ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΛΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΜΕ ΤΗ ΝΕΑ ΕΚΔΟΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 9

Διπλωματική Εργασία

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΑΒΒΟΥΡΗΣ

ΕΜΚ ΔΕ 2022 20

Επιβλέπων: ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΓΑΝΤΕΣ, ΔΡ. ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2022

Copyright © Δημήτριος Καββούρης, 2022
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια Δημήτριου Καββούρη. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του Δημήτριου Καββούρη (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Dimitrios Kavvouris, 2022
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΑΒΒΟΥΡΗΣ (2022)

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΛΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΜΕ ΤΗ ΝΕΑ ΕΚΔΟΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 9

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2022 20

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

DIMITRIOS KAVVOURIS 2022

Diploma Thesis EMK ΔΕ 2022 20

THEORITICAL BACKGROUND AND VERIFICATION EXAMPLES OF ALUMINUM MEMBERS AND CONNECTIONS WITH THE NEW VERSION OF EUROCODE 9

Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον κ. Γαντέ για την βοήθεια και καθοδήγηση,

και τους γονείς μου για την υποστήριξη.

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2022 20

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΛΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ ΜΕ ΤΗ ΝΕΑ ΕΚΔΟΣΗ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 9

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΑΒΒΟΥΡΗΣ

Επιβλέπων: ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ ΓΑΝΤΕΣ, ΔΡ. ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της διπλωματικής είναι η εμβάθυνση στα τεχνολογικά θέματα του αλουμινίου και η διαστασιολόγηση μεμονωμένων δομικών στοιχείων και συνδέσεων για χρήση σε δομικές εφαρμογές.

Θα ασχοληθούμε με την ιστορία του αλουμινίου, τους τρόπους παραγωγής του υλικού καθώς και την ανακύκλωσή του. Θα μάθουμε για τα διαφορετικά κράματα, τους τρόπους παραγωγής διατομών και προϊόντων από αλουμίνιο, αλλά και την περαιτέρω εξωτερική επεξεργασία των προϊόντων αυτών. Έπειτα ακολουθούν οι τρόποι σύνδεσης αλουμινένιων μελών και οι πολλαπλοί τρόποι χρήσης τους. Ύστερα παρουσιάζονται κάποιες διαφορές του αλουμινίου με τον χάλυβα αλλά και των κανονιστικών τους διατάξεων.

Τέλος επεξηγούνται παραδείγματα διαστασιολόγησης μελών και συνδέσεων από αλουμίνιο με τη νέα έκδοση του Ευρωκώδικα 9.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS
ΕΜΚ ΔΕ 2022 20

THEORITICAL BACKGROUND AND VERIFICATION EXAMPLES OF ALUMINUM MEMBERS AND CONNECTIONS WITH THE NEW VERSION OF EUROCODE 9

DIMITRIOS KAVVOURIS

Supervisor: CHARALAMPOS GANTES, DR. CIVIL ENGINEER, PROFESSOR E.M.P.

ABSTRACT

The purpose of this diploma thesis is the deeper understanding of the technology revolving around aluminum and the dimensioning of solitary structural members and connections from aluminum with the purpose of being used in structural applications.

We will learn about the history of aluminum, the extraction of it from nature and the way it is recycled. We will learn about the different alloys, the different ways of producing profiles and products made of aluminum. Furthermore we will dive into the different ways of connecting aluminum members and their different uses. After that we will see the differences between aluminum and steel and their respective Eurocodes.

In the end we will review some numerical applications about aluminum members and connections according to the latest version of Eurocode 9.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....1

1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ.....1

2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ.....19

2.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ.....18

2.2 ΚΡΑΜΑΤΑ.....37

2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.....50

2.4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΙΟΝΤΟΣ.....93

2.5 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ.....110

2.6 ΧΡΗΣΕΙΣ.....151

2.7 ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ VS ΧΑΛΥΒΑΣ.....192

3 ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ.....199

3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ.....199

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....221

4.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....221

5 ΠΕΡΙΛΗΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ.....237

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....239

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΑ

Το 1722, τρεις αιώνες πριν, ο Friedrich Hoffman, καθηγητής του πανεπιστημίου Halle στη Γερμανία ανακοίνωσε ότι η βάση του alum είναι μία μεμονωμένη ουσία. Μετά από 85 χρόνια, το 1807, ο Sir Humphry Davy είπε ότι μπορούμε να την απομονώσουμε, θεωρητικά όμως. Το 1825 όμως ο Δανός Hans Oersted απομόνωσε σωματίδια αλουμινίου επιβεβαιώνοντας την ύπαρξή του. Έχασε όμως το ενδιαφέρον που είχε και συνέχισε τη μελέτη του πάνω στον ηλεκτρομαγνητισμό. Το 1827 Ο Γερμανός Friedrich Wöhler συνέχισε από εκεί όπου σταμάτησε ο Oersted και μετά από 20 χρόνια πειραμάτων (του άρεσε) κατάφερε να δημιουργήσει τα πρώτα χειροπιαστά κομμάτια αλουμίνιου, αρκετά μεγάλα ώστε να γίνουν αισθητές κάποιες από τις ιδιότητες του, όπως το πόσο ελαφρύ και λαμπερό είναι. Τα συγκεκριμένα πειράματα έγιναν με ποτάσιο το οποίο ήταν πολύ ακριβό και για αυτό δεν συνέφερε ακόμα η μαζική παραγωγή αλουμινίου. Παρ' όλα αυτά η ανακάλυψη αυτή ήταν κάτι πρωτοφανές.

Ο Charles Dickens (1812-1870) έγραψε: *"Within the course of the last two years a treasure has been divined, unearthed and brought to light. What do you think of a metal as white as silver, as unalterable as gold, as easily melted as copper, as tough as iron, which is malleable, ductile, and with the singular quality of being lighter that glass? Such a metal does exist and that in considerable quantities on the surface of the globe. The advantages to be derived from a metal endowed with such qualities are easy to be understood. Its future place as a raw material in all sorts of industrial applications is undoubted, and we may expect soon to see it, in some shape or other, in the hands of the civilized world at large"*

Δηλαδή ότι, ανακαλύψαμε ένα μέταλλο άσπρο και λαμπερό σαν το ασήμι, με σύνθεση απαράλαχτη σαν του χρυσού, που λιώνει στην ίδια θερμοκρασία σχεδόν με το χαλκό, έχει συγκρίσιμη αντοχή με αυτή του χάλυβα, πολύ εύκολα διαχειρίσιμο, και με την μοναδική ικανότητα να είναι ελαφρύτερο από γυαλί. Ένα υλικό το οποίο βρίσκεται σε αφθονία στην επιφάνεια της Γης και έχει σίγουρα θέση στο μέλλον της ανθρωπότητας. Το 1850 περίπου, ο Γάλλος Henry Sainte-Claire Deville άνοιξε το δρόμο προς την μαζική παραγωγή του αλουμινίου, καταφέρνοντας να το παράξει με τη χρήση νατρίου το οποίο ήταν αρκετά φθηνότερο σε σχέση με το ποτάσιο. Με την δυνατότητα πλέον παραγωγής σε μεγαλύτερες ποσότητες έγινε εφικτή η χρήση του αλουμινίου στην καθημερινή ζωή όσων είχαν την οικονομική δυνατότητα να αγοράσουν τα παράγωγα προϊόντα του. Έτσι λοιπόν για 30 περίπου χρόνια χρησιμοποιούταν αποκλειστικά από βασιλείς και πλουσίους με τη μορφή παιχνιδιών, αγαλμάτων, κουταλιών και άλλων μαγειρικών σκευών(1 – 2). Το πρώτο αντικείμενο που κατασκευάστηκε από αλουμίνιο ήταν μία κουδουνίστρα(1 – 1), η οποία δόθηκε ως δώρο στον γιό του Ναπολέοντα του 3ου.

Σχήμα 1 – 1: Η κουδουνίστρα του γιού του Ναπολέοντα του 3ου

Σχήμα 1 – 2: Κουτάλια της εποχής, τα οποία χρησιμοποιούνταν από πλούσιες οικογένειες

Σχήμα 1 – 3: Το άγαλμα του Έρου στο Piccadilly, Λονδίνο (1893)

Μερικά χρόνια μετά είχαμε και την χρήση σε κτίρια μεγάλης σημασίας.

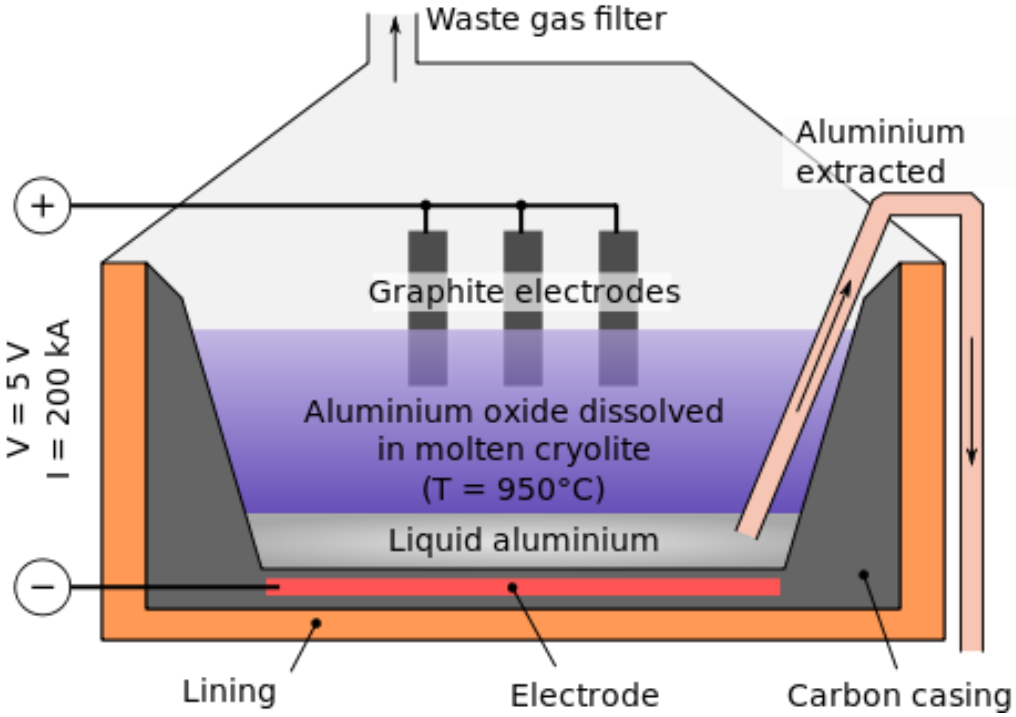
Σχήμα 1 – 4: Ο τρούλος της εκκλησίας του San Gioacchino's στη Ρώμη (1911)

Νωρίτερα, το 1886 ο Αμερικανός Charles M. Hall και ο Γάλλος Paul Héroult, στα 22 τους χρόνια, και με 2 μήνες διαφορά στη καταχώρηση της πατέντας, εφηύραν την διαδικασία ηλεκτρόλυσης για την τήξη του αλουμινίου. Κάτι που είχε δοκιμαστεί χωρίς επιτυχία από τους Humphry Davy και Robert Bunsen στα 1800s και 1850s.

Alumina + λιωμένος κρυόλιθος + πολύς ηλεκτρισμός = αλουμίνιο

Σχήμα 1 – 5: Alumina

Σχήμα 1 – 6: Cryolite - κρυόλιθος

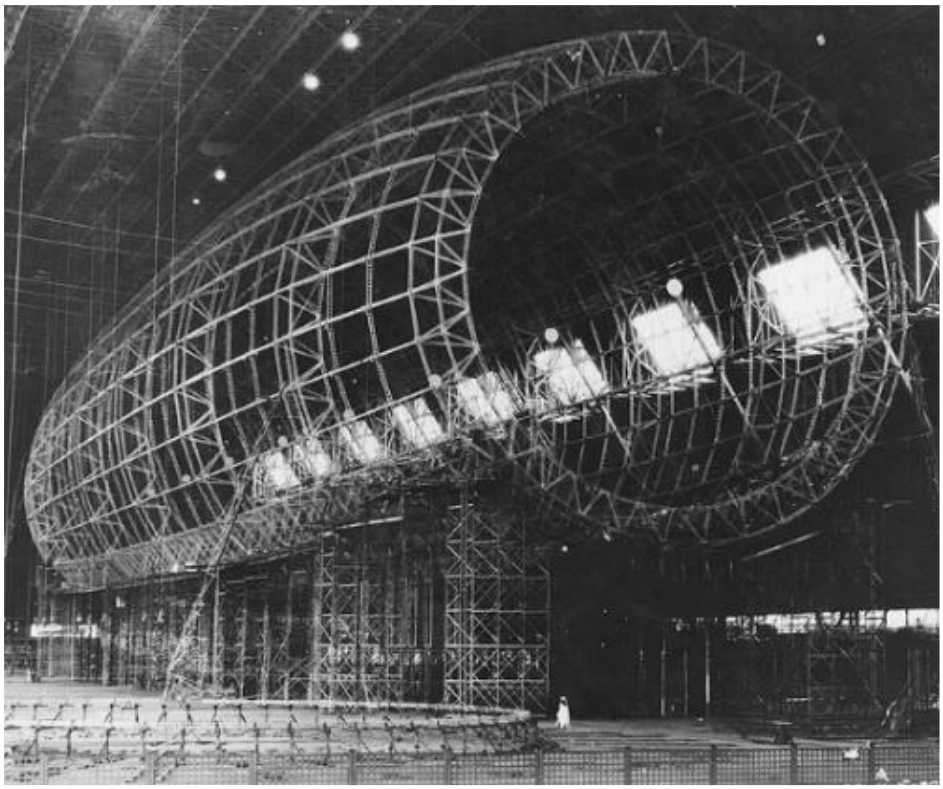


Σχήμα 1 – 7: Διαδικασία τήξης του αλουμινίου

Για την παραγωγή της alumina, της άσπρης αυτής σκόνης χρειάζονταν μεμονωμένα και πολύπλοκα πειράματα με νάτριο. Το 1888 όμως ο Γερμανός Karl Bayer με την αυτοματοποίηση της διαδικασίας απόκτησης της alumina μέσω εξόρυξης και επεξεργασίας του βωξίτη έκανε την παραγωγή του αλουμινίου 10x φθηνότερη. Το 1897 είχαμε αναφορές για βάρκες και μικρά σπιτάκια (Mr Howes) τα οποία χρησιμοποιούνταν από χρυσωρύχους στο Klondyke της Μεγάλης Βρετανίας. Στα 1900s είχαμε την παραγωγή οχημάτων μεταφοράς και πανέλων επικάλυψης με την κατανάλωση να φτάνει τους 8.000 τόνους. Το 1903 αρχίζει η δημιουργία διαφορετικών κραμάτων και του age hardening από τον Alfred Wilm, για τα οποία θα μιλήσουμε σε επόμενες ενότητες. Την ίδια εποχή έγινε χρήση περιβλήματος αλουμινίου για την επιτυχή προστασία της μηχανής του 1ου αεροπλάνου των αδελφών Wright, και λίγο αργότερα το 1905 για τα 'πόδια' υδροπλάνου από τον Wilhelm Kreiss, χωρίς επιτυχία όμως.

Το 1909 είχαμε την δημιουργία του «duralumin», ενός κράματος με αντοχή κοντά σε αυτή του μαλακού χάλυβα, κοντά στα 200 MPa, το οποίο ανήκει στη 2xxx σειρά κραμάτων όπως θα δούμε αργότερα. Μετά από μερικά χρόνια, το 1920 αρχίζει η κατανόηση και περαιτέρω εξέλιξη του age hardening, δηλαδή της ωρίμανσης – σκλήρυνσης του αλουμίνιου σε θερμοκρασία δωματίου ή σε φούρνο για πιο γρήγορα αμέσως μετά την παραγωγή των προϊόντων του. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία του «μαλακού αλουμινίου», το οποίο ανήκει στη σειρά κραμάτων 6xxx (300 MPa) για χρήση κυρίως σε κουφώματα όπως θα δούμε. Μέχρι και το 1939 έχουμε την δημιουργία της 5xxx σειράς «birmabright», η οποία χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία σε βάρκες, του «superdural», κράμα της 2xxx σειράς (450 MPa). Επίσης έχουμε την δημιουργία της 7xxx σειράς (500 MPa), καθώς και όλων σχεδόν των κραμάτων που υπάρχουν μέχρι σήμερα με εξαίρεση το συγκολλήσιμο κράμα της 7xxx σειράς. Στο διάστημα 1900 – 1937 αρχίζει και τελειώνει η εποχή των αερόπλοιων όπως το Zeppelin του Ferdinand von Zeppelin, πατέρα των αλουμινένιων κατασκευών, το οποίο είχε μήκος 130m και διάμετρο 11,5m και σκελετό από αλουμίνιο της σειράς 1xxx, καθαρό αλουμίνιο δηλαδή (pure aluminum) και του αρκετά μεγαλύτερου R101, με μήκος 230m με σκελετό κατασκευασμένο από «duralumin».

Σχήμα 1 – 8: Αερόπλοιο Zeppelin

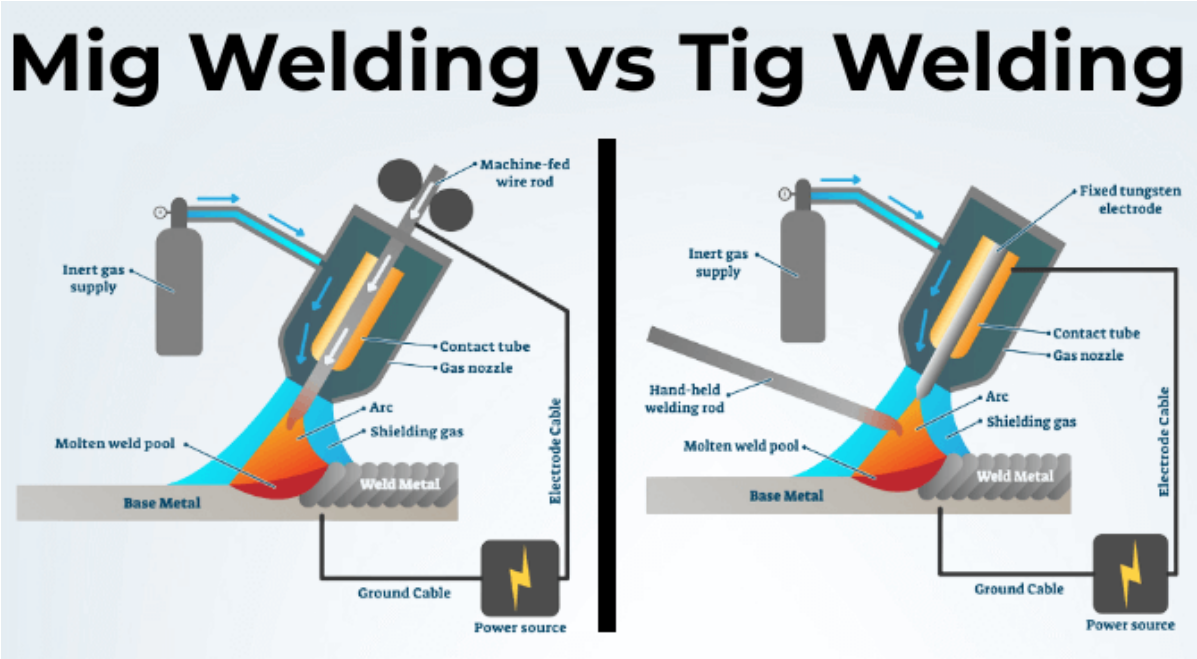


Σχήμα 1 – 9: Αλουμινένιος σκελετός αερόπλοιου

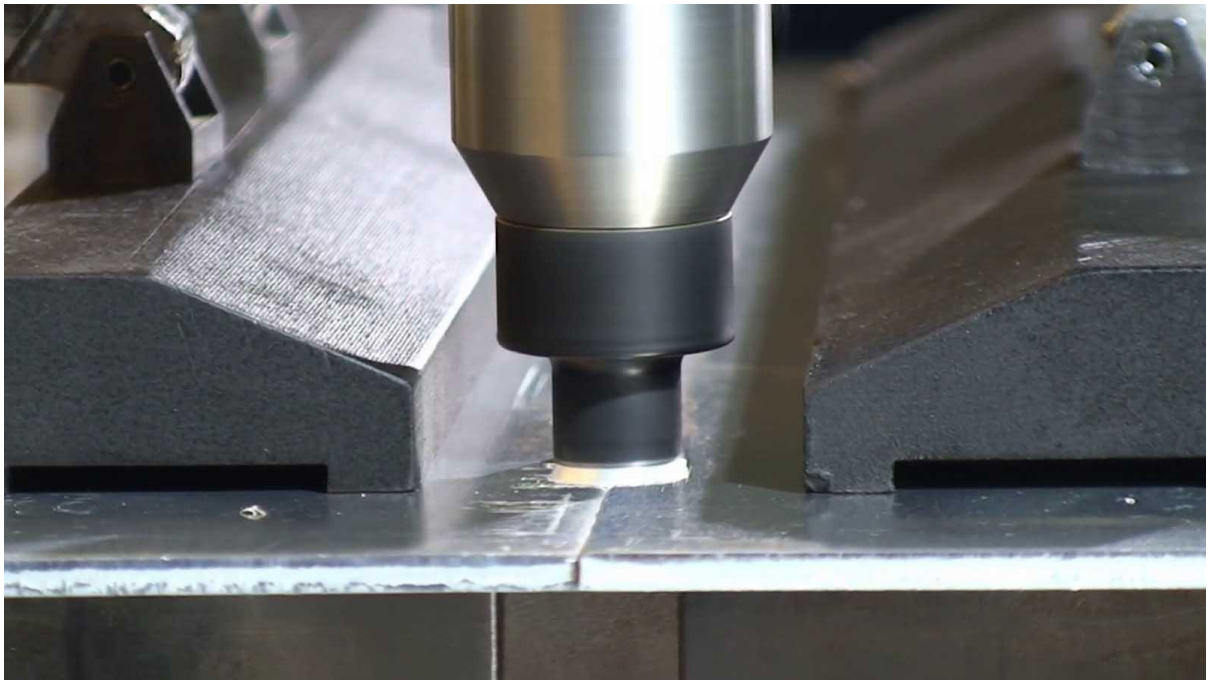
Στο ίδιο περίπου χρονικό διάστημα 1920s – 1939 αρχίζει η χρήση αλουμινίου σε πολεμικά αεροσκάφη και η περαιτέρω βελτιστοποίηση του σχεδιασμού τους με φύλλα αλουμινίου και σύνδεση με ήλους. Στην Μεγάλη Βρετανία μόνο, την περίοδο 1936 – 1947 κατασκευάστηκαν 22.000 πολεμικά αεροσκάφη τύπου Spitfire λόγω φυσικά του πολέμου, αλλά και λόγω της ραγδαίας εξέλιξης της τεχνολογίας που είχε να κάνει με το αλουμίνιο. Το 1943 παρατηρήθηκε κατανάλωση 2.000.000 τόνων αλουμινίου, 14x περισσότερο από ότι 10 χρόνια πριν, το 1933.

Σχήμα 1 – 10: Πολεμικό αεροσκάφος τύπου Spitfire

Παρ' όλα αυτά, μετά τον πόλεμο έπεσε πολύ η ζήτηση του αλουμινίου. Επειδή όμως μπορούσε να αντικαταστήσει άλλα υλικά η αγορά ανέκαμψε, φθάνοντας σήμερα τους 20.000.000 τόνους, εκ των οποίων οι 5.000.000 χρησιμοποιούνται για συσκευασία-packaging. Εκείνη την περίοδο επίσης, το 1945 είχαμε την δημιουργία του συγκολλήσιμου κράματος της σειράς 7xxx και μία γενικότερη εξέλιξη στις συγκολλήσεις. Οι οποίες ονομάζονται TIG, MIG και TWI, δηλαδή χωρίς και με κατανάλωση καλωδίου (filler metal) και συγκολλήσεις τριβής αντίστοιχα, για αυτά λεπτομέρειες αργότερα.

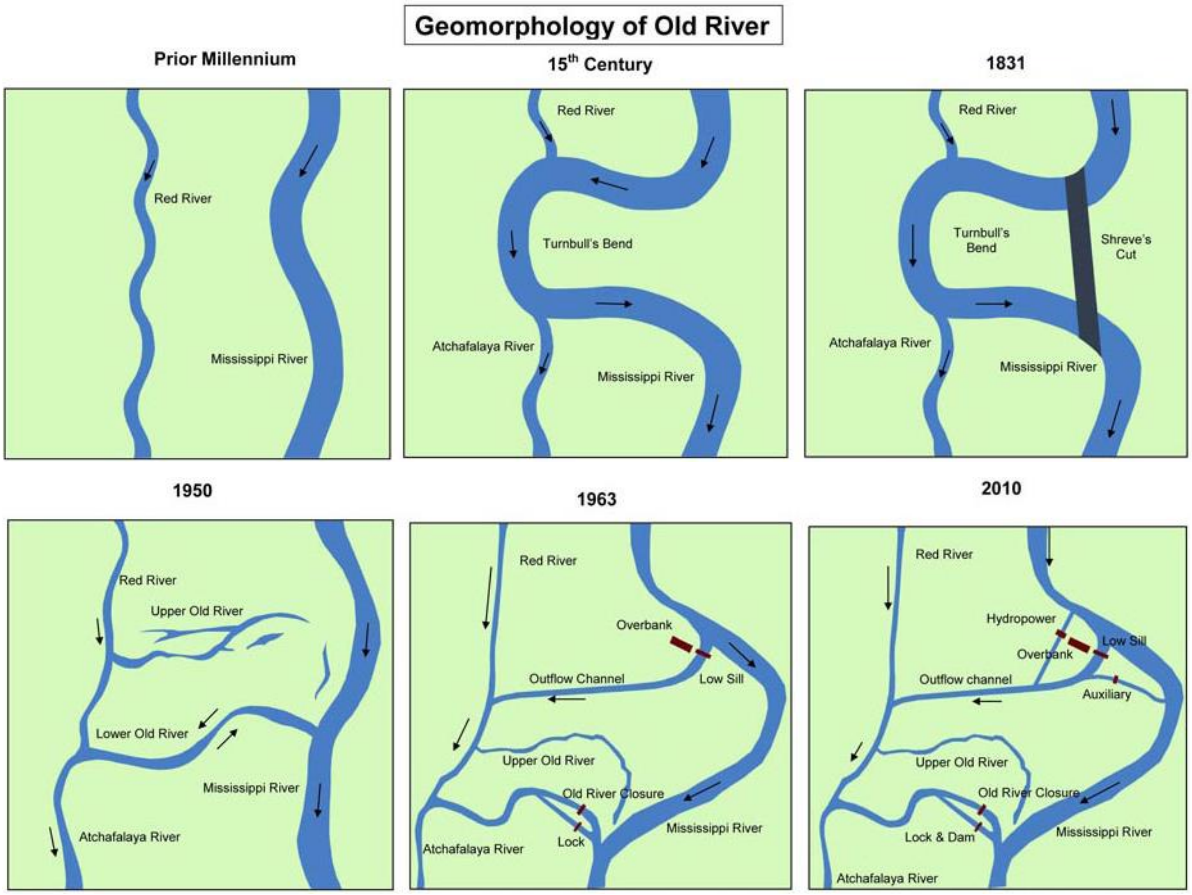


Σχήμα 1 – 11: Μέθοδος συγκόλλησης τύπου MIG και TIG

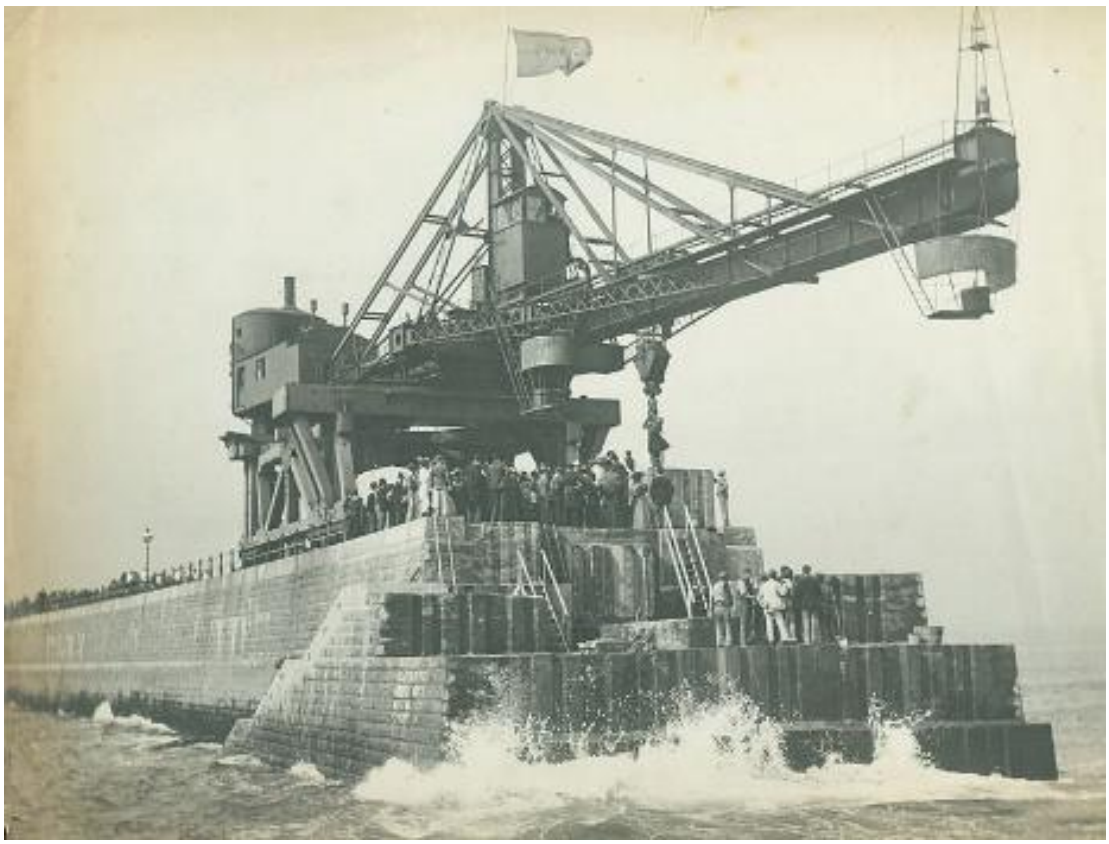


Σχήμα 1 – 12: Μέθοδος συγκόλλησης τύπου TWI – τριβής

Μερικά χρόνια πριν, το 1931 κατασκευάστηκαν από αλουμίνιο 30 γερανοί οι οποίοι συνέβαλαν στα έργα που γίνονταν εκείνη την εποχή στο ποταμό Μισισιπή και αφορούσαν τον έλεγχο του ποταμού «Old River Control Structure» με σκοπό την μη παρέκκλιση της πορείας του.



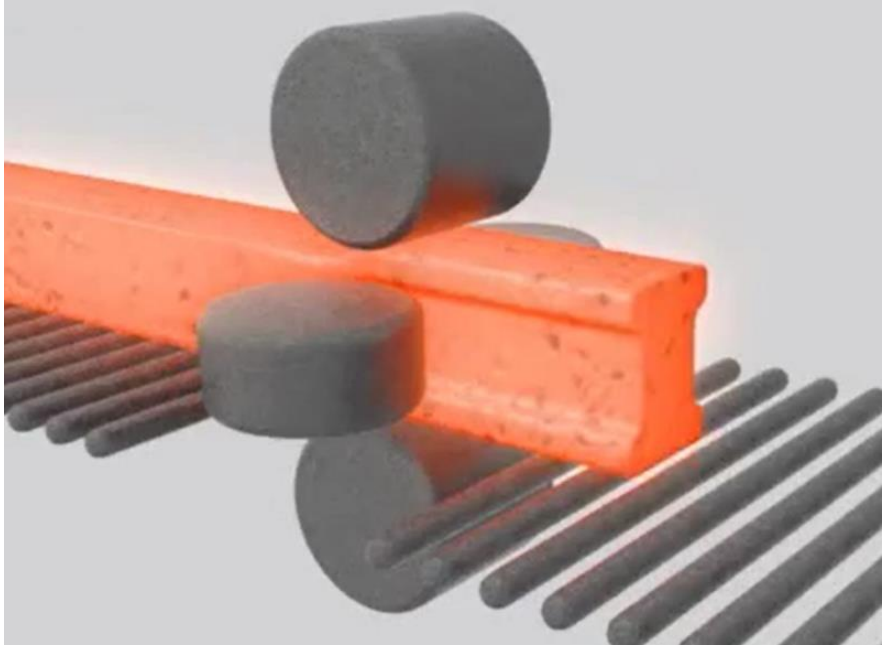
Σχήμα 1 – 13: Αλλαγές στην πορεία του ποταμού Μισισιπή με την πάροδο των χρόνων



Σχήμα 1 – 14: Γερανός της εποχής (1931)

Το 1934 κατασκευάστηκε το κατάστρωμα της γέφυρας Smithfield στο Pittsburgh της Pennsylvania με διατομές μέσω της διαδικασίας hot-rolling, η οποία ήταν ίδια με αυτή για το χάλυβα, και κράματος της σειράς 2xxx, καθώς τότε δεν υπήρχε extrusion για μεγάλες διατομές ακόμα. Το κατάστρωμα αντικαταστάθηκε μετά από 40 χρόνια λόγω διάβρωσης με διατομές μέσω της διαδικασίας extrusion και από κράμα της σειράς 6xxx, η οποία όπως θα δούμε έχει μεγάλη αντοχή στην διάβρωση. Το 1938, σε μία σιδηροδρομική γέφυρα αυτή τη φορά, πάνω από τον ποταμό Grasse στα βόρεια της Νέας Υόρκης, δηλαδή γέφυρα ακόμα μεγαλύτερης σημασίας, έχουμε ένα εκ των ανοιγμάτων μήκους 26m να είναι κατασκευασμένο από κράμα της σειράς 2xxx.

Σχήμα 1 – 15: Γέφυρα Smithfield στο Pittsburgh της Pennsylvania

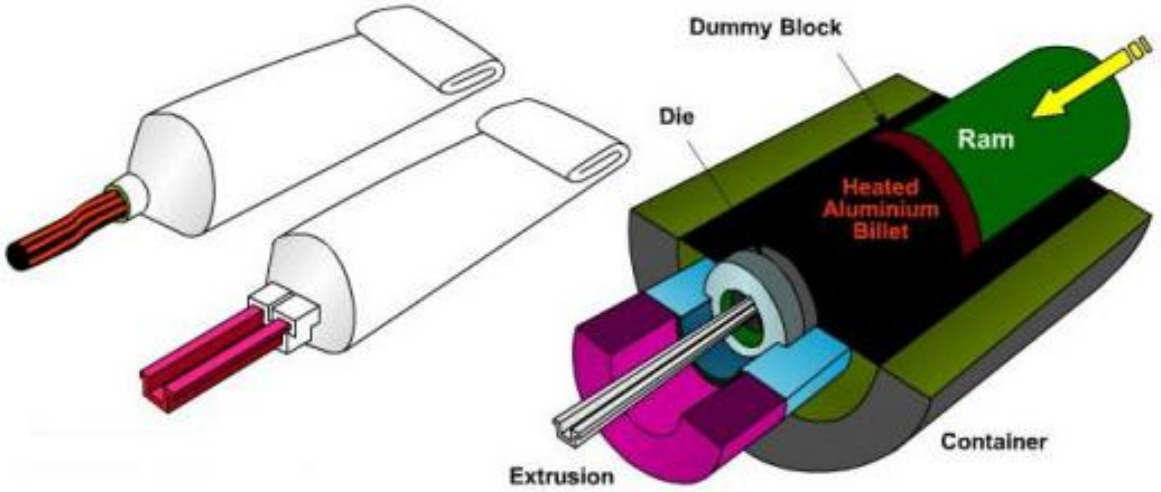


Σχήμα 1 – 16: Διαδικασία hot-rolling

Σχήμα 1 – 17: Εγκατάσταση αλουμινένιου καταστρώματος πάνω σε αλουμινένιες δοκούς, γέφυρα Smithfield

Σχήμα 1 – 18: Σιδηροδρομική γέφυρα πάνω από τον ποταμό Grasse στα βόρεια της Νέας Υόρκης

Την περίοδο 1939 – 1945 εμφανίζεται η μέθοδος extrusion και μία περαιτέρω εξέλιξη της μεθόδου, με αποτέλεσμα μεγάλες πρέσες και διατομές πλάτους 0.8m. Παρατηρείται επίσης και ο εκμηδενισμός σχεδόν της διαφοράς του κόστους μεταξύ κοίλων και ανοιχτών διατομών με ελάχιστη παραγγελία της τάξης των 200-300kg.



Σχήμα 1 – 19: Διαδικασία extrusion

Η εξέλιξη της τεχνολογίας μας βοήθησε με την πάροδο των χρόνων να πάμε από κουτάλια σε αεροπλάνα. Έτσι λοιπόν στα 1890s είχαμε είδη κουζίνας, στα 1900s καλώδια, στα 1910s στρατιωτικές γέφυρες, στα 1930s αεροπλάνα και μετά τον πόλεμο επικαλύψεις κτιρίων όπως το Empire State Building, στο οποίο μάλιστα έγινε για πρώτη φορά η χρήση ανοιδώμενου αλουμινίου (anodized aluminum), μια μορφή επικάλυψης με ηλεκτρολύτες στην οποία θα αναφερθούμε παρακάτω. Το 1958 μάλιστα είχαμε και την κατασκευή του Atomium στις Βρυξέλες, ενός ιδιαίτερης δυσκολίας, από άποψη στατικότητας, κτιρίου.

Σχήμα 1 – 20: Στρατιωτική γέφυρα για οχήματα

Σχήμα 1 – 21: Στρατιωτική γέφυρα για προσωπικό

Σχήμα 1 – 22: Empire State Building

Σχήμα 1 – 23: Curtain wall of Empire State Building

Σχήμα 1 – 24: Atomium στις Βρυξέλες κατά την διάρκεια της ημέρας

Σχήμα 1 – 25: Atomium στις Βρυξέλες κατά την διάρκεια της νύχτας

Λίγο αργότερα, στα 1960s, συσκευάζουμε πλέον διαφορετικά είδη προϊόντων, με αλουμινόχαρτο, κουτάκια αναψυκτικών και τα μετακινούμε μέσα σε κιβώτια μεταφοράς.

Σχήμα 1 – 26: Συσκευασίες διαφορετικών προϊόντων

Σχήμα 1 – 27: Κιβώτια μεταφοράς

Από τα 1990s και μετά, το αλουμίνιο έγινε αναπόσπαστο κομμάτι του τομέα μεταφορών. Με την εισαγωγή του στα αυτοκίνητα, στα αεροπλάνα, στα πλοία, στα τρένα, μας έδωσε την δυνατότητα να φτάσουμε υψηλές ταχύτητες σε θάλασσα, έδαφος, και αέρα.

Σχήμα 1 – 28: Σκελετός αυτοκινήτου

Σχήμα 1 – 29: Αεροσκάφος τύπου SR – 71, από τα γρηγορότερα στην ιστορία

Σχήμα 1 – 30: Πλοίο τύπου catamaran υψηλής ταχύτητας

Σχήμα 1 – 31: Τρένο υψηλής ταχύτητας τύπου Shinkansen

Σχήμα 1 – 32: Σκελετός τρένου υψηλής ταχύτητας τύπου Shinkansen

2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ

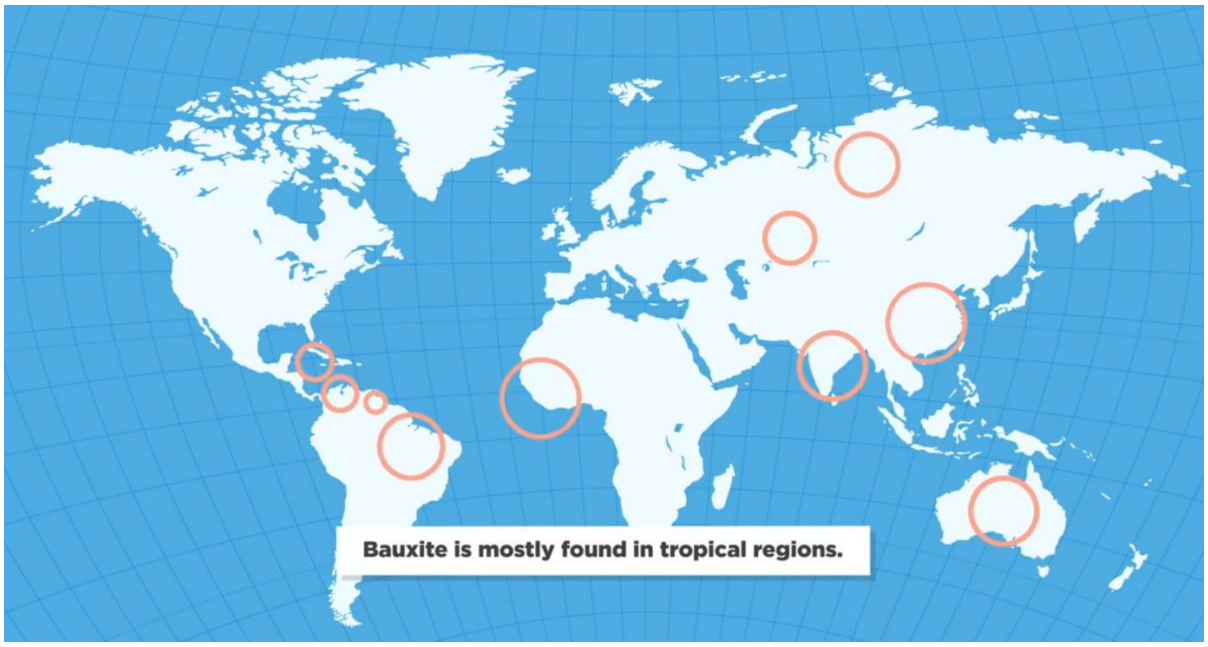
2.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ

Το αλουμίνιο που χρησιμοποιούμε προέρχεται από μετάλλευμα βωξίτη και από ανακύκλωση αλουμινίου. Είναι το 3ο πιο σύνηθες στοιχείο στο φλοιό της Γης μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο, και αποτελεί το 8% της μάζας του φλοιού. Ο βωξίτης βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της Γης, που σημαίνει ότι τα ορυχεία είναι ανοιχτού τύπου, κάτι σαν μεγάλες λακκούβες δηλαδή. Πέρα του ότι δεν χρειάζεται να σκάψουμε πολύ βαθιά για να βρούμε βωξίτη, αλλοιώνοντας έτσι σε μεγάλο βαθμό το περιβάλλον, υπάρχουν για όλα σχεδόν τα ορυχεία σχέδια αναπροσαρμογής. Τα σχέδια αυτά περιλαμβάνουν δενδροφύτευση μετά το κλείσιμο κάποιου ορυχείου και συγκεκριμένο αριθμό ορυχείων που επιτρέπεται να βρίσκεται σε λειτουργία. Δηλαδή για να ανοίξει και να τεθεί σε λειτουργία ένα ορυχείο πρέπει να κλείσει κάποιο άλλο. Η δενδροφύτευση είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι η πληθώρα των ορυχείων βρίσκεται στην τροπική και εύκρατη ζώνη σε περιοχές με πολύ πράσινο. Μεγάλες εκτάσεις δάσους αποψιλώνονται και έχει μεγάλη σημασία η αποκατάστασή τους.

Σχήμα 2 – 1: Μετάλλευμα βωξίτη

Σχήμα 2 – 2: Εκσκαφή βωξίτη

Σχήμα 2 – 3: Ορυχείο βωξίτη, ανοιχτού τύπου



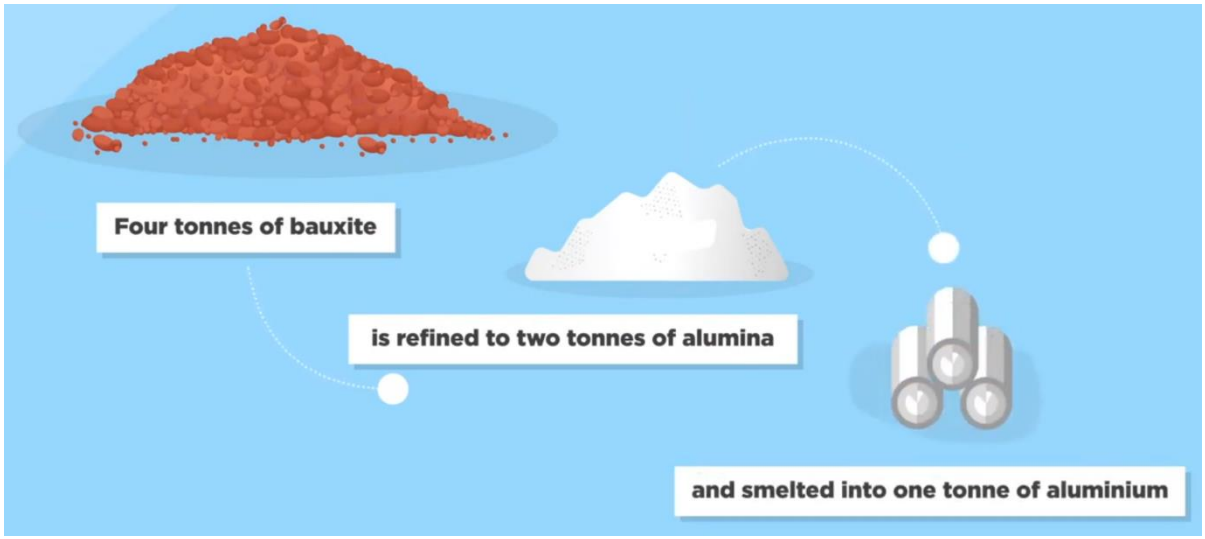
Σχήμα 2 – 4: Τοποθεσίες μεγάλων ορυχείων βωξίτη ανά τον κόσμο

Η αναλογία βωξίτη αλουμινίου είναι 4 προς 1, δηλαδή για κάθε 4 κιλά βωξίτη παράγεται 1 κιλό αλουμινίου. Στην διαδικασία αυτή όμως εισέρχονται και άλλοι παράγοντες. Π.χ. έστω ότι έχουμε 2 κιλά βωξίτη.

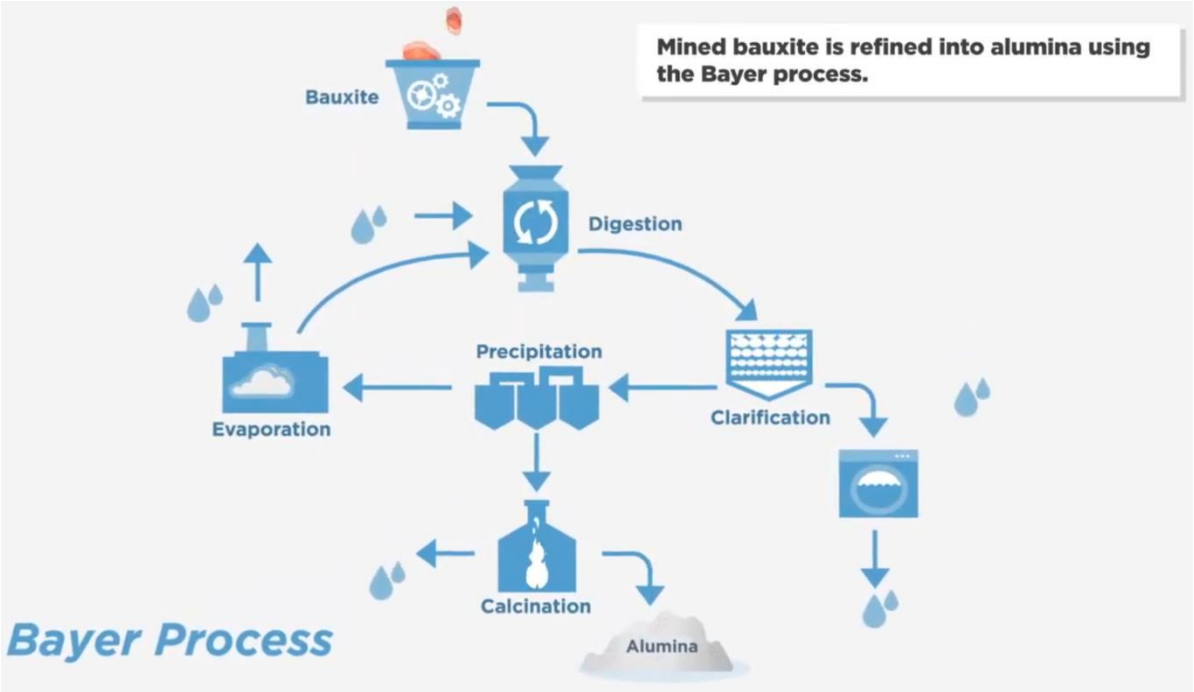
2kg βωξίτης + 2kg κάρβουνο + 0,5kg καυστική σόδα (NaOH) = 1kg alumina (άσπρη σκόνη)

1kg alumina + 0.25kg άνθρακας (ηλεκτρόδια γραφίτη) + 7.5kWh = 0.5kg καθαρό αλουμίνιο (1xxx)

Η διαδικασία Bayer μας επέτρεψε να ρίξουμε αρκετά το κόστος του αλουμινίου και συγκεκριμένα της alumina, αυτό όμως που κρατά την τιμή ψηλά είναι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας και των ηλεκτροδίων γραφίτη τα οποία χρειάζονται συχνές αλλαγές, κατά την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης.

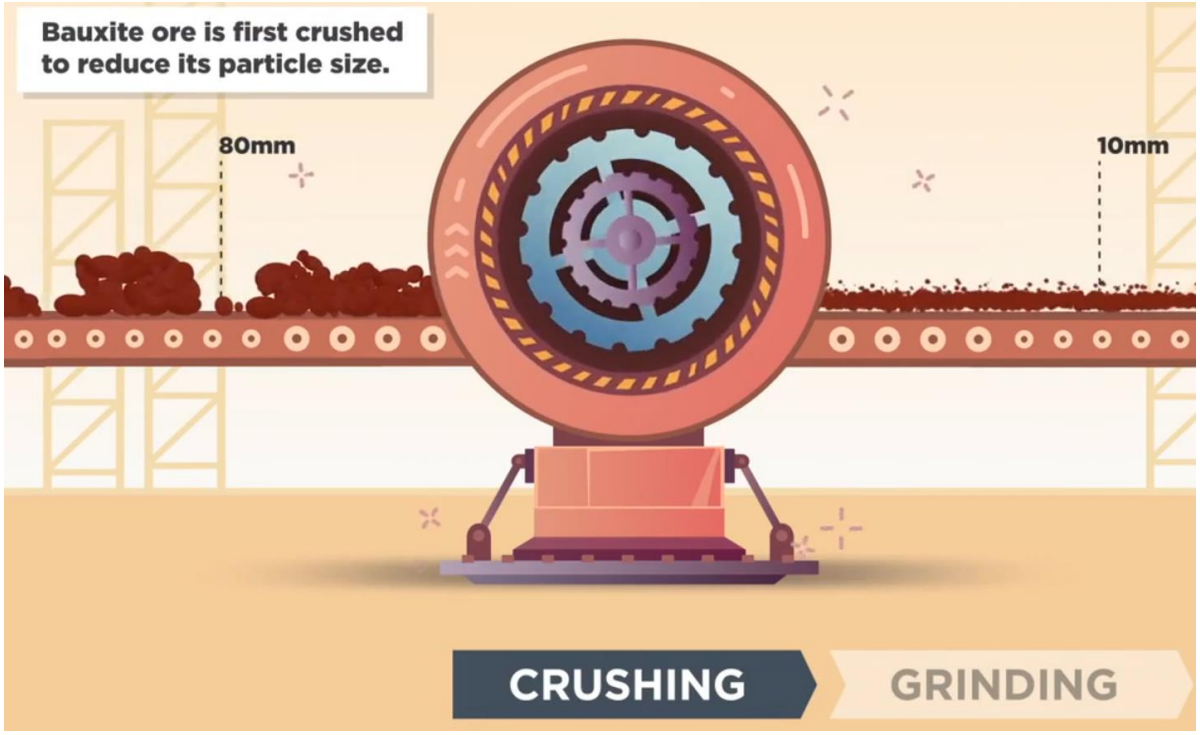


Σχήμα 2 – 5: Αναλογία βωξίτη – alumina – αλουμινίου, 4/2/1



Σχήμα 2 – 6: Διαδικασία Bayer (1888)

Πιο αναλυτικά τα στάδια της διαδικασίας. Αρχικά συνθλίβουμε τα πετρώματα βωξίτη σε μικρά κομμάτια διαμέτρου 10mm και κάτω.

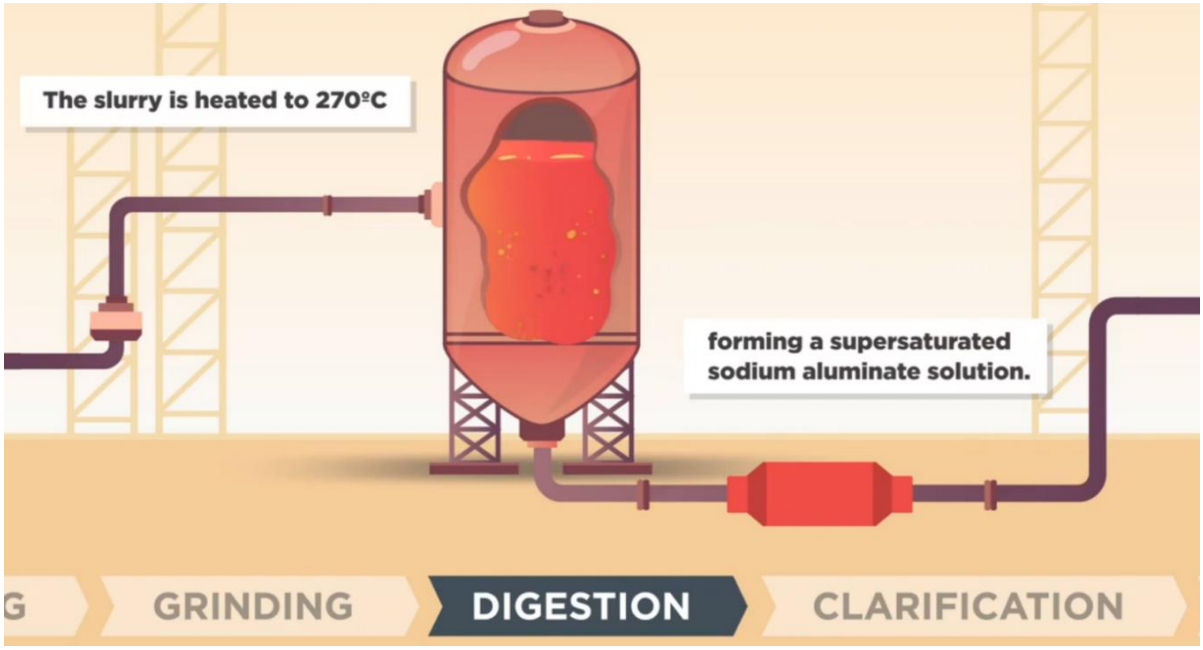


Σχήμα 2 – 7: Στάδιο 1 της διαδικασίας Bayer, σύνθλιψη του βωξίτη

Μετά, τα μικρά σε διάμετρο πλέον πετρώματα αναμειγνύονται με ζεστή καυστική σόδα και αλέθονται, δημιουργώντας λάσπη παρόμοιας μορφής με αυτή του τσιμεντοκονιάματος. Το νάτριο της καυστικής σόδας αντικατέστησε το ακριβό ποτάσιο που χρησιμοποιούταν στα πρώτα πειράματα απομόνωσης του αλουμινίου (1827), μειώνοντας το κόστος.

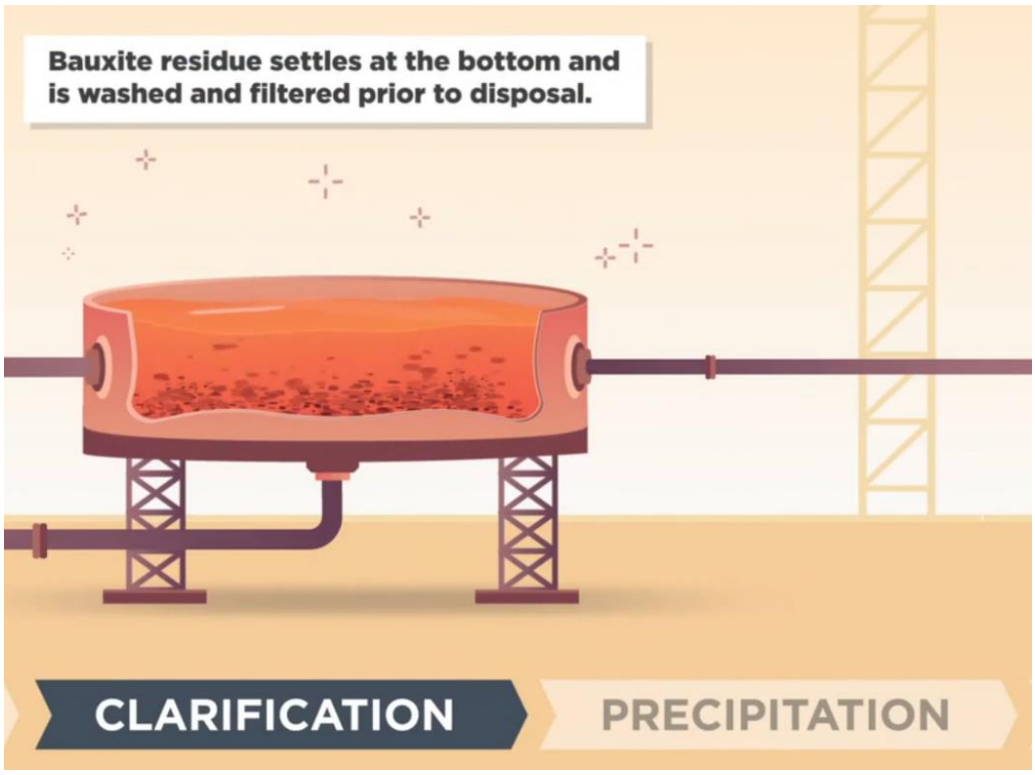
Σχήμα 2 – 8: Στάδιο 2 της διαδικασίας Bayer, ανάμειξη και άλεση με καυστική σόδα (NaOH)

Ύστερα το μείγμα αυτό θερμαίνεται στους 270° C προκειμένου να διαλυθούν τα ορυκτά εκτός του αλουμινίου που βρίσκονται στα πετρώματα του βωξίτη δημιουργώντας ένα υπερκορεσμένο διάλυμα σόδας – αλουμινίου.



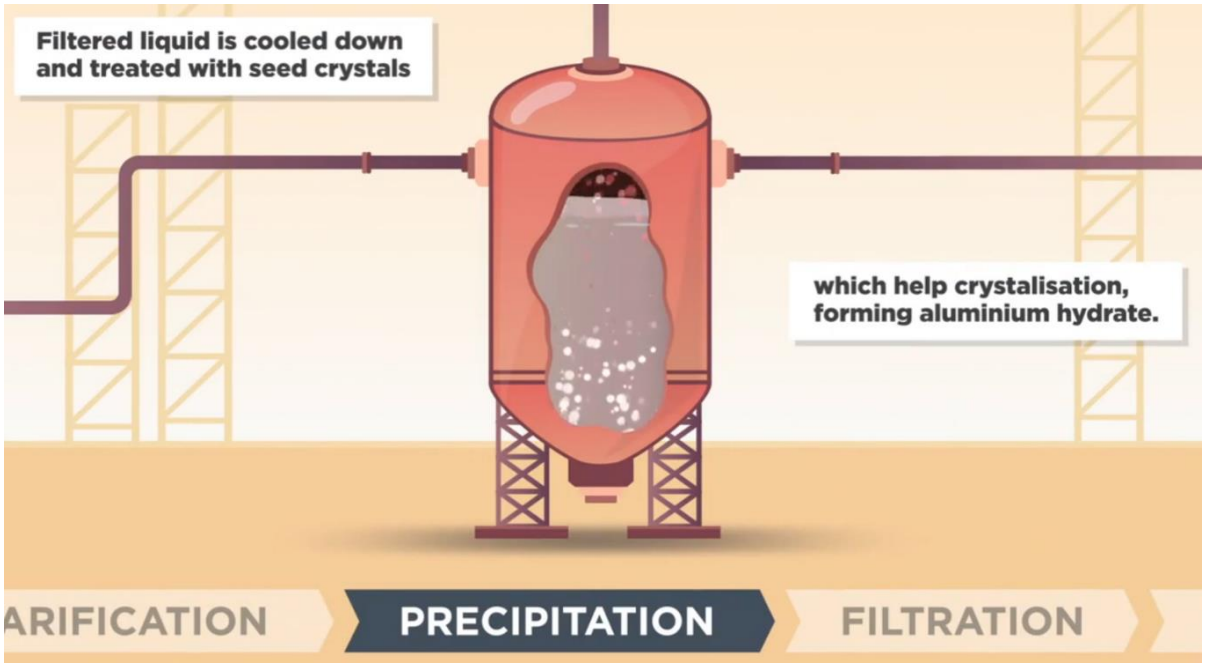
Σχήμα 2 – 9: Στάδιο 3 της διαδικασίας Bayer, 'χώνευση' του μείγματος, καύση των ανεπιθύμητων ορυκτών

Το υπερκορεσμένο διάλυμα αφήνεται σε δεξαμενή καθίζησης όπου τα υπολείμματα βωξίτη κατακάθονται στον πάτο και ύστερα απομακρύνονται.



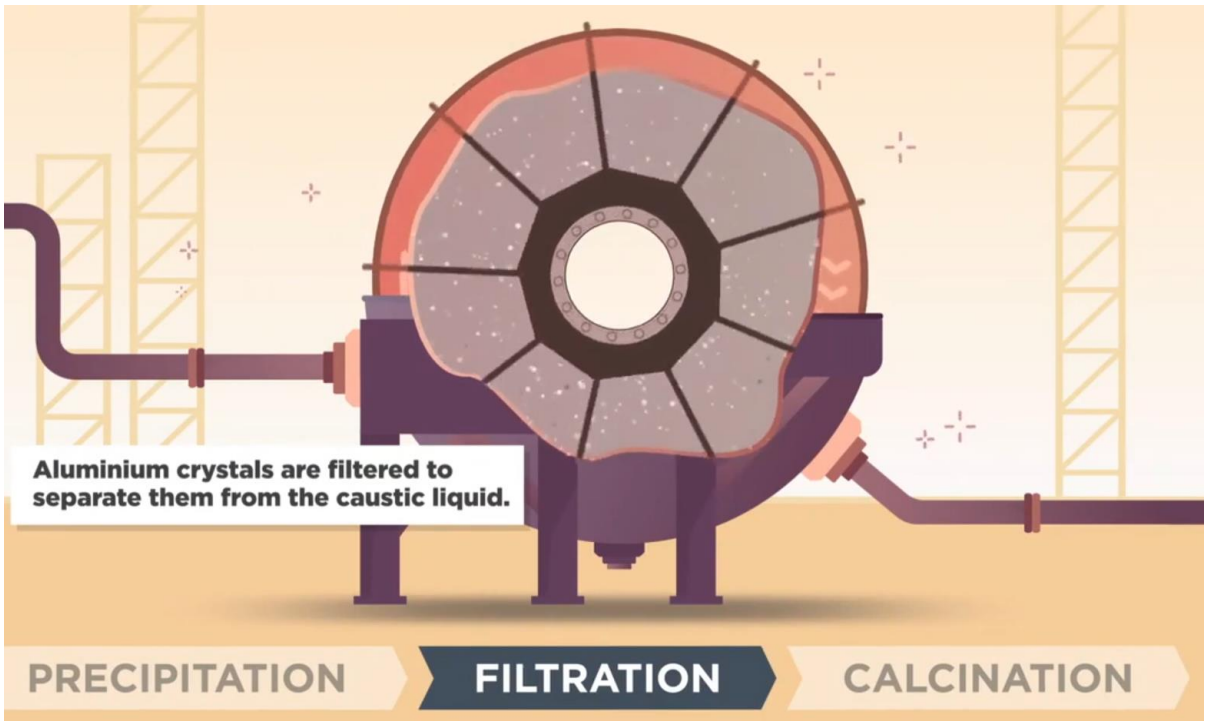
Σχήμα 2 – 10: Στάδιο 4 της διαδικασίας Bayer, καθίζηση των υπολειμμάτων βωξίτη

Το καθαρό πλέον υγρό μείγμα αναμειγνύεται με πυρήνες κρυστάλλων και ψύχεται με σκοπό την δημιουργία αλουμινίου σε κρυσταλλική μορφή.



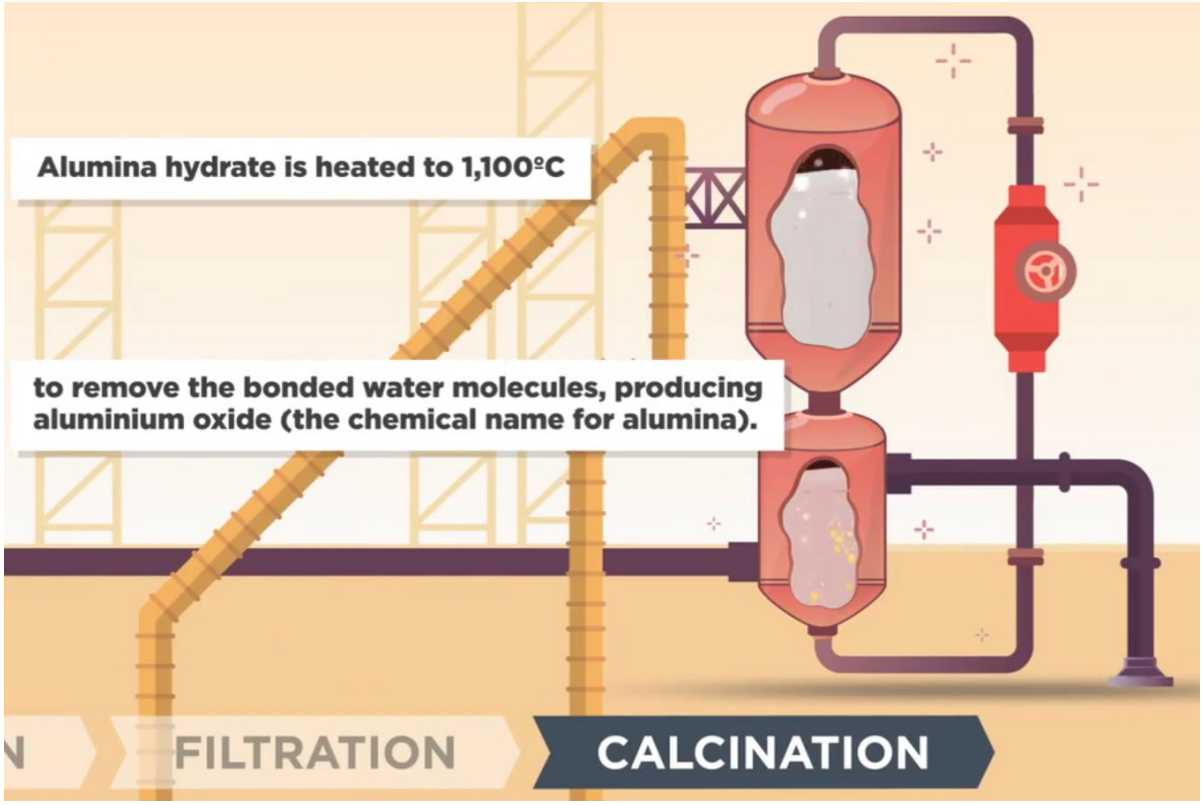
Σχήμα 2 – 11: Στάδιο 5 της διαδικασίας Bayer, κρυσταλλοποίηση των σωματιδίων αλουμινίου

Ακολουθεί το φιλτράρισμα των κρυστάλλων τους οποίους χρειαζόμαστε.



Σχήμα 2 – 12: Στάδιο 6 της διαδικασίας Bayer, φιλτράρισμα των κρυστάλλων

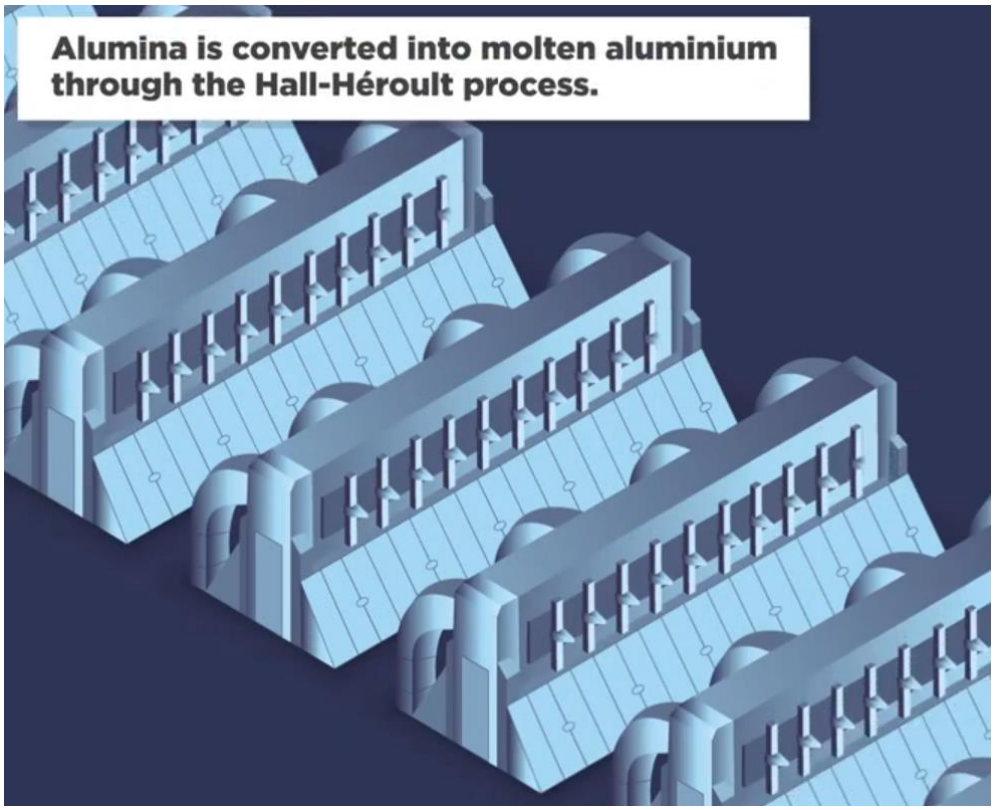
Αφού γίνει το φιλτράρισμα θερμαίνουμε τους κρυστάλλους στους 1100° C προκειμένου να απομακρυνθούν τα σωματίδια νερού με αποτέλεσμα το τελικό προϊόν, οξείδια αλουμινίου ή αλλιώς alumina.



Σχήμα 2 – 13: Στάδιο 7 της διαδικασίας Bayer, θέρμανση των κρυστάλλων με αποτέλεσμα οξείδια αλουμινίου (Al_2O_3), alumina

Σχήμα 2 – 14: Στάδιο 8 της διαδικασίας Bayer, παραγωγή alumina

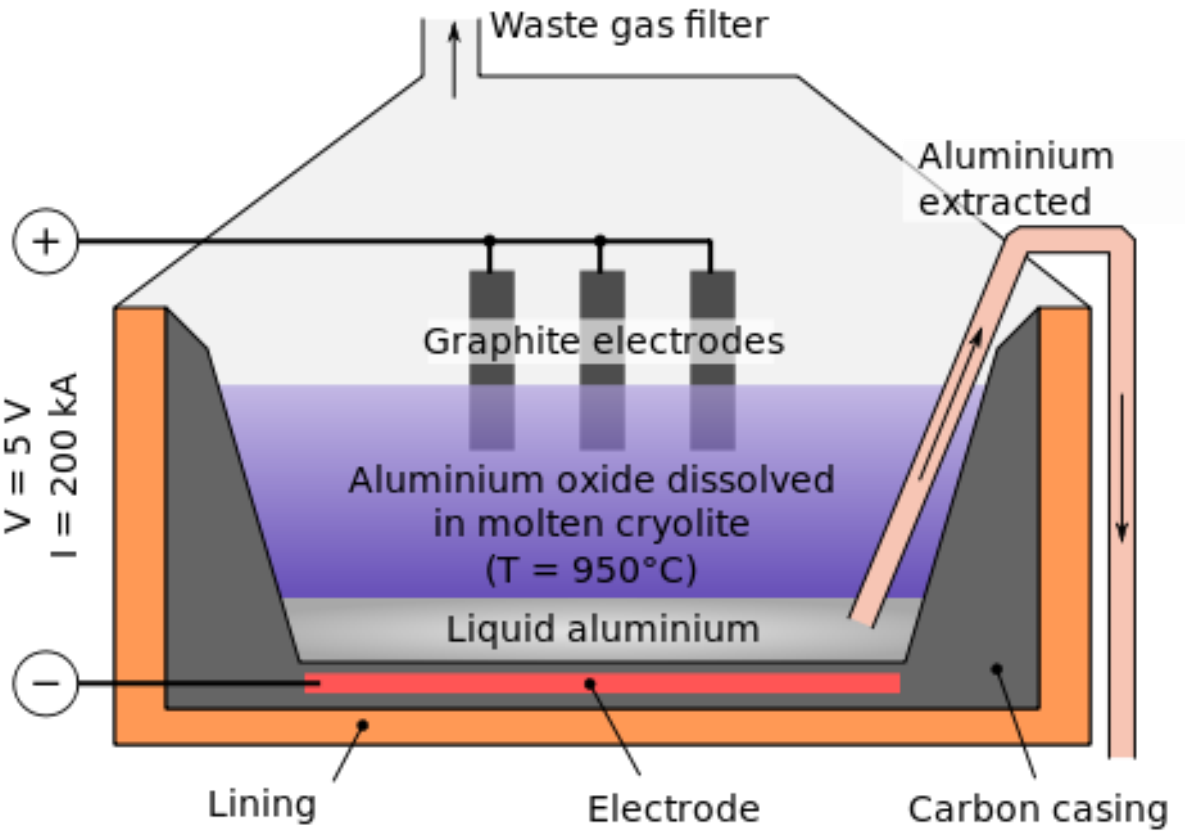
Έχοντας πλέον την alumina και έχοντας ολοκληρώσει την διαδικασία Bayer, προχωρούμε στη διαδικασία ηλεκτρόλυσης Hall - Heroult.



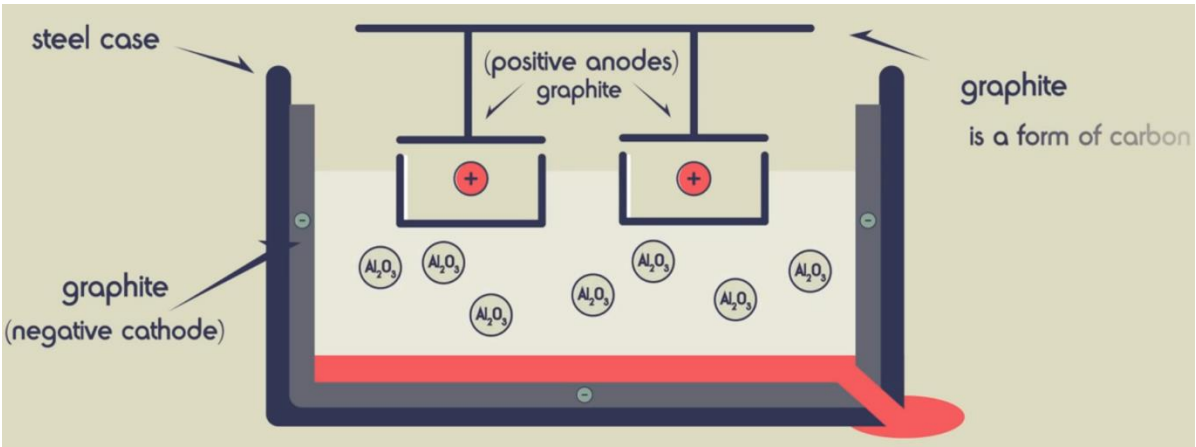
Σχήμα 2 – 15: Μηχανήματα της διαδικασίας Hall - Heroult

Σχήμα 2 – 16: Τήκτες αλουμινίου, aluminum smelters

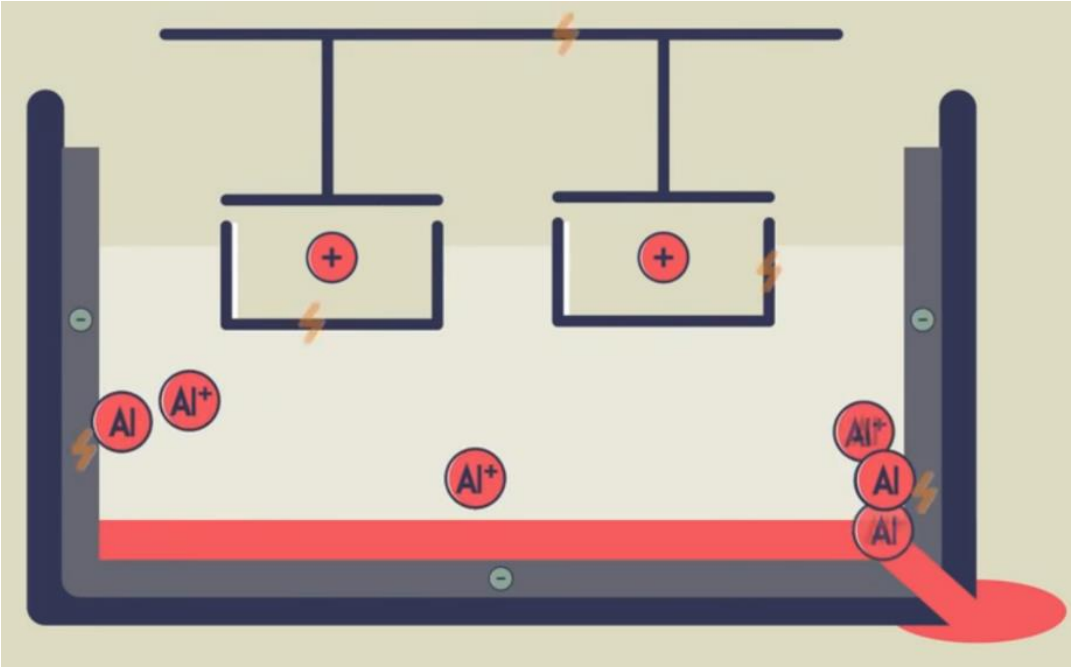
Οι τήκτες αλουμινίου είναι τα μηχανήματα στα οποία διαχωρίζεται το οξυγόνο από τα οξείδια αλουμινίου (Al_2O_3) με τελικό προϊόν καθαρό αλουμίνιο. Είναι θάλαμοι μέσα στους οποίους τοποθετούμε ένα μείγμα alumina και λιωμένου κρυόλιθου. Τα τοιχώματα είναι το ανιόν. Το κατιόν είναι πλάκες φτιαγμένες από γραφίτη, ηλεκτρόδια γραφίτη συγκεκριμένα, τα οποία κρέμονται από επάνω και βρίσκονται μέσα στο υγρό μείγμα. Έπειτα το όλο σύστημα φορτίζεται με ηλεκτρικό ρεύμα.



Σχήμα 2 – 17: Τήξη αλουμινίου

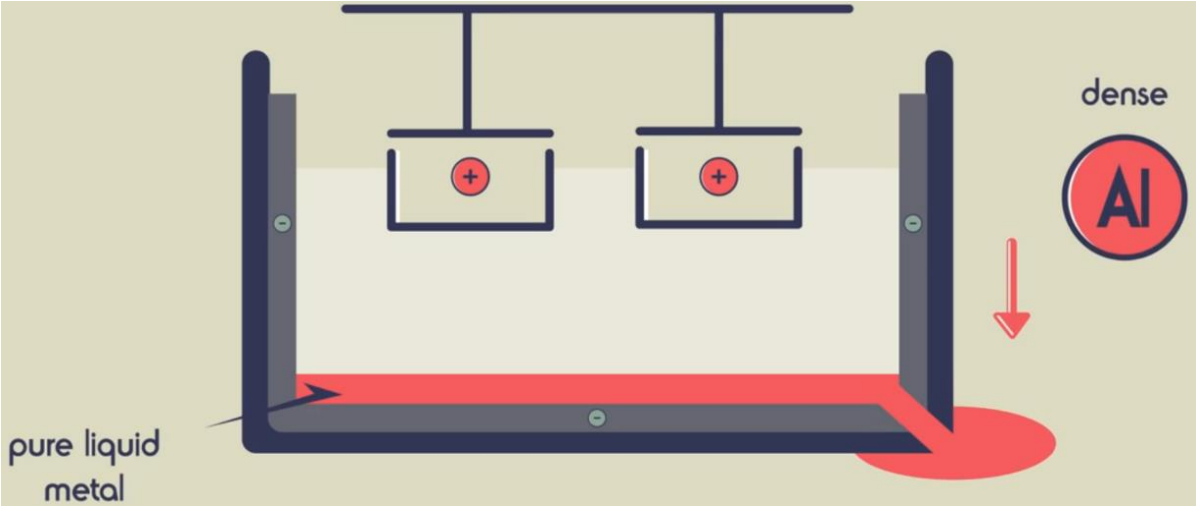


Σχήμα 2 – 18: Τήξη αλουμινίου



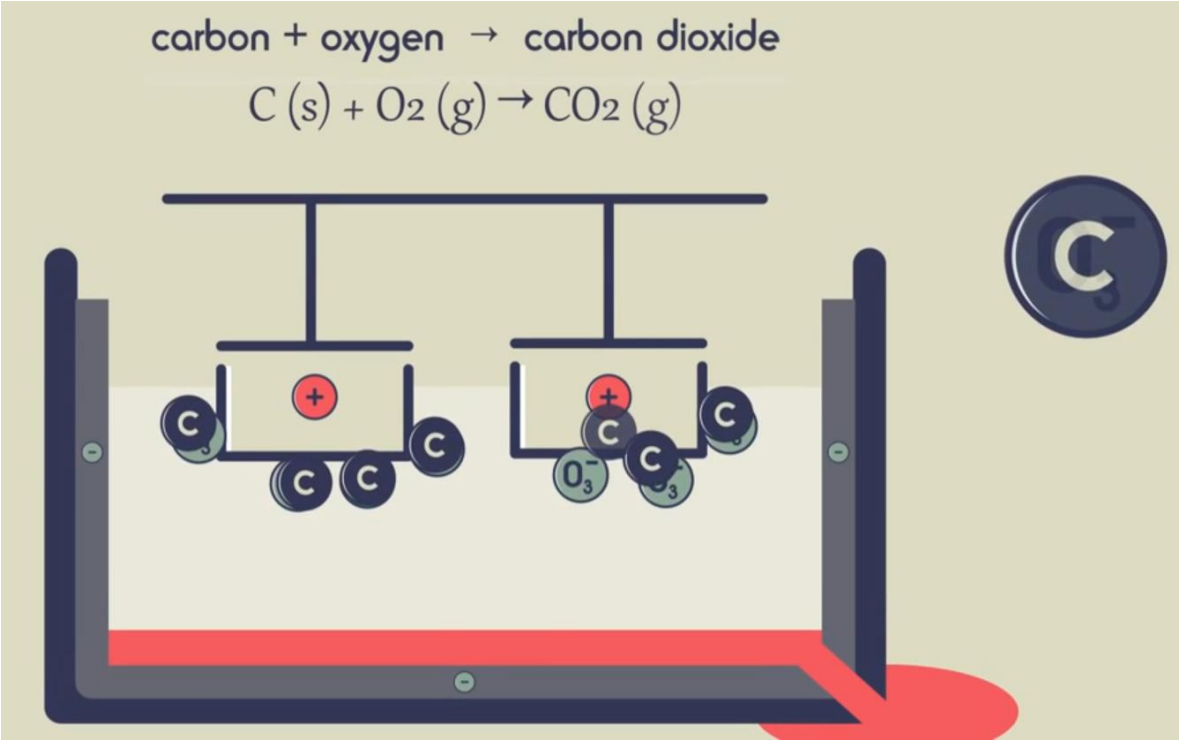
Σχήμα 2 – 19: Φόρτιση του συστήματος τήξης με ρεύμα

Επειδή το αλουμίνιο έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από τον λιωμένο κρυόλιθο όταν διασπάται από το οξυγόνο και προσκολλάται στα τοιχώματα λόγω μαγνητισμού καταλήγει τελικά στο πάτο του θαλάμου από όπου και το μαζεύουμε.

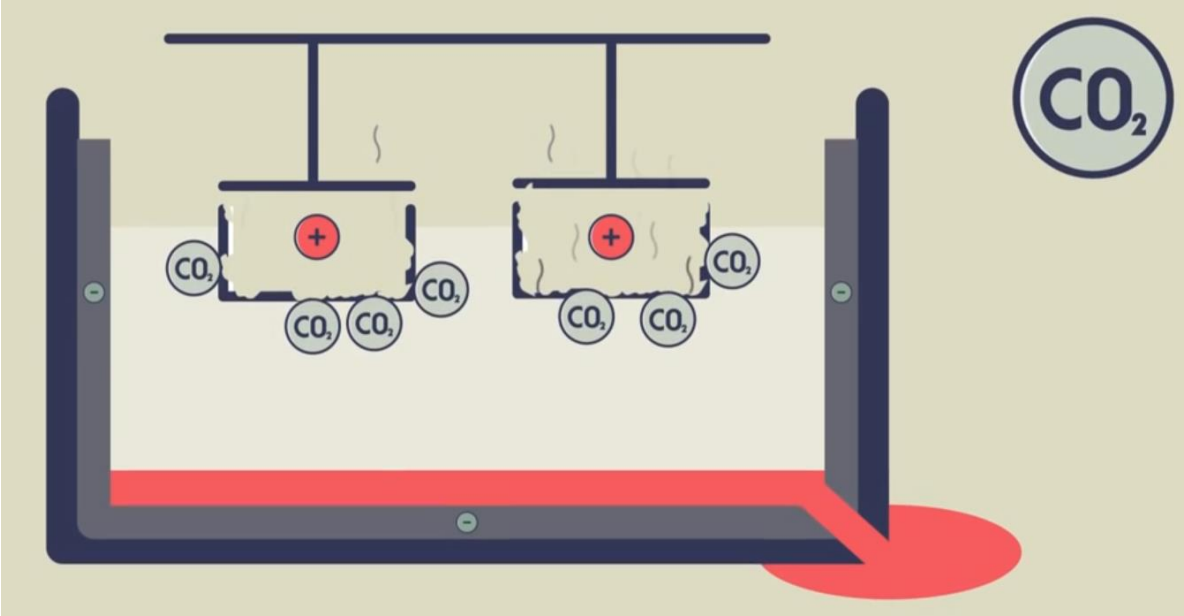


Σχήμα 2 – 20: Συλλογή του καθαρού αλουμινίου από το πάτο του θαλάμου τήξης

Το οξυγόνο προσκολλάται στο κατιόν, στα ηλεκτρόδια γραφίτη δηλαδή, ενώνεται με τον άνθρακα και δημιουργεί CO_2 το οποίο αποβάλλεται σε μορφή αερίου. Επειδή δεσμεύεται ο άνθρακας του γραφίτη, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα τα ηλεκτρόδια δεν είναι πλέον λειτουργικά και πρέπει να αντικατασταθούν. Η αλλαγή αυτή είναι αρκετά συχνή και τα ηλεκτρόδια ακριβά. Αυτό σε συνδυασμό με την τεράστια ποσότητα ενέργειας που απαιτείται, καθιστά την παραγωγή αλουμίνιου ιδιαίτερα δαπανηρή.



Σχήμα 2 – 21: Δημιουργία CO_2 κατά την τήξη του αλουμινίου



Σχήμα 2 – 22: Φθορά των ηλεκτροδίων γραφίτη κατά την τήξη του αλουμινίου

Το καλό σε αυτή την, ακριβή, υπόθεση είναι ότι το αλουμίνιο είναι άπειρες σχεδόν φορές ανακυκλώσιμο. Η ενέργεια που απαιτείται για να γίνει αυτό αποτελεί το 5% της ενέργειας που θα απαιτούνταν για την παραγωγή με βωξίτη της ίδιας ποσότητας αλουμινίου. Το κακό είναι ότι η κλοπή αλουμινίου είναι αρκετά συχνή επειδή μπορεί να πουληθεί για ανακύκλωση. Με τα χρόνια η διαδικασία ηλεκτρόλυσης έχει γίνει πιο αποδοτική, μειώνοντας τις εκπομπές CO_2 και την κατανάλωση ενέργειας και βωξίτη. Στην Ευρώπη πάνω από το 50% του αλουμινίου που χρησιμοποιούμε προέρχεται από ανακύκλωση.

Τώρα σε ό,τι αφορά την διαδικασία.

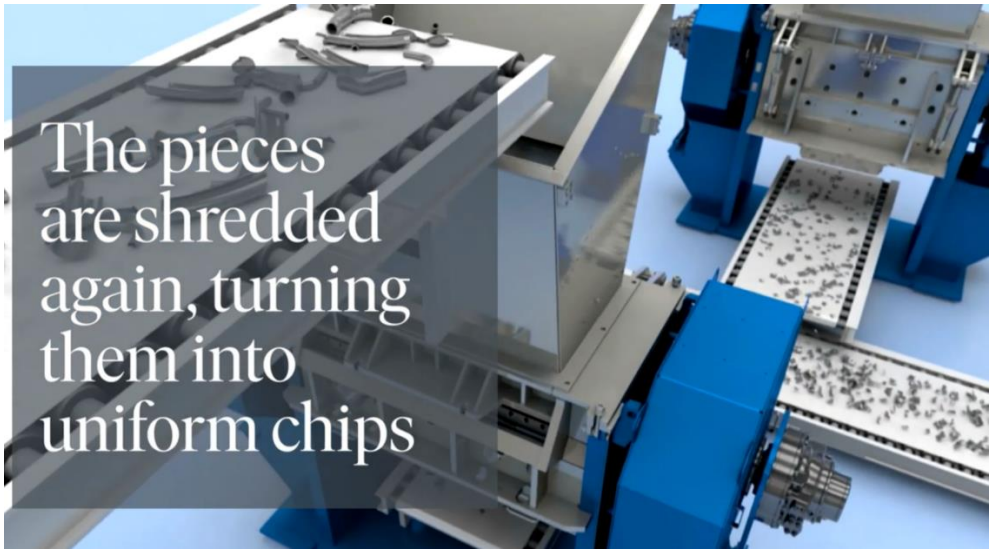
Αρχικά έχουμε την συλλογή και τεμαχισμό του αλουμινίου σε μικρά, εύκολα διαχειρίσιμα κομμάτια, στα οποία γίνεται οπτικός έλεγχος προκειμένου να βεβαιωθούμε ότι όλα είναι αλουμίνιο και όχι κάτι άλλο.

Σχήμα 2 – 23: Συλλογή και τεμαχισμός των κομματιών αλουμινίου

Σχήμα 2 – 24: Οπτικός έλεγχος των τεμαχισμένων κομματιών αλουμινίου

Έπειτα γίνεται διαχωρισμός των σιδηρούχων μετάλλων με τη βοήθεια μαγνήτη. Σιδηρούχα είναι τα μέταλλα που περιέχουν σίδηρο όπως, ο χάλυβας, μη σιδηρούχα είναι το αλουμίνιο, ο χαλκός, το τιτάνιο και άλλα. Τα σιδηρούχα μέταλλα κολλούν στο μαγνήτη και το αλουμίνιο συνεχίζει τη πορεία του. Μετά περνούν από ένα δονούμενο κόσκινο προκειμένου να απομακρυνθεί η σκόνη και άλλα σωματίδια και ύστερα από ένα ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό δινορεύμα, eddy current, με σκοπό τον διαχωρισμό μεταλλούχων κομματιών προσκολλημένων στο αλουμίνιο. Στη συνέχεια τα κομμάτια τεμαχίζονται ξανά σε ομοιόμορφα τσιπς, κομμάτια μερικών εκατοστών δηλαδή, το οποίο διευκολύνει την περαιτέρω επεξεργασία τους. Ύστερα η διαδικασία, μαγνήτης – κόσκινο – δινορεύμα, επαναλαμβάνεται άλλη μία φορά.

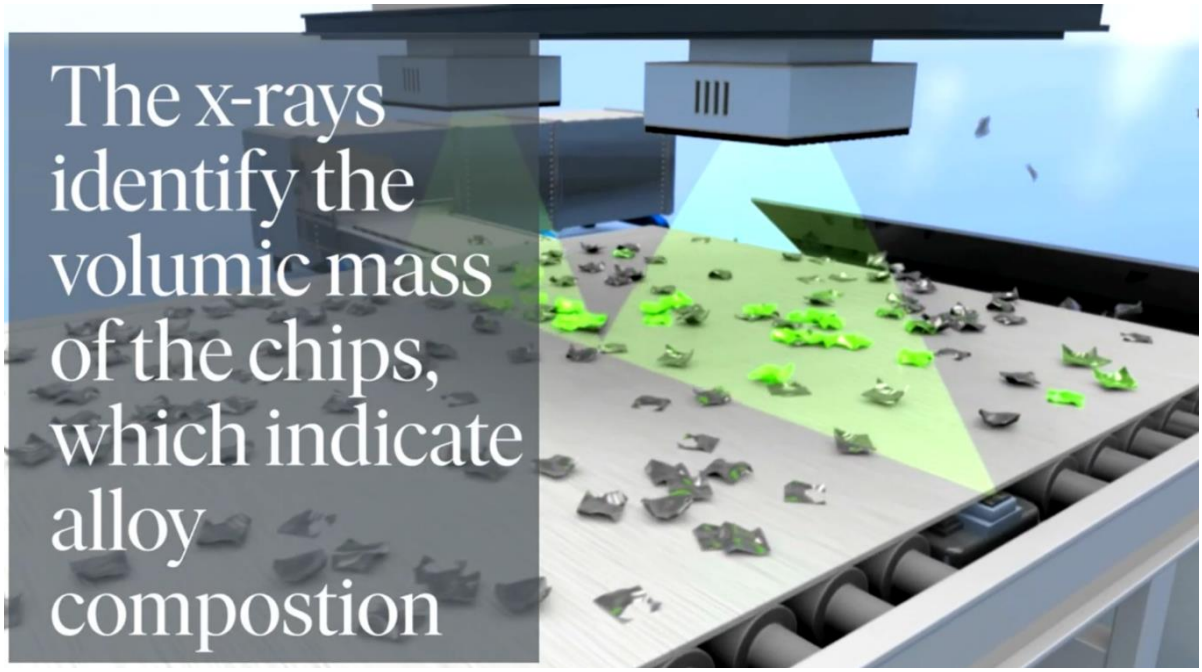
Σχήμα 2 – 25: Διαδικασία διαχωρισμού αλουμινίου από μεταλλούχα κομμάτια, μαγνήτης – κόσκινο – ηλεκτρομαγνητικό δινορεύμα



Σχήμα 2 – 26: Τεμαχισμός σε ομοιόμορφα κομματάκια – τσιπς αλουμινίου

Σχήμα 2 – 27: 2ος γύρος διαδικασίας διαχωρισμού, μαγνήτης – κόσκινο – ηλεκτρομαγνητικό δινορεύμα

Αφού πραγματοποιηθεί ο 2ος γύρος της διαδικασίας διαχωρισμού, τα κομμάτια περνούν από ακτίνες Χ όπου αναγνωρίζεται η ογκομετρική τους μάζα, κάτι το οποίο υποδεικνύει το κράμα από το οποίο αποτελούνται. Με πίεση αέρα εκτινάσσονται τα κομμάτια μη επιθυμητού κράματος. Επιθυμητά είναι τα κράματα τα οποία έχουν πυρίτιο. Το πυρίτιο βελτιώνει τις ρεολογικές ιδιότητες και μειώνει τη θερμοκρασία τήξης, με αποτέλεσμα το ρευστό μέταλλο να καταλαμβάνει ευκολότερα τις κοιλότητες του καλουπιού. Τα κράματα με μαγγάνιο (Mn) της σειράς 6xxx δεν είναι επιθυμητά λόγω του υψηλού σημείου τήξης τους (671° C).



Σχήμα 2 – 28: Χρήση ακτινών Χ με σκοπό την αναγνώριση των κομματιών που αποτελούνται από μη επιθυμητά κράματα, της σειράς 6xxx, επί το πλείστων

1xx.x	Καθαρό Al (Al >99,00%)
2xx.x	Κράματα Al-Cu
3xx.x	Κράματα Al-Si + Cu και / η Mg.
4xx.x	Κράματα Al-Si
5xx.x	Κράματα Al-Mg
6xx.x	Μη χρησιμοποιούμενη σειρά
7xx.x	Κράματα Al-Zn
8xx.x	Κράματα Al-Sn με άλλα στοιχεία
9xx.x	Κράματα Al-με άλλα στοιχεία

Σχήμα 2 – 29: Συμβολισμός των κατάλληλων ομάδων κραμάτων για χύτευση

Προσθήκη	Θερμοκρασία °C
Cu	548
Mg	450
Mn	671
Si	577
Zn	382
Mg_2Si	595

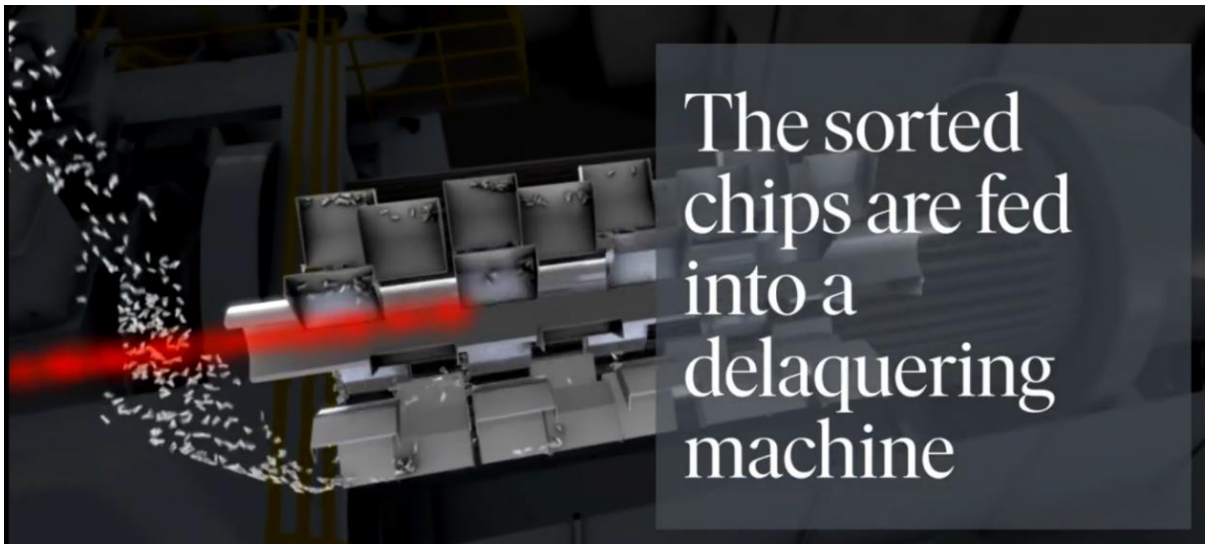
Σχήμα 2 – 30: Θερμοκρασίες τήξης των κραμάτων ανάλογα με το περιεχόμενο στοιχείο τους

Σχήμα 2 – 31: Απομάκρυνση των μη επιθυμητών κομματιών, με χρήση πεπιεσμένου αέρα

Η μηχανή πεπιεσμένου αέρα βρίσκεται κάτω από την ράγα μεταφοράς και αποτελείται από αισθητήρες και πολλά μικρά σωληνάκια τα οποία έχουν την δυνατότητα στοχευμένης εκτόξευσης αέρα και διαλογής πληθώρας μη επιθυμητών κομματιών, της τάξης των 1000κομμάτια/second.

Σχήμα 2 – 32: Εκτόξευση των τσιπς

Τα επιθυμητά πλέον κομμάτια μεταφέρονται σε μία μηχανή η οποία απομακρύνει τις επιστρώσεις που ενδέχεται να έχουν μετατρέποντας τες σε αέριο με χρήση ζεστού αέρα.



Σχήμα 2 – 33: Μηχανή απομάκρυνσης των επιστρώσεων

Σχήμα 2 – 34: Μετατροπή των επιστρώσεων σε αέριο με χρήση ζεστού αέρα

Μετά τα κομμάτια περνούν από ακόμα ένα δονούμενο κόσκινο για να απομακρυνθούν τυχόν υπολείμματα των επιστρώσεων και ύστερα τα λιώνουμε. Το ρευστό μέταλλο αναμιγνύεται με μικρή ποσότητα αλουμινίου χαμηλό σε ποσότητα σιδήρου. Σκοπός είναι το τελικό προϊόν να έχει χαμηλή ποσότητα σιδήρου, κάτι το οποίο αλλοιώνει την ποιότητα του αλουμινίου. Το ρευστό αλουμίνιο καταλήγει σε κυλινδρικά επί το πλείστων καλούπια, με αποτέλεσμα την δημιουργία ράβδων – billets. Οι ράβδοι αυτοί χρησιμοποιούνται για την δημιουργία διαφορετικών προϊόντων τα οποία καταλήγουν πάλι στα σκουπίδια και ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Σχήμα 2 – 35: Δονούμενο κόσκινο

Σχήμα 2 – 36: Λιώσιμο των τελικών κομματιών σε υψηλή θερμοκρασία

Σχήμα 2 – 37: Προσθήκη καθαρού από σίδηρο αλουμίνιου για καλύτερο τελικό προϊόν

Σχήμα 2 – 38: Κυλινδρικά καλούπια

Σχήμα 2 – 39: Ράβδοι αλουμινίου

2.2 ΚΡΑΜΑΤΑ

Όλα τα κράματα αποτελούνται από καθαρό αλουμίνιο ποσοστού της τάξης του 90% και παραπάνω, και επιπλέον μικρές ποσότητες χαλκού, ψευδαργύρου, μαγνησίου, πυριτίου, λιθίου σε ποσοστά μικρότερα του 1% και μέχρι 6%. Επίσης περιέχουν ακόμα μικρότερες ποσότητες χρωμίου, τιτανίου, ζιρκονίου, μόλυβδου, βισμουθίου, νικελίου, σιδήρου, τα οποία έχουν την δυνατότητα να τριπλασιάσουν την αντοχή του κράματος και να του προσδώσουν επιπλέον ιδιότητες. Έχουμε 9 ομάδες – σειρές κραμάτων, τις 1xxx, 2xxx,…, 9xxx, η 9xxx δεν χρησιμοποιείται πλέον. Η κάθε μία αποτελείται από επιμέρους κράματα. Υπάρχουν πάνω από 300 διαφορετικά κράματα, αλλά γύρω στα 50 είναι αυτά που χρησιμοποιούνται.

Σειρά 1xxx: καθαρό αλουμίνιο

Οι αντοχές των κραμάτων της ομάδας κυμαίνονται από 30 MPa μέχρι 100 MPa, φτάνουν όμως και εφελκυστική αντοχή της τάξης των 150 MPa. Το πιο ευρέως διαδεδομένο κράμα της σειράς είναι το 1060 με περιεκτικότητα 99,6% αλουμίνιο. Η σειρά αυτή έχει καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, πολύ μεγάλη

παραμορφωσιμότητα της τάξης του 30% με 40%, στα επίπεδα του χάλυβα δηλαδή, είναι πολύ καλή έναντι διάβρωσης. Λόγω της μεγάλης αντίστασης στη διάβρωση χρησιμοποιείται σε δεξαμενές αποθήκευσης νερού, καλώδια και πύργους ηλεκτροδότησης.

Σχήμα 2 – 40: Δεξαμενή νερού

Σχήμα 2 – 41: Πυλώνες ηλεκτρικού ρεύματος

Σειρά 2xxx: με χαλκό (Cu)

Οι αντοχές των κραμάτων της ομάδας κυμαίνονται κάτω από 300 MPa, φτάνουν όμως και εφελκυστική αντοχή 450 MPa. Το πιο ευρέως διαδεδομένο είναι το 2024 με περιεκτικότητα 4,4% χαλκό. Η σειρά αυτή έχει μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, 73.000 MPa, διότι φτάνει και ξεπερνάει το 70.000 MPa το οποίο θεωρείται αρκετά καλό για το αλουμίνιο, και επιπλέον έχει υψηλή αντοχή. Επαρκή παραμορφωσιμότητα της τάξης του 10%, αλλά είναι κακή έναντι διάβρωσης, οπότε χρειάζονται επικαλύψεις για προστασία.

Επιπλέον η παραγωγή της δεν είναι εύκολη. Σε ό,τι αφορά τις χρήσεις, γενικά έχουν να κάνουν κυρίως με αεροσκάφη και συνδέσεις με ήλους. Πιο συγκεκριμένα έχουμε, το 2603 για εσωτερικούς χώρους κατοικιών, το 2604 για πολυώροφες κατοικίες, το 2605 για ουρανοξύστες και το 2197 για F-16.

Σχήμα 2 – 42: Σύνδεση με ήλους φύλλων αλουμινίου σε επιβατικό αεροσκάφος

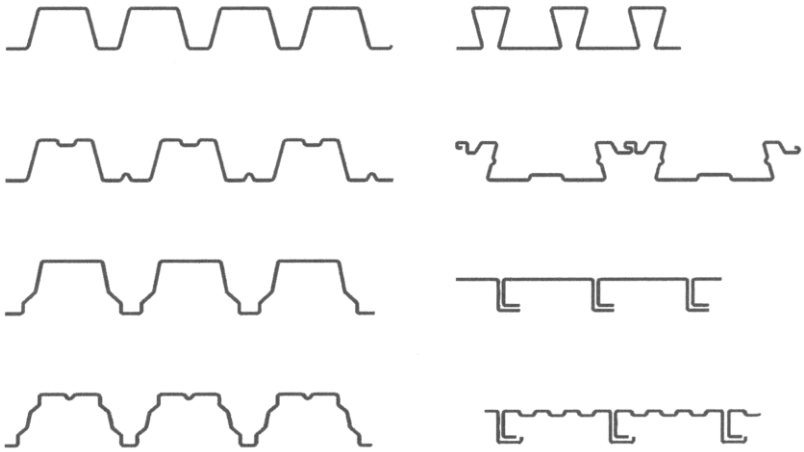
Σχήμα 2 – 43: Πλαίσια αλουμινίου εσωτερικών χώρων

Σχήμα 2 – 44: Πολεμικό αεροσκάφος τύπου F – 16

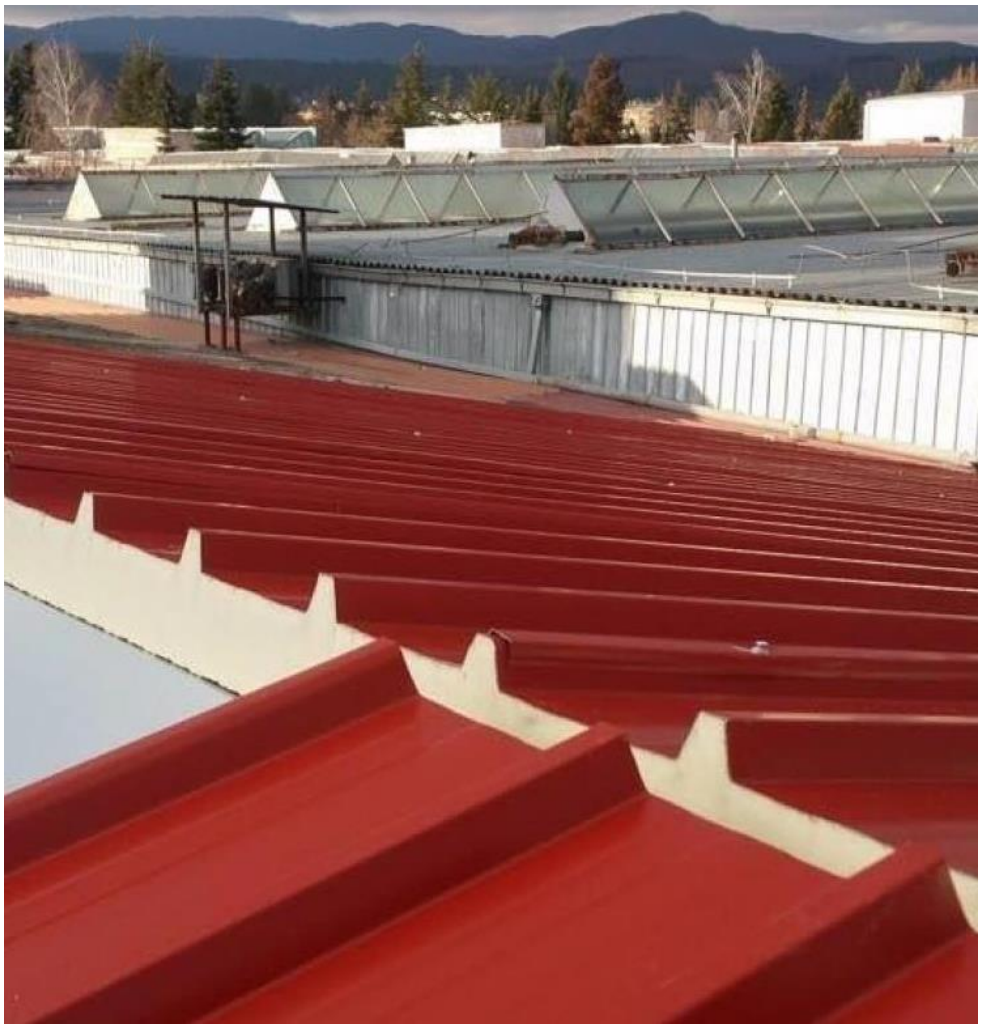
Σειρά 3xxx: με μαγγάνιο (Mn)

Τα 3003, 3004, 3105 είναι τα πιο συνήθη. Έχουν καλό μέτρο ελαστικότητας 70.000 – 80.000 MPa, και καλή αντίσταση στη διάβρωση. Χρησιμοποιείται σε πανέλα τύπου sandwich για οροφές και προσόψεις καθώς και για κιβώτια μεταφοράς.

Σχήμα 2 – 45: Διατομή φύλλου αλουμινίου



Σχήμα 2 – 46: Διαφορετικά προφίλ φύλλων αλουμινίου



Σχήμα 2 – 47: Πανέλα sandwich

Σχήμα 2 – 48: Κιβώτια μεταφοράς

Σειρά 4xxx: με πυρίτιο (Si)

Το 4043 είναι το πιο διάσημο. Παρόμοιες ιδιότητες με την 3xxx σειρά και χρήση ως σύρμα συγκόλλησης (filler wire).

Σχήμα 2 – 49: Καλώδιο συγκόλλησης

Σειρά 5xxx: με μαγνήσιο (Mg)

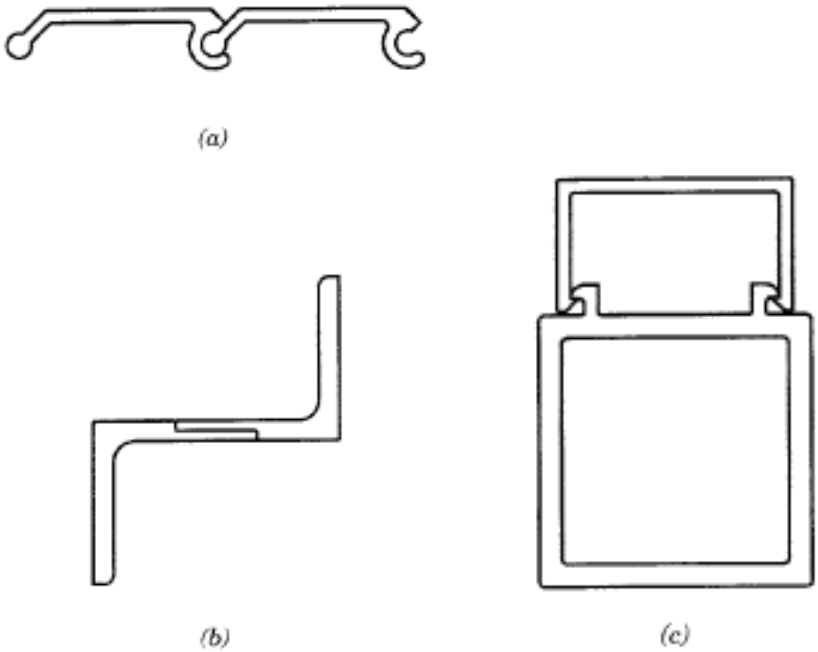
Η ομάδα αυτή διατηρεί την αντοχή της μετά από συγκόλληση σε αντίθεση με τις άλλες ομάδες. Έχει καλύτερες ιδιότητες από τις 1xxx 3xxx 4xxx, και τα κράματά της είναι από τα πιο ελαφριά. Υψηλή αντοχή της τάξης των 200 MPa, αλλά φτάνει και τα 300 MPa, και μεγάλο μέτρο ελαστικότητας 69.000 MPa. Αύξηση αντοχής με προσθήκη μαγνησίου της τάξης του 6% και πάνω, και επαρκής παραμορφωσιμότητα κοντά στο 10%. Πολύ καλό έναντι διάβρωσης, ιδανικό για χρήση σε σωλήνες τύπου culvert, δεξαμενές και πλοία. Παρ' όλο που γενικά τα κράματα είναι ευαίσθητα σε θερμοκρασίες λειτουργίας άνω των 65°C καθώς «σκάνε» οι στρώσεις, τα 5083, 5086, 5154, 5254, 5456, αντέχουν μέχρι και 200°C το οποίο τις καθιστά ιδανικές για σωλήνες όπου μπορεί να έχουμε μεγάλες αυξομειώσεις στη θερμοκρασία. Παρ' όλα αυτά τα υψηλής αντοχής κράματα παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης όταν λειτουργούν για πολύ καιρό σε καυτό περιβάλλον. Στο κρύο δεν μας απασχολεί γιατί μέχρι και τους -269°C το αλουμίνιο είναι απόλυτα λειτουργικό. Επίσης η 5100 γίνεται πολύ λαμπερή μετά από ανοδίωση – anodization (επικάλυψη ηλεκτρολυτών για προστασία από περιβαλλοντικούς παράγοντες).

Σχήμα 2 – 50: Συγκολλήσεις σε σκελετό πλοίου

Σχήμα 2 – 51: Σωλήνες τύπου culvert

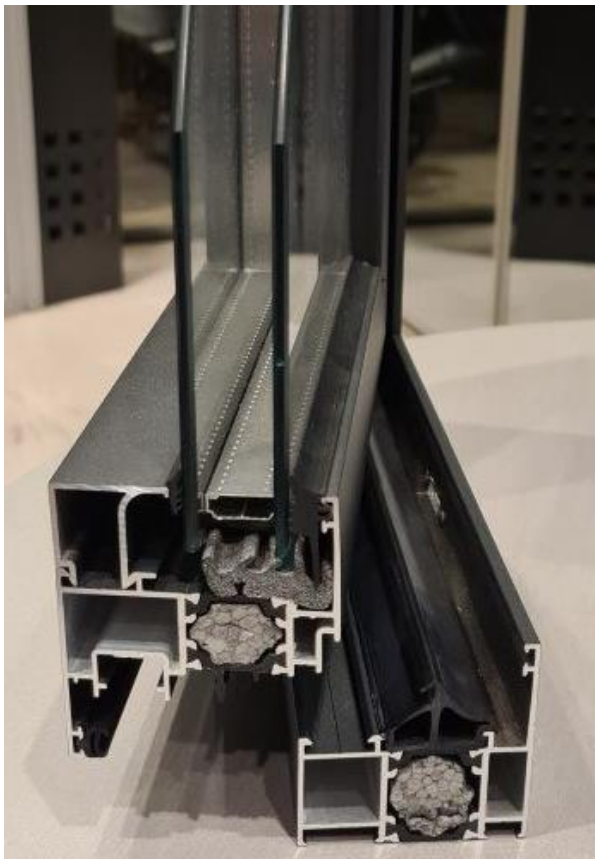
Σειρά 6xxx: με μαγνήσιο και πυρίτιο (Mg + Si)

Αντοχή κραμάτων κοντά, αλλά κάτω από 250 MPa, αγγίζει και τα 300 MPa. 6061 το πιο διάσημο. Η ομάδα αυτή είναι συνδυασμός των ιδιοτήτων των 4xxx και 5xxx. Καλή και για τους 3 τύπους συνδέσεων, ήλοι, κοχλίες, συγκόλληση. Δυνατότητα αποθήκευσης σε ρολά. Από τις πιο ελαφριές μαζί με την 5xxx. Υψηλή αντοχή, κοντά σε αυτή του μαλακού χάλυβα, στα 250 MPa. Πολύ καλό για extrusion καθώς είναι «μαλακό». Επαρκής παραμορφωσιμότητα που αγγίζει το 12%. Καλό έναντι διάβρωσης, ιδανικό για χρήση σε σωλήνες, κτίρια (τα υψηλής αντοχής κράματα της ομάδας), κουφώματα (extruded interlocks).



Σχήμα 2 – 52: Extruded interlocks

Σχήμα 2 – 53: Αλουμινένια δοκάρια κτιρίου, τα οποία έχουν λεκέδες από υγρασία



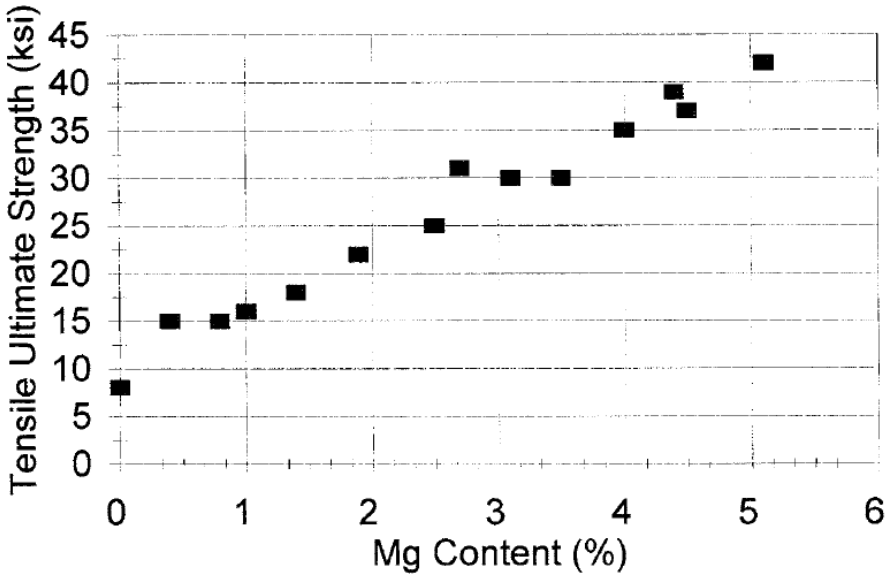
Σχήμα 2 – 54: Κούφωμα αλουμινίου

Σειρά 7xxx: με ψευδάργυρο (Zn)

Η ομάδα αυτή χωρίζεται σε δύο υποομάδες, η μία έχει επιπλέον μαγνήσιο (Mg), όπως το 7005. Και η άλλη έχει επιπλέον χαλκό (Cu), όπως τα 7075, 7178.

Η πρώτη (AlZnMg) έχει αντοχές άνω των 250 MPa, αγγίζοντας και τα 350 MPa. Είναι καλή έναντι διάβρωσης και επαρκή παραμορφωσιμότητα της τάξης του 10%. Είναι πολύ καλή για συγκολλήσεις, καθώς ενώ στα υπόλοιπα κράματα οι αντοχές πέφτουν στις ζώνες συγκόλλησης, στα κράματα αυτής της ομάδας ανακάμπτουν εκεί σχεδόν που ήταν. Χρήση κυρίως σε κτίρια.

Η δεύτερη υποομάδα (AlZnMgCu) έχει αντοχές που ξεπερνούν τα 500 MPa. Το κακό είναι όμως ότι δεν έχει αντίσταση στη διάβρωση και δεν συγκολλάται. Χρησιμοποιείται σε αεροσκάφη.



Σχήμα 2 – 55: Αύξηση της αντοχής της πρώτης υποομάδας ανάλογα με την περιεκτικότητα σε μαγνήσιο, 1 ksi = 7 MPa, οπότε από 49 MPa για 0% μαγνήσιο μέχρι 300 MPa για 5% μαγνήσιο

Σχήμα 2 – 56: Αεροσκάφος τύπου SR – 71

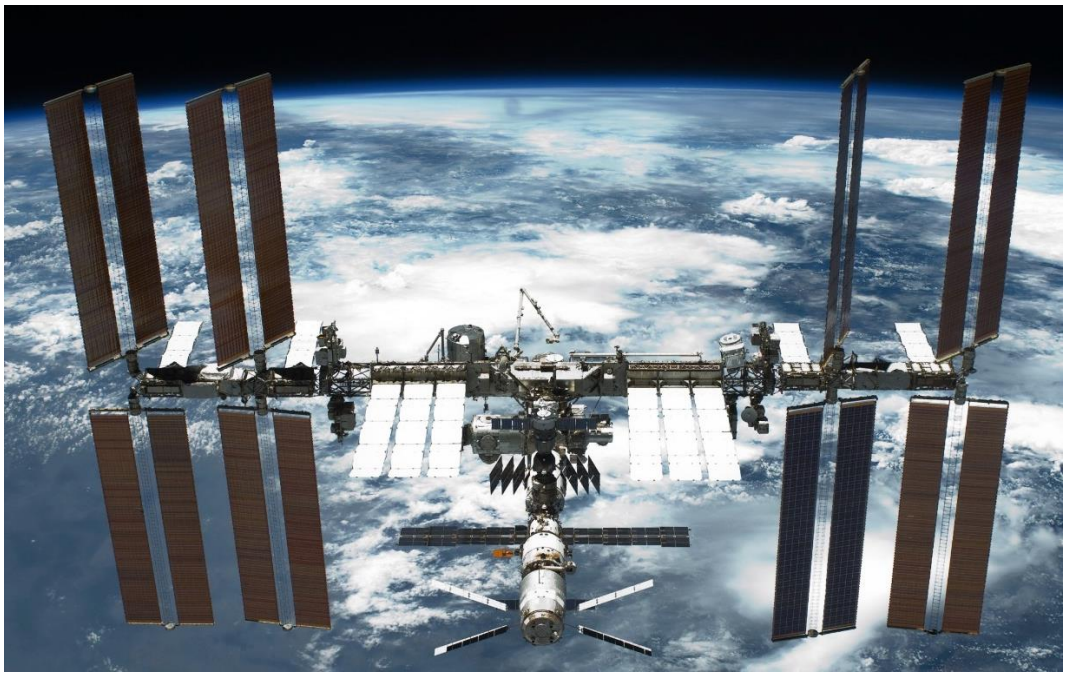
Σειρά 8xxx: με σίδηρο και πυρίτιο (Fe + Si)

Χρήση στη συσκευασία προϊόντων και μετά από μερικά χρόνια σε προσόψεις και εφαρμογές της 2xxx και 7xxx, όπως αεροσκάφη

Υποομάδα 1 με σίδηρο και νικέλιο (Fe + Ni) η οποία έχει καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα, 8017

Υποομάδα 2 με λίθιο (Li) η οποία έχει πολύ υψηλές αντοχές και σκληρότητα, 8090 για χρήση σε εφαρμογές αεροδιαστημικής.

Σχήμα 2 – 57: Εκτόξευση διαστημοπλοίου



Σχήμα 2 – 58: Διαστημικός σταθμός

	Non-heat-treatable		
Alloy series Main ingredients	1xxx (Pure)	3xxx Mn	5xxx Mg
Type			
Top tensile strength (approx.) in N/mm²	150	200	300
Durability rating	A	A	A*
Arc-welding	Yes	Yes	Yes
Extrudability	Very good	–	Moderate to poor
Available forms	All	Sheet, strip	All

	Heat-treatable				
Alloy series Main ingredients	2xxx Cu, etc.	6xxx Mg, Si		7xxx Zn, Mg	
Type		Weaker	Stronger	Weaker	Stronger
Top tensile strength (approx.) in N/mm²	450	200	300	350	550
Durability rating	D	B	B	C	D
Arc-welding	No	Yes	Yes	Yes	No
Extrudability	Poor	Very good	Good	Moderate	Poor
Available forms	All	Extrusions, tube	All	All	All

Σχήμα 2 – 59: Πίνακας χαρακτηριστικών

Επιπλέον πληροφορίες για τις διαφορετικές ομάδες:

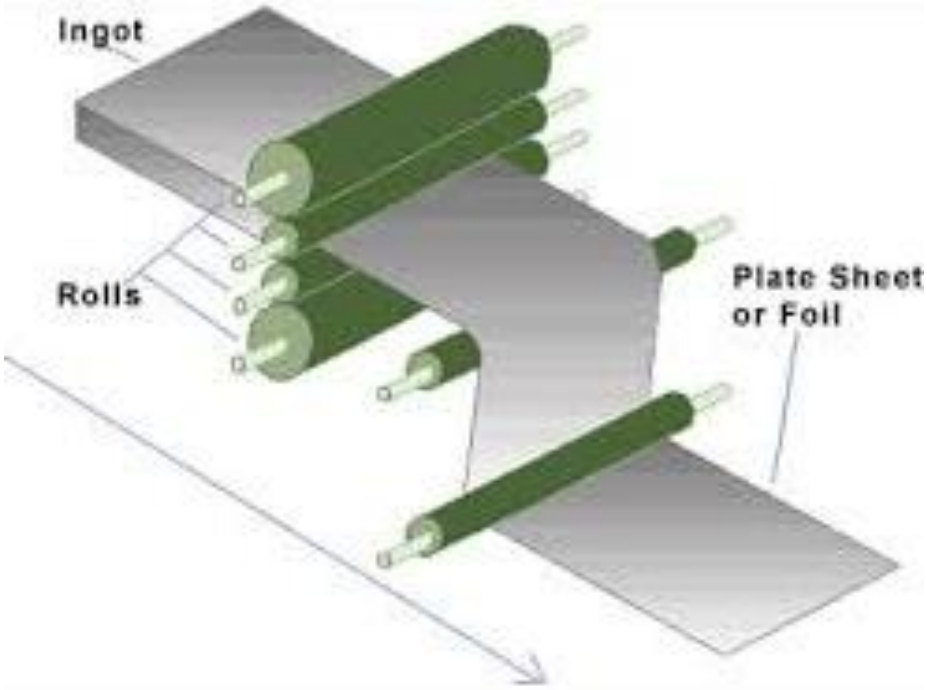
Σε ό,τι αφορά την ονομασία, ποικίλει ανάλογα με την τοποθεσία π.χ. 6005 A στην Ευρώπη, και ανάλογα με αλλαγές – updates π.χ. A9 5052. Η υποομάδα της 7xxx με επιπλέον μαγνήσιο που κάνει για συγκολλήσεις χρησιμοποιείται για στρατιωτικές γέφυρες. Οι 2xxx, 7xxx κάνουν για αεροπλάνα και κοχλίες. Οι 1xxx, 3xxx, 6xxx έχουν κράματα «μαλακά», ιδανικά για extrusion. Οι 2xxx, 5xxx, 7xxx έχουν υψηλή αντοχή, είναι πιο ακριβά και «σκληρά», για αυτό δεν κάνουν για extrusion. Οι 2xxx, 5xxx, 6xxx κάνουν για αυτοκίνητα. Επίσης το αλουμίνιο χρησιμοποιείται σε μορφή σκόνης ως καύσιμο πυραύλων.

Σχήμα 2 – 60: Καύση καυσίμου πυραύλου

Alloy	Color
1100	White
2014	Gray
2024	Red
3003	Green
3004	—
3005	—
3105	—
5005	—
5050	—
5052	Purple
5083	Red and Gray
5086	Red and Orange
5154	Blue and Green
5454	—
5456	Gray and Purple
6005	—
6061	Blue
6063	Yellow and Green
6066	Red and Green
6070	Blue and Gray
6105	—
6351	Purple and Orange
7075	Black

Σχήμα 2 – 61: Χρώματα κραμάτων

Οι 1xxx, 3xxx, 6xxx κοστίζουν 3$/kg και η επεξεργασία τους γίνεται με «κρύες» μεθόδους (non-heat treatable), όπως pressάρισμα φύλλου αλουμινίου (cold work). Οι 2xxx, 6xxx, 7xxx κοστίζουν 4.4$/kg και η επεξεργασία τους γίνεται με «ζεστές» μεθόδους (heat treatable), όπως ωρίμανση σε φούρνο άνω των 100°C για μερικές ώρες (hot work). Οι 5xxx, 6xxx είναι οι πιο ελαφριές. Τα κράματα της 2xxx απαγορεύεται να έρθουν σε επαφή με το έδαφος «γυμνά», χωρίς κάποια επικάλυψη ή προστασία. Τα 3004, 5025, 6061, 6063 επιτρέπεται να έρθουν σε απευθείας επαφή με το έδαφος, χωρίς απαίτηση για επιπλέον προστασία από διάβρωση. Εξαιρούνται τα αργιλώδη εδάφη, και αυτά με pH 4 – 9.



Σχήμα 2 – 62: Pressάρισμα φύλλου αλουμινίου (cold work)

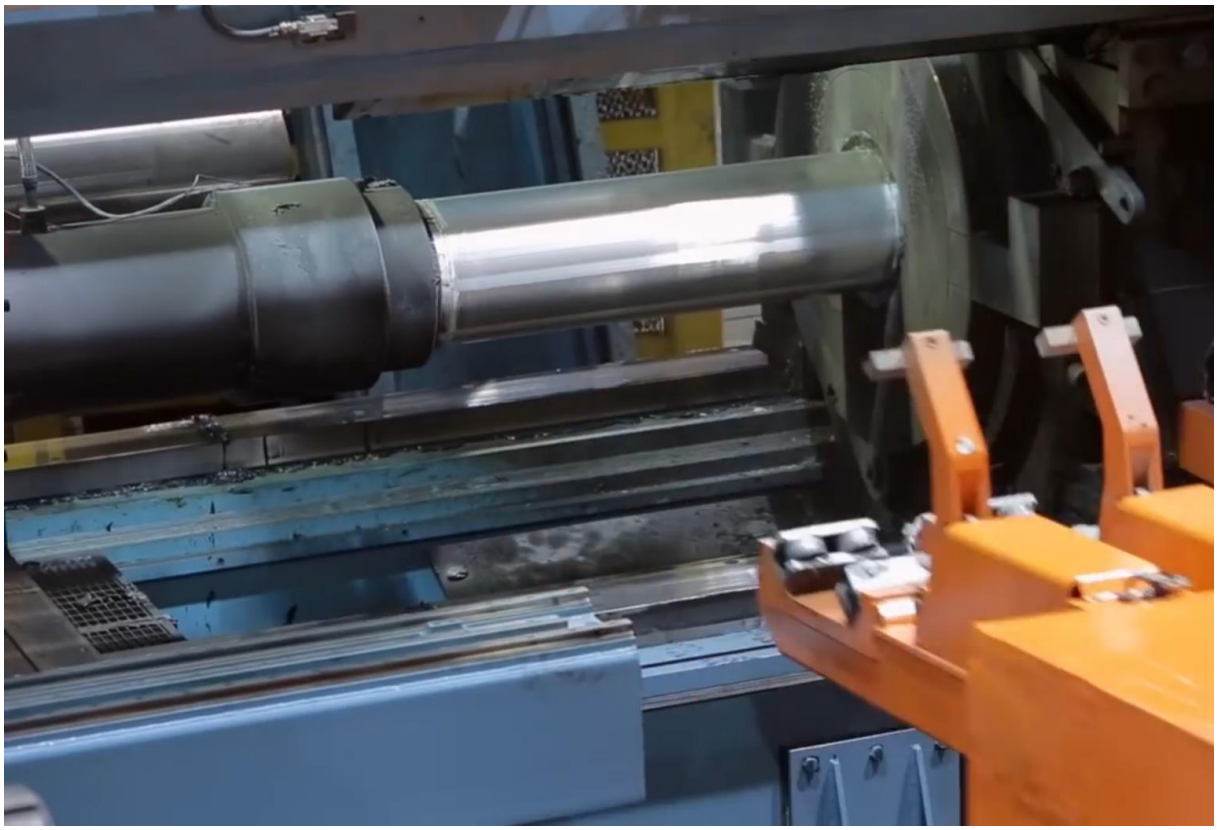
Σχήμα 2 – 63: Ωρίμανση προϊόντων αλουμινίου σε φούρνο (hot work)

2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Υπάρχει μία πληθώρα μεθόδων παραγωγής προϊόντων αλουμινίου, η πιο ξεχωριστή είναι το extrusion. Είναι η διαδικασία σύμφωνα με την οποία σπρώχνουμε ράβδους αλουμινίου μέσα από στόμια – dies με διαφορετικά προφίλ – profiles. Υπάρχουν δύο τρόποι, άμεσα και έμμεσα. Άμεση – direct extrusion έχουμε όταν σπρώχνουμε την ράβδο αλουμινίου μέσα από ένα θάλαμο πίεσης και μέσα από μια σειρά στομίων. Έμμεση – indirect extrusion έχουμε όταν σπρώχνουμε τα στόμια στην ράβδο. Αυτό γίνεται κλειδώνοντας την ράβδο στο θάλαμο πίεσης και σπρώχνοντας όλο το σύστημα σε μία σειρά ακίνητων στομίων.

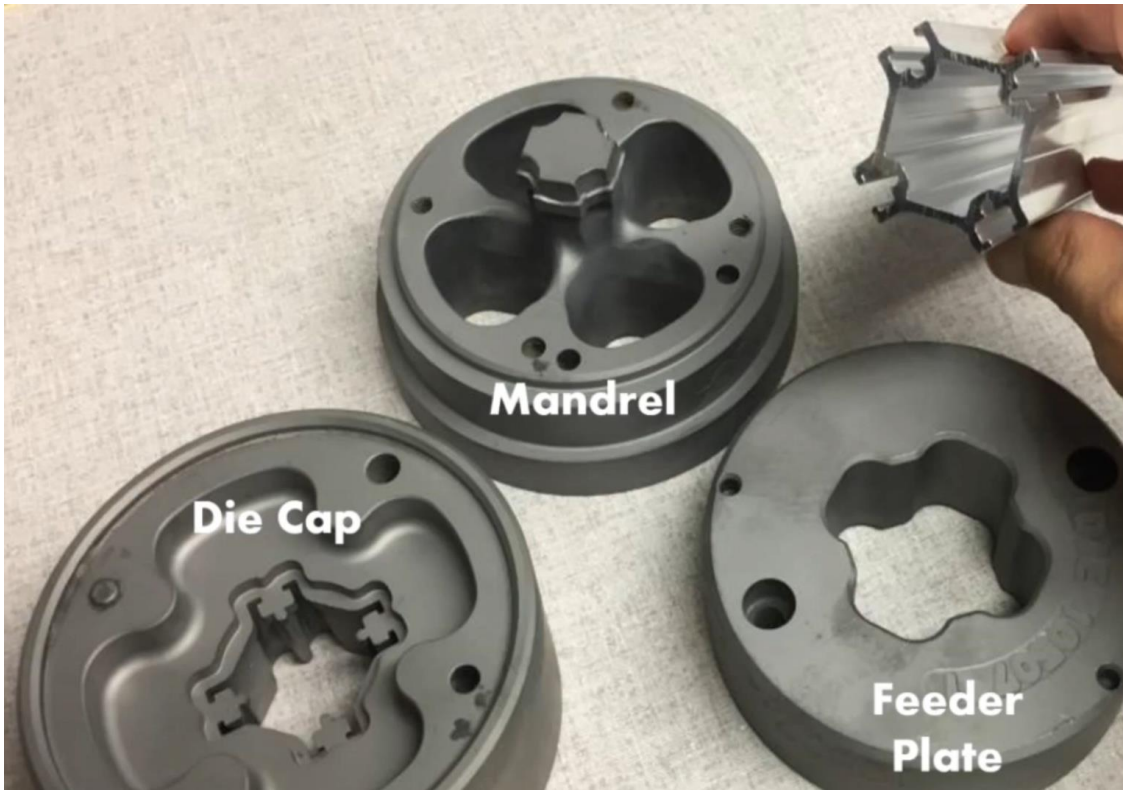
Σε ό,τι αφορά την άμεση, οι τεράστιες δυνάμεις τριβής μεταξύ ράβδου και τοιχωμάτων αναγκάζουν το αλουμίνιο στο κέντρο της ράβδου να ρέει γρηγορότερα από την περίμετρο, έτσι η κακή συνήθως εξωτερική επιφάνεια μένει τελευταία και απομακρύνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολύ καλή εξωτερική επιφάνεια προϊόντος αλλά μεγάλη κατανάλωση ενέργειας λόγω τριβών. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει πληθώρα διατομών εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν υπάρχει περιορισμός στο πόσα στόμια θα βάλουμε στη σειρά. Τα στόμια είναι πολλά και σε σειρά προκειμένου να ρέει καλύτερα και ευκολότερα το μέταλλο. Το κακό με την άμεση μέθοδο είναι ότι δεν έχουμε τόσο καλές τελικές ιδιότητες και μειωμένη ακρίβεια στις διαστάσεις.

Σε ό,τι αφορά την έμμεση, έχουμε μικρότερη κατανάλωση ενέργειας λόγω της μείωσης των τριβών στο θάλαμο πίεσης, καθώς η ράβδος κινείται μαζί με το θάλαμο πίεσης. Απαιτείται λιγότερο «σπρώξιμο» και οι τελικές ιδιότητες και διαστάσεις είναι πιο καλές και ακριβείς αντίστοιχα. Το κακό είναι ότι έχουμε περιορισμένα μεγέθη καθώς ο αριθμός των στομίων που χωρούν στην ειδική κοίλη πρέσα που παραμένει ακίνητη και που μπαίνει στο θάλαμο συγκεκριμένου μήκους, είναι περιορισμένος. Επίσης απαιτείται ξεφλούδισμα της εξωτερικής, όχι και τόσο καλής, επιφάνειας διότι το εξωτερικό της ράβδου γίνεται το εξωτερικό του τελικού προϊόντος.

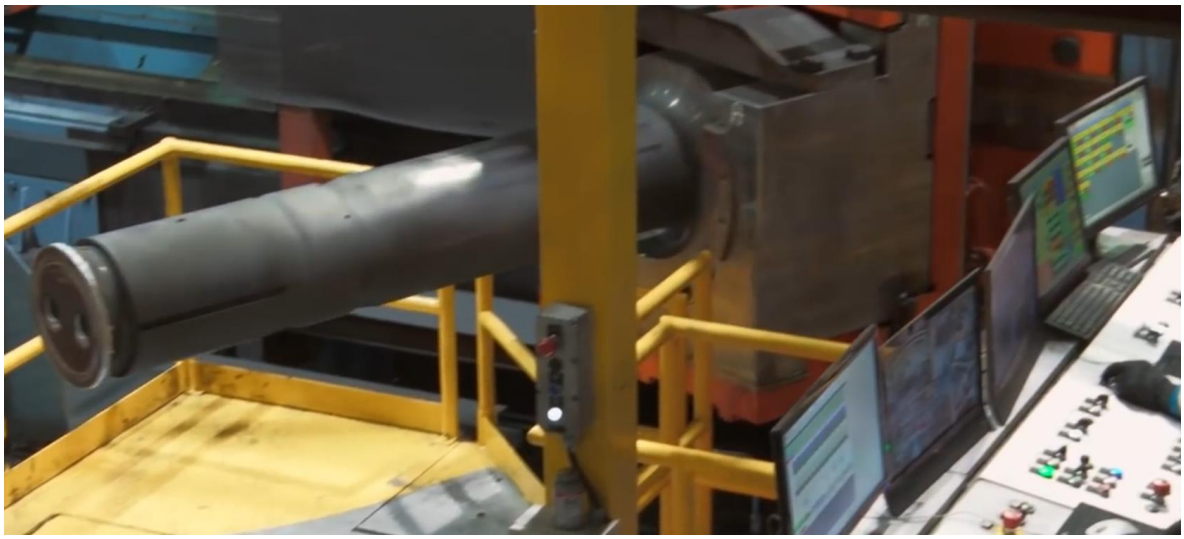


Σχήμα 2 – 64: Direct extrusion

Σχήμα 2 – 65: Σειρά στομίων – dies για διαφορετικές διατομές

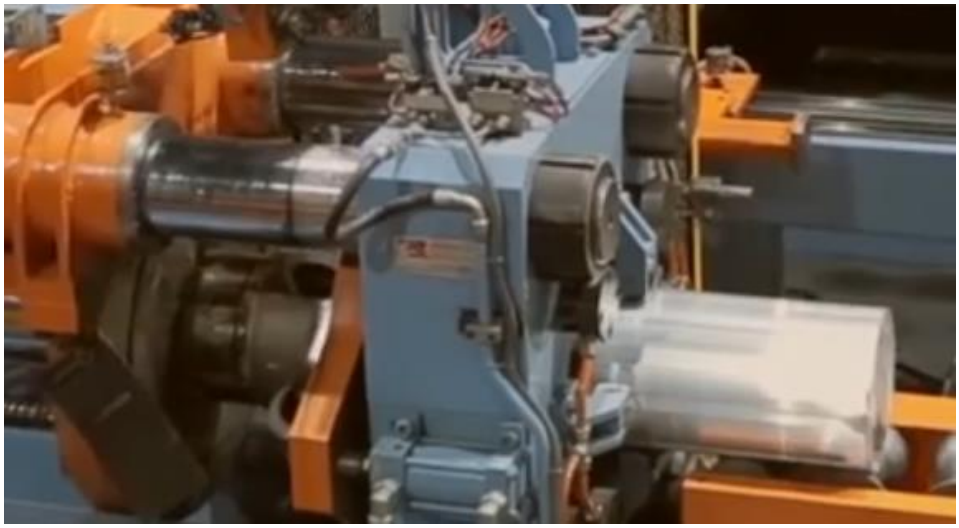


Σχήμα 2 – 66: Διατομές στομίων μιας σειράς για καλή ροή και σωστό τελικό προϊόν



Σχήμα 2 – 67: Indirect extrusion, κοίλη ακούνητη πρέσα, με μήκος ίδιο με αυτό του θαλάμου

Σχήμα 2 – 68: Ξεφλούδισμα εξωτερικής επιφάνειας billet



Σχήμα 2 – 69: Μηχανή ξεφλουδίσματος

Τα βήματα και για τις δύο τρόπους extrusion είναι ίδια. Αρχικά θερμαίνουμε τόσο τις ράβδους στους 500° C, όσο και τα στόμια, καθώς αν περάσει το ζεστό αλουμίνιο από το κρύο στόμιο υπάρχει κίνδυνος το στόμιο να σπάσει. Έπειτα σπρώχνουμε, με ή χωρίς ξεφλούδισμα ανάλογα με τη μέθοδο. Η πρέσα ασκεί δυνάμεις της τάξης 1000tn – 12000tn. Ένα επιβατικό λεωφορείο ζυγίζει 20tn. Οι ράβδοι σπρώχνονται συνεχόμενα η μία μετά την άλλη. Δηλαδή όταν εισέλθει η ράβδος στο θάλαμο πίεσης, κατά την άμεση μέθοδο, ακριβώς πίσω της βάζουμε την επόμενη ράβδο. Στον έμμεσο τρόπο μόλις η κοίλη ακούνητη πρέσα φτάσει στο τέρμα του κινούμενου θαλάμου, ο θάλαμος επανέρχεται στην αρχική του θέση και τοποθετείτε η επόμενη ράβδος. Και στις δύο μεθόδους η διαδοχή των ράβδων γίνεται αφού απομακρυνθεί με κοπή το τελευταίο 10% περίπου της προηγούμενης. Οι εν λόγω ράβδοι – billets έχουν αρχικά μήκη της τάξης 6m – 9m για ευκολία στη μεταφορά. Πριν όμως αρχίσει η διαδικασία extrusion τα μεγάλα αυτά «κούτσουρα» - logs κόβονται σε κυλίνδρους – billets των 0,25m – 1,25m. Οι διάμετροι τους είναι της τάξης των 250mm, 300mm πιο σπάνια, και 790mm από τα μεγαλύτερα και σπανιότερα που έχουν παρατηρηθεί ,και μπορούν να φτάσουν 2tn το ένα.

Καθώς το προϊόν βγαίνει από την εσοχή ψύχεται με νερό. Υπάρχουν τρεις τρόποι. Μπορεί να ψεκάζεται με νερό υπό πίεση, να περνάει από δεξαμενή μικρού μήκους, ή να διασχίζει διαμήκεις δεξαμενές νερού. Το καλύτερο είναι η διαμήκης δεξαμενή γιατί το προϊόν ψύχεται με ομαλό και συνεχή τρόπο, αλλά η δεξαμενή έχει περιορισμένο μήκος και σπαταλάμε πολύ νερό. Το χειρότερο είναι το πεπιεσμένο νερό γιατί δεν έχει μεγάλη διάρκεια και δεν ψύχει τελείως ομοιόμορφα προκαλώντας τοπικές ατέλειες, εξοικονομούμε νερό όμως. Ύστερα το προϊόν, 30m μήκους συνήθως, ψύχεται περαιτέρω με ανεμιστήρες κινούμενο πάνω σε ράγες και φθάνει σε ένα μηχάνημα το οποίο το τεντώνει ισιώνοντάς το. Αυτό συμβαίνει γιατί δεν βγαίνει τελείως ίσο από τα στόμια ούτε από την απότομη ψύξη με νερό – quenching. Παράλληλα απαλλάσσεται από ενδεχόμενες παραμένουσες τάσεις. Αυτό γίνεται κρατώντας την μία άκρη ακούνητη και τραβώντας την άλλη άκρη με την χρήση ενός σφιγκτήρα που μετακινείται προς τα πίσω κατά 1% - 3% του μήκους ανάλογα με το κράμα και τις επιθυμητές ιδιότητες, δηλαδή 30cm – 90cm για 30m μήκος. Το τράβηγμα – τέντωμα είναι ιδανικό για κράματα στα οποία επιτρέπεται θερμή επεξεργασία, heat – treatment, των σειρών 2xxx, 6xxx, 7xxx. Όταν γίνεται σε non – heat treated κράματα, των σειρών 1xxx, 3xxx, 5xxx ρίχνει τις ιδιότητές τους.

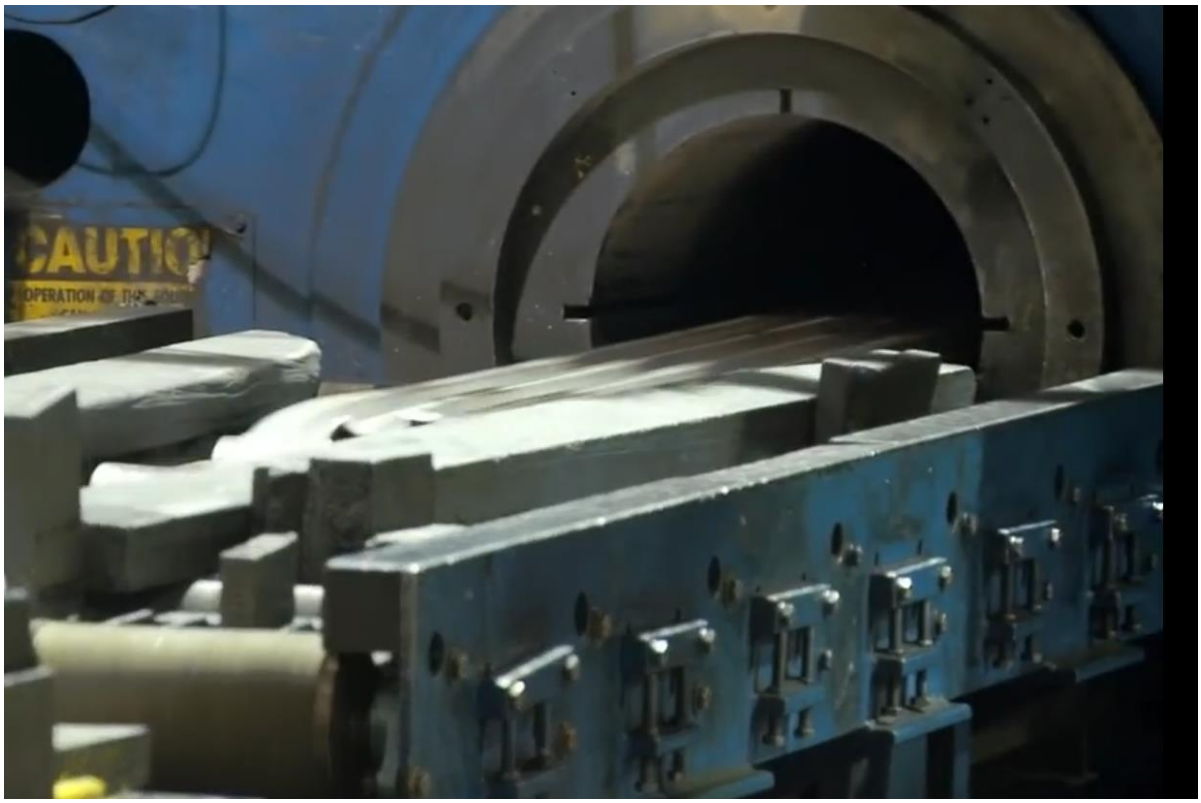
Έπειτα κόβουμε τις άκρες και κόβουμε το προϊόν σε επιθυμητά μεγέθη, το πολύ 12m, προκειμένου να χωράει σε φορτηγό. Η κοπή γίνεται με χρήση πλάσματος ή πριονιού, ψυχρές μέθοδοι, καθώς συγκεντρωμένη και υψηλή θερμότητα κάνει κακό στο αλουμίνιο. Ύστερα γίνεται έλεγχος των διαστάσεων με παχύμετρα, μεζούρες αλλά και με πιο περίπλοκα μηχανήματα που χρησιμοποιούν συντεταγμένες για να μετρήσουν με ακρίβεια τις διαστάσεις περίπλοκων μικρών προϊόντων. Στη συνέχεια γίνονται πειράματα εφελκυσμού, θλίψης, κάμψης για να δούμε εάν πληρούνται οι προδιαγραφές. Αυτό γίνεται, γιατί πολλές φορές οι παραγόμενες διατομές δεν έχουν ξαναδοκιμαστεί, και πρέπει να δούμε μέχρι πόσο αντέχουν. Δεν είναι όπως στο χάλυβα που οι διατομές είναι standard και πινακοποιημένες. Αφού επιβεβαιωθούν οι επιθυμητές προδιαγραφές, τα κομμάτια τοποθετούνται σε φούρνους για μερικές ώρες προκειμένου να φτάσουν την πλήρη σκληρότητά τους. Μετά από αυτό υπάρχει η επιλογή για ομαλοποίηση των μυτερών ακρών, καθώς και για δημιουργία τρυπών, αλλά και για συγκολλήσεις. Τέλος τα προϊόντα φορτώνονται σε φορτηγά.

Σχήμα 2 – 70: Κύλινδροι – billets αλουμινίου

Σχήμα 2 – 71: Θέρμανση των κυλίνδρων

Σχήμα 2 – 72: Θέρμανση των στομίων – dies

Σχήμα 2 – 73: Direct extrusion



Σχήμα 2 – 74: Έξοδος του προϊόντος από τα στόμια

Σχήμα 2 – 75: Ψύξη σε μικρή δεξαμενή

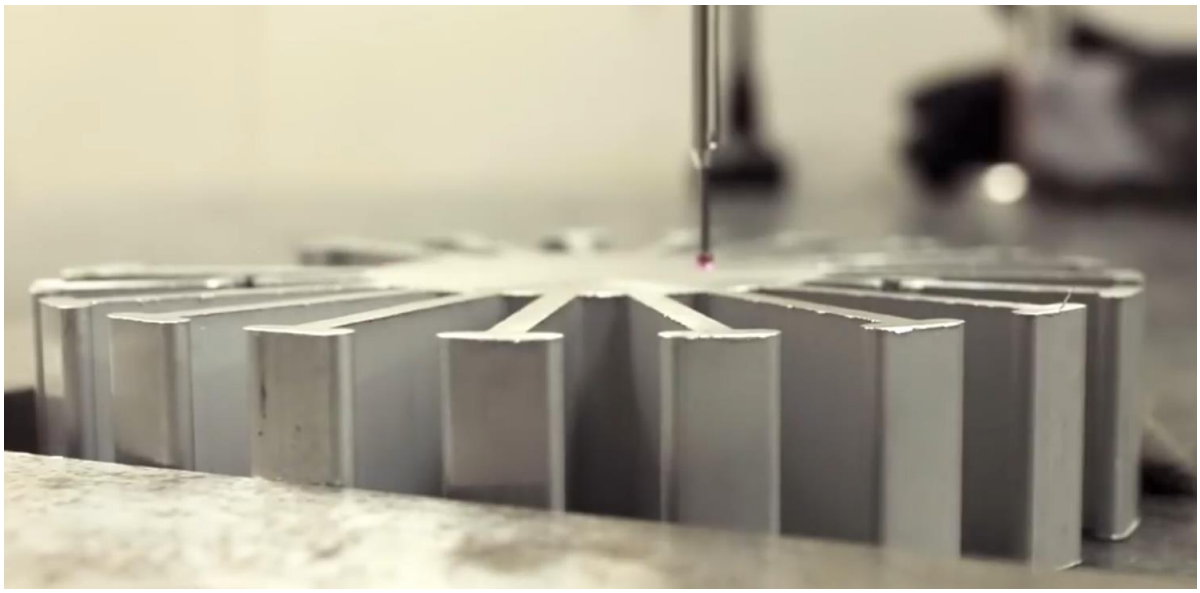
Σχήμα 2 – 76: Ψύξη σε μεγάλη δεξαμενή

Σχήμα 2 – 77: Ψύξη με πεπιεσμένο νερό

Σχήμα 2 – 78: «Τέντωμα» του προϊόντος

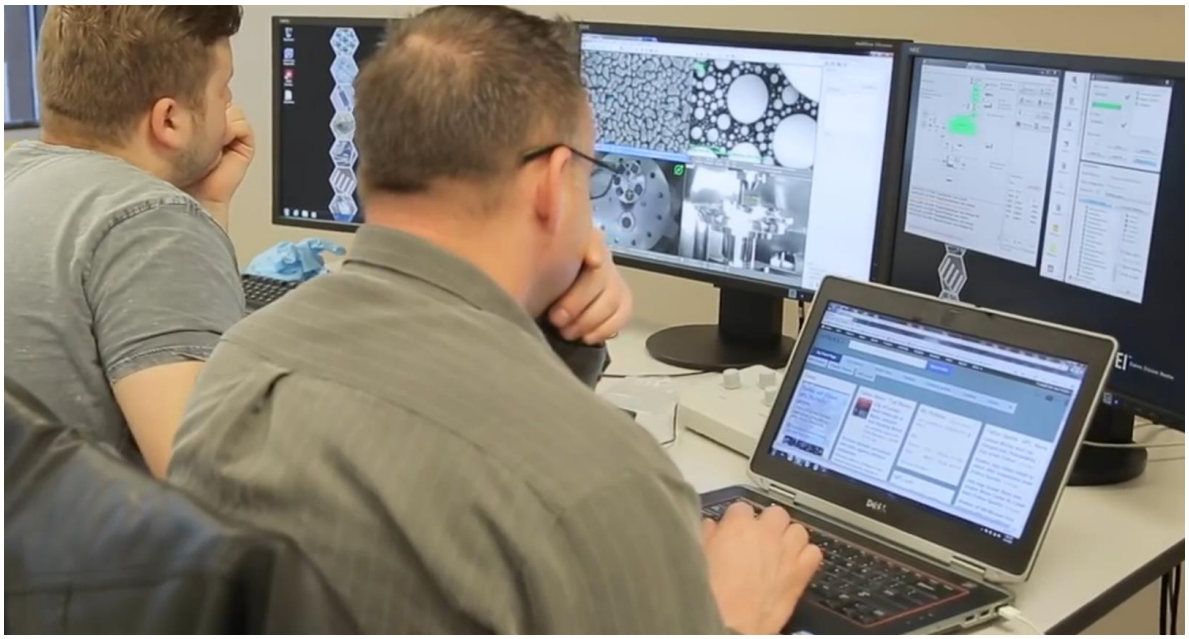
Σχήμα 2 – 79: Κοπή στα επιθυμητά μεγέθη

Σχήμα 2 – 80: Μέτρηση με εργαλεία



Σχήμα 2 – 81: Μέτρηση με ειδικά μηχανήματα ακριβείας

Σχήμα 2 – 82: Υποβολή σε πειράματα για επιβεβαίωση των αντοχών



Σχήμα 2 – 83: Έλεγχος της σύστασης του υλικού

Σχήμα 2 – 84: Ωρίμανση σε φούρνο

Σχήμα 2 – 85: Ομαλοποίηση των μυτερών ακρών

Σχήμα 2 – 86: Μεταφορά στον πελάτη

Υπάρχουν κάποιες αποφάσεις που μπορούμε να πάρουμε σε ό,τι αφορά την επιλογή των διατομών και κραμάτων που θέλουμε, έτσι ώστε να κάνουμε οικονομία και να διευκολύνουμε την διαδικασία. Η ευκολία αυτή συνεπάγεται καλύτερες ιδιότητες τελικού προϊόντος και πιο ακριβείς διαστάσεις.

Αρχικά καλό είναι να πάμε σε μεγάλη ποσότητα και standard διατομές όπως διπλά Τ. Αυτό γιατί, custom διατομές θέλουν custom στόμια τα οποία για να φτιαχτούν απαιτούνται εξειδικευμένες γνώσεις, χρόνος και χρήμα. Όπως σε όλα τα πράγματα, εάν αγοράσεις σε μεγάλες ποσότητες πέφτει η τιμή της μονάδας. Για αυτό και παραγγελίες κάτω από 500kg ή συνολικού μήκους κάτω από 300m είναι απαγορευτικές. Το καλό είναι ότι μικρές ποσότητες standard διατομών υπάρχουν στην αγορά και έτσι μπορούμε να κάνουμε οικονομία, και να γλιτώσουμε την δίμηνη τουλάχιστον αναμονή παραγωγής καινούριας παρτίδας.

Η διατομή μας πρέπει να χωράει σε κύκλο διαμέτρου το πολύ 20cm καθώς είναι πολύ λίγες οι εταιρείες που μπορούν να κάνουν extrusion για μεγαλύτερες. Η συμμετρία και η ισότητα στην κατανομή του υλικού διευκολύνουν την διαδικασία και το τελικό προϊόν βγαίνει πιο κοντά σε αυτό σε αυτό που θέλουμε

από άποψη ιδιοτήτων. Σημαντικό είναι ο εξοπλισμός για την παραγωγή της διατομής μας να είναι ευρέως διαθέσιμος για αυτό και επιλέγουμε για μικρές π.χ. διαμέτρους μικρό εμβαδόν διατομής.

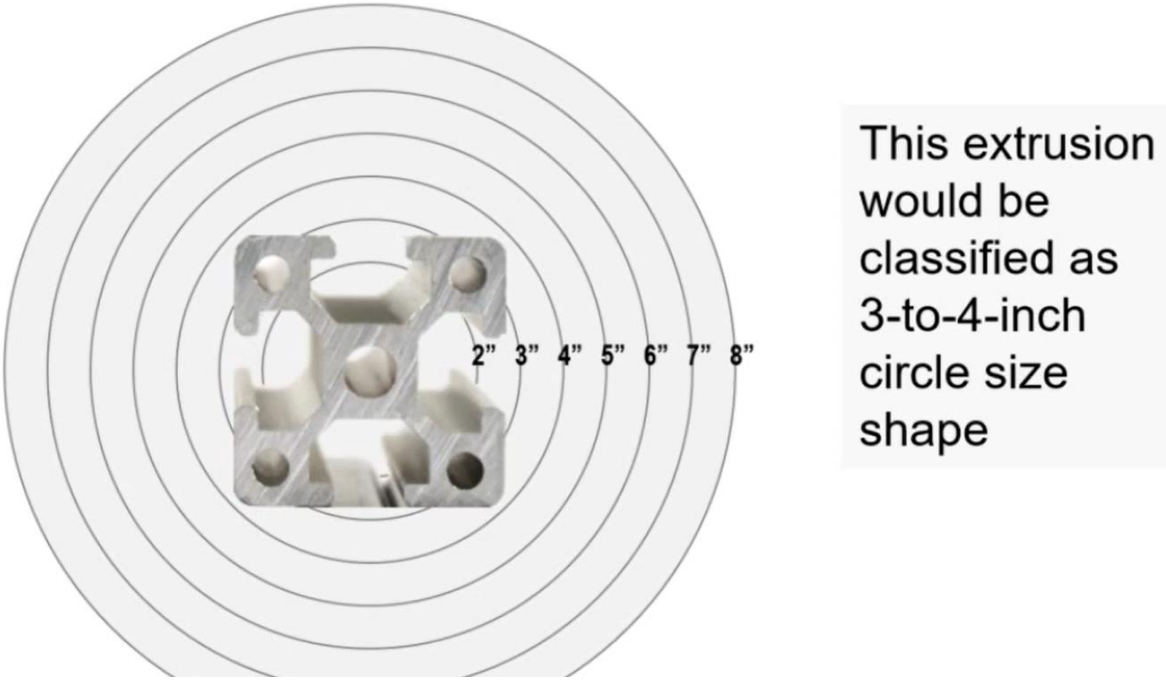
Μπορούμε να σχεδιάσουμε την διατομή με ενσωματωμένες ενισχύσεις για να γλιτώσουμε συγκολλήσεις και κοχλιώσεις, και με οδοντώσεις για να εξοικονομήσουμε υλικό. Επίσης μία πολύπλοκη διατομή μπορούμε να την χωρίσουμε σε τμήματα που συνδέονται με interlocks και βίδες. Πολύ σημαντικό είναι να υπάρχει περιθώριο λάθους για τις διαστάσεις, όσο μεγαλύτερο τόσο οικονομικότερη η παραγωγή. Αυτό γιατί, οι απαιτούμενοι έλεγχοι είναι πολλοί και διαφορετικοί προκειμένου να έχουμε μεγάλη ακρίβεια στις διαστάσεις, και αυτό κοστίζει. Οι σειρές 1xxx, 3xxx, 6xxx είναι ιδανικές για extrusion. Συγκεκριμένα τα κράματα 6061, 6062, 6063 είναι τα ιδανικότερα, κάνουν για κουφώματα και προσόψεις.

Για σωστό extrusion είναι ανάγκη τα πάχη των τοιχωμάτων να είναι τουλάχιστον 1,6mm και παντού ίδια. Για μικρότερα πάχη οι ατέλειες είναι εμφανείς και τα μηχανήματα παραγωγής καταπονούνται πολύ. Ελάχιστο πάχος για το 6063 κράμα, που θεωρείται από τα πιο μαλακά, είναι 1,2mm. Το πάχος αυξάνεται ανάλογα με τη σκληρότητα του κράματος, μεγαλύτερη σκληρότητα συνεπάγεται μεγαλύτερα απαιτούμενα πάχη, με σκοπό ευκολότερη ροή του αλουμινίου.

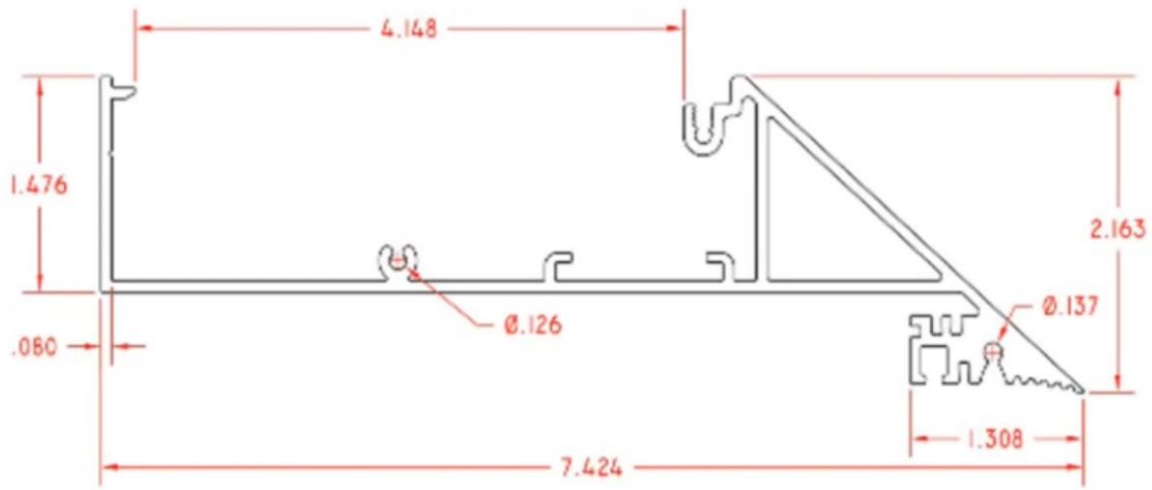
Καλό είναι να μην έχουμε πολλές και μακριές «γλώσσες» - ενισχύσεις στις διατομές μας. Οι κοιλότητες στις διατομές καταπονούν τα μηχανήματα και δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθούν. Παρ' όλα αυτά το 6063 που είναι το καλύτερο για extrusion, κάνει την παραγωγή κοίλων διατομών ευκολότερη. Το ίδιο ισχύει και για το συγκολλήσιμο κράμα της 7xxx, το 7020, με πιο αργό ρυθμό extrusion όμως. Επιπλέον οι κοφτερές άκρες είναι δύσκολες και πρέπει να αποφεύγονται. Κράματα της 2xxx και τα ισχυρά της 7xxx είναι δύσκολα, και θέλουν και κρύωμα σε διαμήκη δεξαμενή, την οποία ενδέχεται να μην έχει η εταιρεία της επιλογής μας.

Σχήμα 2 – 87: Standard διατομές αλουμινίου

Σχήμα 2 – 88: Custom διατομές αλουμινίου



Σχήμα 2 – 89: Ταίριασμα της διατομής με το κατάλληλο μέγεθος εξοπλισμού, 2inches = 5cm.



Σχήμα 2 – 90: Ασύμμετρη διατομή, δύσκολη για extrusion

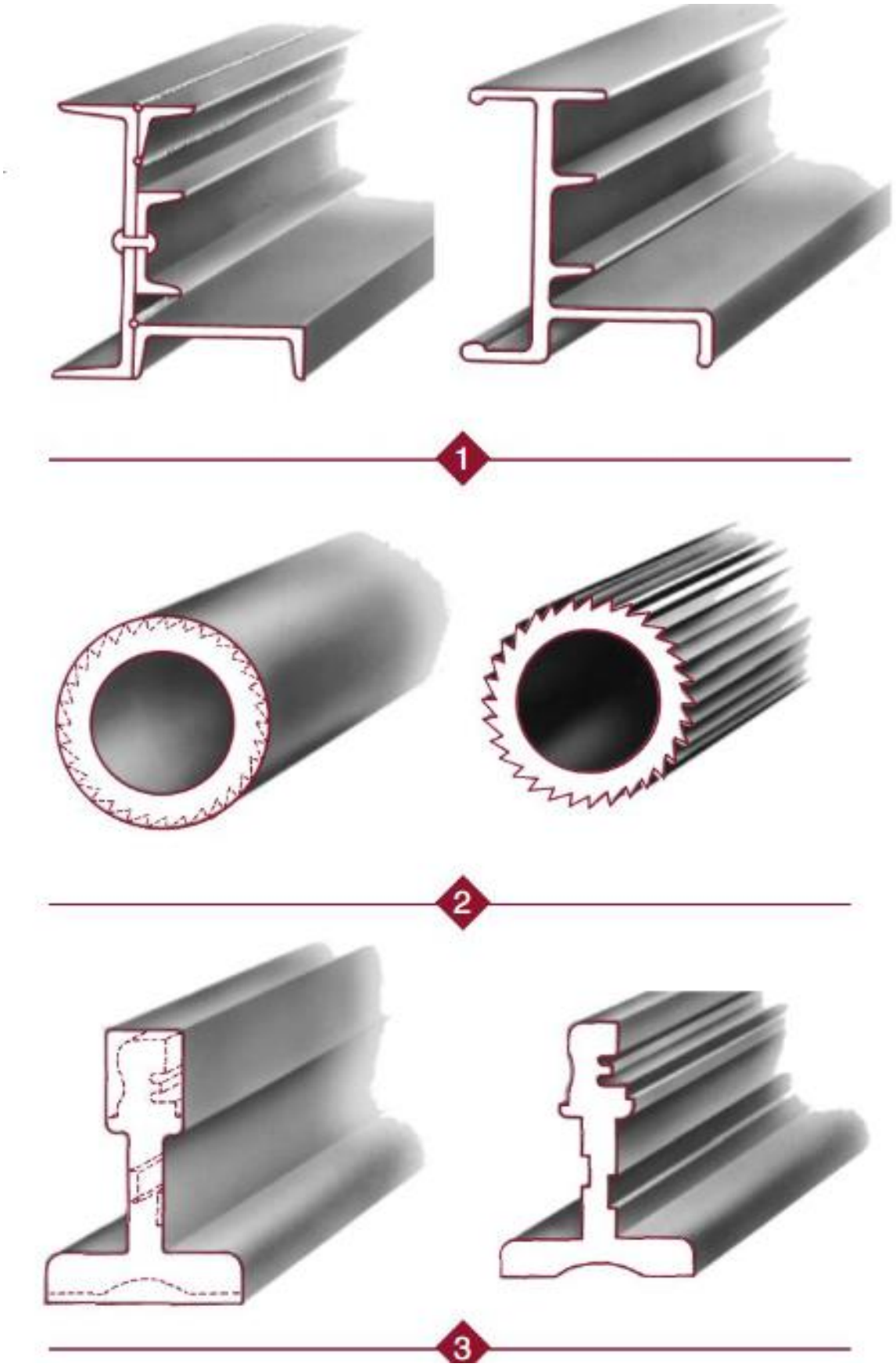
Some Limitations of the Aluminum Extrusion Process

Press Availability Chart	Circumscribed Circle Size in inches					Corresponding Profile weight (lbs/ft)	
Cross Section Area in sq inches	<1	1 to 7	7 to 10	10 to 14	>14	Min	Max
<.050	L	x	x	x	x	-	0.06
.050 to .100	G	G	L	x	x	0.06	0.12
.100 to 1.0	W	W	L	x	x	0.12	1.18
1.0 to 2.5	x	W	W	L	x	1.18	2.94
2.5 to 10	x	W	W	G	L	2.94	11.76
>10	x	x	W	G	L	11.76	-

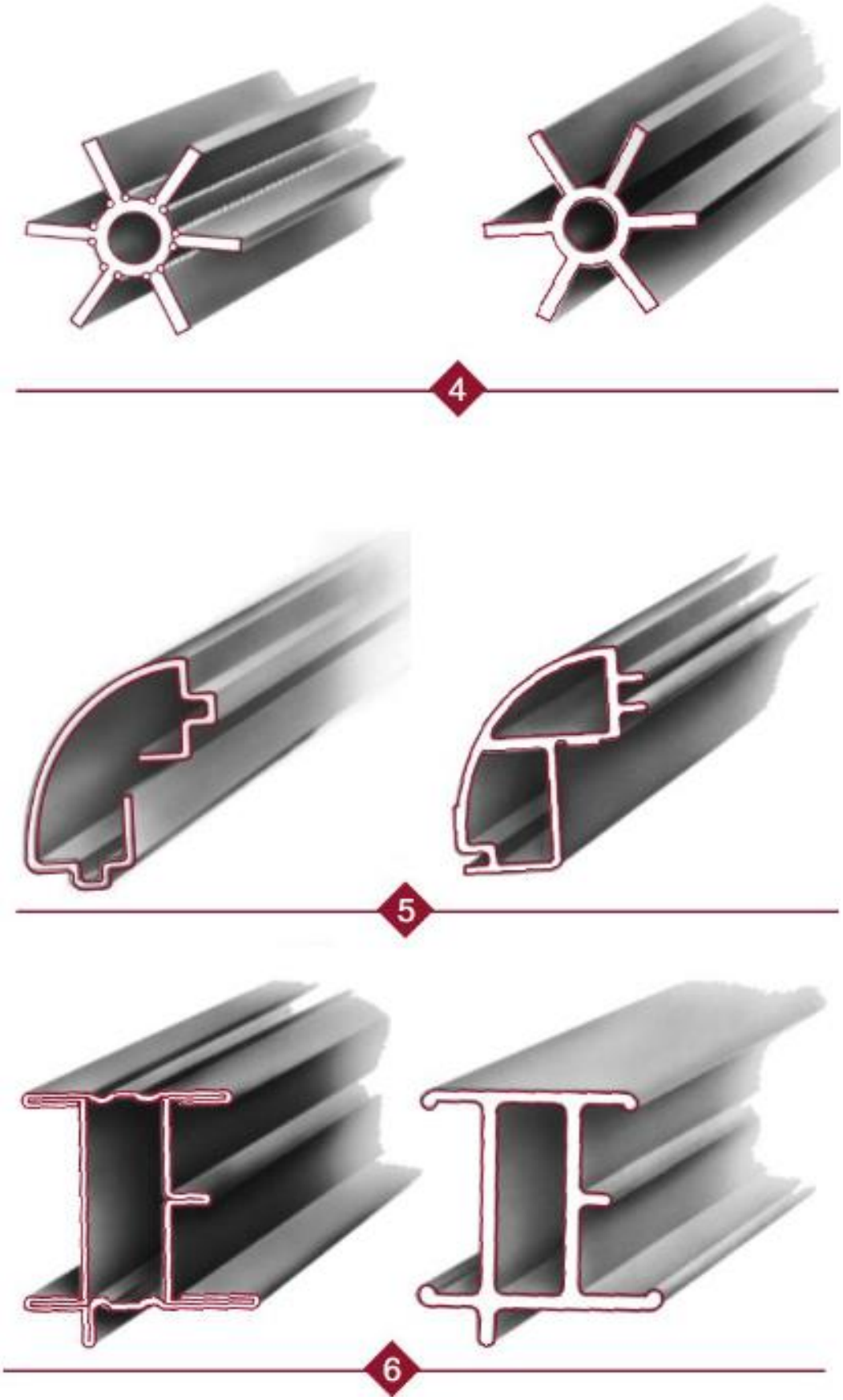
x	Not available
L	Limited Availability
G	Generally Available
W	Widely Available

NOTE:
There are many presses available with up to 7" diameter containers
There are fewer presses available with 7" to 10" diameter containers
There are even fewer presses available with 10" to 14" diameter containers
There are very few presses available with greater than 14" diameter containers

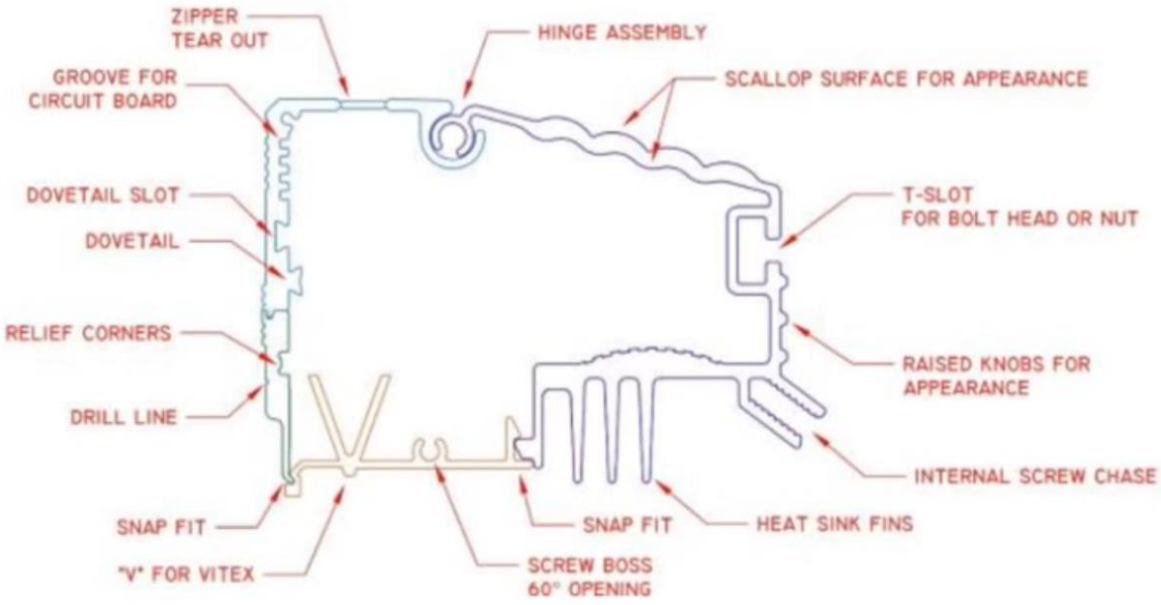
Σχήμα 2 – 91: Διαθεσιμότητα εξοπλισμού ανάλογα με την επιφάνεια της διατομής και τη διάμετρο του κύκλου στο οποίο περιέχεται, 1inches = 2,5cm, 1sq inches = 6,5cm^2, 1lbs/ft = 1,5kg/m



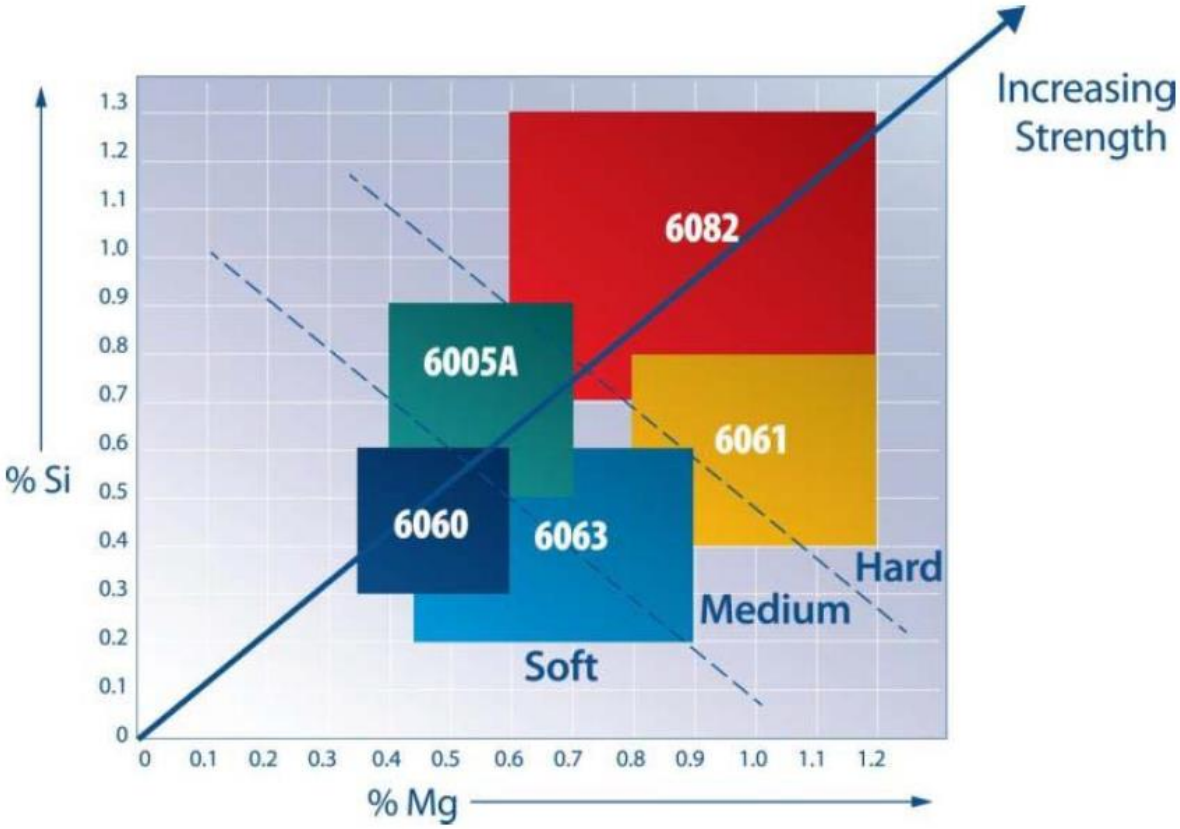
Σχήμα 2 – 92: Εξοικονόμηση υλικού, και συγκολλήσεων για ενισχύσεις



Σχήμα 2 – 93: Απλότητα των διατομών και στρογγυλεμένες άκρες

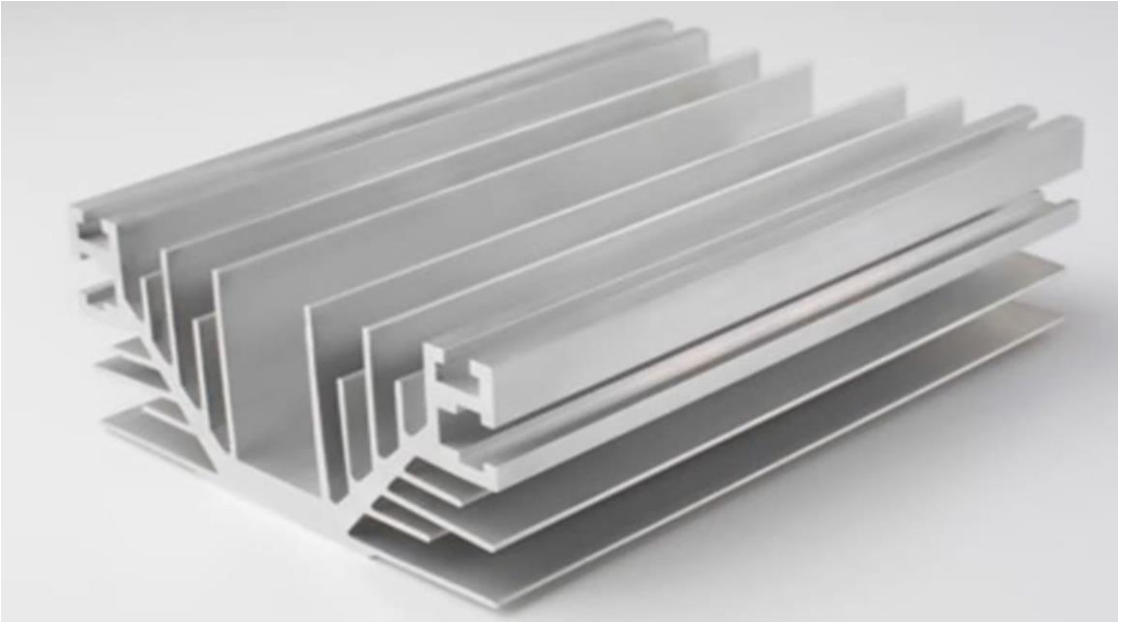


Σχήμα 2 – 94: Διαχωρισμός μιας πολύπλοκης διατομής σε πιο απλές

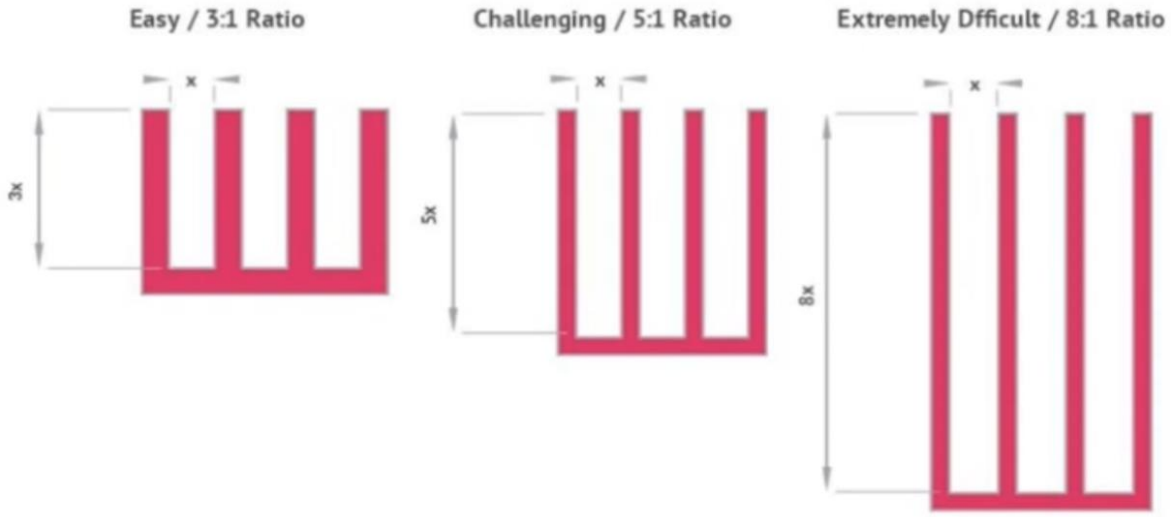


Σχήμα 2 – 95: Διάγραμμα σκληρότητας και απαιτούμενης πίεσης για τα καλύτερα και πιο συνήθη κράματα extrusion

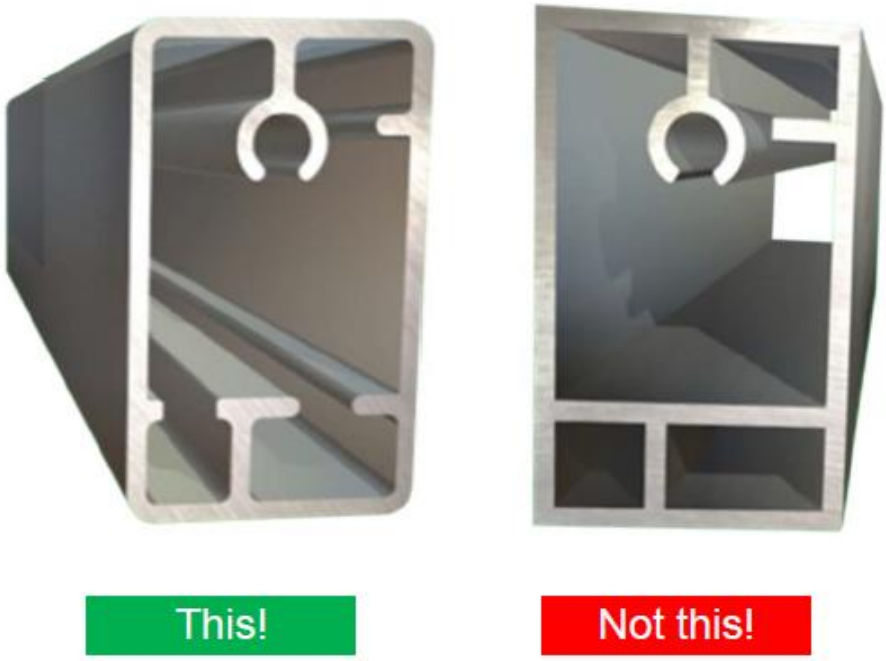
Σχήμα 2 – 96: Διατομή με ίσα σχεδόν πάχη τοιχωμάτων, ευκολία στη κατασκευή



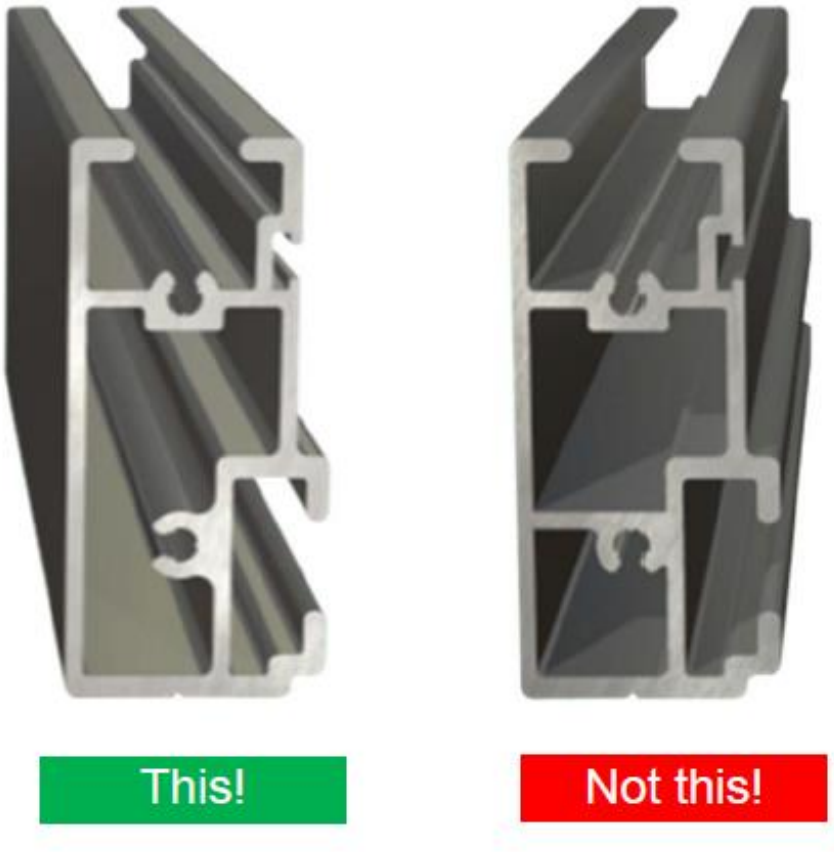
Σχήμα 2 – 97: Διατομή με πολλές «γλώσσες» - ενισχύσεις, δυσκολία στη κατασκευή



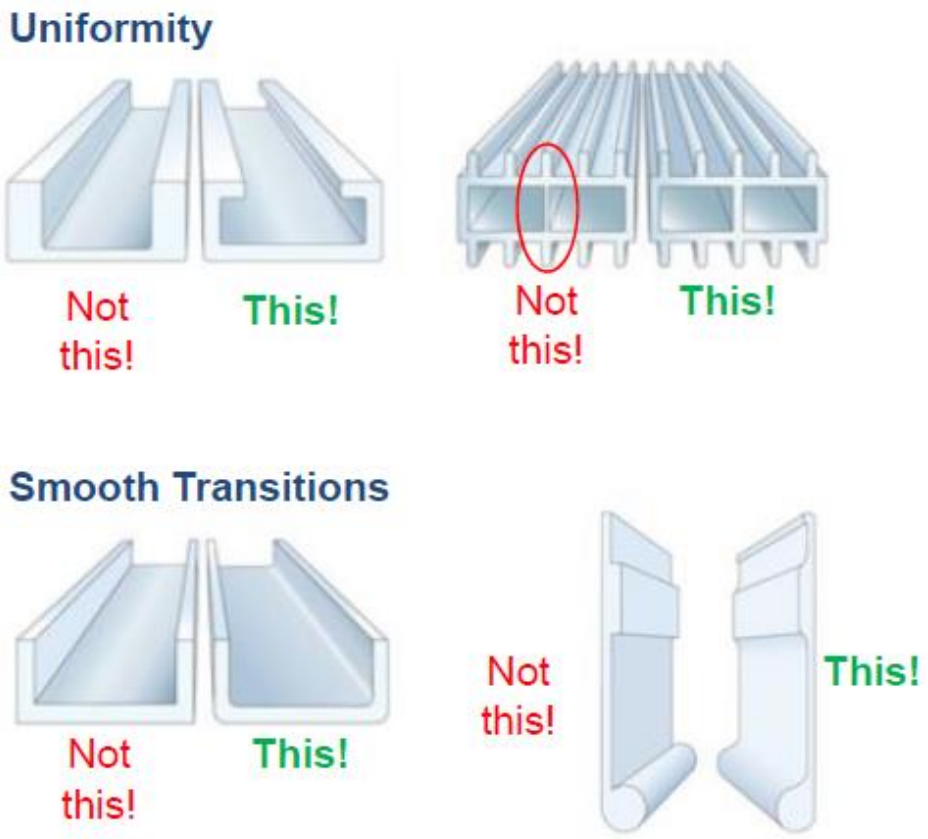
Σχήμα 2 – 98: Ευκολία ή δυσκολία στη παραγωγή ανάλογα με τα μήκη των ενισχύσεων



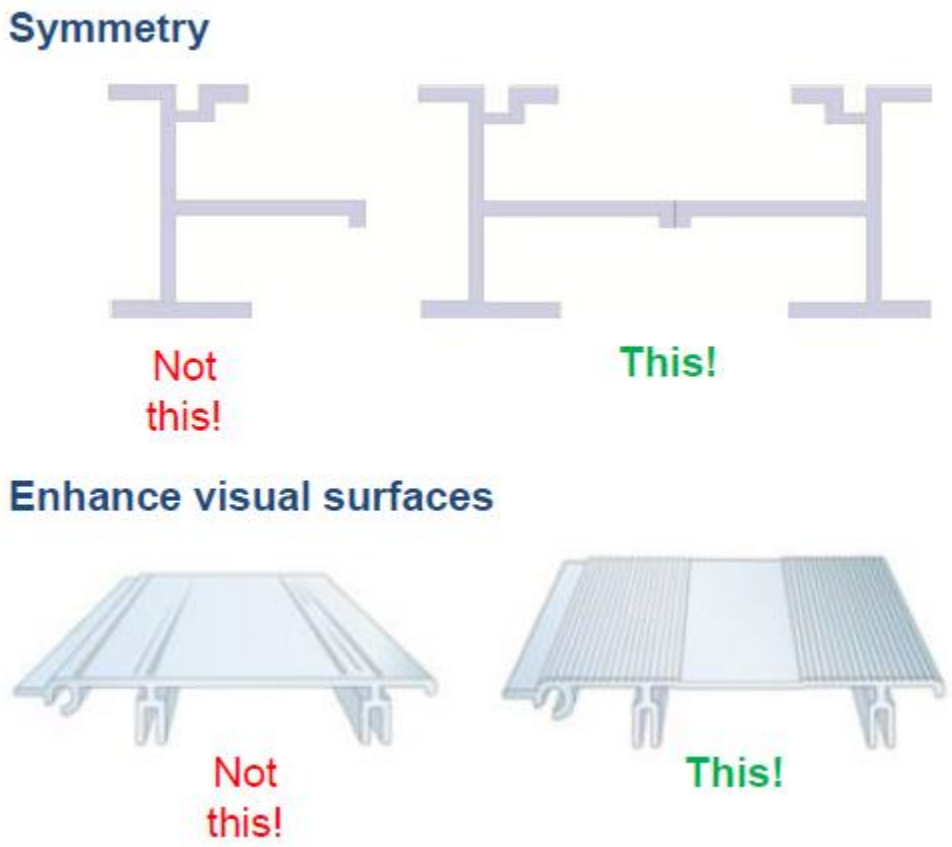
Σχήμα 2 – 99: Αποφυγή αιχμηρών γωνιών



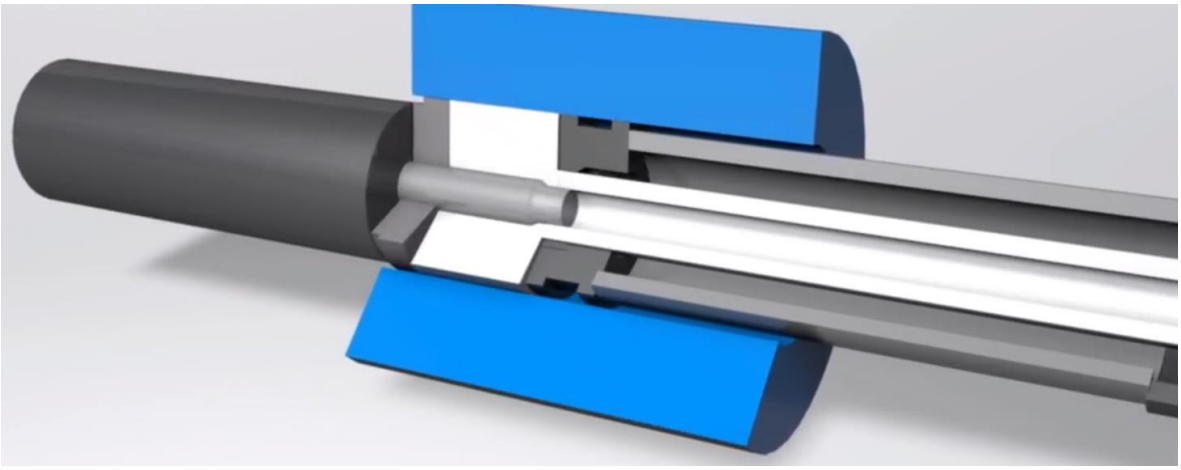
Σχήμα 2 – 100: Αποφυγή πολλαπλών κοιλοτήτων



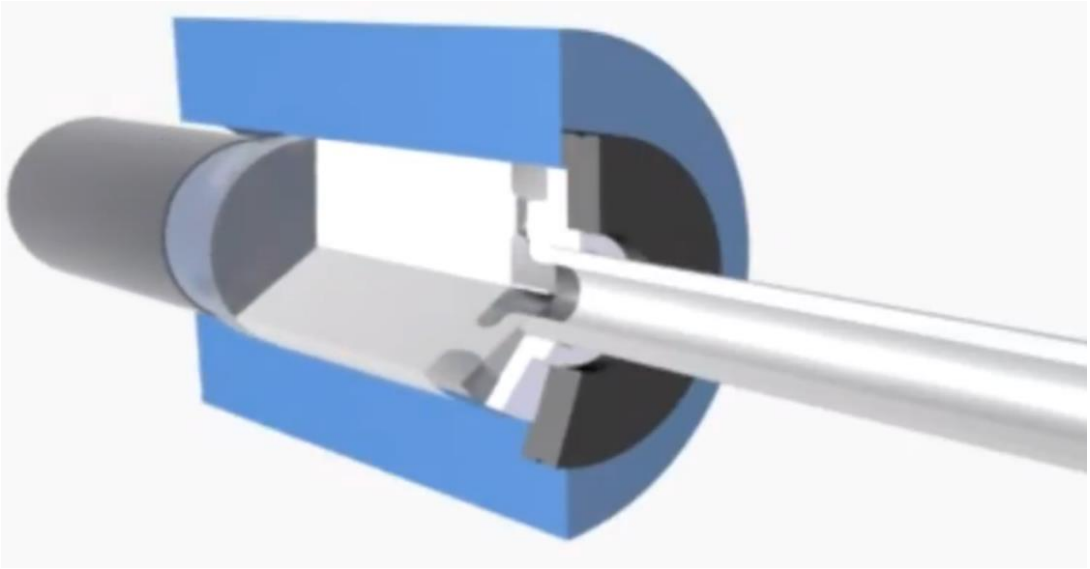
Σχήμα 2 – 101: Περιορισμοί μέρος 1



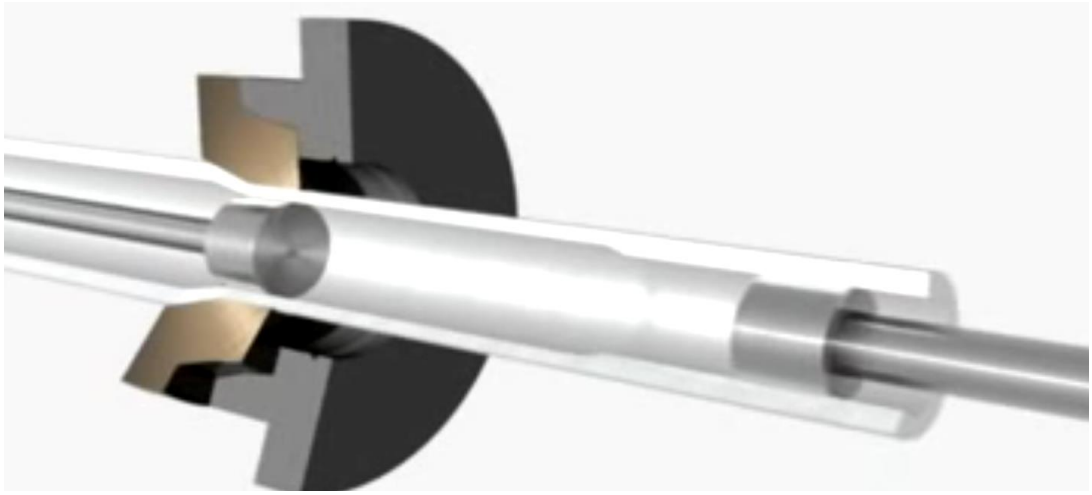
Σχήμα 2 – 102: Περιορισμοί μέρος 2



Σχήμα 2 – 103: Κοίλη διατομή με indirect extrusion



Σχήμα 2 – 104: Κοίλη διατομή με direct extrusion



Σχήμα 2 – 105: Περαιτέρω επεξεργασία κοίλης διατομής

Σχήμα 2 – 106: Ποικιλία extruded διατομών

Η επόμενη μέθοδος ονομάζεται casting και πραγματοποιείται με την βοήθεια μεταλλικών καλουπιών ή άμμου. Είναι η διαδικασία στην οποία ρίχνουμε λιωμένο αλουμίνιο σε μία τρύπα στην οροφή του καλουπιού το οποίο είναι σαν κιβώτιο, φτιαγμένο από άμμο ή μέταλλα όπως σίδηρος, χαλκός, μπρούντζος, αλουμίνιο, γραφίτης, καρβίδιο του πυριτίου, αλλά και από άλλα μέταλλα με μεγάλη θερμική αγωγιμότητα και πυκνότητα. Το λιωμένο αλουμίνιο ρέει στις κοιλότητες του καλουπιού με τη βοήθεια της βαρύτητας μονάχα. Στα μεταλλικά καλούπια το αλουμίνιο ψύχεται γρηγορότερα, έχει καλύτερη εξωτερική επιφάνεια, μεγαλύτερη ακρίβεια διαστάσεων, ταχύτερη παραγωγή σε σχέση με την άμμο, κοστίζει όμως. Συμφέρει για μεγάλες ποσότητες, ελάχιστη παραγγελία 1000 κομμάτια. Επίσης τα μεταλλικά καλούπια μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν αρκετές φόρες σε αντίθεση με την άμμο που είναι κανονικά μίας χρήσης. Τα αντικείμενα που παράγονται με αυτή τη μέθοδο φτάνουν βάρη μέχρι 180kg το ένα.

Τα βήματα παραγωγής με μεταλλικά καλούπια είναι απλά. Ρίχνουμε το λιωμένο αλουμίνιο στο ειδικά κατασκευασμένο κιβώτιο και μετά από συγκεκριμένο χρόνο ανοίγει και βγάζουμε το προϊόν. Βιδώνουμε το κιβώτιο στην αρχική του κατάσταση αφού απομακρύνουμε τα υπολείμματα και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία.

Στα καλούπια από άμμο έχουμε άμμο πάνω και κάτω, και στη μέση έναν πυρήνα ο οποίος έχει το σχήμα του προϊόντος μας. Το λιωμένο αλουμίνιο ρέει και καταλαμβάνει την θέση του πυρήνα ο οποίος είναι φτιαγμένος από την ίδια άμμο αλλά με τρόπο που μπορεί να διατηρήσει το σχήμα του καθώς τον κρατάμε στο χέρι μας. Είναι όμως αρκετά ευαίσθητο και θέλει προσοχή. Η διαδικασία αποτελείται συνήθως από τρία βήματα. Πρώτα το κάτω μισό του καλουπιού από άμμο, μετά το πάνω μισό και έπειτα η τοποθέτηση του πυρήνα. Είναι ουσιαστικά δύο τελάρα με κολλημένους πάτους και μία σχάρα που παρεμβάλλεται μεταξύ τους. Βάζουμε άμμο από κάτω και τη πιέζουμε με ένα καπάκι, γυρνάμε ανάποδα και βάζουμε άμμο και από πάνω, πιέζουμε καλά και από τις δύο μεριές. Χωρίζουμε στη μέση το κατασκεύασμα, βγάζουμε τα μεταλλικά τελάρα. Στη σχάρα βάζουμε τους πυρήνες και τοποθετούμε προσεκτικά το πάνω μισό της άμμου. Τα εν λόγω τελάρα είναι ειδικές μεταλλικές κατασκευές με αποσπόμενα τοιχώματα και πάτους.

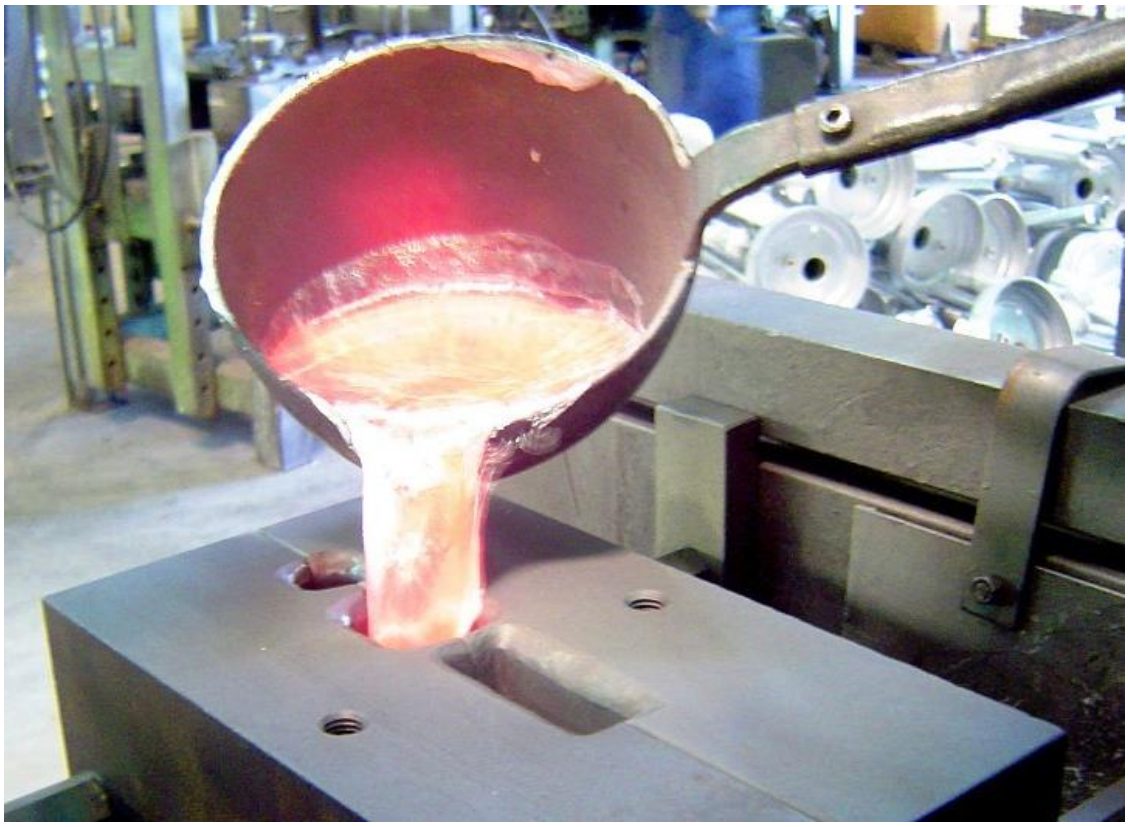
Τα καλούπια από άμμο είναι φθηνότερη μέθοδος, η ελάχιστη παραγγελία όμως μπορεί να είναι και 10 κομμάτια, τα οποία μπορούν να φτάσουν βάρη της τάξης των 3000kg ανά αντικείμενο.

Γενικά οι διαστάσεις δεν είναι τόσο ακριβείς και με τις δύο μεθόδους. Τα προϊόντα είναι ψαθυρά λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε πυρίτιο, το οποία έχει σκοπό να διατηρεί το αλουμίνιο σε υγρή μορφή. Η ονομασία των προϊόντων είναι της μορφής 1xx.x, και τα προϊόντα της μεθόδου δεν κάνουν για χρήση σε κτίρια. Κάποια κράματα είναι συμβατά με έναν εκ των δύο τρόπων, μόνο για άμμο ή μόνο για καλούπια. Τα κράματα 4300 O, 4330 O, 4420 O είναι καλά για casting, το O σημαίνει χωρίς καμία επεξεργασία. Οι ζάντες αυτοκινήτων είναι ένα αρκετά σύνηθες προϊόν casting.

1xx.x	κομμάτια μηχανών
2xx.x	από τις πιο δυνατές σειρές, εξαρτήματα αεροσκαφών και κινητήρων
3xx.x	πιστόνια μηχανών, αντέχουν την απώλεια υλικού με τη πάροδο του χρόνου
4xx.x	γραφομηχανές
5xx.x	ό,τι είναι κοντά στη θάλασσα, δυσκολία στη κατασκευή όμως
6xx.x	-------
7xx.x	κινούμενα μέλη
8xx.x	ιδανικό για bearings (fidget spinner)
9xx.x	ειδικές περιπτώσεις

Καλό είναι να ζητάμε έλεγχο των προϊόντων casting. Υπάρχουν δύο τρόποι, με υπερήχους και με χρώμα. Οι υπέρηχοι θέλουν εξειδικευμένο προσωπικό και χρησιμοποιούνται για την επιθεώρηση συγκολλήσεων έργων μεγάλης σημασίας, όπως σωλήνες μεταφοράς καυσίμων. Η επιθεώρηση με χρώμα είναι πολύ φθηνή και εύκολη και μπορεί να γίνει από τον καθένα.

Σχήμα 2 – 107: Casting με άμμο, sand casting



Σχήμα 2 – 108: Casting με καλούπια, chill casting

Σχήμα 2 – 109: Το κάτω μισό του καλουπιού

Σχήμα 2 – 110: Προσθήκη άμμου στο κάτω μισό του καλουπιού

Σχήμα 2 – 111: Το πάνω μισό του καλουπιού

Σχήμα 2 – 112: Προσθήκη άμμου στο πάνω μισό του καλουπιού

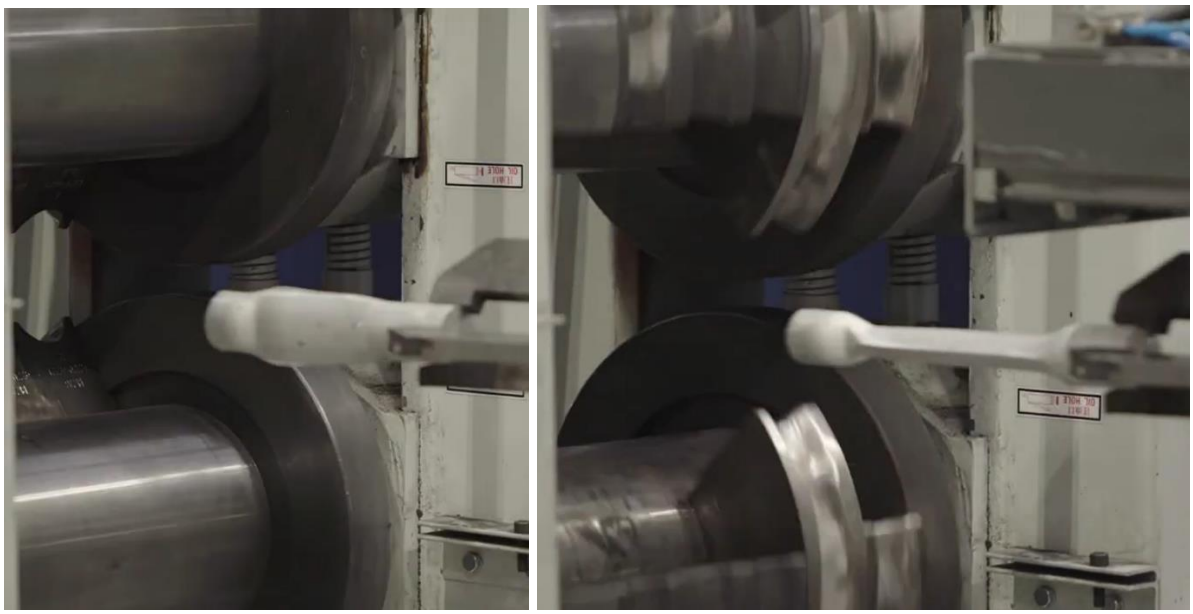
Σχήμα 2 – 113: Τοποθέτηση των πυρήνων

Σχήμα 2 – 114: Το ολοκληρωμένο καλούπι χωρίς τα μεταλλικά τελάρα, με μία τρύπα στην οποία θα ρίξουμε το λιωμένο αλουμίνιο

Σχήμα 2 – 115: Διαδικασία έκχυσης του αλουμίνιου

Σχήμα 2 – 116: Τελικό προϊόν sand casting

Μετά έχουμε την μέθοδο forging, για «χοντρά» κομμάτια αλουμινίου και forming, για φύλλα αλουμινίου. Καταλλήλως διαμορφωμένα και επεξεργασμένα κομμάτια και φύλλα αλουμινίου τοποθετούνται μεταξύ σταθερής ή ελαφρώς μετακινούμενης κάτω πλατφόρμας και από πάνω μία πρέσα τα πιέζει προκειμένου να σχηματίσουν το επιθυμητό προϊόν. Η πίεση της πρέσας ισοδυναμεί με χιλιάδες τόνους και οι επιφάνειες πάνω και κάτω είναι τα δύο μισά του καλουπιού. Τα προϊόντα ψύχονται σε δεξαμενές νερού αμέσως μετά την παραγωγή τους. 1000 κομμάτια είναι μία καλή ελάχιστη παραγγελία.



Σχήμα 2 – 117: Αρχική επεξεργασία προϊόντος forging

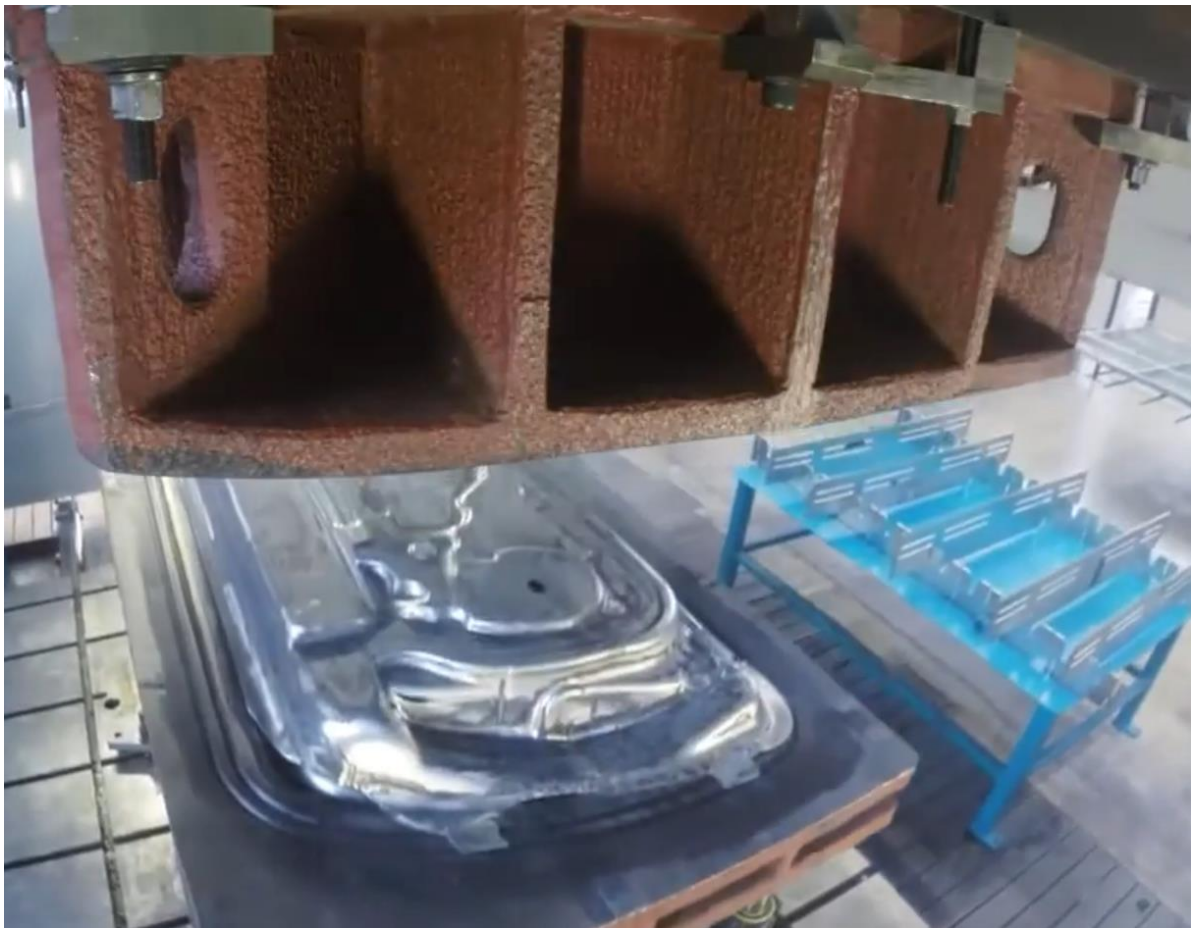
Σχήμα 2 – 118: Προϊόν πριν το πέρασμα της πρέσας

Σχήμα 2 – 119: Προϊόν μετά το πέρασμα της πρέσας

Σε ό,τι αφορά το forming η διαδικασία είναι ίδια. Εδώ όμως το σχήμα και το πάχος του φύλλου παίζουν μεγάλο ρόλο στην οικονομία υλικού που θα κάνουμε, καθώς και στην επιτυχία της διαδικασίας. Αν το φύλλο δεν έχει το κατάλληλο πάχος και σχήμα ο τρόπος με τον οποίο θα «τραβηχτεί» όταν το πιέσει η πρέσα μπορεί να αφήσει κενά στο κέλυφος που θα δημιουργηθεί. Και εδώ 1000 κομμάτια ελάχιστη παραγγελία.

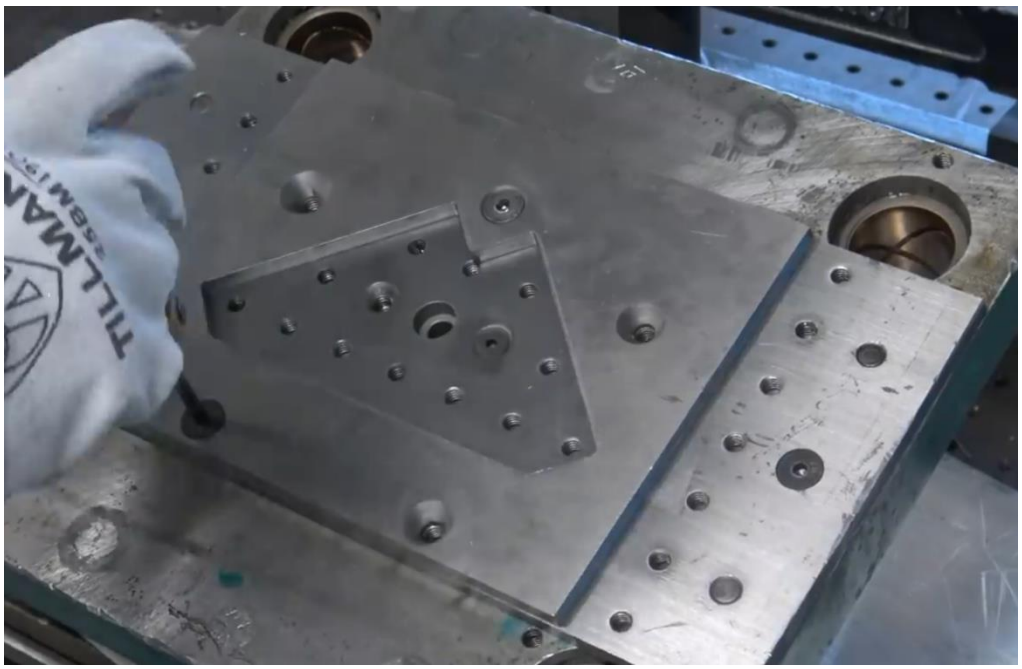
Σχήμα 2 – 120: Τοποθέτηση κατάλληλα διαμορφωμένου φύλλου κάτω από την πρέσα

Σχήμα 2 – 121: Πρεσάρισμα του φύλλου

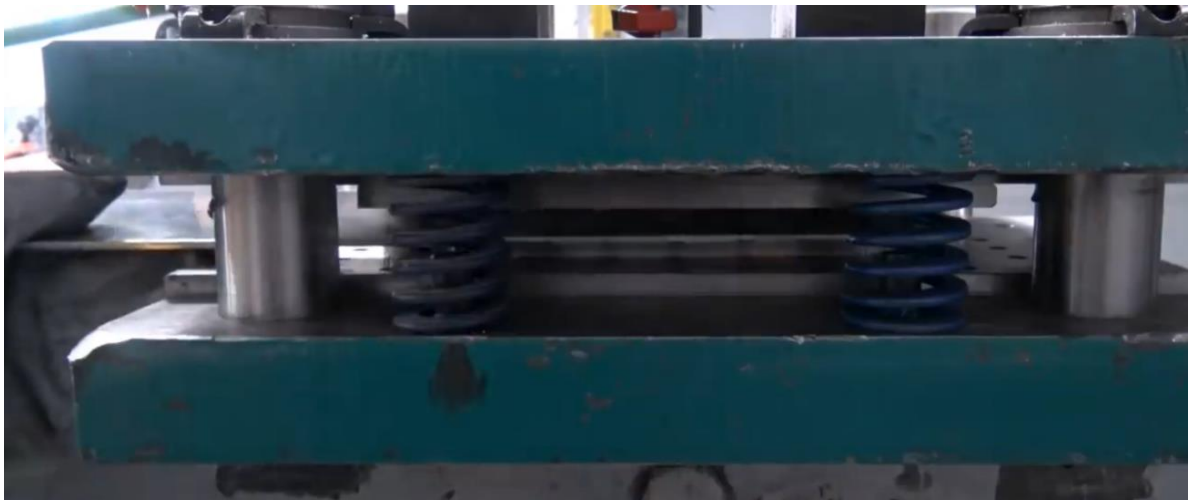


Σχήμα 2 – 122: Τελικό κέλυφος

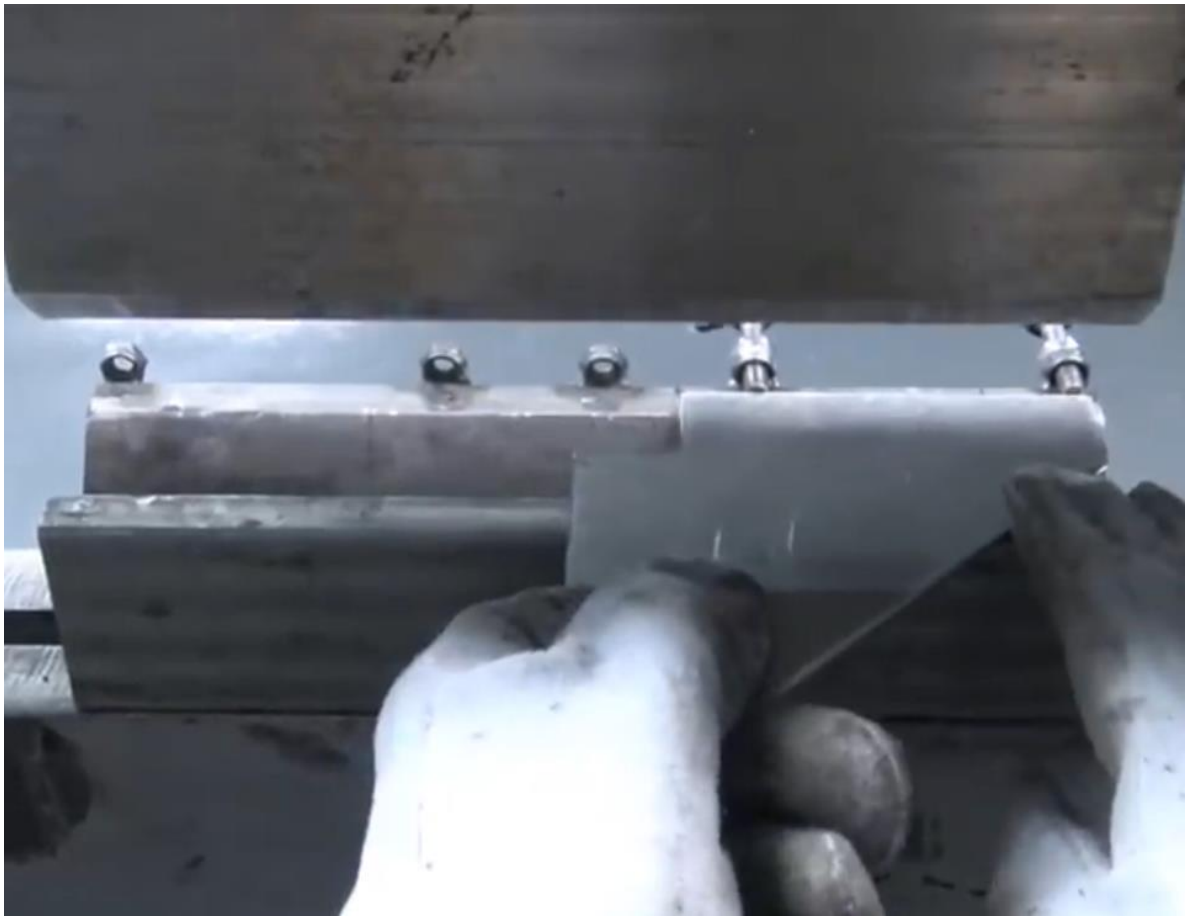
Επίσης forming μπορεί να γίνει και με το χέρι, τοποθετώντας ένα κομμάτι φύλλου ή πλάκας σε ειδικές μηχανές οι οποίες το τσακίζουν στο επιθυμητό σχήμα. Μπορούν να γίνουν και τρύπες διαφορετικών μεγεθών, punching.



Σχήμα 2 – 123: Καλούπι για την κοπή κομματιού του συγκεκριμένου σχήματος



Σχήμα 2 – 124: Κοπή του επιθυμητού σχήματος

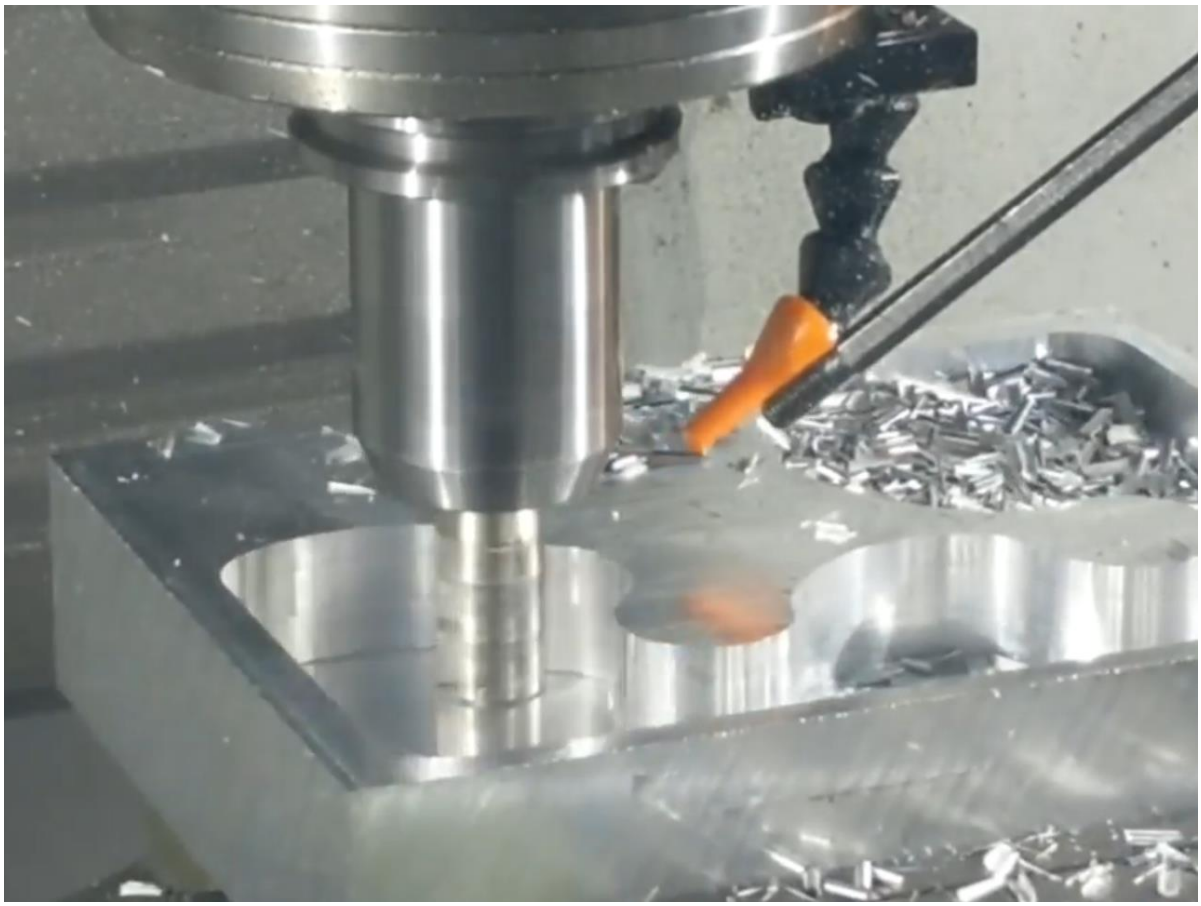


Σχήμα 2 – 125: Τσάκισμα του κομματιού με ειδική μηχανή σε συγκεκριμένο σημείο με το χέρι

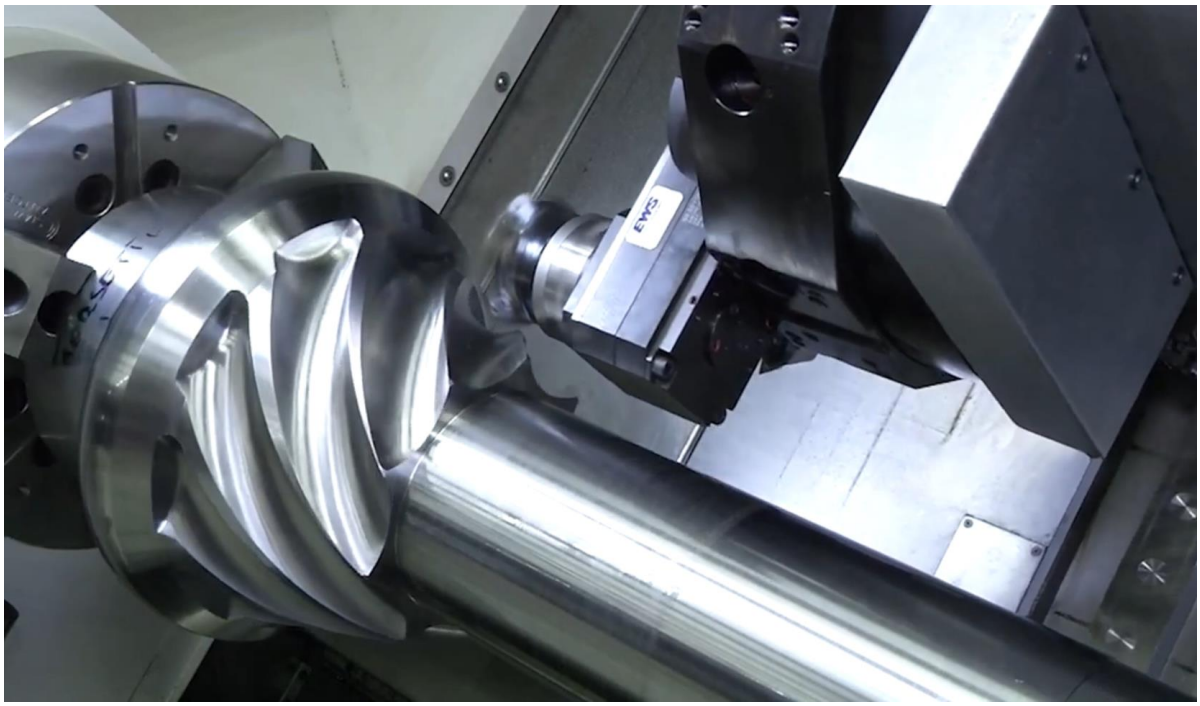
Σχήμα 2 – 126: Αποτέλεσμα μετά από δύο τσακίσματα

Μία άλλη αρκετά ξεχωριστή μέθοδος παραγωγής είναι το machining – milling. Εδώ, περιστρεφόμενες κεφαλές μετατρέπουν κύβους και ράβδους αλουμινίου σε ό,τι μπορεί να φανταστεί κάποιος. Από μικρά αυτοκινητάκια τύπου hot – wheels μέχρι κιβώτια ταχυτήτων και άξονες αυτοκινήτων, καθώς και οτιδήποτε άλλο θελήσει κάποιος πελάτης. Προϊόντα για πολύ εξειδικευμένες χρήσεις και με τεράστια ακρίβεια στις διαστάσεις.

Σχήμα 2 – 127: Προϊόν machining- milling



Σχήμα 2 – 128: Προϊόν machining- milling



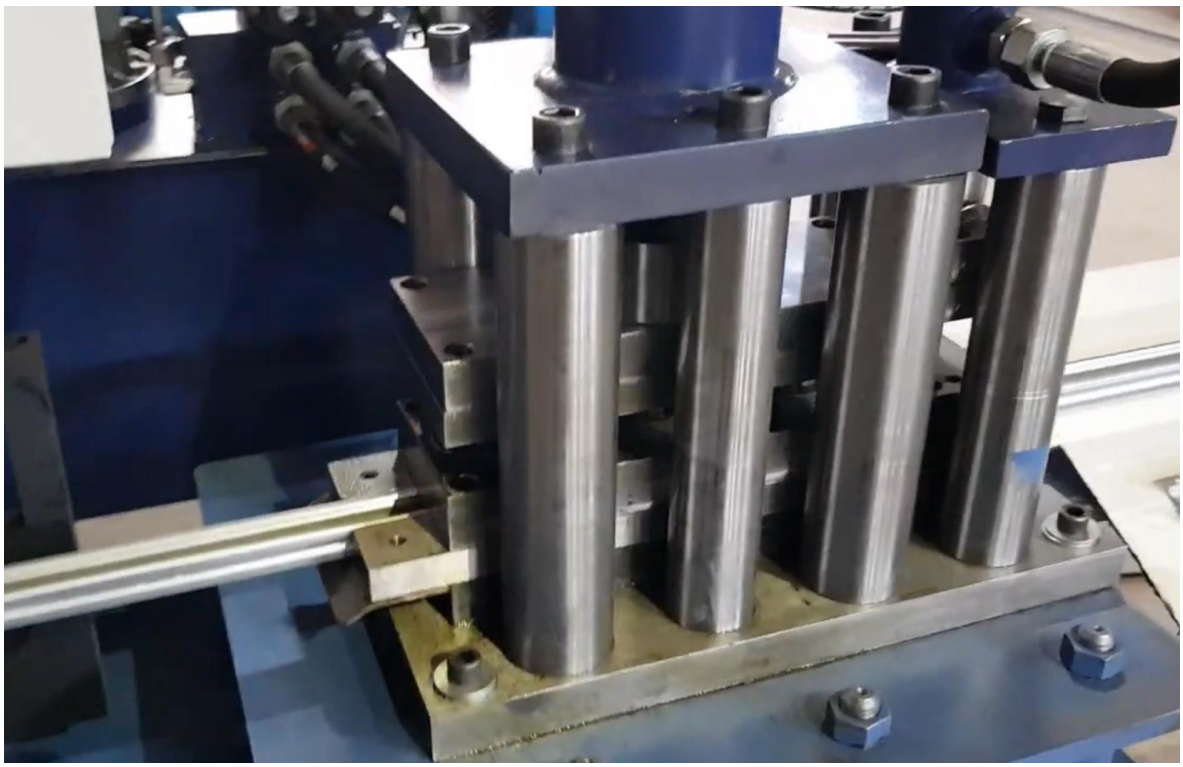
Σχήμα 2 – 129: Προϊόν machining- milling

Μια άλλη μέθοδος είναι το cold roll forming. Φύλλο αλουμινίου διέρχεται από διαφορετικά rollers παίρνοντας το επιθυμητό σχήμα. Μπορούμε να φτιάξουμε διατομές πλάτους μερικών εκατοστών αλλά και μερικών μέτρων, από 6cm μέχρι και 3m πλάτος. Τα πάχη φύλλου και πλάκας που χρησιμοποιούνται

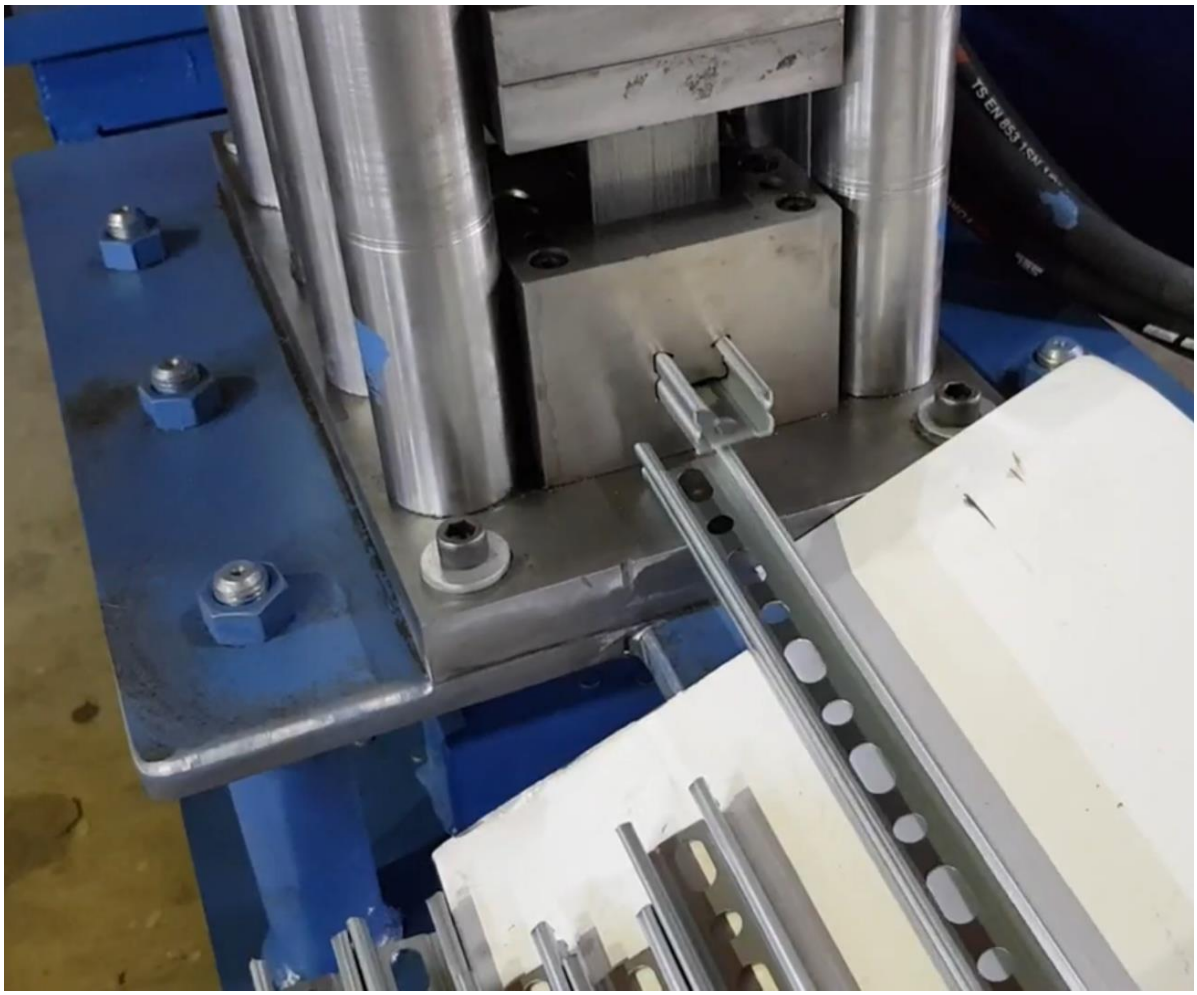
σε αυτή την μέθοδο είναι 0.15mm – 6.3mm (κάτω από 0.15mm, αλουμινόχαρτο) και 6.25mm – 200mm αντίστοιχα. Η γωνία τσακίσματος του φύλλου καλό είναι να είναι αμβλεία γιατί αλλιώς υπάρχει κίνδυνος ρωγμών. Τα κράματα 6082, 6061, 7020 είναι καλά για φύλλο και τα 5083, 5754 είναι ιδανικά για φύλλο. Τα προϊόντα cold rolling των σειρών 2xxx, 7xxx χρησιμοποιούνται σε αεροπλάνα και διαστημόπλοια αντίστοιχα. Για τα πιο εξωτικά αυτά κράματα η παραγγελία συμφέρει να είναι της τάξης των 30tn – 50tn. Παρ' όλο που υπάρχει δυνατότητα για διατομές 3m πλάτος στην αγορά 2m είναι το μέγιστο πλάτος για sheet και plate προϊόντα, και 10m με 12m μέγιστο μήκος. Για πλάτη 0.5mm – 6mm έχουμε aluminum sheet ενώ για >6mm aluminum plate, όπως είπαμε. Παρ' όλα αυτά ό,τι είναι κοντά στα 6mm το λέμε shate.

Σχήμα 2 – 130: Cold roll forming στενής διατομής

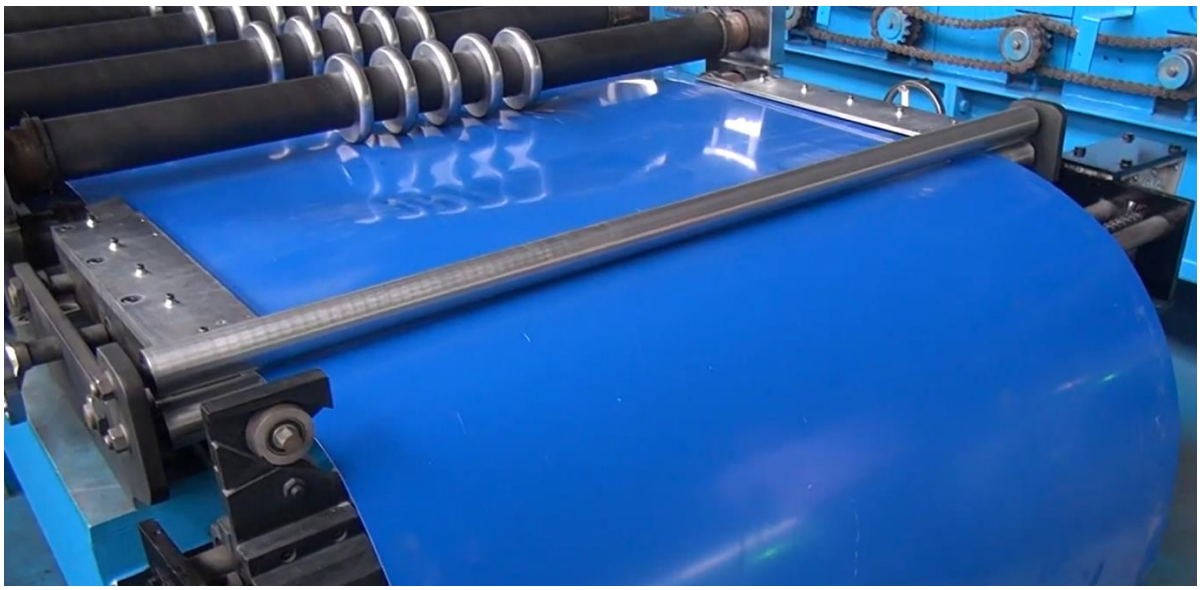
Σχήμα 2 – 131: Rollers για στενές διατομές



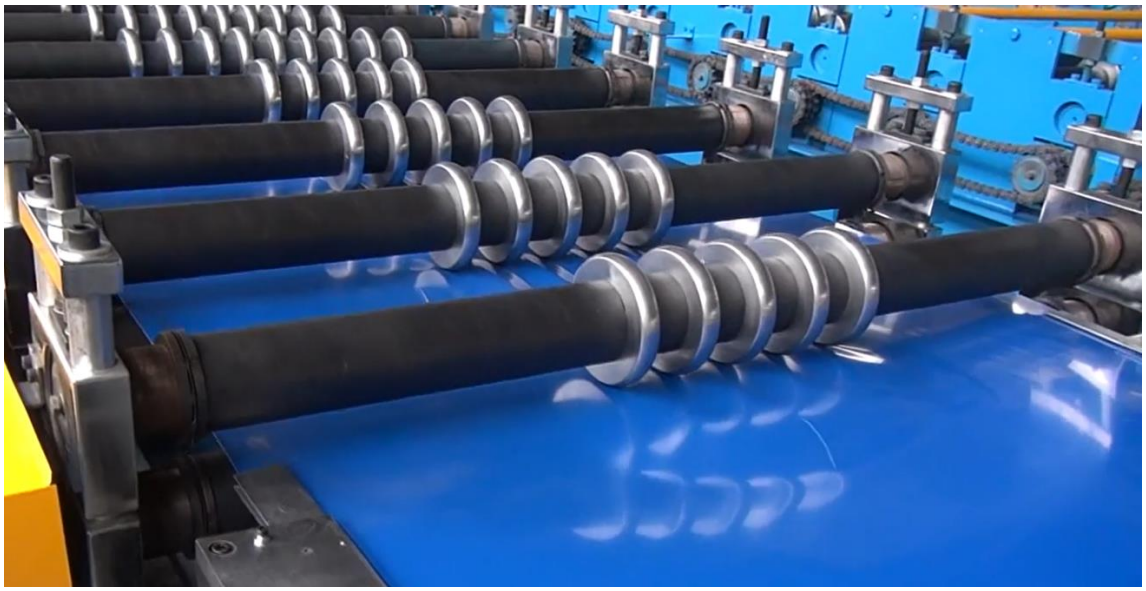
Σχήμα 2 – 132: Μηχάνημα για τρύπες



Σχήμα 2 – 133: Κοπή σε επιθυμητά μεγέθη cold rolled στενής διατομής



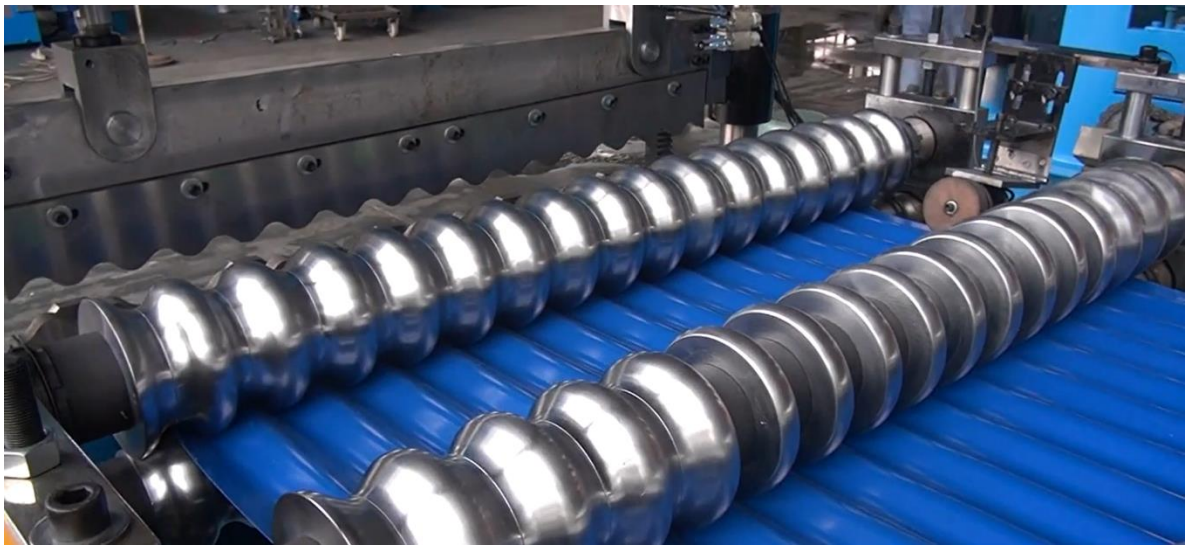
Σχήμα 2 – 134: Cold roll forming πλατιάς διατομής



Σχήμα 2 – 135: Cold roll forming πλατιάς διατομής

Σχήμα 2 – 136: Cold roll forming πλατιάς διατομής

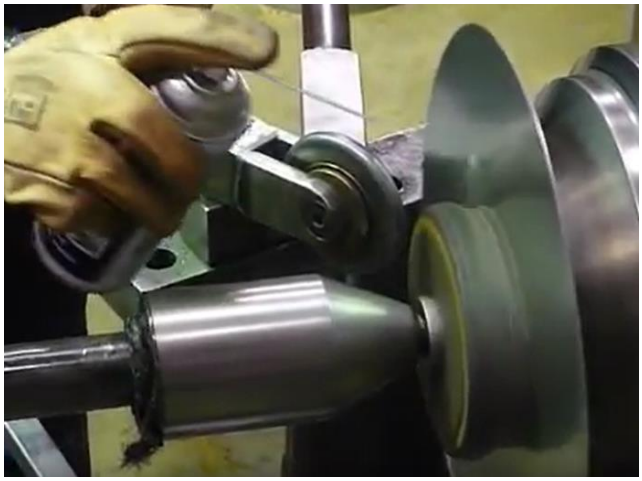
Σχήμα 2 – 137: Cold roll forming πλατιάς διατομής



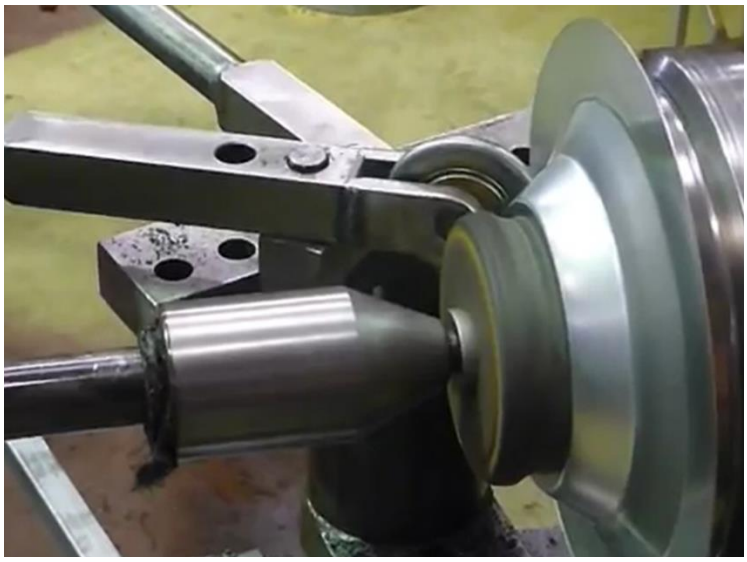
Σχήμα 2 – 138: Cold roll forming πλατιάς διατομής

Σχήμα 2 – 139: Cold roll forming πλατιάς διατομής

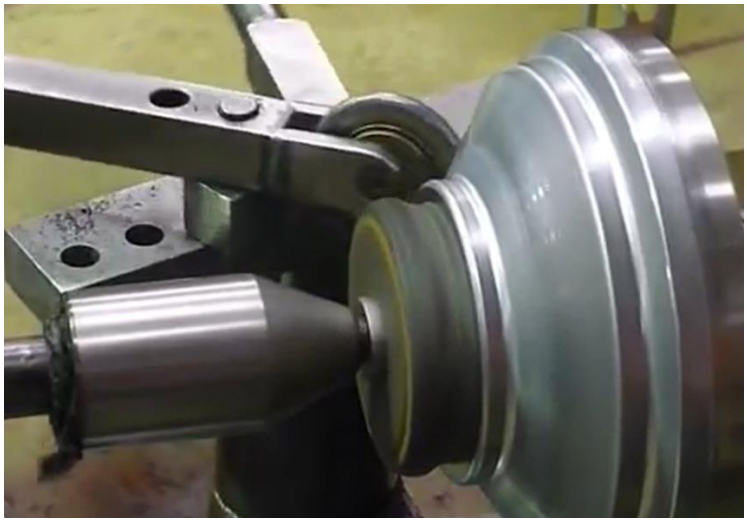
Τελευταία έχουμε την μέθοδο spinning. Λεπτοί δίσκοι αλουμινίου περιστρέφονται, και με την βοήθεια εργαλείων από έμπειρους τεχνικούς παίρνουν την μορφή του καλουπιού. Η διαδικασία μοιάζει αρκετά απλή αλλά ο τεχνικός πρέπει να είναι έμπειρος και να ξέρει, πού, πότε, και πόση πίεση να ασκήσει. Πρέπει όπως λένε αυτοί οι τεχνικοί να μπορεί να «δει», να «ακούσει», και να «αισθανθεί» το υλικό.



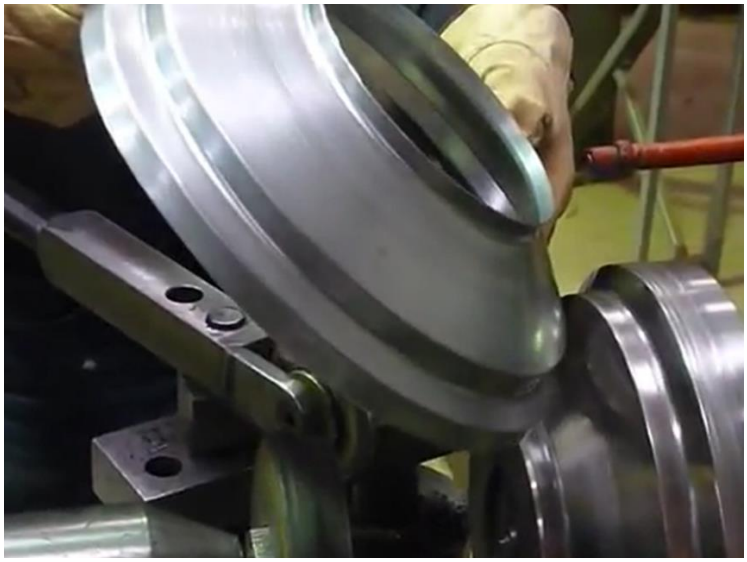
Σχήμα 2 – 140: Εφαρμογή λιπαντικού για να μην φθαρεί ο δίσκος από την επαφή με το ειδικό εργαλείο



Σχήμα 2 – 141: Διαδικασία spinning

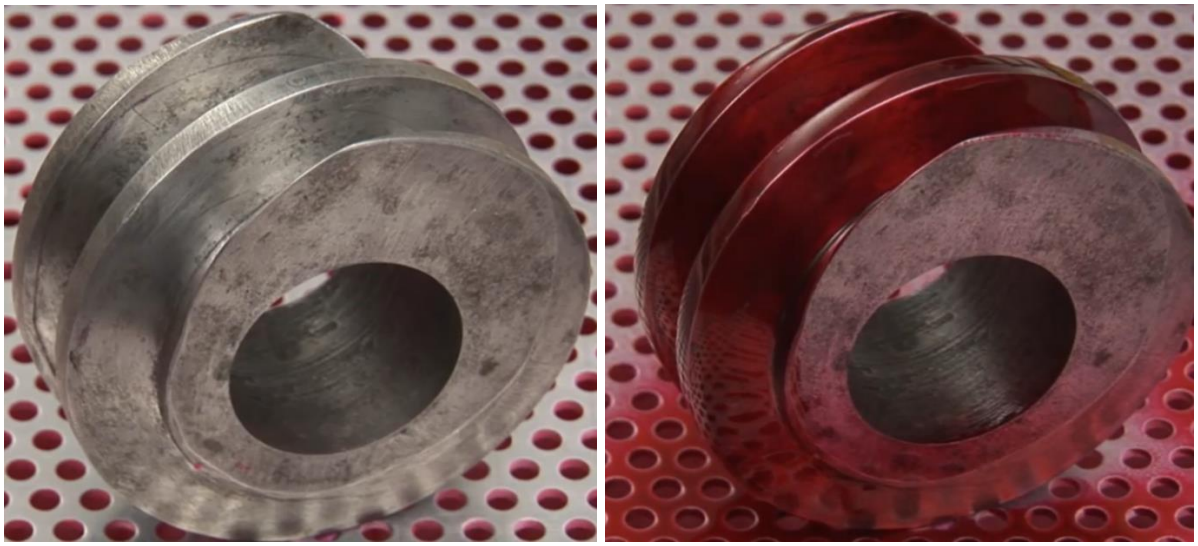


Σχήμα 2 – 142: Διαδικασία spinning

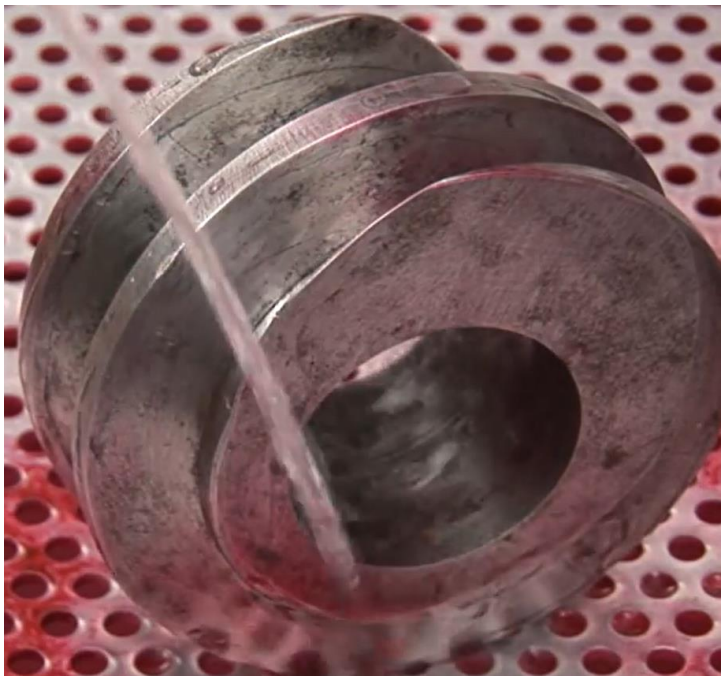


Σχήμα 2 – 143: Τελικό προϊόν spinning

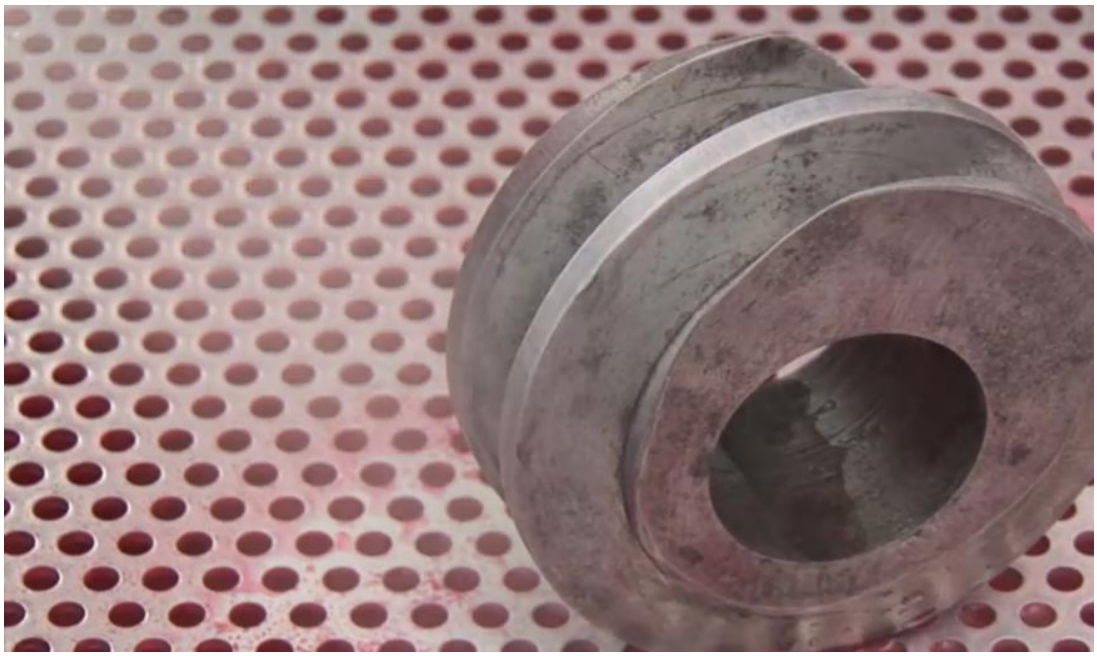
Εκτός των προϊόντων casting καλό είναι να ελέγχονται τα προϊόντα όλων των μεθόδων. Ο έλεγχος γίνεται με την χρήση χρώματος. Ψεκάζουμε με χρώμα το αντικείμενο, αφήνουμε το χρώμα να ποτίσει, ξεπλένουμε ελαφρώς, σκουπίζουμε με μια πετσέτα, και ψεκάζουμε με ειδικό σπρέι που κάνει έντονο το χρώμα που έχει μπει στις ρωγμές ώστε να φαίνεται με γυμνό μάτι.



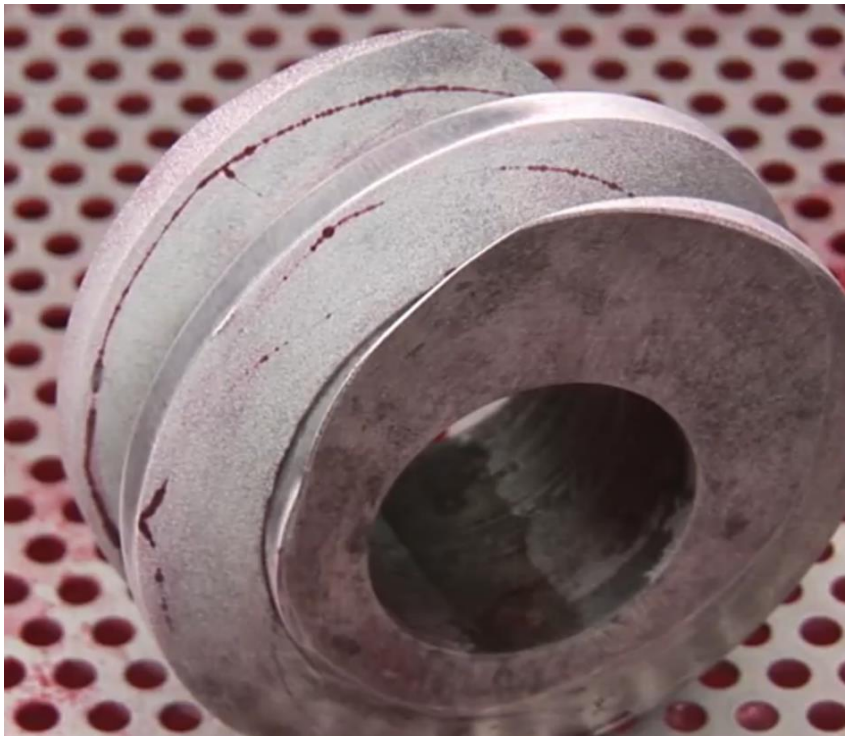
Σχήμα 2 – 144: Βαφή του αντικειμένου με σπρέι έντονου χρώματος



Σχήμα 2 – 145: Ελαφρύ ξέπλυμα του χρώματος



Σχήμα 2 – 146: Αφού σκουπίσουμε για να απομακρύνουμε το νερό ψεκάζουμε με ειδικό σπρέι

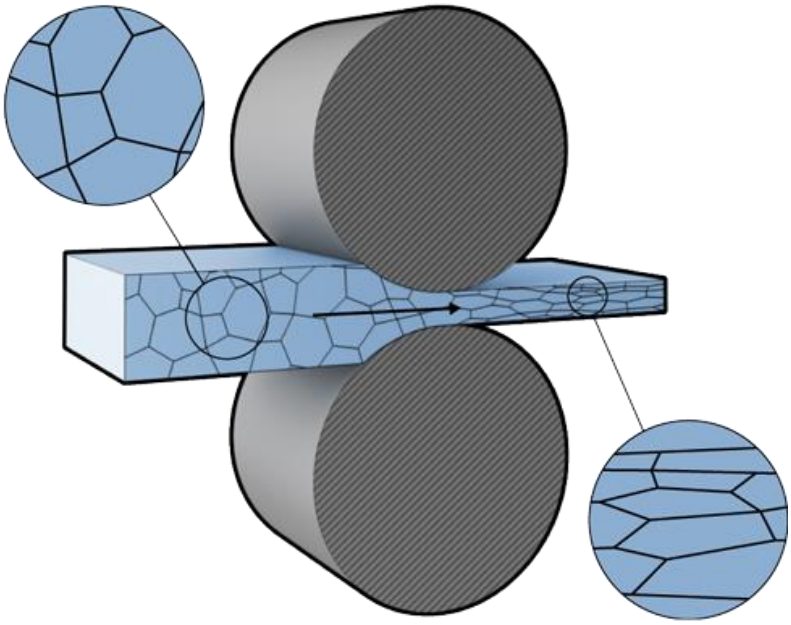


Σχήμα 2 – 147: Το σπρέι κάνει έντονο το χρώμα που έχει μπει στις ρωγμές για να φαίνεται με το μάτι

2.4 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΡΟΙΟΝΤΟΣ

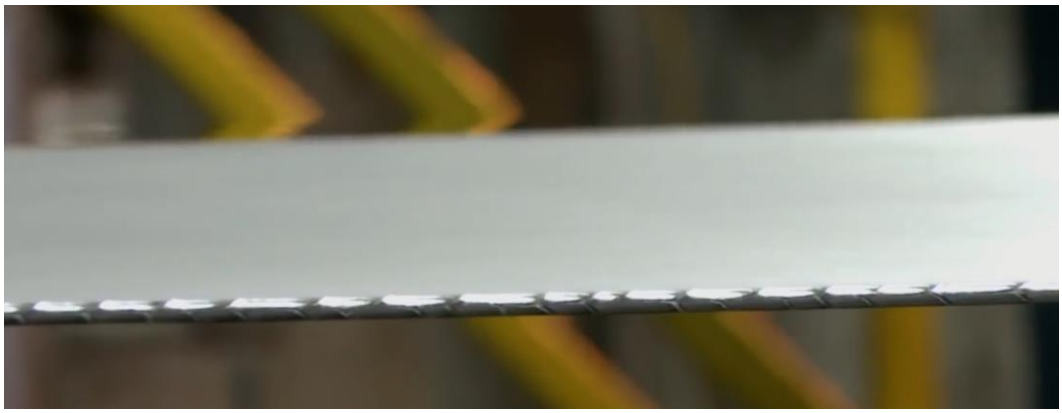
Πριν, μετά, αλλά και σε κάποιο ενδιάμεσο στάδιο της παραγωγής, τα προϊόντα του αλουμινίου υπόκεινται σε διαφορετικών ειδών επεξεργασίες. Το cold rolling είναι η διαδικασία με την οποία δημιουργούνται τα ρολά αλουμίνιου τα οποία χρησιμοποιούμε κατά το cold roll forming. Αρχικά λιώνουμε «φρέσκο» αλουμίνιο ή αλουμίνιο που είναι για ανακύκλωση. Δημιουργούμε ένα φύλλο πάχους μερικών χιλιοστών το οποίο τυλίγουμε σε ρολά. Ύστερα περνάμε το φύλλο από διαδοχικά rollers μειώνοντας το πάχος του, χωρίς κάποιου είδους προθέρμανση. Μόλις φτάσουμε στο επιθυμητό πάχος της παραγγελίας, το

ξανακάνουμε ρολό. Υπάρχει η επιλογή για εφαρμογή λιπαντικού καθώς το φύλλο περνάει από τα rollers. Το λιπαντικό ομαλοποιεί την διαδικασία και προσδίδει καλή ποιότητα στην επιφάνεια του φύλλου. Η ονομασία κραμάτων ύστερα από cold work είναι, π.χ. 5052 H32. Το H και το πρώτο νούμερο (H3) δηλώνει τον τρόπο επεξεργασίας. Ενώ το δεύτερο νούμερο (2) δηλώνει το ποσοστό σκλήρυνσης. Έχουμε 0, 2(quarter hard), 4(half hard), 8(full hard), 9, με αντοχές 170 MPa – 270 MPa μέχρι το full hard, και 285 MPa για το 9.

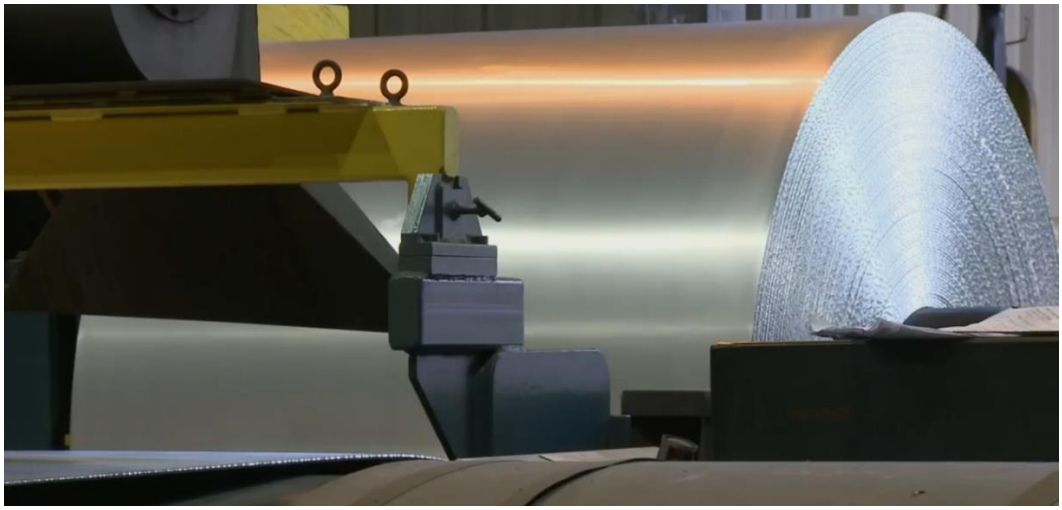


Σχήμα 2 – 148: Μείωση του πάχους με cold rolling

Σχήμα 2 – 149: Λιωμένο αλουμίνιο πριν την δημιουργία του αρχικού φύλλου

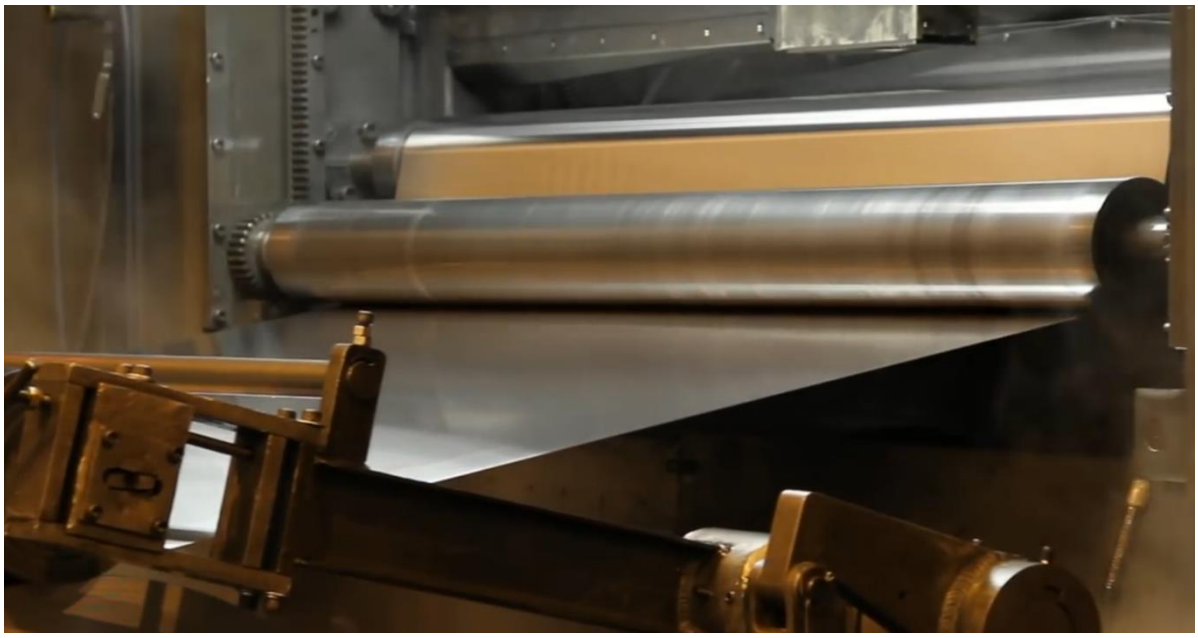


Σχήμα 2 – 150: Αρχικό φύλλο αλουμινίου



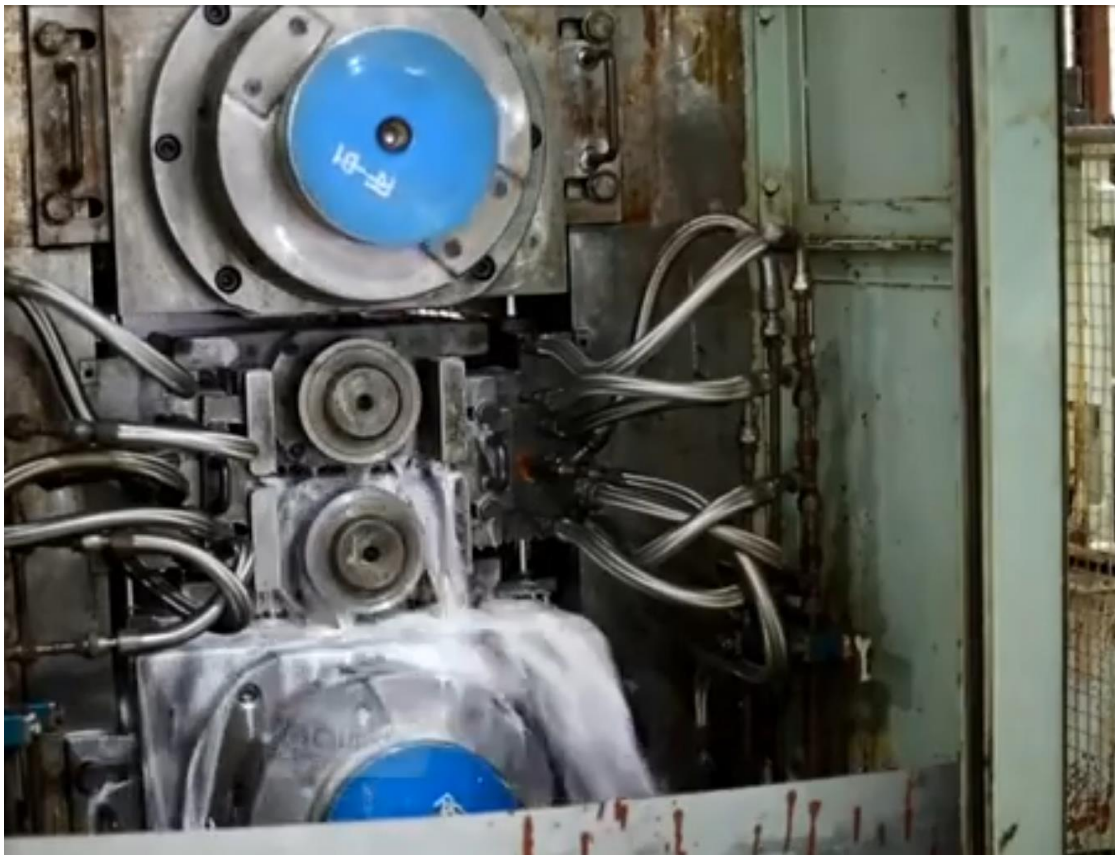
Σχήμα 2 – 151: Αρχικό ρολό

Σχήμα 2 – 152: Σχηματισμός αρχικού ρολού, με αργό ρυθμό (6 ώρες)

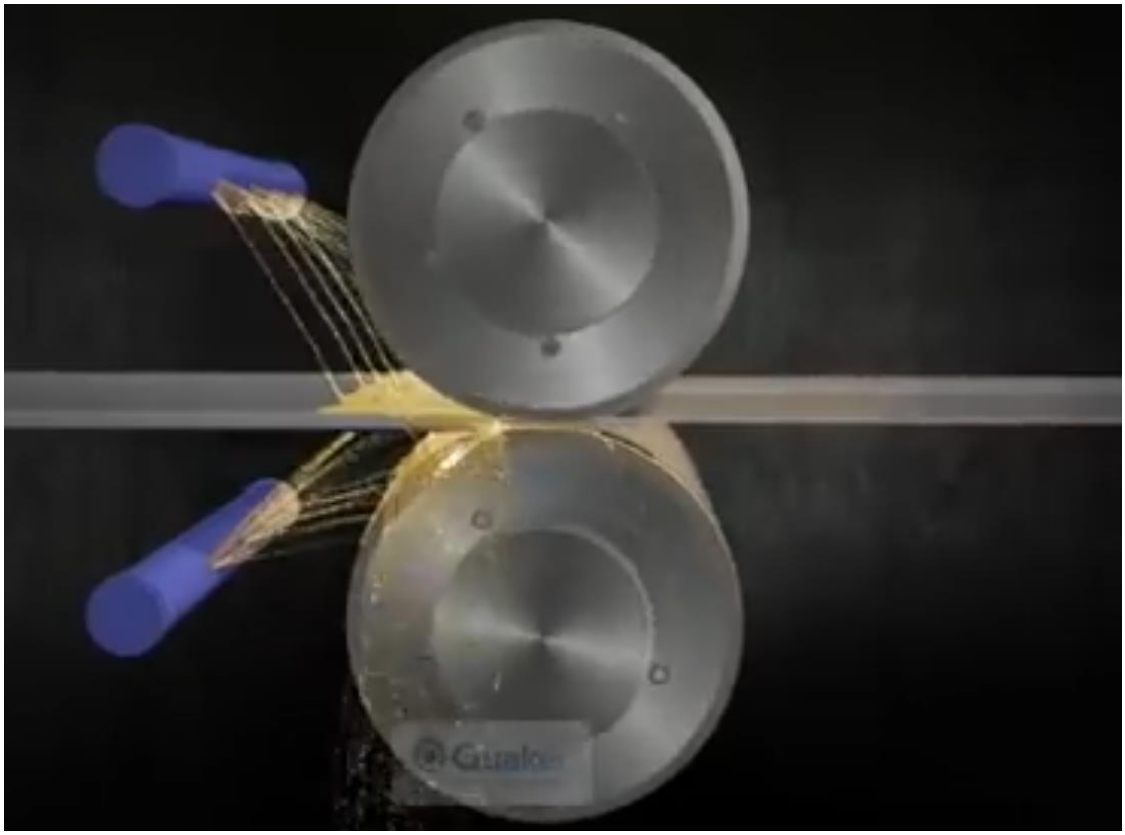


Σχήμα 2 – 153: Πέρασμα από rollers, γρήγορο ρυθμό (<100m/min)

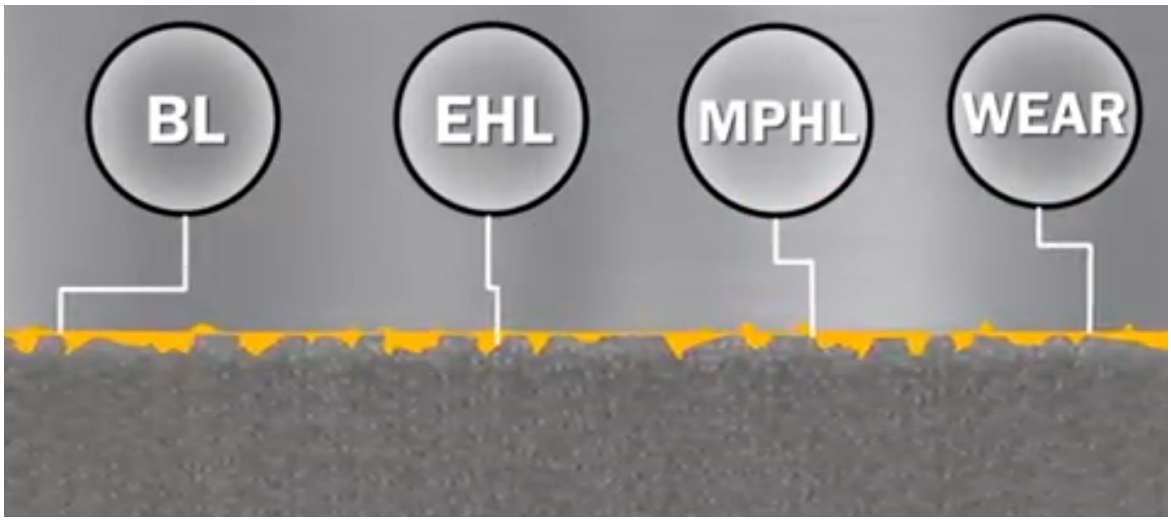
Σχήμα 2 – 154: Τελικό αποτέλεσμα και κοπή δειγμάτων προς εξέταση



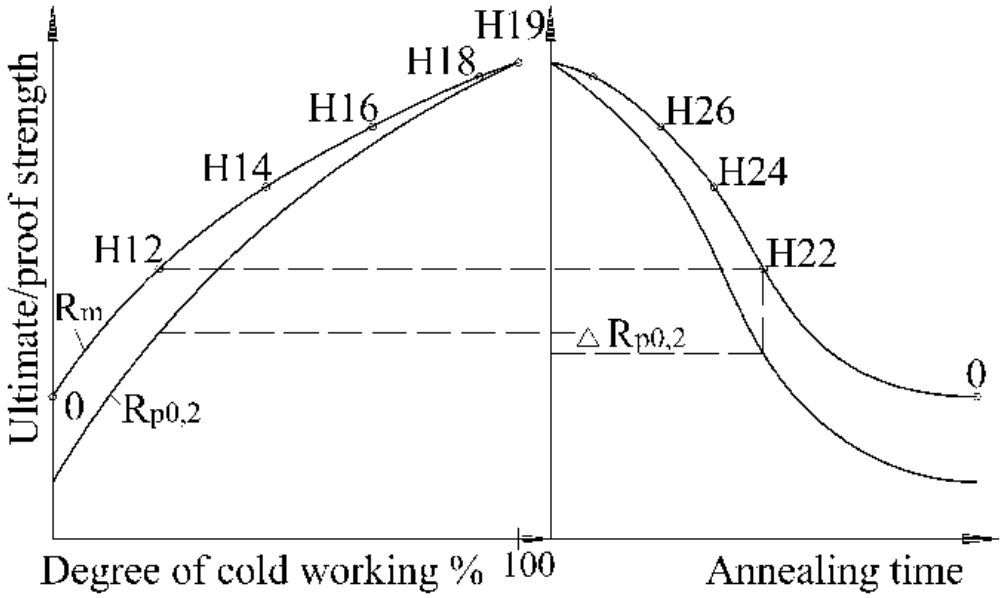
Σχήμα 2 – 155: Πέρασμα από rollers και παράλληλη λίπανση



Σχήμα 2 – 156: Τρόπος λίπανσης



Σχήμα 2 – 157: Καλύτερη επιφάνεια, εξαιτίας της λίπανσης

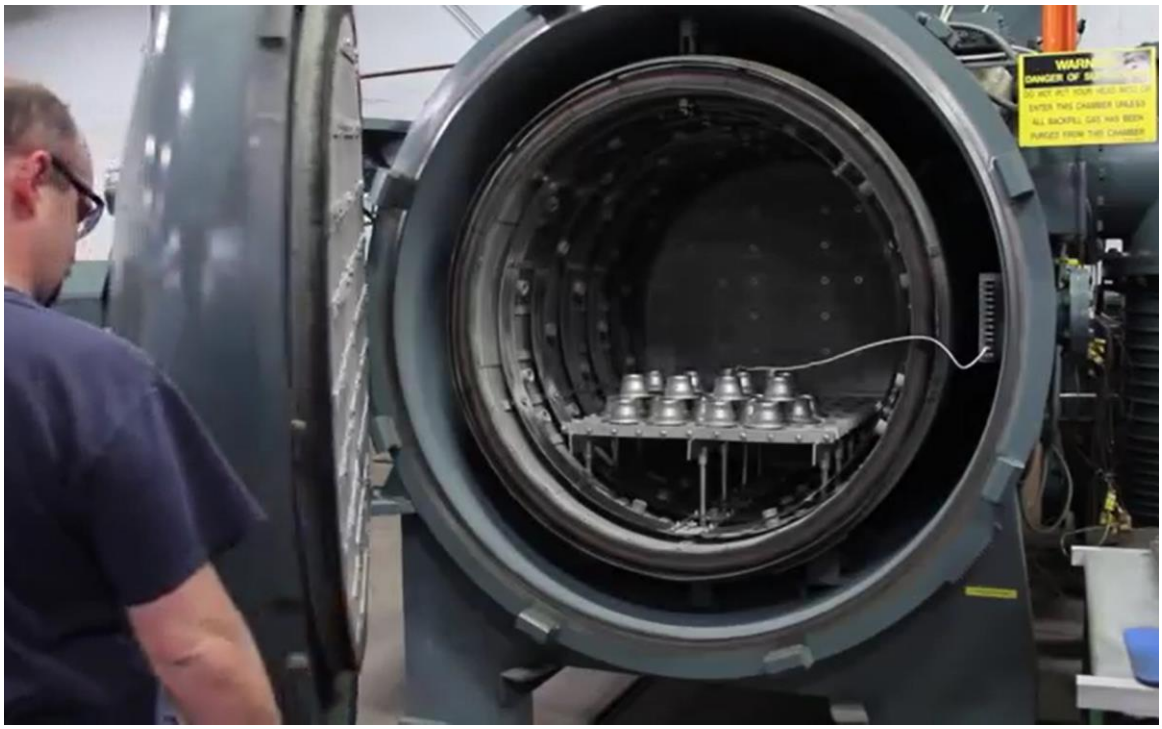


Σχήμα 2 – 158: Διάγραμμα σχετικού χρόνου εκτέλεσης και σχετικής αντοχής που προσδίδει η κρύα επεξεργασία

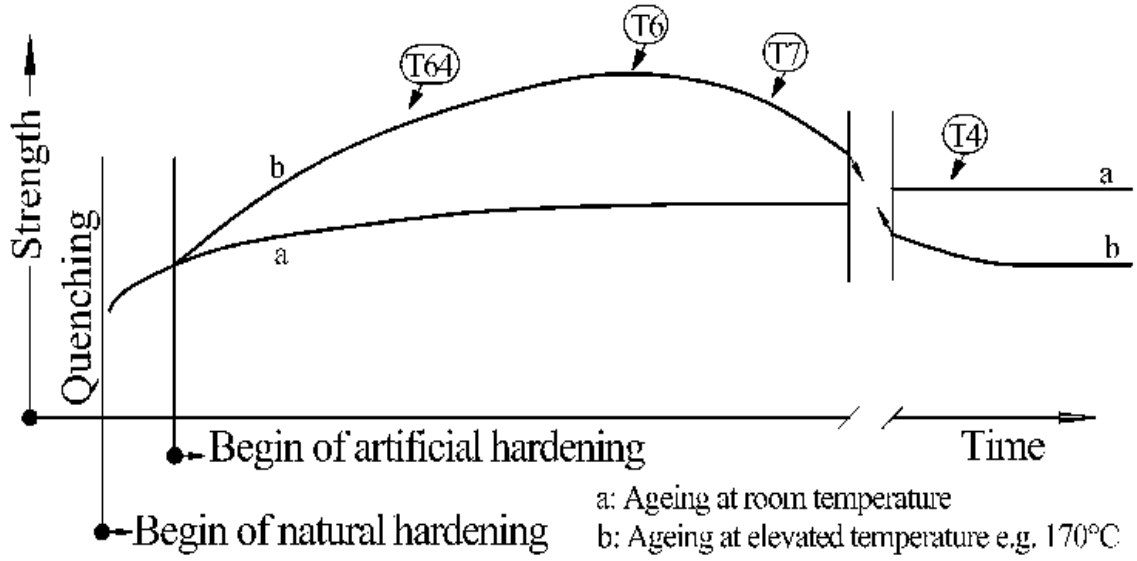
Ζεστές μέθοδοι επεξεργασίας – hot work, περιλαμβάνουν και την απότομη ψύξη των προϊόντων – quenching, η οποία γίνεται σε ενδιάμεσα στάδια. Η ωρίμανση σε φούρνο γίνεται στο τέλος της παραγωγής του προϊόντος. Πριν την απότομη ψύξη υπάρχει η δυνατότητα για ολιγόλεπτη ωρίμανση σε φούρνο. Ο φούρνος αυτός πρέπει να έχει αποσπώμενο πάτο και δεξαμενή νερού από κάτω του, καθώς έχει μεγάλη σημασία η ζέστη να «φύγει» γρήγορα από το προϊόν. Στο τέλος της παραγωγής ακολουθεί η ωρίμανση σε φούρνο. Υπάρχουν και φούρνοι κενού. Δηλαδή απομάκρυνση του αέρα, αφού τα αντικείμενα μπουν στο φούρνο. Χρησιμοποιείται σε ειδικές περιστάσεις για να μην ρυπανθεί το προϊόν από τον ατμοσφαιρικό αέρα κατά την ωρίμανση. Οι θερμοκρασίες είναι της τάξης 180°C για 5 ώρες ή 20°C για 1 – 2 εβδομάδες. Η ονομασία είναι, π.χ. 6053 T61.

Σχήμα 2 – 159: Φούρνος με αποσπώμενο πάτο και δεξαμενή νερού ακριβώς από κάτω του

Σχήμα 2 – 160: Απότομη ψύξη ύστερα από ολιγόλεπτη ωρίμανση



Σχήμα 2 – 161: Φούρνος κενού



Σχήμα 2 – 162: Διάγραμμα σχετικού χρόνου εκτέλεσης και σχετικής αντοχής που προσδίδει η ωρίμανση σε φούρνο

Το αλουμίνιο έχει την δυνατότητα για ανοδίωση – anodization, μία διαδικασία η οποία προσδίδει στο προϊόν επικάλυψη μικρού πάχους η οποία είναι κομμάτι του υλικού και προέρχεται από ίδιο το υλικό. Αν η δεξαμενή ήταν από αλουμίνιο τότε θα προερχόταν από την δεξαμενή, με αποτέλεσμα συχνές αλλαγές των δεξαμενών, το οποίο δεν συμφέρει. Η στρώση αυτή αποτελείται από οξείδια του αλουμινίου και προστατεύει από την διάβρωση, προσδίδοντας παράλληλα ωραία εμφάνιση. Είναι αποτέλεσμα του εμποτισμού του προϊόντος σε δεξαμενή θειικού οξέος και της παράλληλης φόρτισης με ηλεκτρισμό του όλου συστήματος. Το μέλος είναι το + και η δεξαμενή -. Ανάλογα με τον χρόνο παραμονής έχουμε και ανάλογο πάχος. Η διαδικασία ανοδίωσης περιλαμβάνει εμποτισμό του μέλους σε διαδοχικές δεξαμενές. Στην αρχή καθαρίζεται με νερό, μετά μπαίνει σε μια δεξαμενή οξέος όπου απομακρύνεται μια μικρή επιφανειακή στρώση με σκοπό καλύτερη επιφάνεια για ανοδίωση. Ύστερα μπαίνει σε δεξαμενή όπου

απομακρύνεται το εναπομείναν οξύ, και μετά ανοδιώνεται. Λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας υπάρχει ανάγκη για ψύξη του θειικού οξέος. Ακολουθεί ξέπλυμα με νερό και αν απαιτείται εμποτισμός σε χρώμα. Τελευταίο στάδιο είναι το σφράγισμα των πόρων της ανοδιώμενης επιφάνειας, με ή χωρίς χρώμα, σε δεξαμενή οξικού νικελίου. Η συγκόλληση ανοδιώμενων κομματιών δεν είναι δυνατή χωρίς την καταστροφή του προστατευτικού στρώματος, πρέπει να γίνεται πριν την ανοδίωση. Τα χρώματα μέσω ηλεκτρολυτών είναι περιορισμένα και δεν παίρνουμε το ίδιο αποτέλεσμα σε κάθε παρτίδα. Μπορούμε να βάλουμε και τεχνητό χρώμα, κόκκινο, μπλε, χρυσό είναι καλά. Το αποτέλεσμα έχει διάρκεια στον χρόνο είναι ωραίο οπτικά, αλλά ακριβό. Έχουμε 2 πάχη στρώσεων ανοδίωσης, class I (>18μm) και class II (10μm – 18μm). Η Class I για εξωτερικούς χώρους. Η ονομασία είναι, π.χ. AA M12C22 A44.

AA: aluminum association

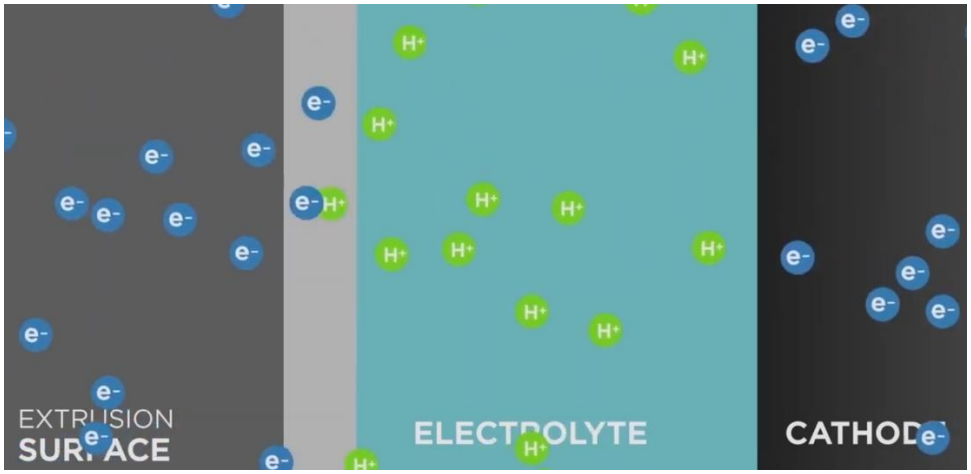
M__C__: mechanical & chemical surface preparation

_4_: 4 = class I, 3 = class II, 2 και 1 δεν χρησιμοποιούνται (πολύ λεπτή στρώση)

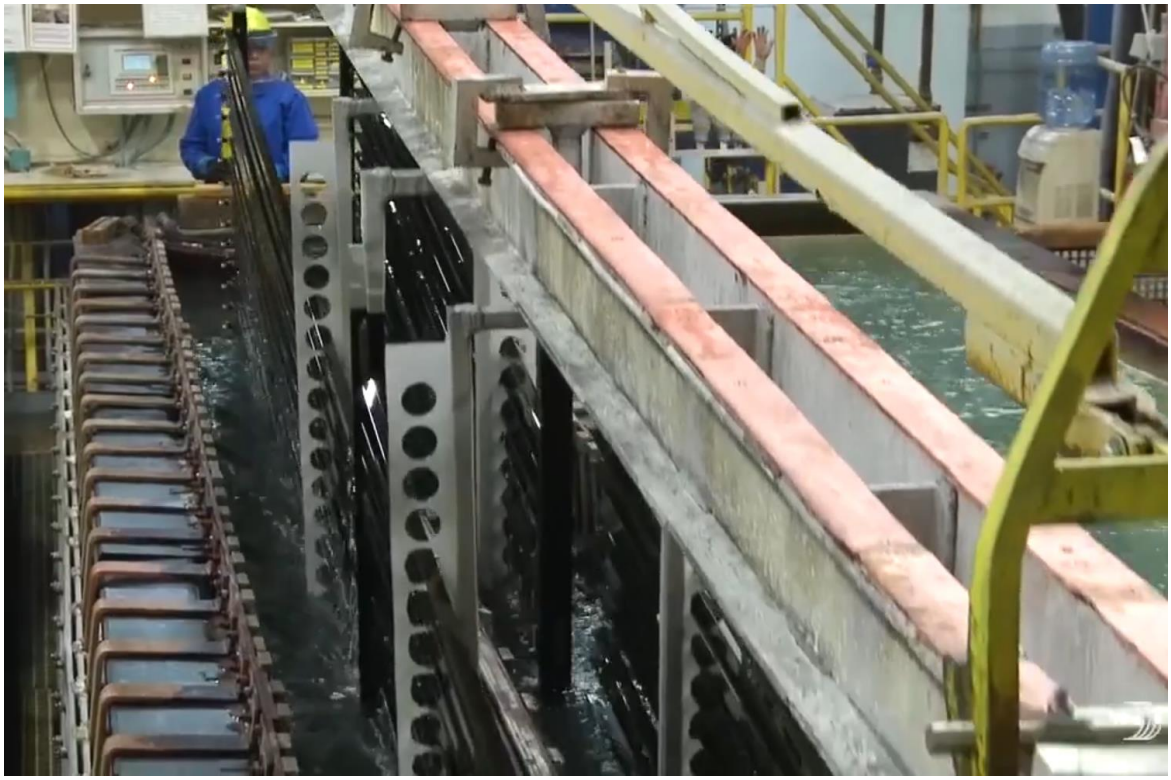
__4: 4 = χρώμα μέσω ηλεκτρολυτών (χάλκινες αποχρώσεις, μπλε), 1 = καθαρό, 2 = χρώμα που προκύπτει ανάλογα με το κράμα, 3 = χρώμα της επιλογής μας

Σχήμα 2 – 163: Οι διαδοχικές δεξαμενής της διαδικασίας ανοδίωσης

Σχήμα 2 – 164: Προϊόν ανοδίωσης



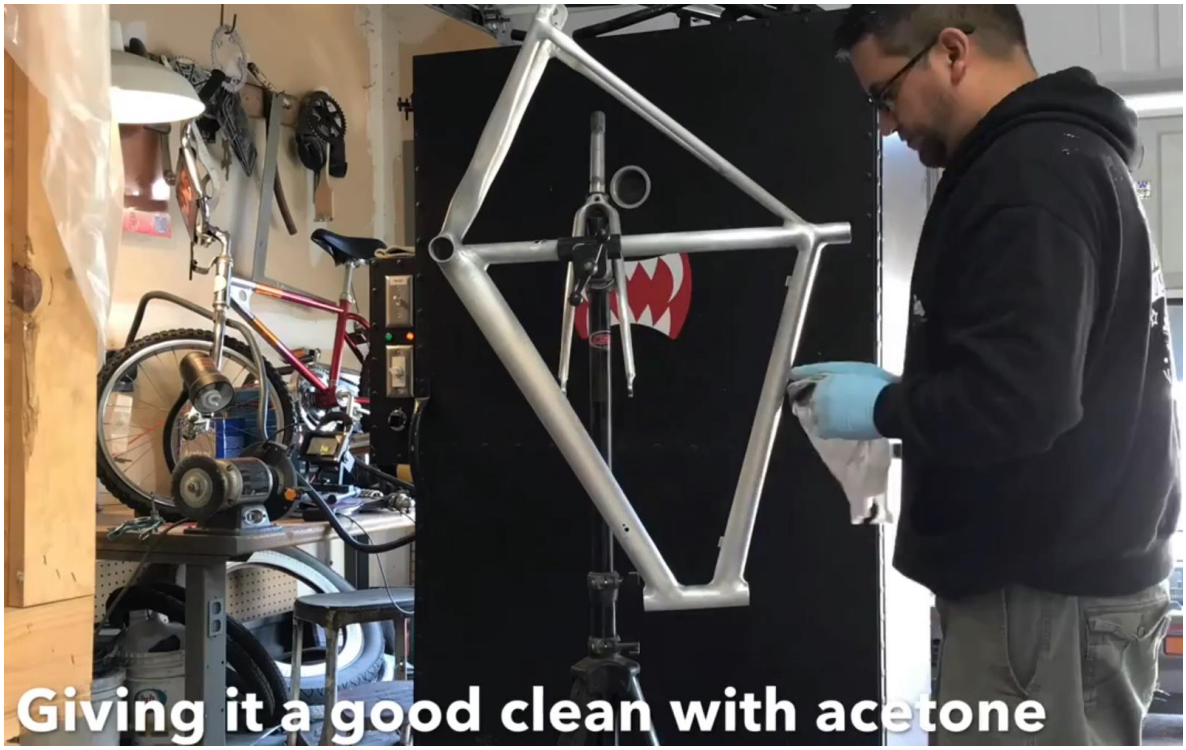
Σχήμα 2 – 165: Δημιουργία του στρώματος από το ίδιο το υλικό



Σχήμα 2 – 166: Εμποτισμός σε χρώμα

Μία φθηνότερη εναλλακτική είναι το powder coating, ψεκασμός με χρωματιστή ειδική σκόνη και ενεργοποίηση του χρώματος σε φούρνο. Αρχικά θέλουμε καθαρή και καλά προετοιμασμένη επιφάνεια (π.χ. τρίψιμο με γυαλόχαρτο ή το οξύ της ανοδίωσης) για να «κάτσει» η σκόνη. Για την απομάκρυνση της υγρασίας και για να «κολλήσει» η σκόνη, προθερμαίνουμε το αντικείμενο πριν την εφαρμογή της. Το ψέκασμα μπορεί να γίνει σε δύο στάδια για πιο φανταχτερό και μεγαλύτερης διάρκειας αποτέλεσμα. Ψέκασμα του χρώματος, ψήσιμο, ψέκασμα ειδικής επικάλυψης, ψήσιμο. Η επικάλυψη με χρήση σκόνης έχει το καλό πως, ό,τι σκόνη πέσει κάτω μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί. Προκειμένου το χρώμα να «κάτσει», υποβάλλουμε το αλουμίνιο σε υψηλές θερμοκρασίες, κάτι το οποίο ρίχνει την αντοχή του αλουμινίου. Η βαφή χρησιμοποιείται και για διαχωρισμό από αλλά υλικά.

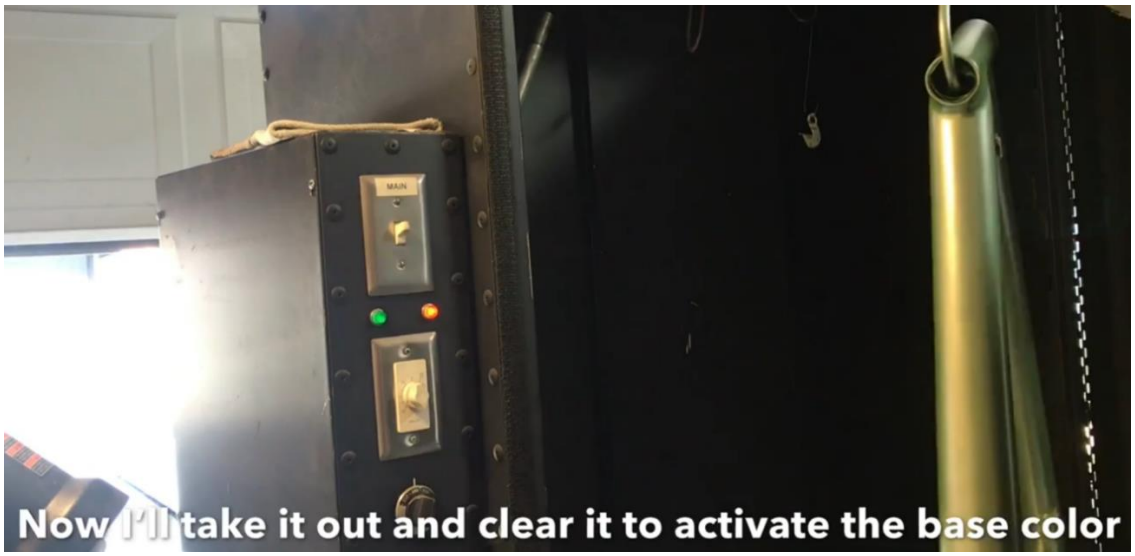
Σχήμα 2 – 167: Προετοιμασία της επιφάνειας



Σχήμα 2 – 168: Καθαρισμός της επιφάνειας

Σχήμα 2 – 169: Εφαρμογή του χρώματος

Σχήμα 2 – 170: Ψήσιμο του χρώματος μετά από προθέρμανση του μέλους



Σχήμα 2 – 171: Τέλος πρώτου ψησίματος

Σχήμα 2 – 172: Εφαρμογή της ειδικής επικάλυψης

Σχήμα 2 – 173: Τελικό αποτέλεσμα powder coating

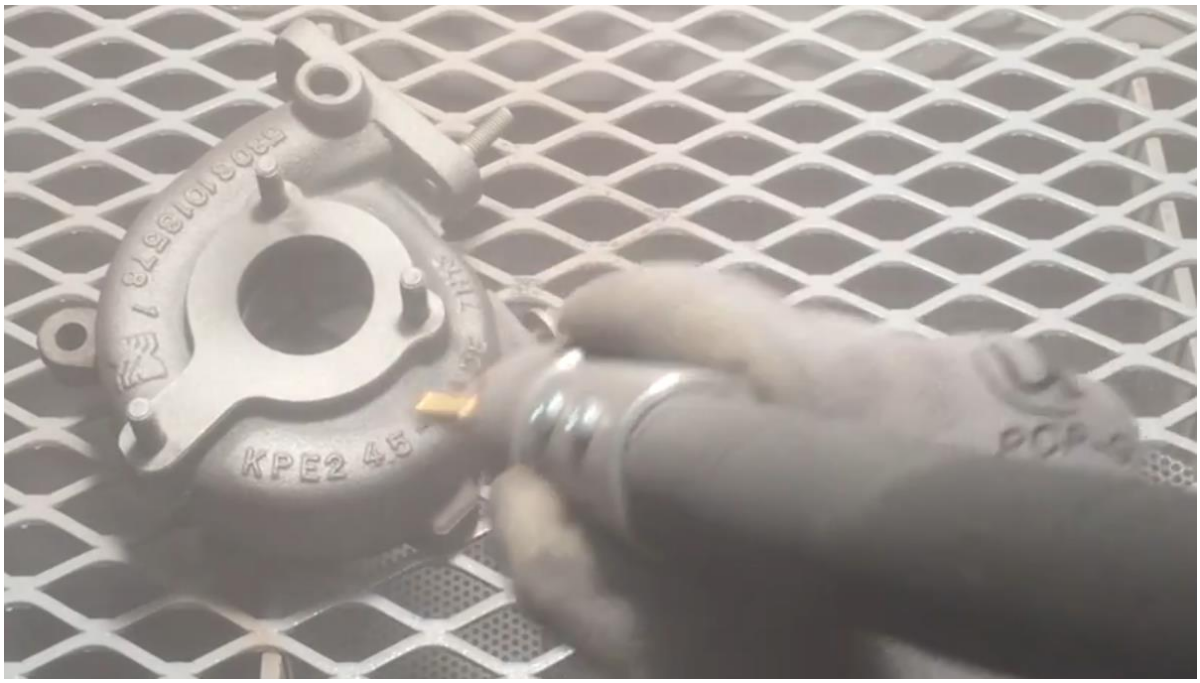
Blasting ή αλλιώς η εφαρμογή σκόνης οξειδίων του αλουμινίου με υψηλή πίεση είναι ό,τι κοντινότερο έχουμε στην ανοδίωση, και αρκετά φθηνότερο. Δεν υπάρχει η δυνατότητα για χρώμα. Δεν υπάρχει η ανάγκη απομάκρυνσης της προηγούμενης επικάλυψης, η τεράστια πίεση του αέρα το κάνει από μόνη της. Επίσης μπορεί να εφαρμοστεί και σε κομμάτια που έχουν σκουριά. Μπορεί να γίνει με άμμο και με οξείδιο αλουμινίου και μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές. Η μέθοδος blasting αλλά και το powder coating δεν κάνουν για λεπτά φύλλα.

Σχήμα 2 – 174: Αρχικό κομμάτι πριν το blasting

Σχήμα 2 – 175: Blasting

Σχήμα 2 – 176: Τελικό αποτέλεσμα blasting

Σχήμα 2 – 177: Σκουριασμένο κομμάτι, όχι από αλουμίνιο



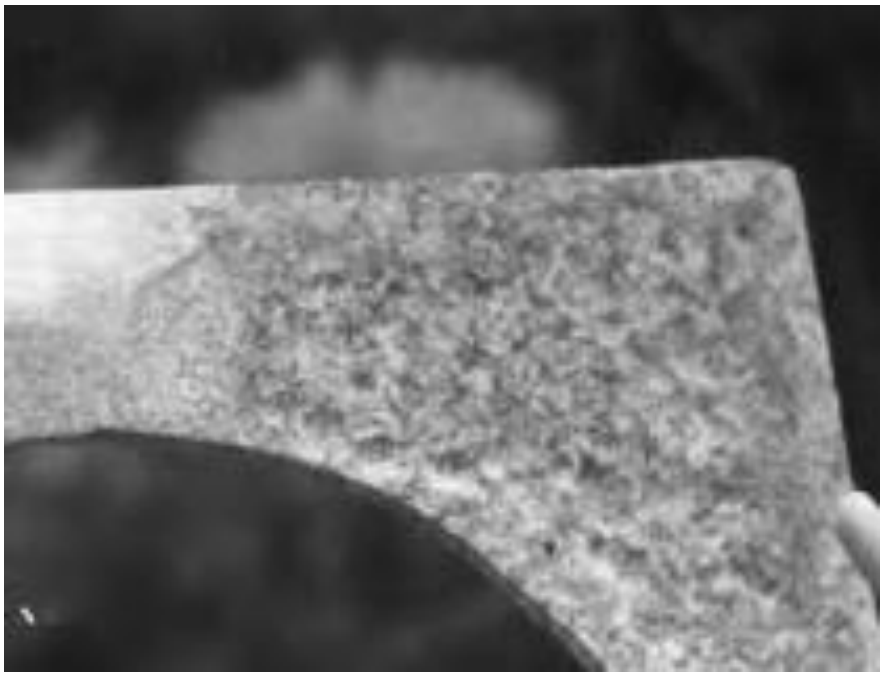
Σχήμα 2 – 178: Blasting σε σκουριασμένο κομμάτι, και τελικό αποτέλεσμα

Τελευταία έχουμε την λείανση – buffing, η οποία γίνεται με τροχό και με την βοήθεια λιπαντικού. Αναγκαίο πριν την ανοδίωση αν θέλουμε γυαλιστερό χρώμα.

Σχήμα 2 – 179: Λείανση σωλήνα με την χρήση τροχού για εξοικονόμηση χρόνου

Σχήμα 2 – 180: Λείανση και μη σε πλάκα αλουμινίου

Επιπλέον η επικάλυψη μπορεί να είναι το 1.5% - 10% του συνολικού πάχους. Το αλουμίνιο πρέπει να αποθηκεύεται σε ξηρό και καθαρό περιβάλλον (κλειστή αποθήκη) και με μια μικρή ενδιάμεση απόσταση μεταξύ τους, όχι το ένα κομμάτι πάνω στο άλλο, και μόλις βρέχεται να σκουπίζεται ή να στεγνώνεται άμεσα. Αυτό γιατί οι λεκέδες από λάσπη και σκόνη μετά από λίγο καιρό δεν φεύγουν με απλό σκούπισμα. Ένα καλό μέσο προστασίας είναι η ασφαλτική μπογιά (φτηνή), για προστασία από την διάβρωση που προκαλεί η επαφή με το τσιμέντο, αλλά και το ξύλο. Υπάρχουν βέβαια και ενέματα, όπως αυτό με το φωσφορικό μαγνήσιο, τα οποία έχουν χαμηλό pH και δεν αντιδρούν με το αλουμίνιο, οπότε δεν υπάρχει ανάγκη για προστασία.



Σχήμα 2 – 181: Διάβρωση αλουμινίου από επαφή με ξύλο

2.5 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

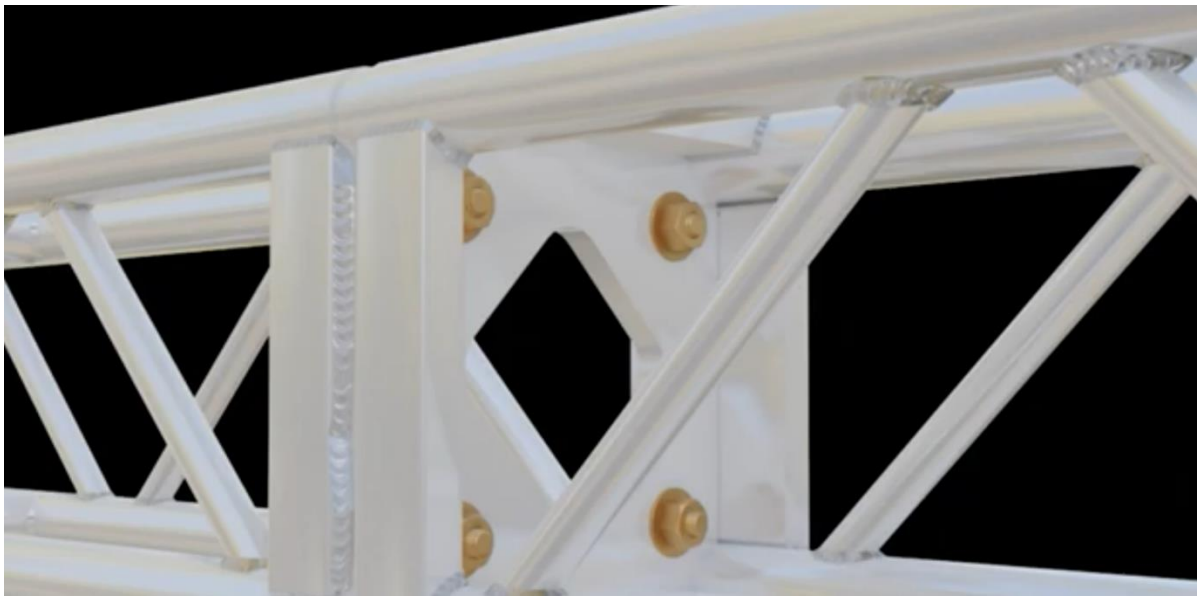
Όπως και στους τρόπους παραγωγής, έτσι και εδώ, έχουμε μία πληθώρα τρόπων σύνδεσης. Αρχικά έχουμε την απλή κοχλίωση. Βιδώνουμε με κατσαβίδι όσο μας επιτρέπει η δύναμή μας, τόσο ώστε να μπορούμε να ξεβιδώσουμε με το χέρι. Σε περίπτωση που σφίξουμε πολύ τους κοχλίες ενδέχεται να κάνουμε ζημιά στα μέλη που συνδέουμε. Για να συνδέσουμε αλουμίνιο χρησιμοποιούμε αλουμινένιους κοχλίες συνήθως. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιημένοι αλουμινένιοι κοχλίες είναι φτιαγμένοι από τα κράματα, 2024-T4, 6061-T6, 7075-T73, και κάνουν και για lockbolts. Υπάρχουν και κράματα όπως, το 6262-T9, αποκλειστικά για κοχλίες. Για βίδες, μυτερό στην άκρη δηλαδή, χρησιμοποιούμε το 7075-T73. Με την χρήση ειδικού εργαλείου, πιστόλι, μπορούμε να τρυπήσουμε και εκεί όπου δεν υπάρχει τρύπα. Οι αλουμινένιες βίδες τρυπούν μέχρι ένα συγκεκριμένο πάχος αλλά δεν σκουριάζουν, οι χαλύβδινες από την άλλη σκουριάζουν αλλά τρυπούν μεγαλύτερα πάχη. Οι βίδες κράματος 2024 και 7075 έχουν υψηλή αντοχή, ενώ αυτές από 6061 είναι καλές έναντι διάβρωσης. Οι ανοξείδωτες βίδες από χάλυβα είναι μαγνήτες και αν έχουν πολύ άνθρακα έχουν υψηλή αντοχή ενώ αν έχουν χρώμιο, έχουν προστασία από διάβρωση. Για τις χαλύβδινες, υπάρχουν υποκατηγορίες. Βίδες από ωστενιτικό χάλυβα, φερριτικές, μαρτενσιτικές, από ανθρακοχάλυβα και γαλβανισμένες. Ο ωστενιτικός – austenitic χάλυβας έχει πολύ χρώμιο και δεν μαγνητίζεται, έτσι μπορούμε να ξεχωρίζουμε εύκολα τις ωστενιτικές, όπως και τις αλουμινένιες βίδες που είναι και πιο ακριβές. Υπάρχουν και φερριτικές – ferritic και μαρτενσιτικές – martensitic με λιγότερο χρώμιο, αλλά πιο φτηνές. Οι βίδες από ανθρακοχάλυβα έχουν υψηλή αντοχή, αλλά είναι αδύναμες έναντι διάβρωσης. Οι γαλβανισμένες απαγορεύονται διότι αστοχούν ψαθυρά. Σημαντικό είναι να μην αρκούμαστε στις αντοχές που μας δίνονται από τους κατασκευαστές αλλά να κάνουμε δοκιμές για να είμαστε σίγουροι ότι οι βίδες μας, επαρκούν, και ότι αγοράσαμε αυτό για το οποίο πληρώσαμε.

Ενδεικτικά, αντοχές σε διάτμηση και εφελκυσμό:

Αλουμινένιες:	140 – 315 MPa	σε διάτμηση	
	200 – 580 MPa	σε εφελκυσμό	με συντελεστή 2.34 (π.χ. 140/2.34)
Ανοξείδωτες:	300 – 500 MPa	σε διάτμηση	
από χάλυβα	530 – 750 MPa	σε εφελκυσμό	

Η κοχλίωση έχει το θέμα ότι με τον καιρό και τους κραδασμούς χαλαρώνει, σε ράγες τρένου για παράδειγμα. Το πρόβλημα έλυσαν κοχλίες υψηλής αντοχής από αλουμίνιο και χάλυβα, τους οποίους μπορούμε να σφίξουμε πολύ δυνατά, με προένταση, αρκεί βέβαια τα ελάσματα που ενώνουμε, να αντέχουν την πίεση. Οι τεράστιες δυνάμεις τριβής που δημιουργούνται εμποδίζουν τον κοχλία από το να χαλαρώσει. Ενδιαφέρον είναι ότι ο χαλύβδινος με τον αντίστοιχο αλουμινένιο κοχλία θέλουν τον ίδιο αριθμό στροφών για να φτάσουν την επιθυμητή προένταση. Ο αλουμινένιος, μάλιστα, «παίρνει» και λίγο ακόμα, επειδή είναι «μαλακός». Για μεγαλύτερη ασφάλεια, αλλά και οπτικά, βάζουμε πολλά και μεγάλα περικόχλια για να ασφαλίσουμε τον κοχλία. Επίσης η αντοχή των κοχλιών μειώνεται όταν η διεπιφάνεια των ελασμάτων «κόβει» το σπείρωμα. Σε ό,τι αφορά τις τρύπες. Πολλές φορές κάνουμε οβάλ – μακριές τρύπες όταν δεν υπάρχει καλή ευθυγράμμιση μεταξύ των μελών. Πρέπει όμως, το φορτίο να είναι κάθετο στην μεγάλη πλευρά της τρύπας, για να μην γίνει μηχανισμός. Πρέπει οι τρύπες να είναι «just» και λίγο μεγαλύτερες, για να ληφθούν υπ' όψη και οι συστολο-διαστολές λόγω θερμότητες, που στο αλουμίνιο παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο. Όταν τρυπάμε, λίγο πριν συνδέσουμε, κάτι που συνήθως προτιμάμε, πρέπει να έχουμε μεγάλη τρύπα σε λεπτό έλασμα, αλλιώς γίνεται ζημιά. Εάν γίνει τρύπα σε λάθος σημείο δεν την καλύπτουμε συγκολλώντας υλικό, την αφήνουμε ως έχει.

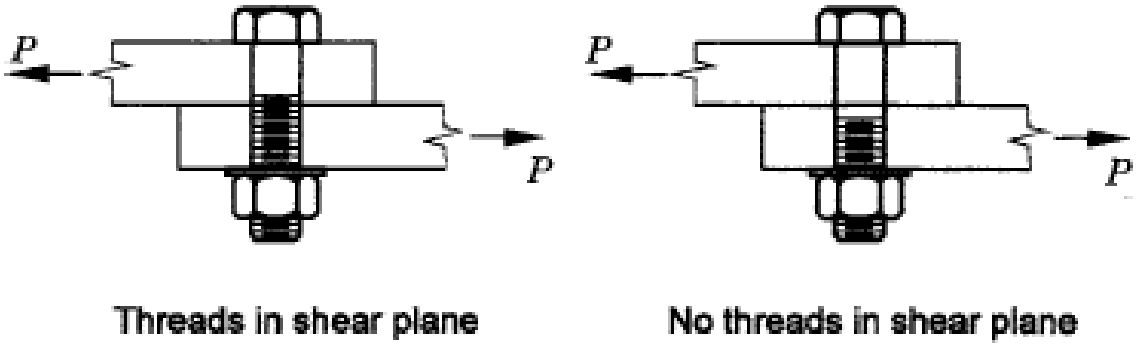
Σχήμα 2 – 182: Κοχλίωση με κλειδί χειρός αλουμινένιων στοιχείων δοκού



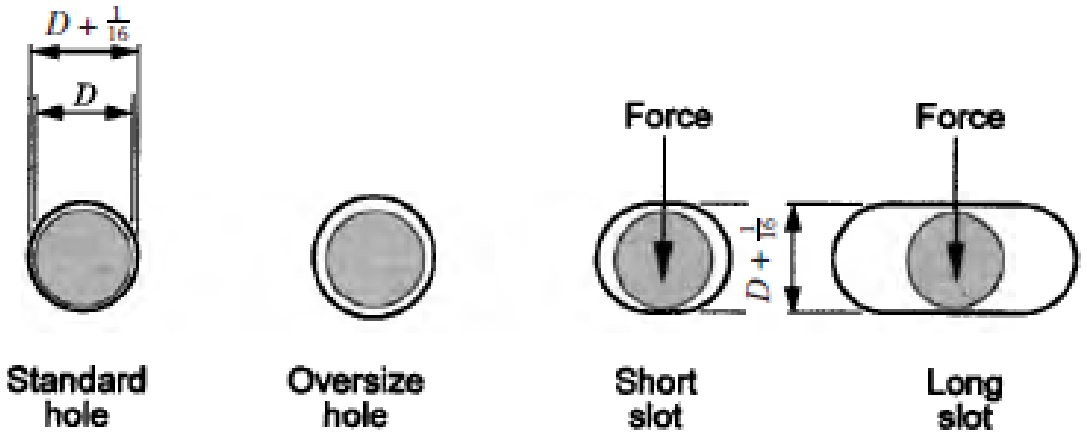
Σχήμα 2 – 183: Πέρας κοχλίωσης με κλειδί χειρός

Σχήμα 2 – 184: Χαλάρωση κοχλίωσης λόγω των κραδασμών σε σιδηροδρομική γραμμή

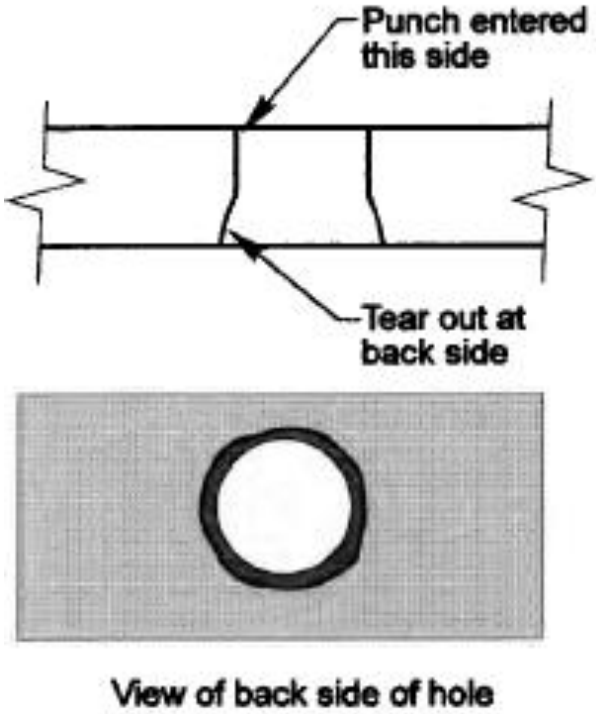
Σχήμα 2 – 185: Πολλά σε αριθμό και μέγεθος περικόχλια προσδίδουν αισθητικά και πραγματικά, ασφάλεια



Σχήμα 2 – 186: Παράδειγμα διεπιφάνειας που κόβει το σπείρωμα



Σχήμα 2 – 187: Διαφορετικές τρύπες συνδέσεων



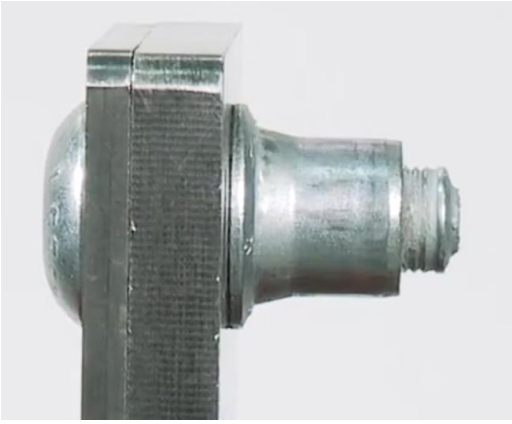
Σχήμα 2 – 187: Μικρή τρύπα σε παχύ έλασμα = ζημιά

Lockbolts είναι η μέθοδος κοχλίωσης με χρήση εργαλείου το οποίο σφίγγει το περικόχλιο επάνω στον κοχλία χωρίς περιστροφή. Διάρκεια στον χρόνο, αντικραδασμική σύνδεση. Βγαίνουν εύκολα, απλώς κόβουμε με τροχό το περικόχλιο.

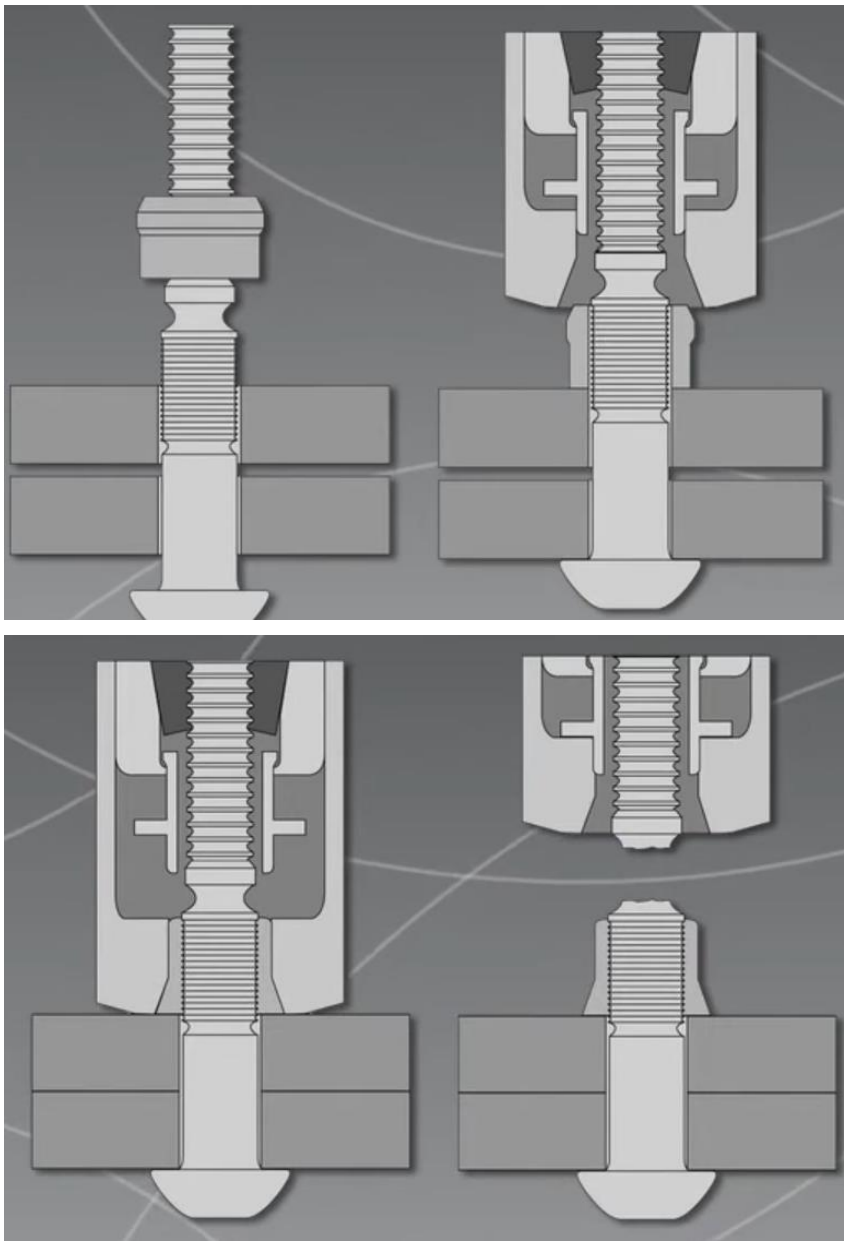
Σχήμα 2 – 188: Lockbolt

Σχήμα 2 – 189: Αρχική τοποθέτηση lockbolt

Σχήμα 2 – 190: Σφίξιμο του καρυδιού με ειδικό εργαλείο που κόβει την άκρη του lockbolt

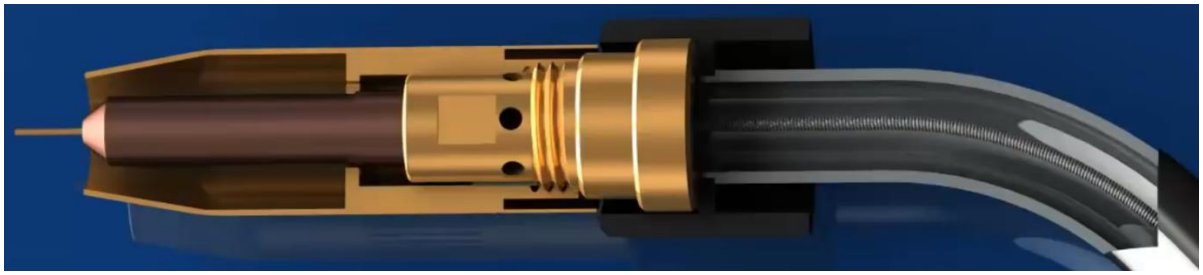


Σχήμα 2 – 191: Τελικό αποτέλεσμα



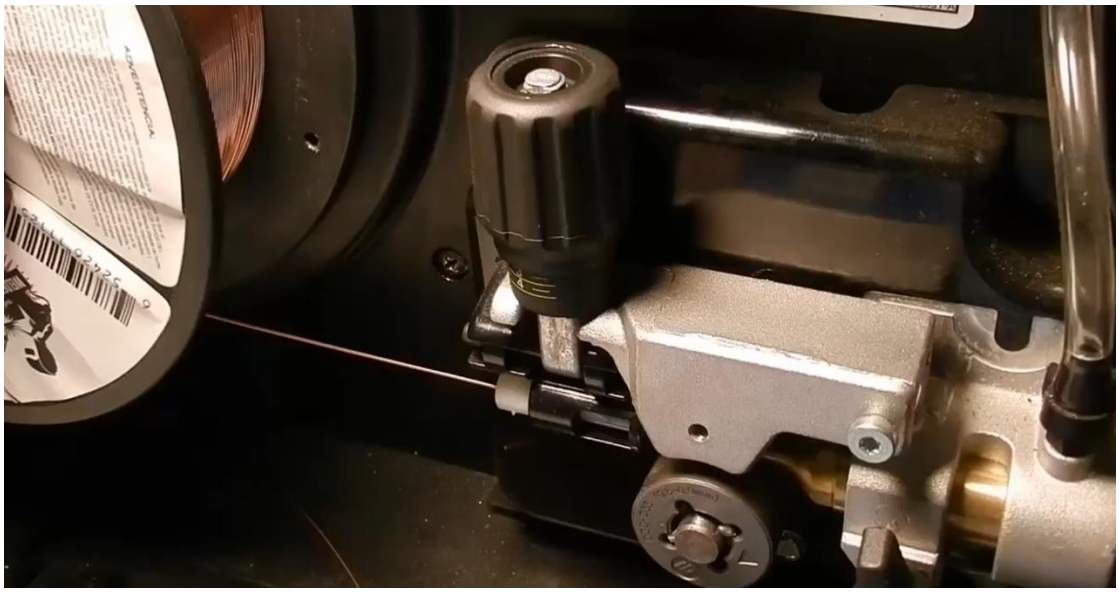
Σχήμα 2 – 192: Διαδικασία που λαμβάνει χώρα μέσα στο εργαλείο lockbolting

Το αλουμίνιο μπορεί και να συγκολληθεί. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι, MIG, TIG, FSW. MIG, ή αλλιώς, metal inert gas, ή gas metal arc welding (GMAW), ή wire welding είναι ιδανικό για την ένωση «χοντρών» αντικειμένων, πιο βαθιά συγκόλληση. Είναι αρκετά αυτοματοποιημένο και κοστίζει 16€/m περίπου. Η διαδικασία χρησιμοποιεί καταναλώσιμο καλώδιο – filler. Ειδικό αέριο το οποίο προστατεύει την περιοχή από τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος αλλοιώνει την ποιότητα της συγκόλλησης. Το καλώδιο και το αέριο βγαίνουν από το στόμιο με συγκεκριμένο ρυθμιζόμενο ρυθμό, που σταματάει και ξεκινάει με διακόπτη on – off. Το ρεύμα που τροφοδοτεί και λιώνει το καλώδιο ρέει σε κύκλο, από την μπαταρία στο στόμιο και στο καλώδιο, από το καλώδιο στο αντικείμενο που συγκολλάται, και μέσω καλωδίου σαν αυτό εκκίνησης του αυτοκινήτου, πίσω στην μπαταρία. Το στόμιο και το καλώδιο είναι το + και το αντικείμενο που συγκολλάται το -.

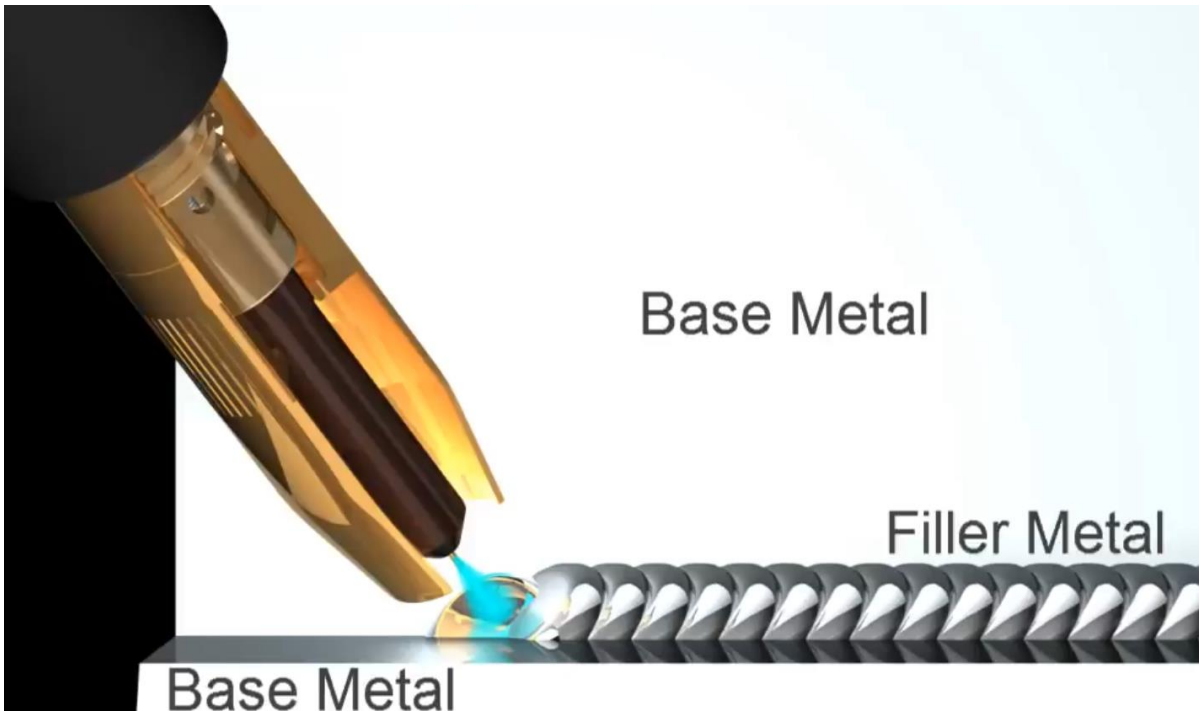


Σχήμα 2 – 193: Εσωτερικό στομίου συγκόλλησης MIG

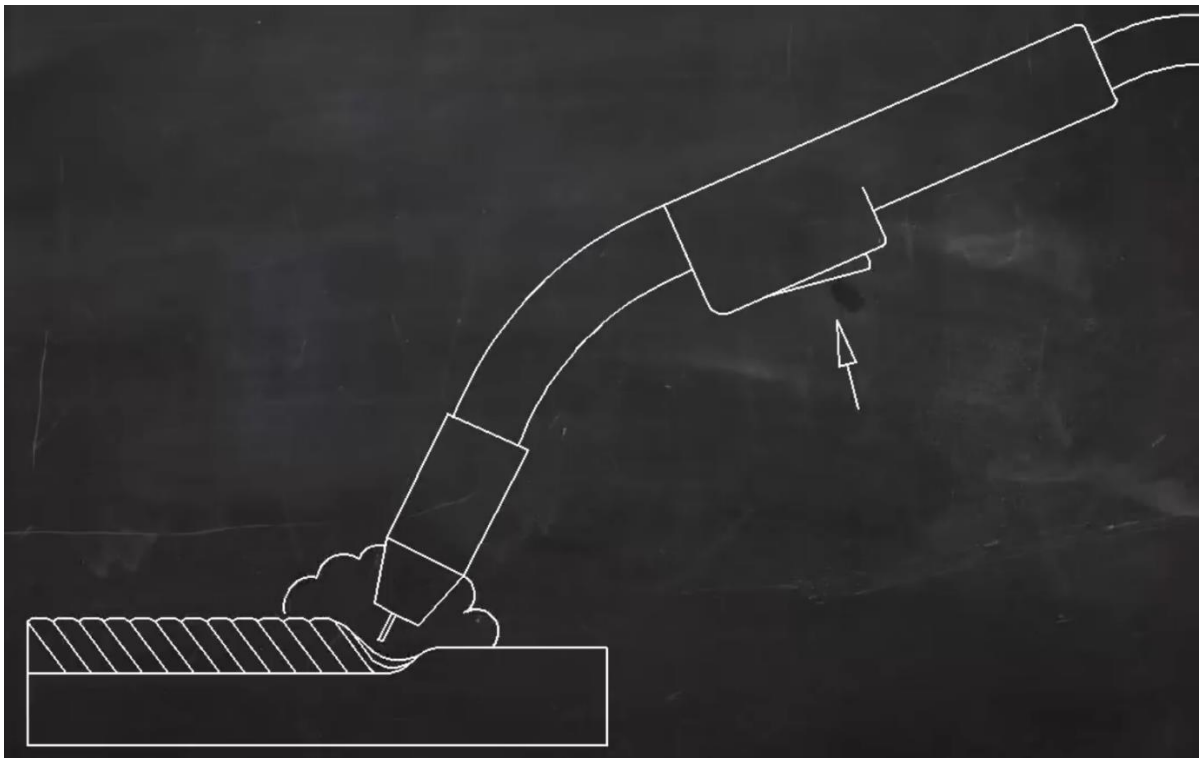
Σχήμα 2 – 194: Μορφή στομίου MIG στην πραγματικότητα



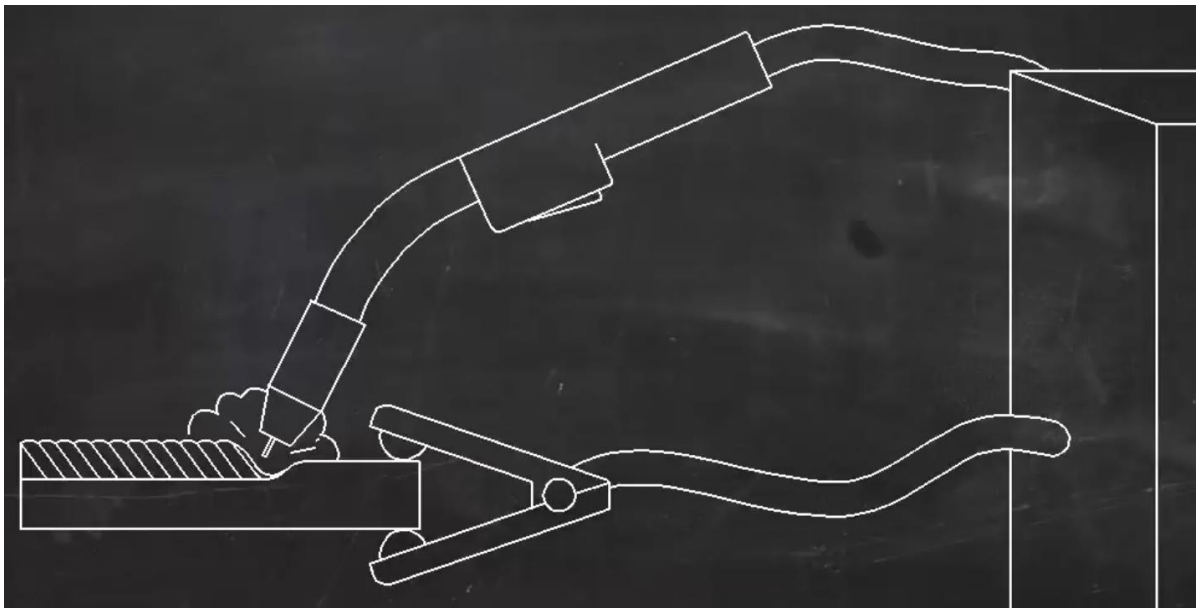
Σχήμα 2 – 195: Τροφοδότηση καλωδίου κατά την MIG



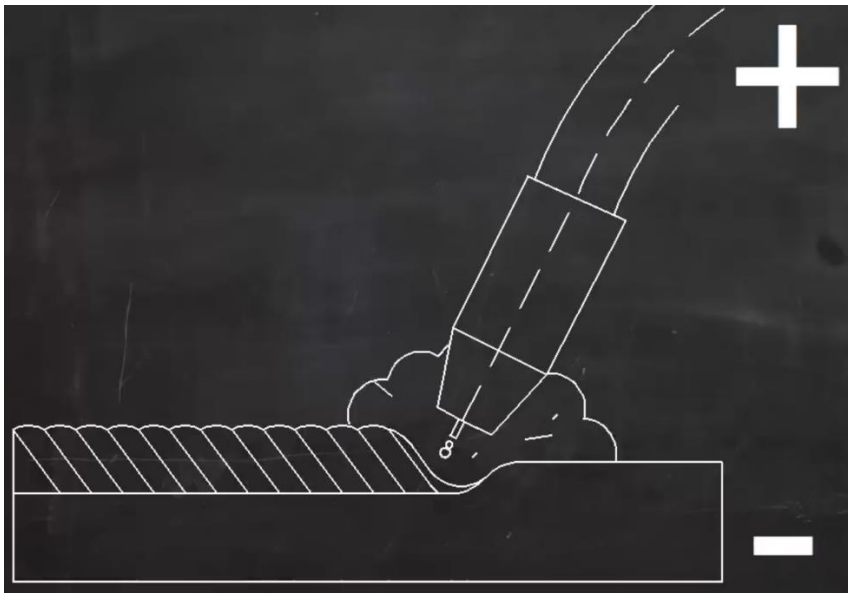
Σχήμα 2 – 196: Συγκόλληση MIG εξωραφής



Σχήμα 2 – 197: Αναπαράσταση της εφαρμογής του προστατευτικού αερίου και του διακόπτη on – off της MIG

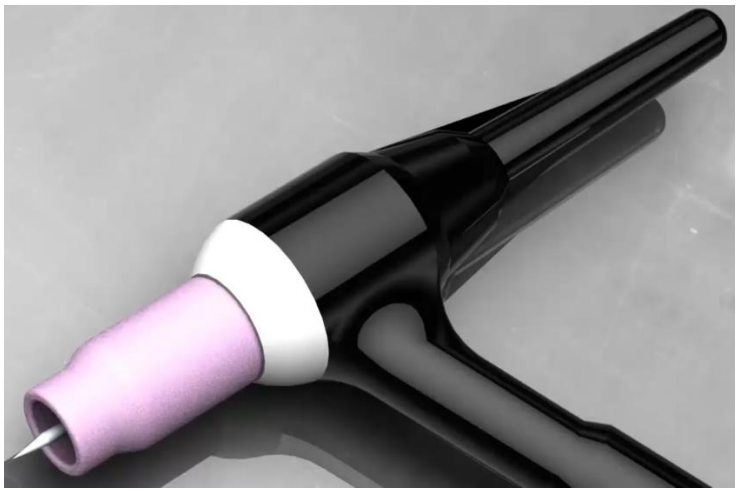


Σχήμα 2 – 198: Αναπαράσταση της κυκλικής ροής του ρεύματος κατά την MIG

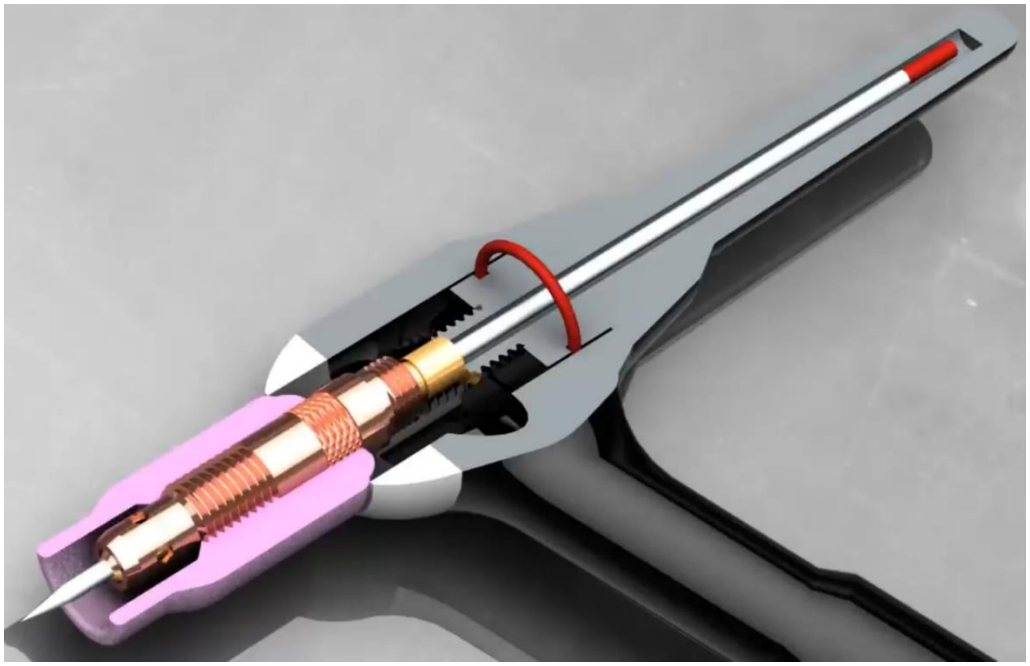


Σχήμα 2 – 199: Αναπαράσταση του θετικού και του αρνητικού κατά την συγκόλληση MIG

TIG ή αλλιώς tungsten inert gas, ή gas tungsten arc welding (GTAW) ή heliarc welding είναι ιδανικό για την ένωση «λεπτών» αντικειμένων, φύλλων – sheet. Μία λεπτή μυτερή ράβδος που εξέχει από το στόμιο θερμαίνει και λιώνει το υλικό στην περιοχή της συγκόλλησης, ενώνοντας το αντικείμενο με χρήση του ίδιου του του υλικού. Η ράβδος αυτή ονομάζεται ηλεκτρόδιο και έχει πολύ υψηλότερο σημείο τήξης σε σχέση με το αλουμίνιο. Παρ' όλο που δεν καταναλώνεται κατά την συγκόλληση, χρειάζεται αλλαγή μετά από κάποιο χρόνο χρήσης. Κανονικά δεν χρησιμοποιείται καταναλώσιμο καλώδιο, υπάρχει όμως η δυνατότητα για χρήση ράβδου η οποία όμως πρέπει να «ταιριάζει» με τα μέταλλα που συγκολλούνται. Και εδώ γίνεται χρήση προστατευτικού αερίου. Το ρεύμα ρέει σε κύκλο, το + όμως είναι το αντικείμενο και το -, το στόμιο. Κατά την συγκόλληση αλουμινίου το + και το - εναλλάσσονται, με αποτέλεσμα καταπόνηση του ηλεκτροδίου λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσει, αλλά καθαρό τελικό αποτέλεσμα. Η εναλλαγή αυτή εμποδίζει τα οξείδια του αλουμινίου που δημιουργούνται να ανέβουν στην επιφάνεια και να αλλοιώσουν την ποιότητα της συγκόλλησης. Αντίθετα πηγαίνουν συνεχώς πάνω κάτω, μένοντας ουσιαστικά στην ίδια θέση.

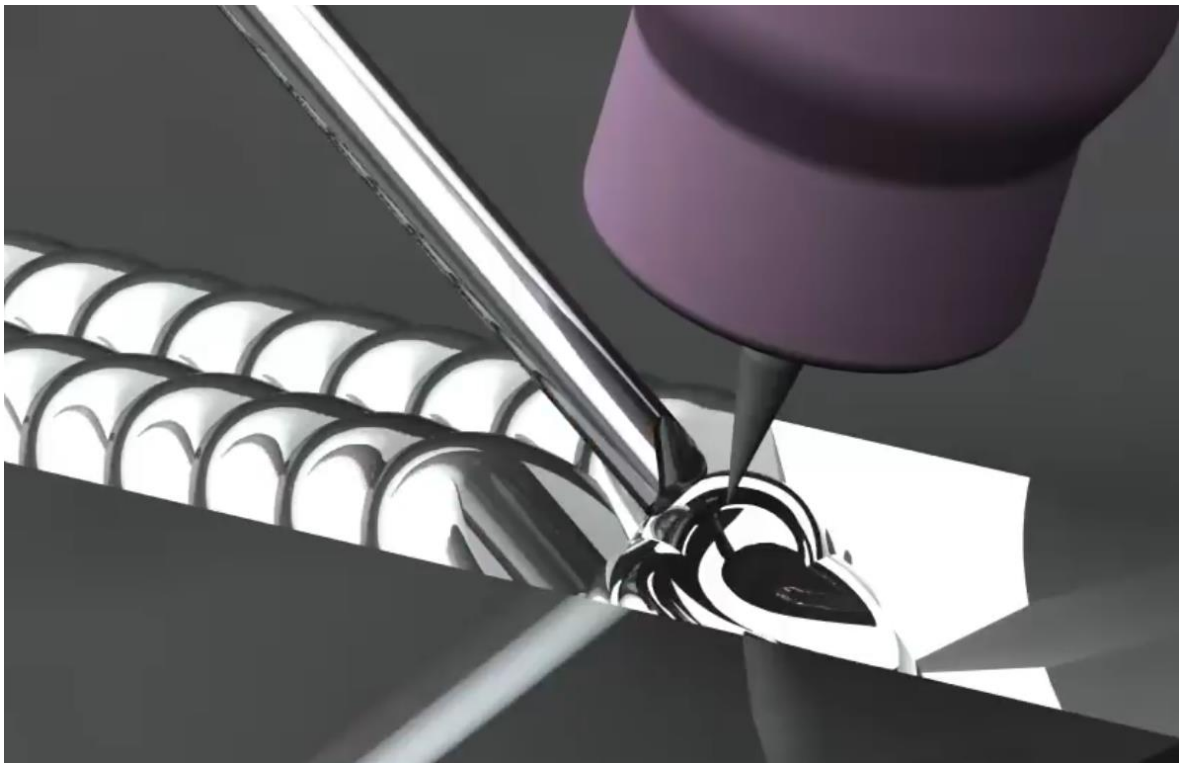


Σχήμα 2 – 200: Αναπαράσταση στομίου TIG

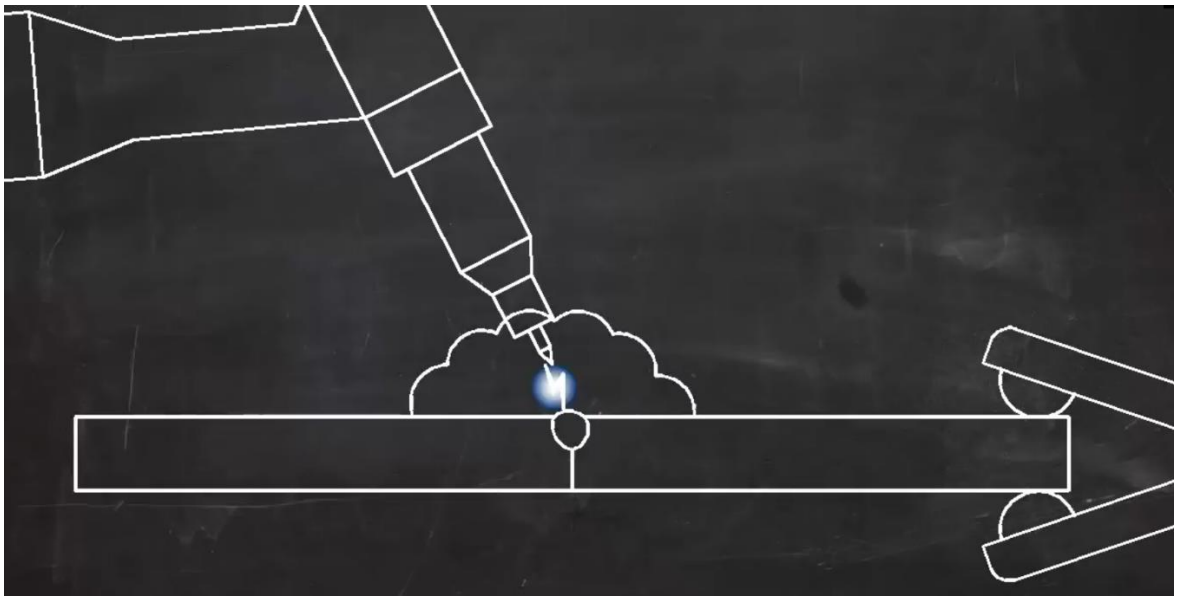


Σχήμα 2 – 201: Περιεχόμενο στομίου TIG

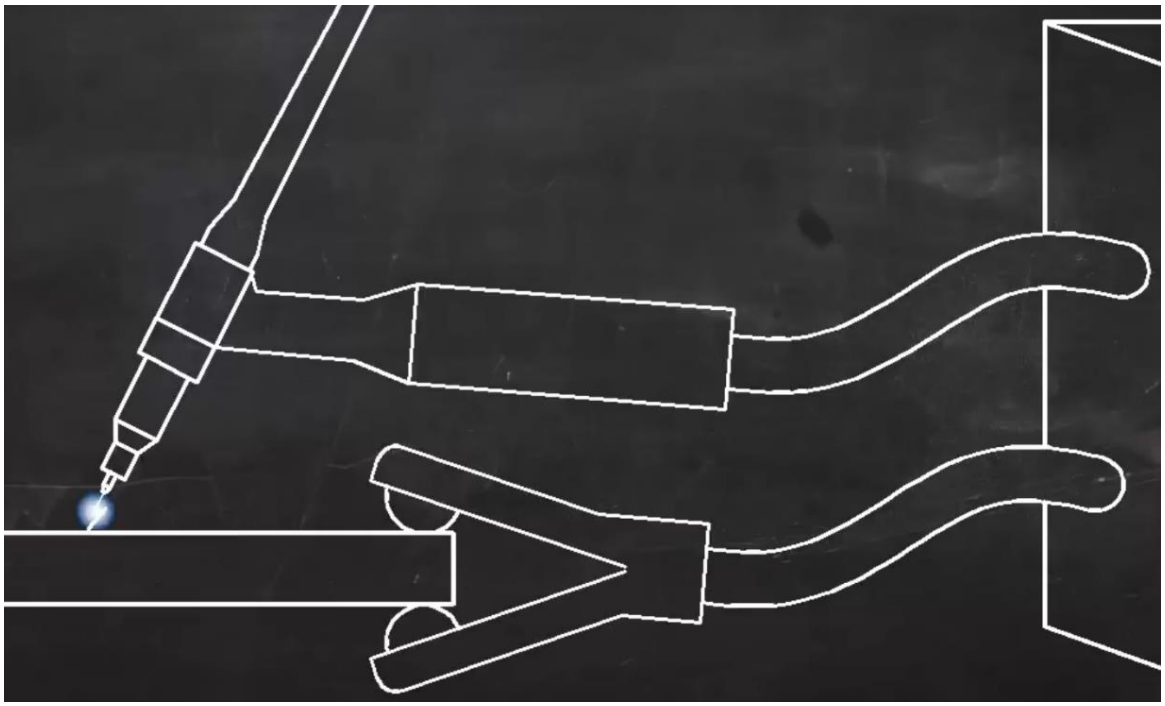
Σχήμα 2 – 202: Ηλεκτρόδιο συγκόλλησης TIG



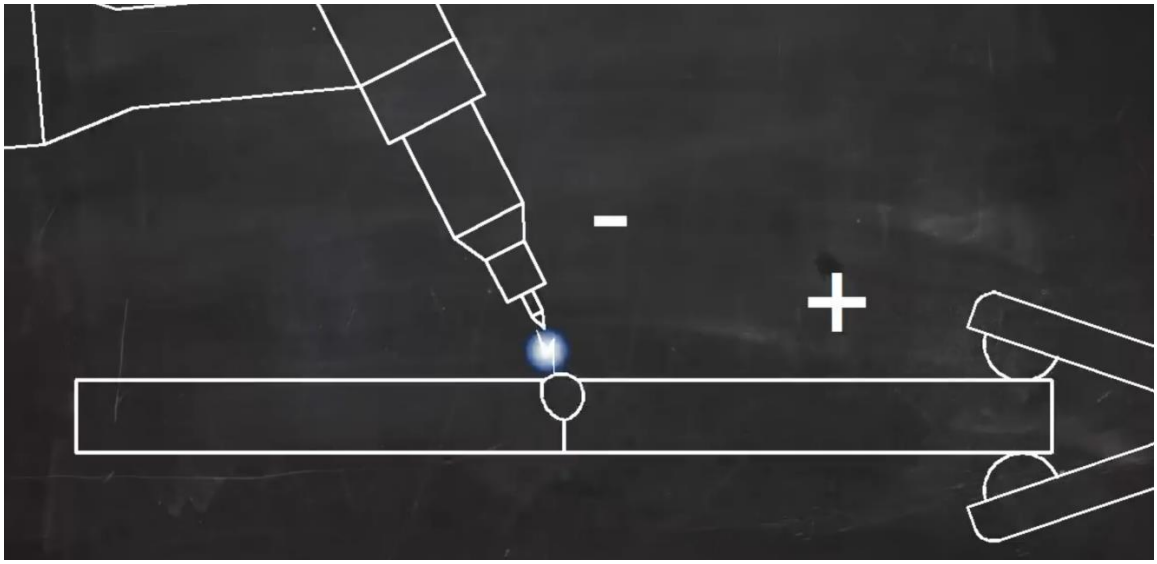
Σχήμα 2 – 203: Χρήση ράβδου ως filler, ακολουθεί το στόμιο, κατά την TIG



Σχήμα 2 – 204: Αναπαράσταση χρήσης προστατευτικού αερίου κατά την TIG

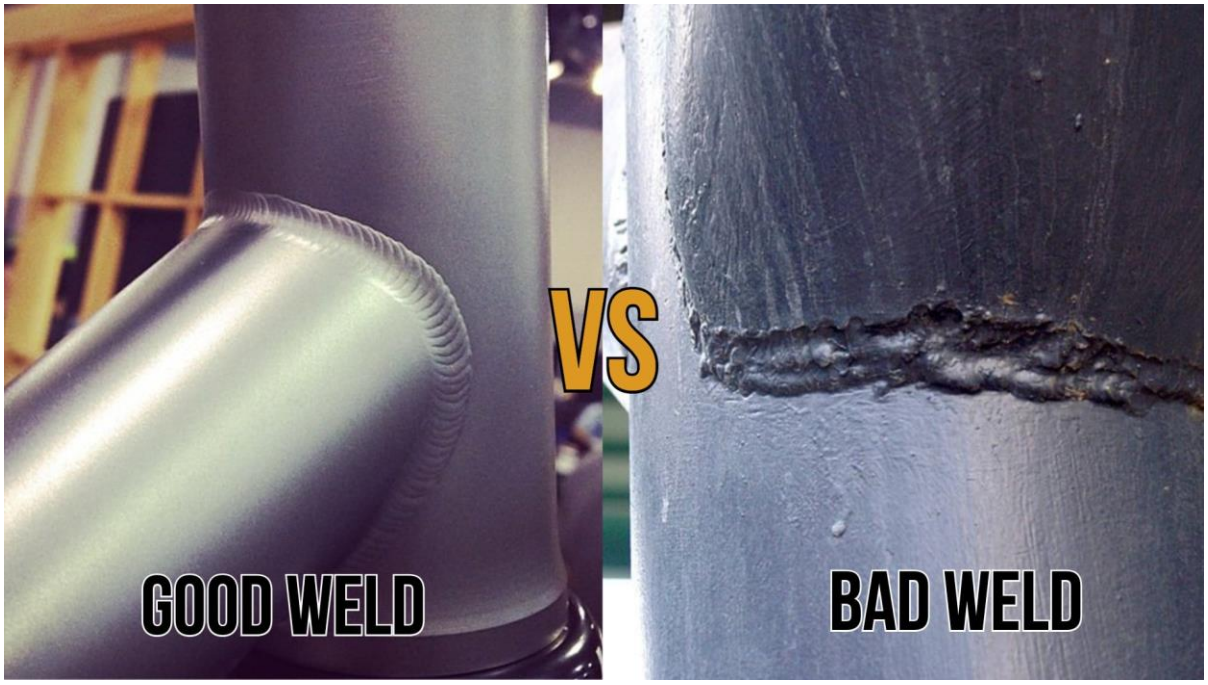


Σχήμα 2 – 205: Αναπαράσταση της κυκλικής ροής του ρεύματος κατά την TIG



Σχήμα 2 – 206: Αναπαράσταση του θετικού και του αρνητικού κατά την TIG, τα οποία εναλλάσσονται κατά την συγκόλληση αλουμινίου

Σχήμα 2 – 207: Παράδειγμα καλής συγκόλλησης



Σχήμα 2 – 208: Καλή και κακή συγκόλληση

Τα καλώδια και οι ράβδοι που χρησιμοποιούνται, fillers, παρά τις ιδιότητές τους, λειτουργούν καλά, μόνο όταν ενώνονται με συμβατά κράματα. Κοστίζουν 7€/kg αν είναι από τα συνήθη και διάσημα κράματα,

και 26€/kg αν είναι από πιο εξωτικά κράματα. Σημασία στην επιλογή filler έχουν ο σκοπός και τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης. Εάν μας ενδιαφέρει η εξωτερική εμφάνιση της συγκόλλησης, fillers από το 4043 πρέπει να αποφεύγονται καθώς το κράμα αυτό γίνεται μαύρο όταν το προϊόν ανοδιώνεται. Αν μας ενδιαφέρει η αντοχή, το 5556 έχει υψηλή αντοχή (140 MPa). Για αντίσταση σε διάβρωση, το 5654 είναι καλό έναντι διάβρωσης, ευαίσθητο όμως στις υψηλές θερμοκρασίες. Αν θέλουμε ευκολία εφαρμογής, το 4043 λιώνει γρήγορα, ρέει ευκολότερα και δεν ρηγματώνεται εύκολα (80 MPa). Γενικά όμως το 5356 (115 MPa) είναι το πιο καλό «all around», και προσαρμόζεται χρωματικά με τα κράματα που ενώνει.

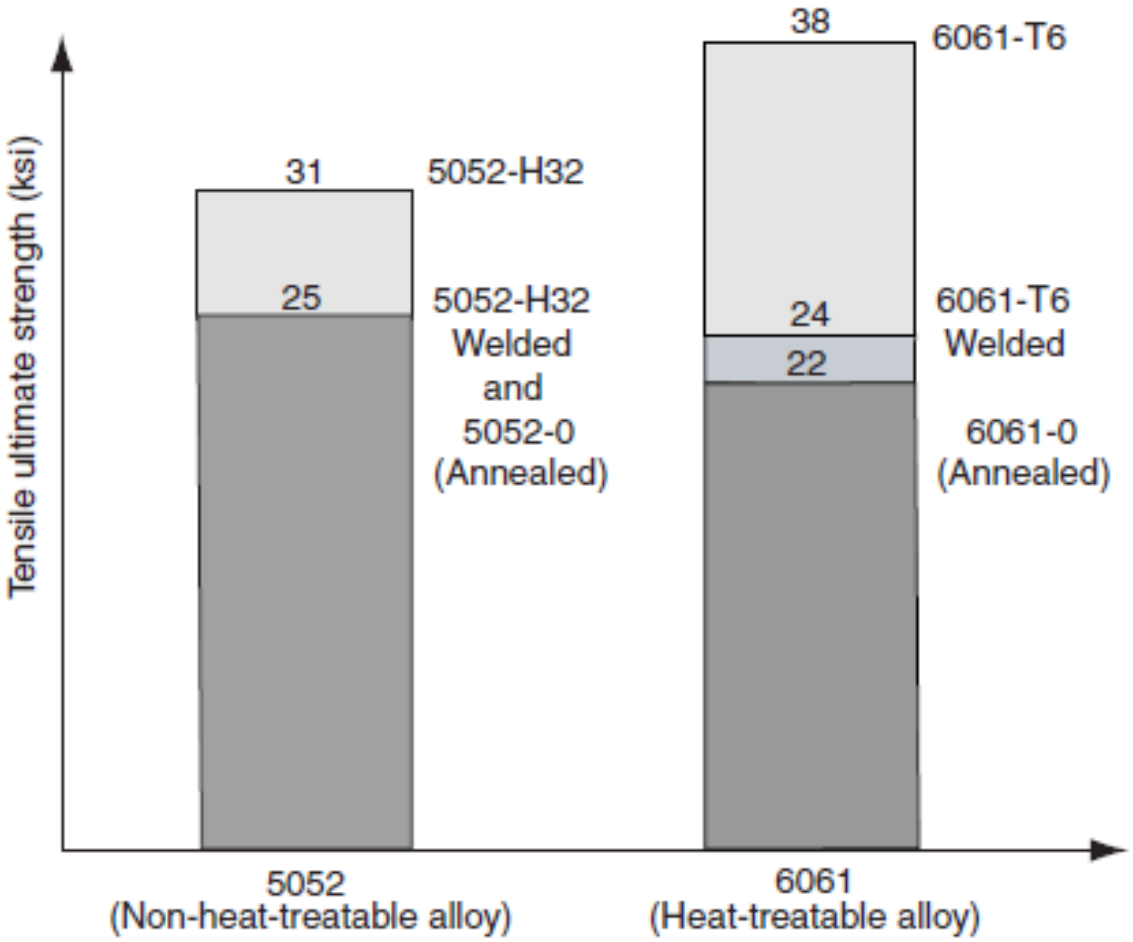
Parent alloy series	Filler alloy	Comments
1xxx	Type 1 or 4	Type 1 for corrosion resistance. Type 4 for strength and crack prevention.
3xxx	Type 3 or 4	Type 3 for corrosion resistance. Type 4 for strength and crack prevention.
5xxx	Type 5	Important to select *appropriate* Type 5 composition, depending on actual parent composition.
6xxx	Type 4 or 5	Type 4 for crack prevention. Type 5 may give better weld strength.
7xxx	Type 5	When strength is paramount, it is important to select *appropriate* Type 5 filler composition.

Σχήμα 2 – 209: Πίνακας επιλογής τύπου filler ανάλογα με το κράμα που ενώνει και τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της συγκόλλησης

	Alloy-series of second parent metal				
Alloy-series of first parent metal	1xxx	3xxx	5xxx	6xxx	7xxx
1xxx	1 or 4	3 or 4	5	4	5
3xxx	3 or 4	3 or 4	5	4	5
5xxx	5	5	5	5	5
6xxx	4	4	5	4 or 5	5
7xxx	5	5	5	5	5

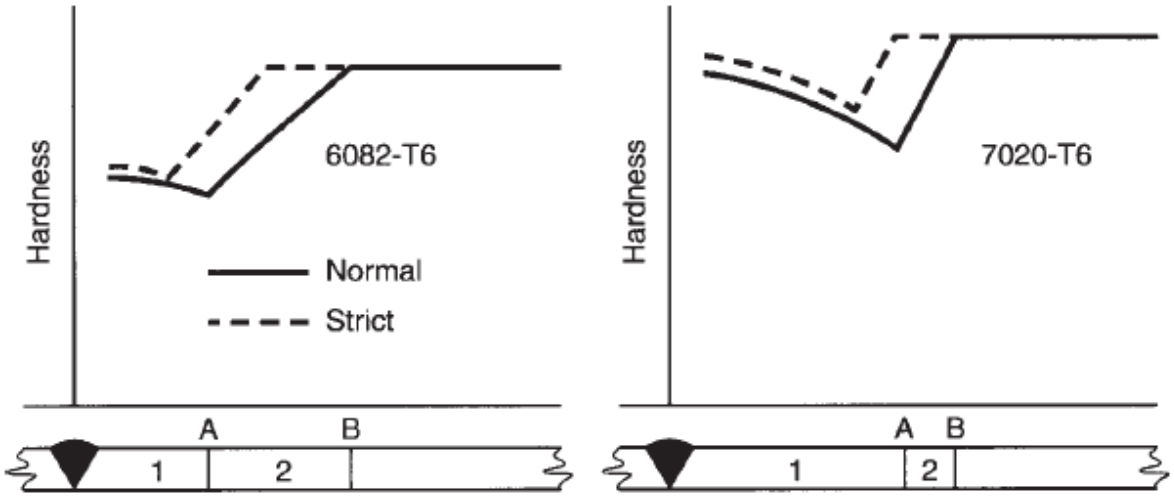
Σχήμα 2 – 210: Πίνακας επιλογής τύπου filler ανάλογα με τα διαφορετικά κράματα που ενώνει

Προτιμούμε το πλήθος των συγκολλήσεων να γίνεται σε κλειστό και προστατευμένο χώρο. Όχι στο εργοτάξιο, και από έμπειρους τεχνίτες. Τα κράματα της 2xxx και τα πιο δυνατά της 7xxx δεν συγκολλούνται. Η συγκόλληση ρίχνει την αντοχή, σε άλλα κράματα περισσότερο, σε άλλα λιγότερο, σε επίπεδο που ακυρώνεται το hot/cold work. Για παράδειγμα, για το 5086, από 250 MPa πέφτουμε στα 240 MPa μόνο. Οι συντελεστές ασφαλείας είναι 0.9 – 0.75, οπότε 216 MPa – 180 MPa, επειδή δεν μπορούμε να έχουμε απόλυτη τελειότητα στις συγκολλήσεις. Η άποψη του συγκολλητή έχει μεγάλη σημασία, ακόμα και αν επηρεάζει τον σχεδιασμό μας. Πρέπει τα μέλη που θα συγκολληθούν να έχουν την κατάλληλη μορφή και προετοιμασία, προκειμένου να «πιάσει τόπο» η συγκόλληση.

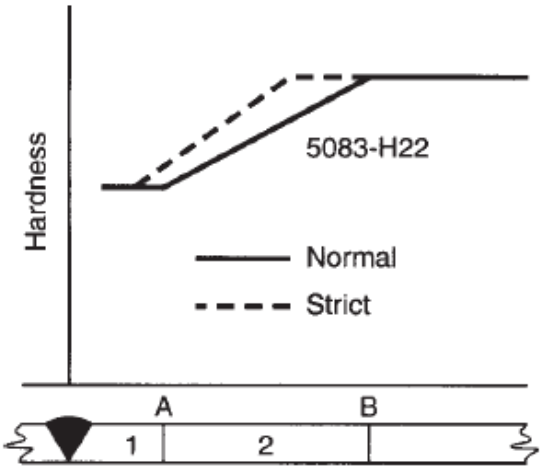


Σχήμα 2 – 211: Πτώση της αντοχής κατά την συγκόλληση για 2 διαφορετικά κράματα,

1 ksi = 7 MPa



Σχήμα 2 – 212: Διαγράμματα πτώσης της αντοχής κοντά στην συγκόλληση



Σχήμα 2 – 213: Διάγραμμα πτώσης της αντοχής κοντά στην συγκόλληση

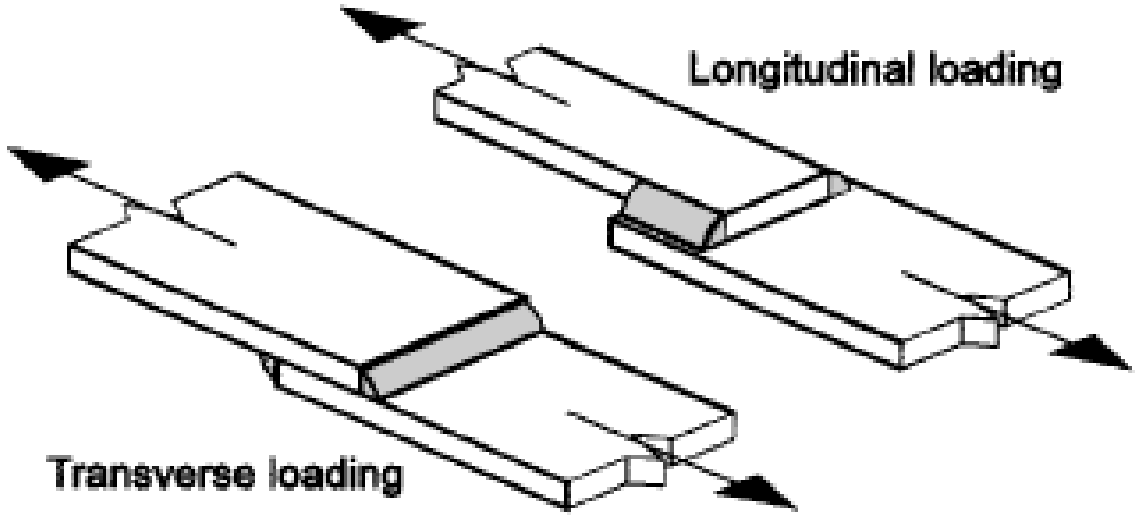
Πρέπει το filler να έχει μεγαλύτερη αντοχή από τα κράματα που ενώνει, να μην είναι ποτέ ο αδύναμος κρίκος. Έστω filler 4043 (77,5 MPa) ενώνει κομμάτια 6061 (162 MPa).

για το 4043 έχουμε: 77,5/2,34 (συντελεστής ασφαλείας συγκόλλησης) = 33 MPa

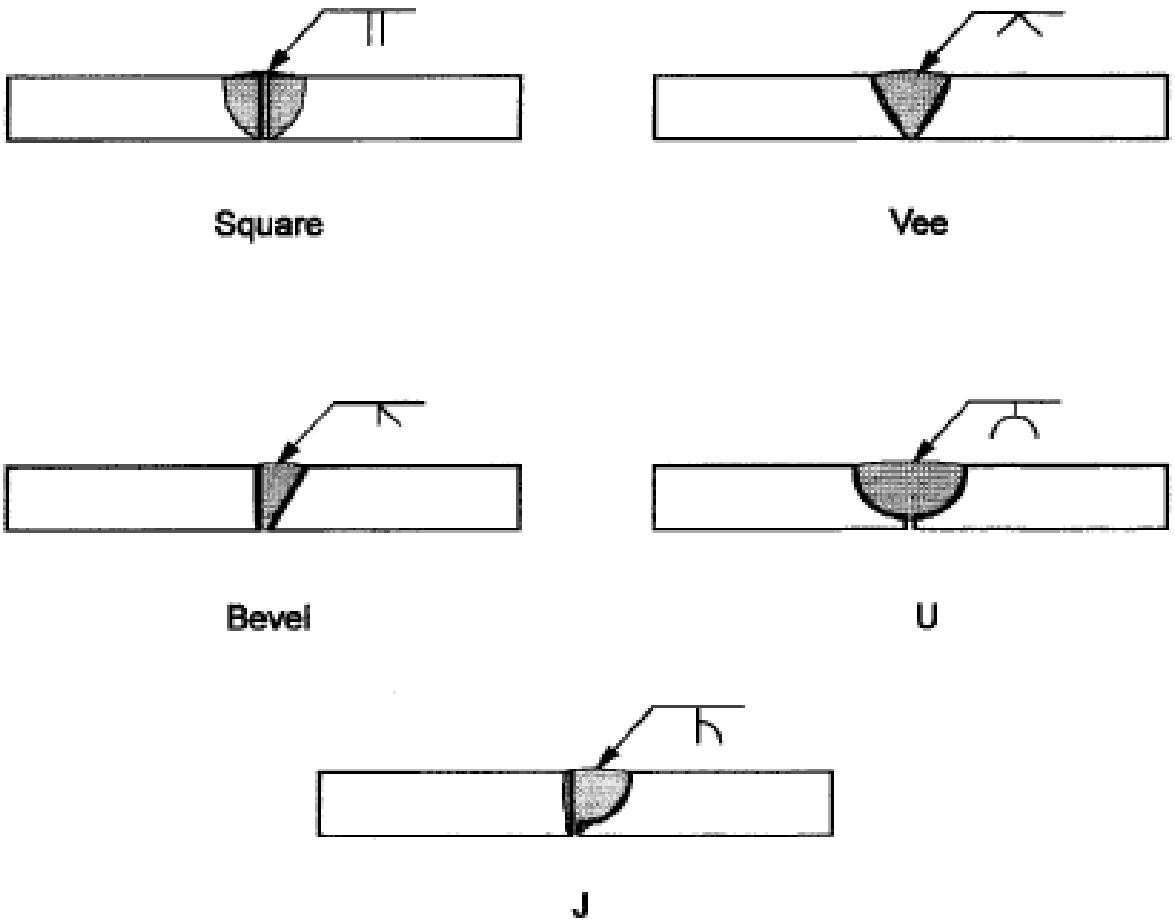
για το 6061 έχουμε: 162 MPa

αντοχή τελικού προϊόντος 61 MPa

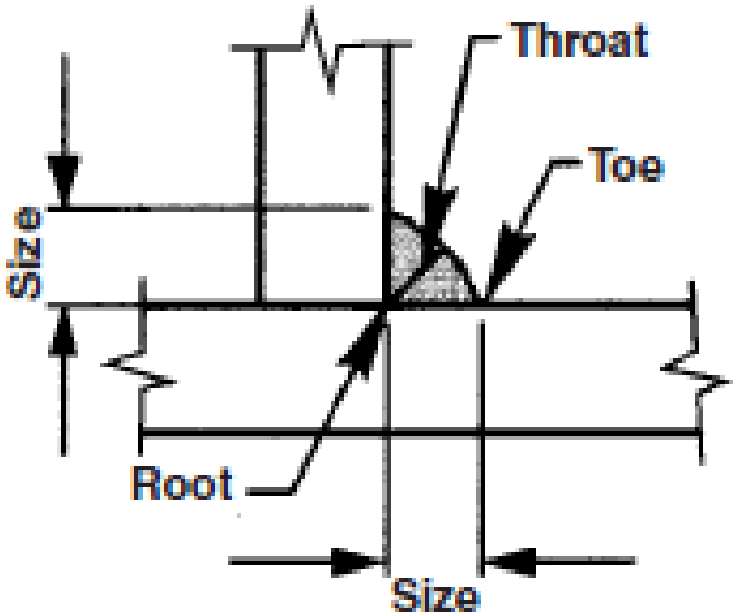
Και το δυνατότερο κράμα να έχουμε, εάν το μέσο σύνδεσης είναι αδύναμο, η αντοχή είναι η αντοχή του αδύναμου κρίκου. Πρέπει πάντα να έχουμε στο μυαλό μας την συρρίκνωση και την κύρτωση που λαμβάνει χώρα σε περίπτωση πολλαπλών συγκολλήσεων, ειδικά στο αλουμίνιο που διαστέλλεται και συστέλλεται περισσότερο από τον χάλυβα. Η αντοχή της συγκόλλησης σε διάτμηση είναι μικρότερη της αντοχής σε εφελκυσμό. Για λόγους ασφαλείας θεωρούμε την αντοχή σε διάτμηση την αντοχή της συγκόλλησης. Από άποψη κόστους προτιμούμε συγκόλληση μορφής διακεκομμένης γραμμής, καθώς το κόστος πηγαίνει με τον όγκο και όχι με το μήκος. Η συνεχόμενη γραμμή έχει μεγαλύτερη αντοχή αλλά σε λεπτά φύλλα ενδέχεται να προκαλέσει κύρτωση και αλλοίωση των γωνιών αφού κρυώσει, η ορθή γωνία δηλαδή να γίνει οξεία. Η συγκόλληση σε μεμονωμένα σημεία προκαλεί ισχυρές τοπικές τάσεις και δεν είναι αποδοτική.



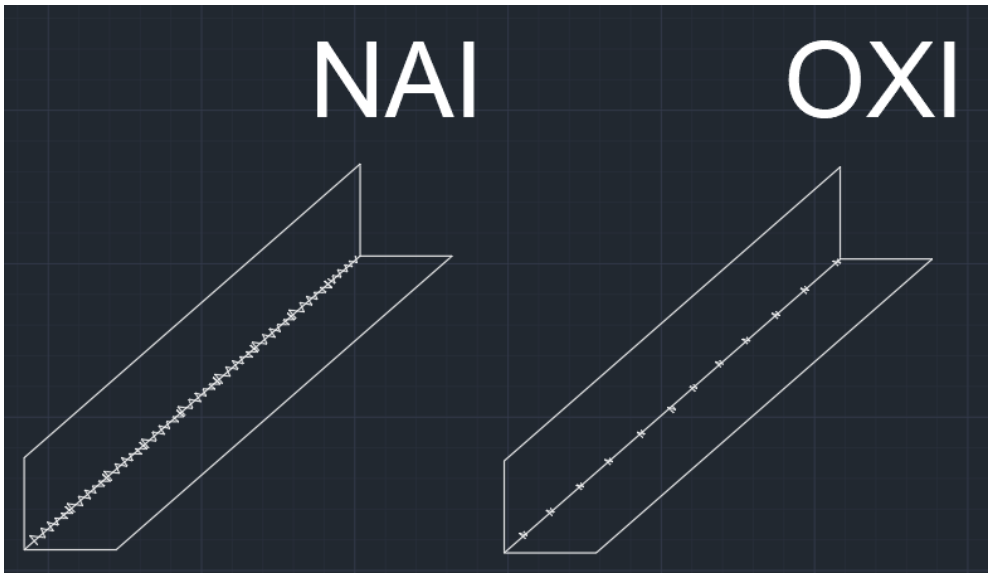
Σχήμα 2 – 214: Εφελκυσμός και διάτμηση συγκόλλησης, αντίστοιχα



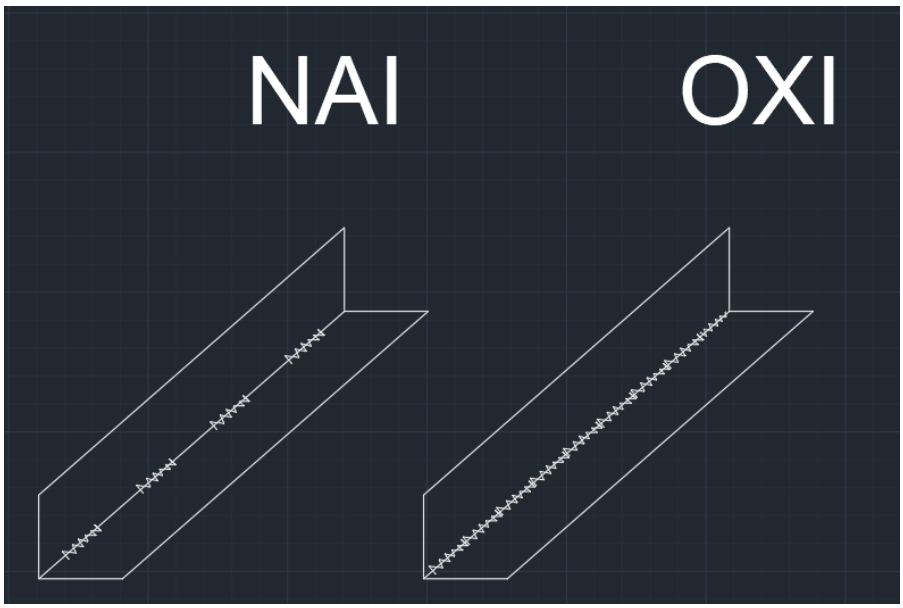
Σχήμα 2 – 215: Εσωραφές



Σχήμα 2 – 216: Εξωραφή

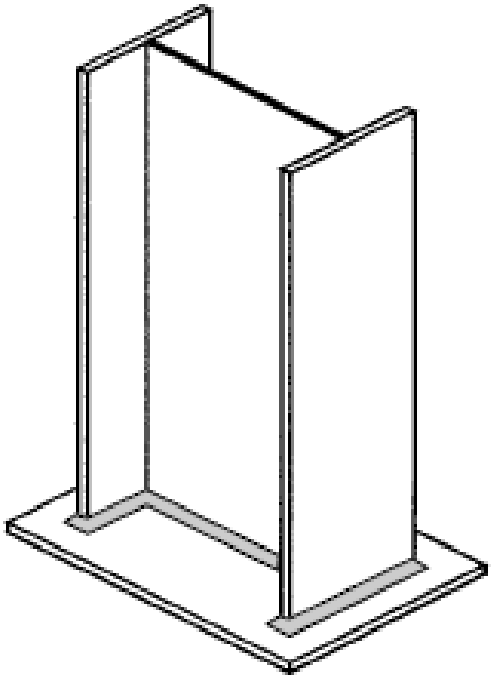


Σχήμα 2 – 217: Συγκόλληση συνεχόμενης γραμμής και μεμονωμένων σημείων, κριτήριο η αρτιότητα και η αντοχή

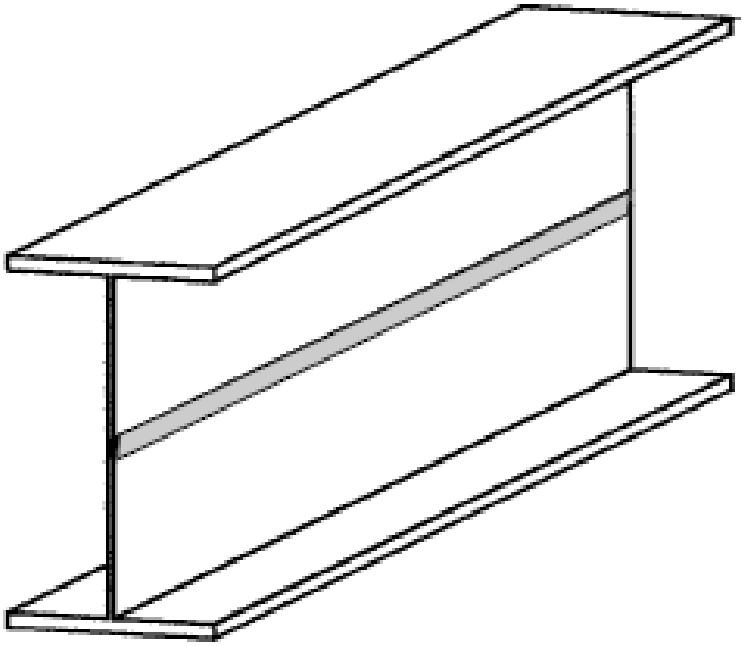


Σχήμα 2 – 218: Συγκόλληση διακεκομμένης και συνεχόμενης γραμμής, κριτήριο το κόστος

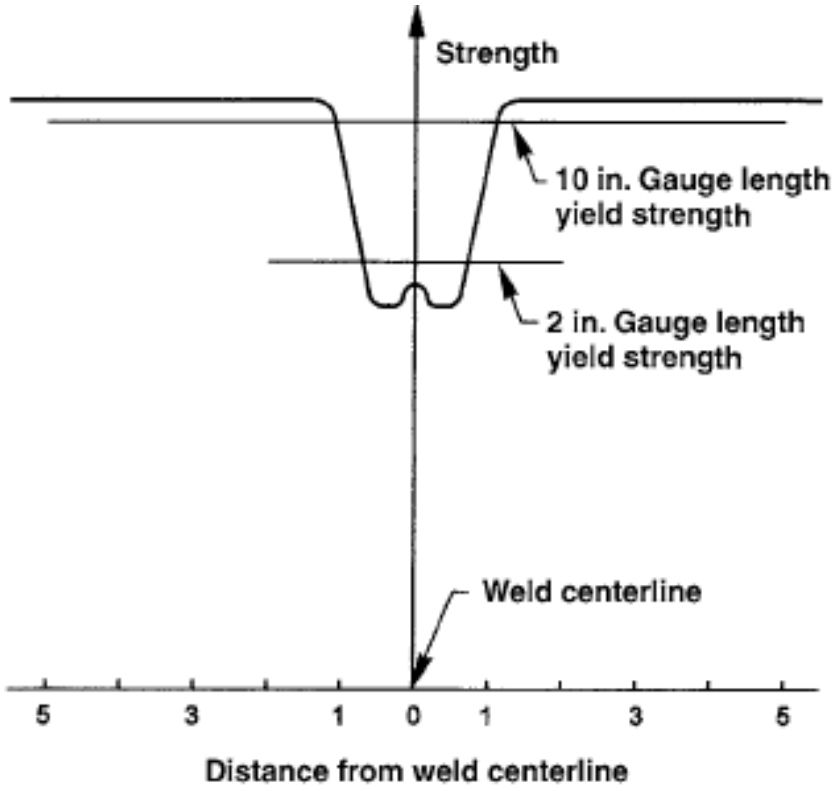
Σε περίπτωση συγκόλλησης στη διατομή θλιβόμενου μέλους, η συνολική αντοχή δεν επηρεάζεται. Ενώ σε διαμήκης επηρεάζεται η αντοχή. Μπορούμε αφού συγκολλήσουμε να ζεστάνουμε την περιοχή όπως στο heat – treatment (φούρνος), ώστε να αυξήσουμε την αντοχή. Ανάλογα με το κράμα έχουμε αύξηση της αντοχής 40% - 85%, οπότε αξίζει να σκεφτούμε λίγο παραπάνω την επιλογή μας. Υπάρχει ένας κανόνας, 2.5cm γύρω από την συγκόλληση έχουμε τις μεγάλες μειώσεις στην αντοχή. Είναι αρκετά συντηρητικός, αλλά πολύ απλός και γρήγορος.



Σχήμα 2 – 219: Συγκόλληση στη διατομή θλιβόμενου μέλους



Σχήμα 2 – 220: Διαμήκης διατομή



Σχήμα 2 – 221: Πτώση της αντοχής ανάλογα με την απόσταση από την συγκόλληση

Συγκόλληση τριβής, friction steer welding (FSW) είναι η διαδικασία ανάμειξης του υλικού δύο κομματιών που ακουμπούν το ένα το άλλο με ειδικές περιστρεφόμενες κεφαλές. Συμφέρει από άποψη ταχύτητας και κόστους όταν γίνεται για μαζική παραγωγή λόγω της αυτοματοποίησης των μηχανημάτων. Δεν αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες όπως στο TIG και MIG, οπότε ιδανικό για αλουμίνιο. Δεν υπάρχει ανάγκη για αέριο προστασίας, καλώδιο συμπλήρωσης και κύκλωμα ρεύματος. Η συγκολλήσεις τριβής είναι ο ιδανικός τρόπος συγκόλλησης των κραμάτων της σειράς 2xxx, και του δυνατού, μη συγκολλήσιμου της 7xxx, για χρήση στην αεροδιαστημική μηχανική. Δεν μπορούν να συγκολληθούν διαφορετικά. Δεν χρειάζονται ειδικές εσοχές όπως στις εσωραφές. Δεν είναι ακόμα ευρέως διαθέσιμο, λόγω των ακριβών και σπάνιων εγκαταστάσεων. Υπάρχει έλλειψη κανονιστικών διατάξεων, επειδή είναι σχετικά καινούριο. Είναι πιο «φυσικός» τρόπος, σε σχέση με την MIG και TIG μέθοδο, και για αυτό δεν προκαλεί μεγάλη μείωση των ιδιοτήτων του υλικού. Έχει εφαρμογή και σε άλλα υλικά όπως το τιτάνιο.

Σχήμα 2 – 222: FSW

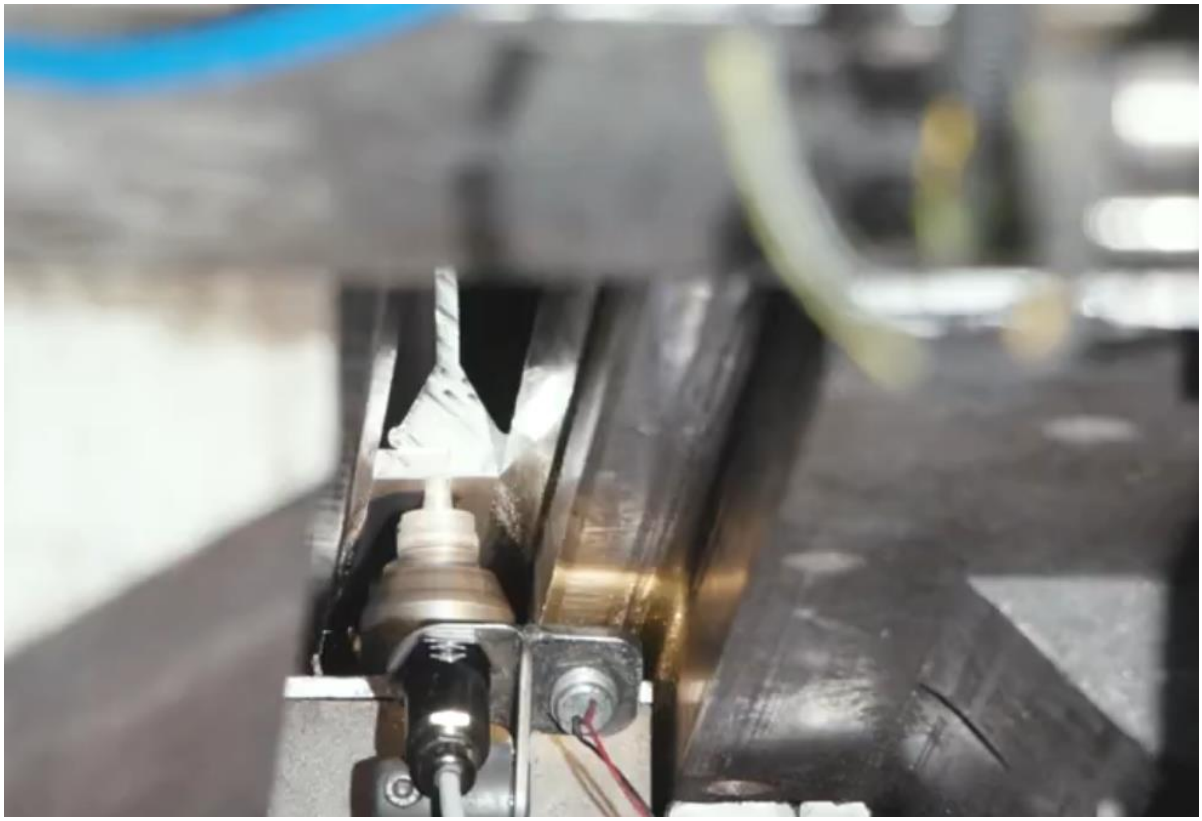
Σχήμα 2 – 223: Προετοιμασία για το πέρασμα της κεφαλής

Σχήμα 2 – 224: Προετοιμασία για το πέρασμα της κεφαλής

Σχήμα 2 – 225: Πλεονεκτήματα έναντι MIG και TIG

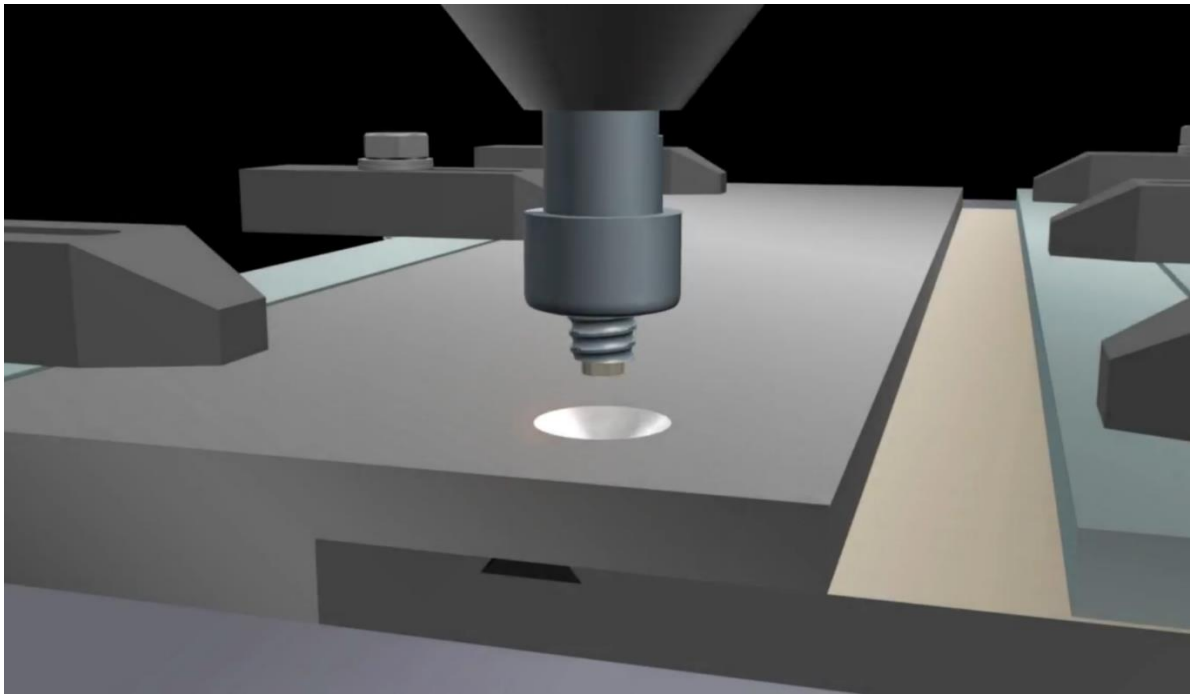
Σχήμα 2 – 226: Κομμάτι που θα συγκολληθεί με FSW με άλλα όμοια με αυτό

Σχήμα 2 – 227: Πέρασμα της κεφαλής

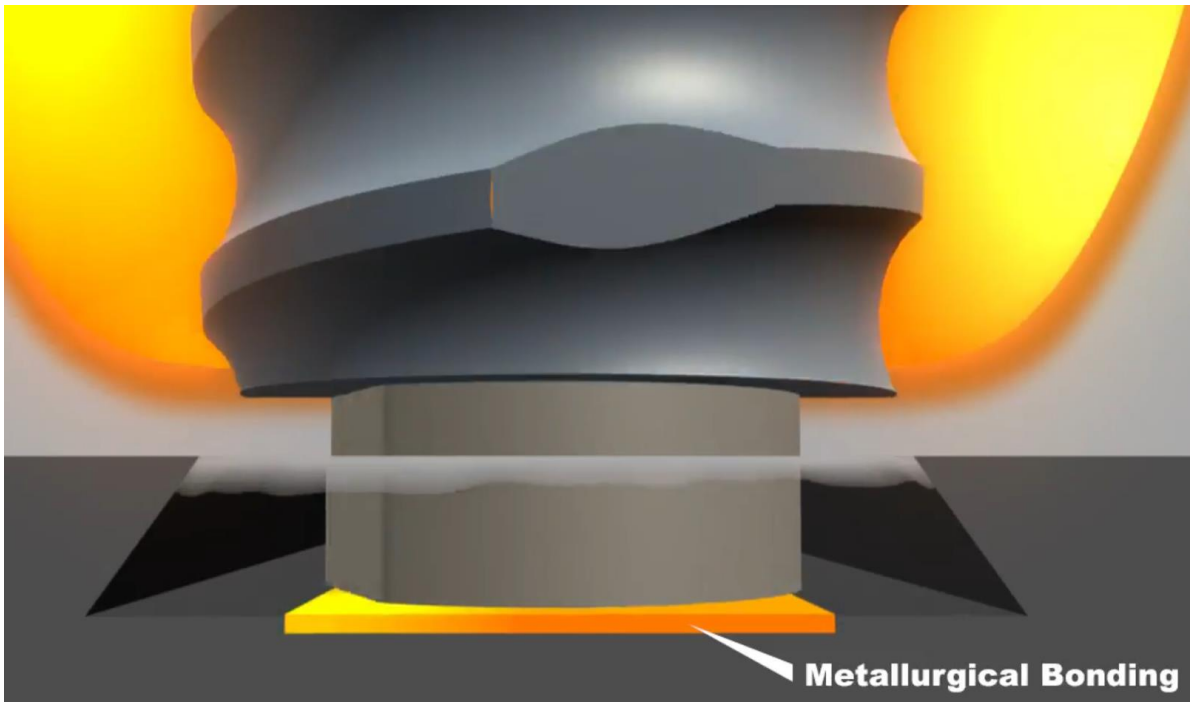


Σχήμα 2 – 228: Παράλληλο πέρασμα και από την κάτω μεριά της δοκού στο σχήμα 2 – 226 για μεγαλύτερη ταχύτητα συγκόλλησης

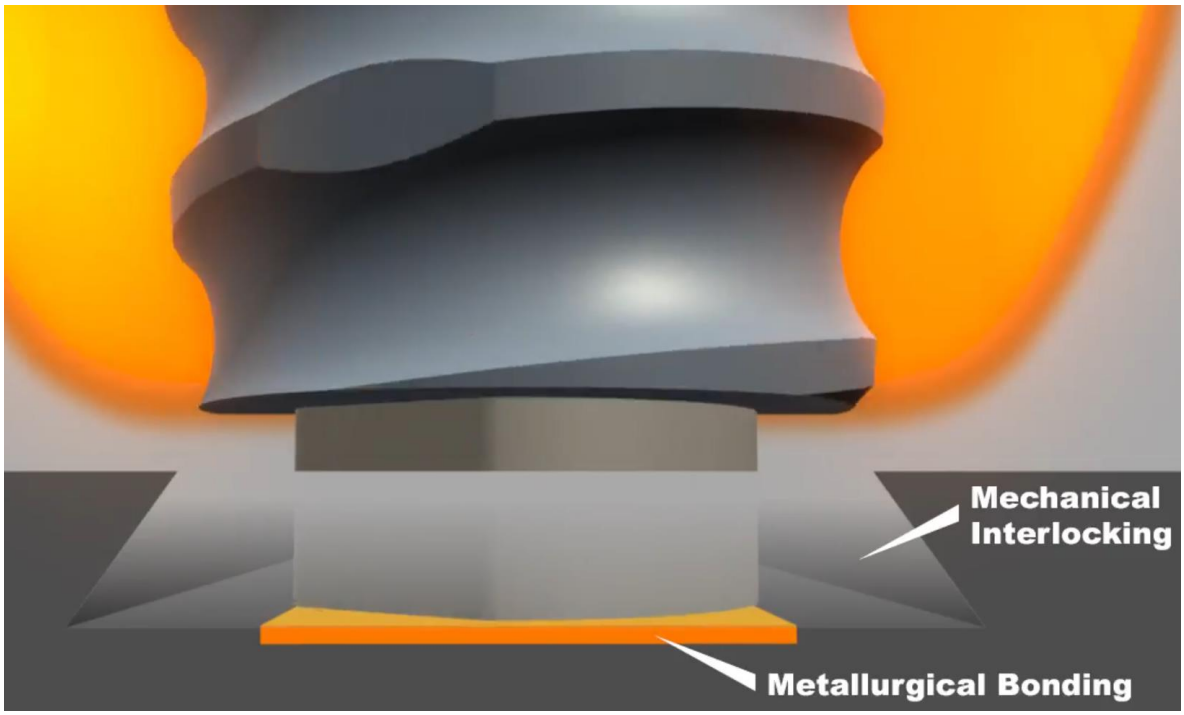
Σχήμα 2 – 229: Αναπαράσταση της κεφαλής FSW



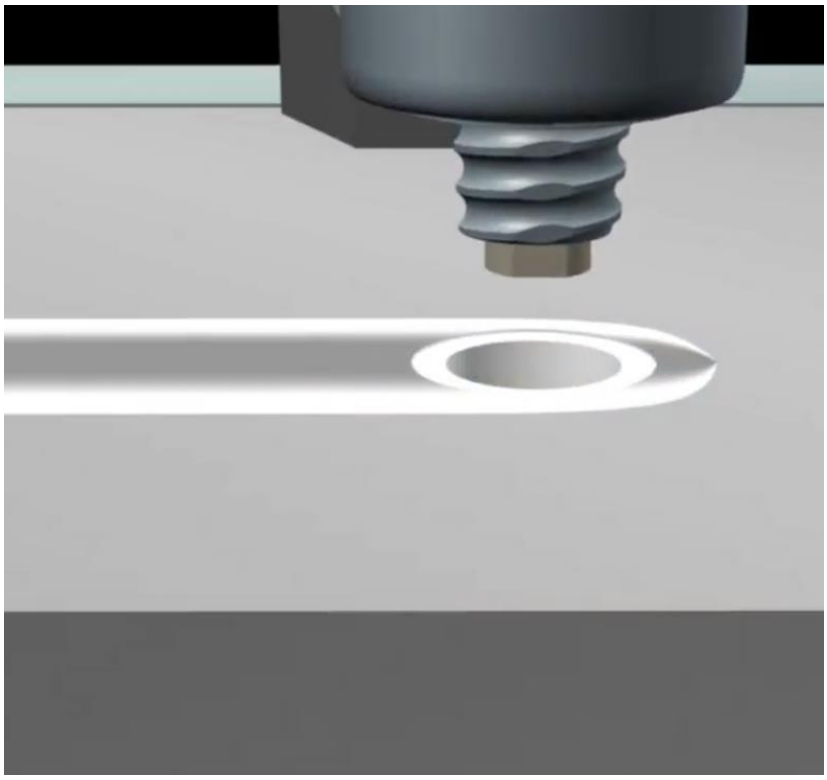
Σχήμα 2 – 230: Αναπαράσταση FSW



Σχήμα 2 – 231: Αναπαράσταση του τι συμβαίνει στην περιοχή της συγκόλλησης



Σχήμα 2 – 232: Αναπαράσταση του τι συμβαίνει στην περιοχή της συγκόλλησης

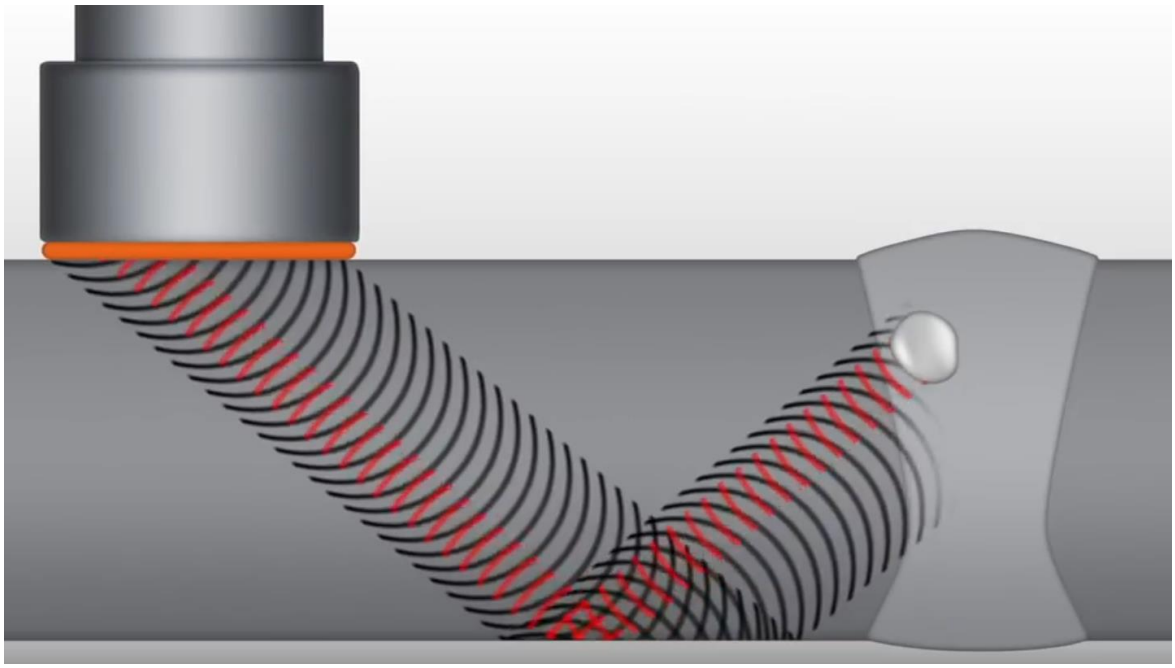


Σχήμα 2 – 233: Πέρας της FSW

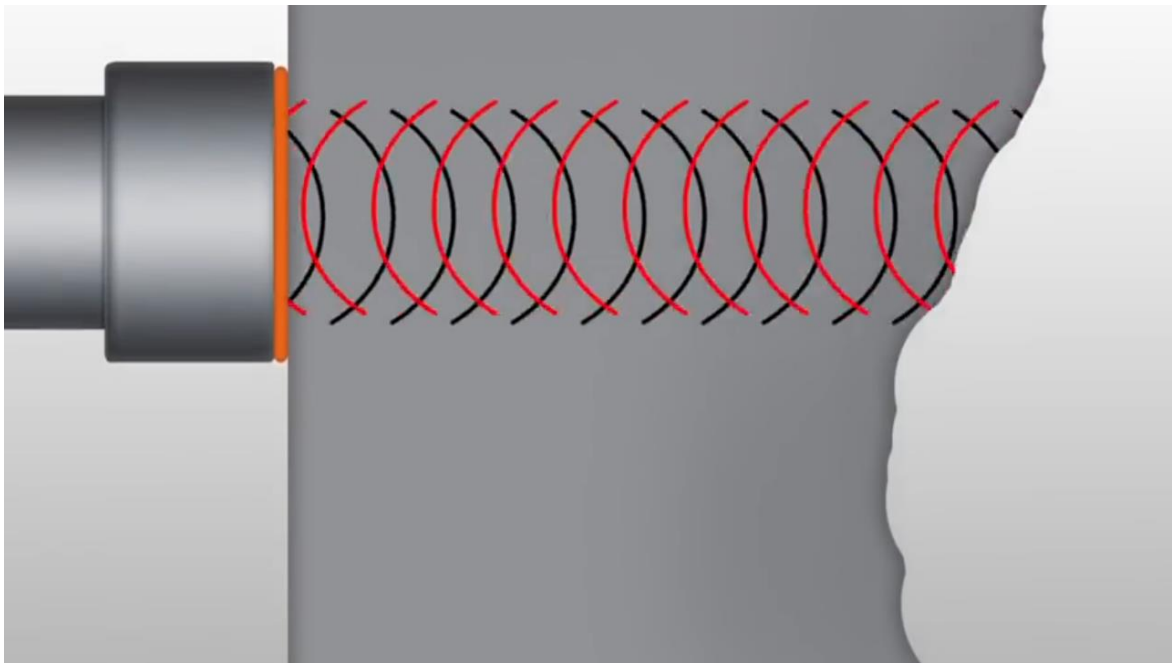
Σχήμα 2 – 234: Περαιτέρω πλεονεκτήματα της FSW

Οι συγκολλήσεις όλων των ειδών πρέπει να ελέγχονται. Έχουμε καταστροφικούς και μη, ελέγχους. Μη καταστροφικοί όπως με το μάτι, για εμφανείς ρωγμές και ασυνέχειες. Με ακτίνες Χ, για εσωραφές με σταθερά πάχη και τον εντοπισμό όλων σχεδόν των ατελειών (98%). Δεν εντοπίζει όμως, τις ατέλειες παράλληλα στην ακτίνα. Με μπογιά που μπαίνει στις ρωγμές. Με υπέρηχους, για τον εντοπισμό όλων των ατελειών. Οι υπέρηχοι είναι ακριβή μέθοδος η οποία χρειάζεται εξειδικευμένο προσωπικό για να γίνει σωστά και είναι καλό να ξέρουμε τι ψάχνουμε. Όπως για παράδειγμα ατέλειες στη συγκόλληση ή

αλλοίωση του υλικού. Υπάρχουν και καταστροφικοί έλεγχοι. Testάρισμα δειγμάτων στο εργαστήριο, για να δούμε αν ο τρόπος σύνδεσης είναι ο κατάλληλος και αν έγινε σωστή συγκόλληση.



Σχήμα 2 – 235: Χρήση υπέρηχου για εντοπισμό ατέλειας στη συγκόλληση

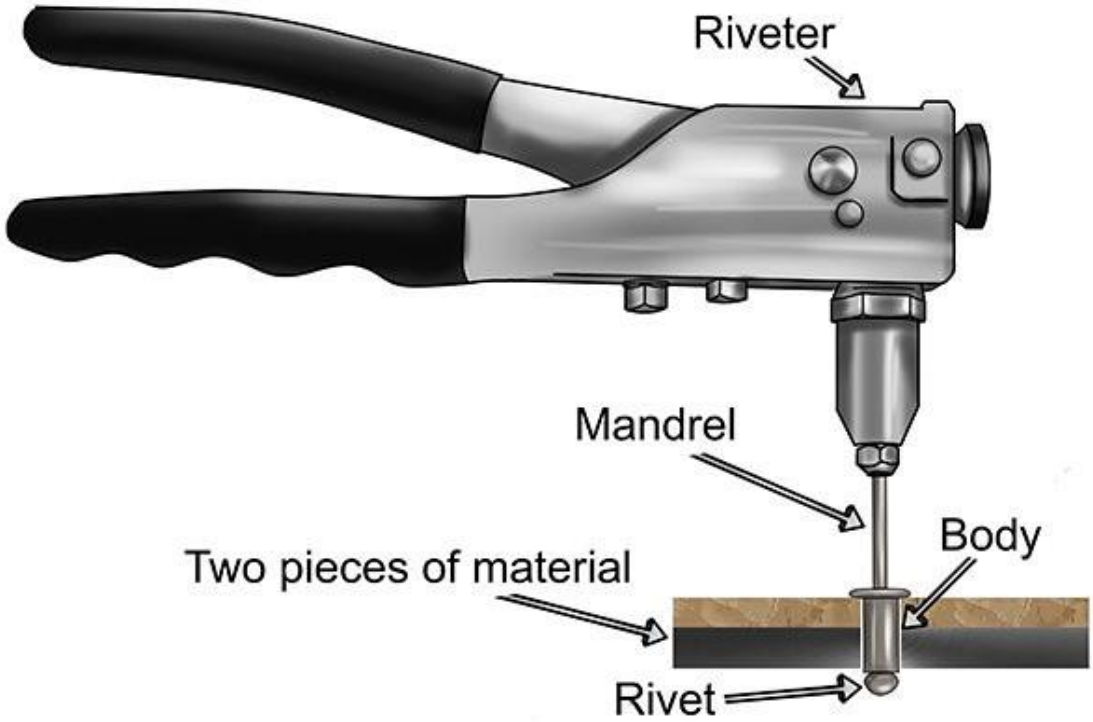


Σχήμα 2 – 236: Χρήση υπέρηχου για εντοπισμό των αλλοιώσεων από την διάβρωση

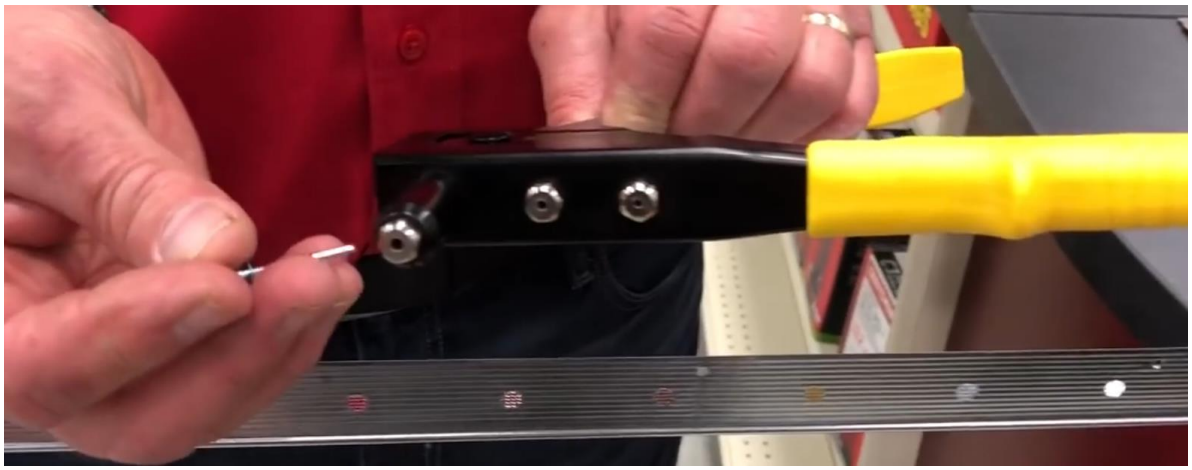
Σχήμα 2 – 237: Χρήση ειδικού gel για καλύτερη επαφή και σωστή λειτουργία του εξοπλισμού

Σχήμα 2 – 238: Χρήση του υπέρηχου

Επόμενος τρόπος σύνδεσης είναι οι ήλοι – rivets ή αλλιώς πριτσίνια. Βίδες χωρίς κοχλίωση οι οποίες «φουσκώνουν» με το ίδιο τους το υλικό, με τη χρήση ειδικού εργαλείου. Πρέπει να υπάρχει πρόσβαση και από τις 2 πλευρές. Η τρύπα να είναι το πολύ 4% μεγαλύτερη από τον ήλο. Είναι ιδανικοί για διάτμηση αλλά όχι για εφελκυσμό. Αποτελείται από υλικό με διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας. Το «σκληρό» μπαίνει μεταξύ των ελασμάτων και ανοίγει την τρύπα προκειμένου να εφαρμόσει καλά, και το «μαλακό» δημιουργεί την κεφαλή. Υπάρχουν ήλοι που μπαίνουν μεταξύ ελασμάτων χωρίς να υπάρχει τρύπα. Οι χαλύβδινοι ήλοι απαγορεύονται, εκτός αν δεν υπάρχει διάβρωση. Συνήθεις αλουμινένιοι ήλοι είναι από 6053-T61, 6061-T6, 7075-T73.



Σχήμα 2 – 239: Αναπαράσταση διαδικασίας riveting



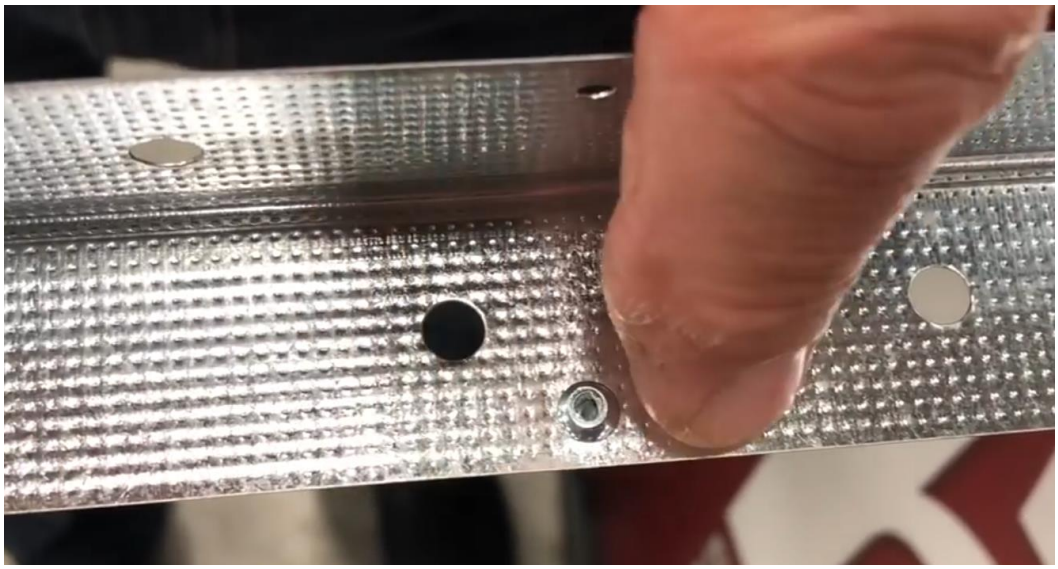
Σχήμα 2 – 240: Τοποθέτηση ήλου στο rivet gun

Σχήμα 2 – 241: Πιέζοντας την λαβή 2 με 3 φορές ο ήλος «φουσκώνει» και γεμίζει την τρύπα

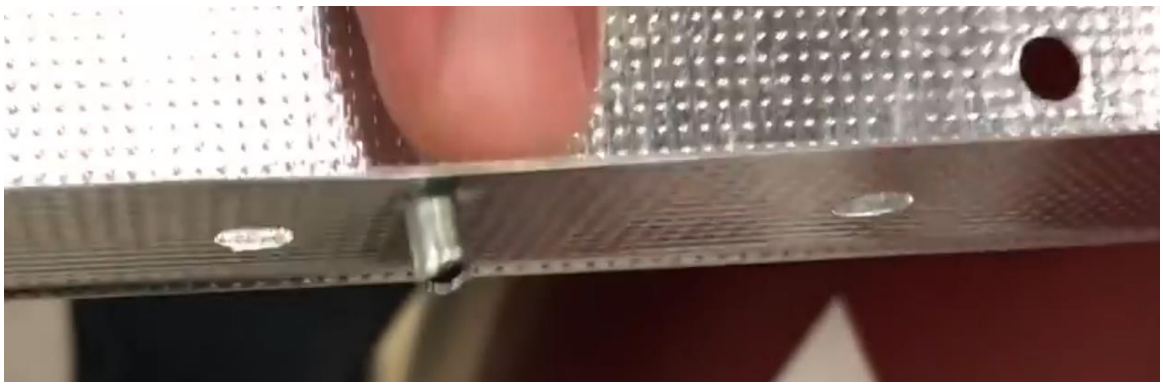
Σχήμα 2 – 242: Το υλικό που χρησιμοποιεί για να «φουσκώσει» το σώμα του ήλου το παίρνει από το mandrel – μανδρέλι

Σχήμα 2 – 243: Με την 3η ή 4η φορά που πιέζουμε, το εργαλείο κόβει το mandrel και έτσι έχουμε το τελικό αποτέλεσμα

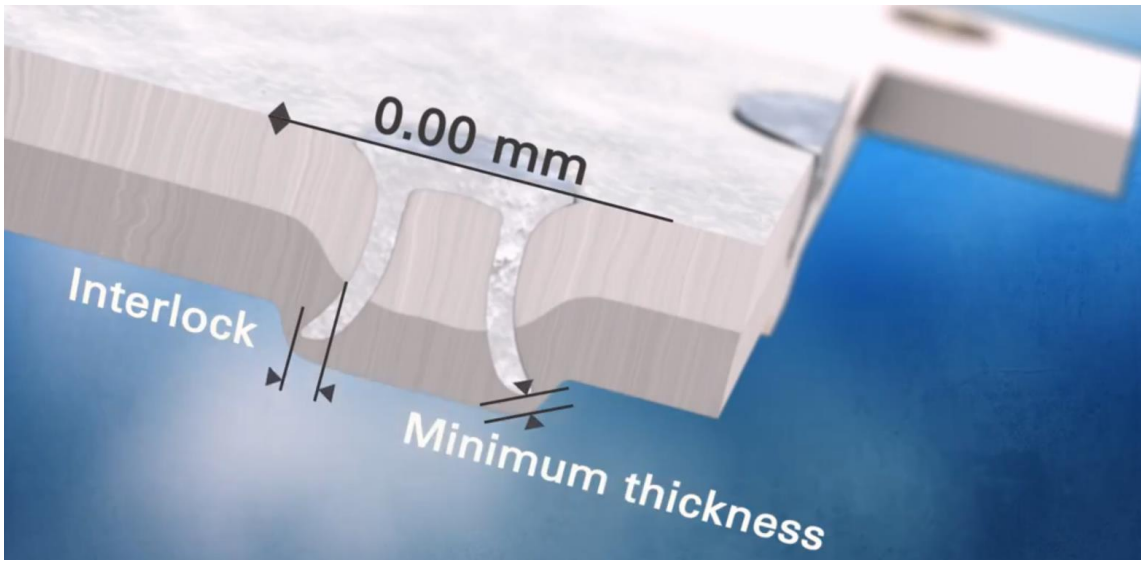
Σχήμα 2 – 244: Το mandrel – μανδρέλι μετά την εγκατάσταση του ήλου



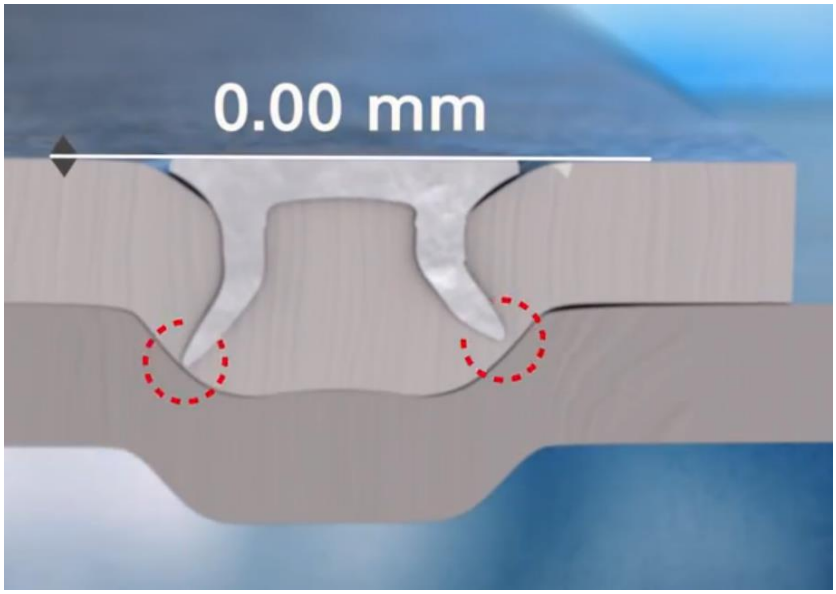
Σχήμα 2 – 245: Τελικό αποτέλεσμα riveting



Σχήμα 2 – 246: Τελικό αποτέλεσμα riveting



Σχήμα 2 – 247: Εφαρμογή ήλου χωρίς την ύπαρξη τρύπας, self piercing rivet



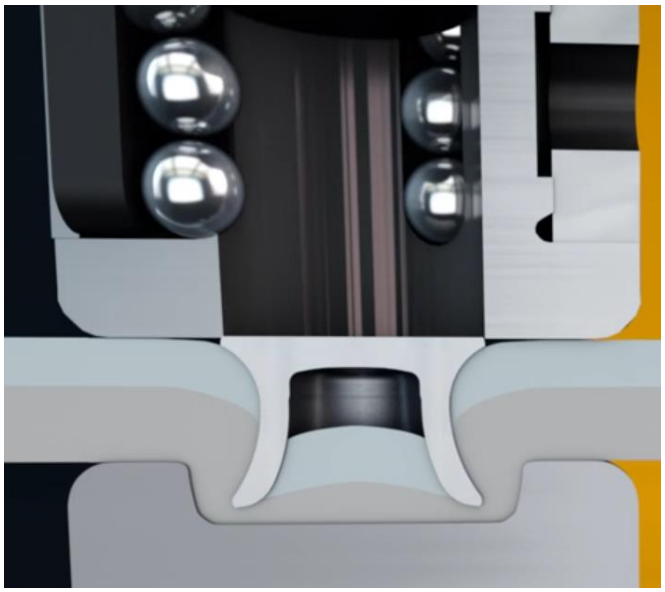
Σχήμα 2 – 248: Αποτυχημένη εφαρμογή self piercing rivet

Σχήμα 2 – 249: Self piercing rivets

Σχήμα 2 – 250: Αποτυχημένη εφαρμογή λόγω σκληρότητας του πάνω στρώματος

Σχήμα 2 – 251: Εφαρμογή διπλού ήλου για σίγουρο αποτέλεσμα

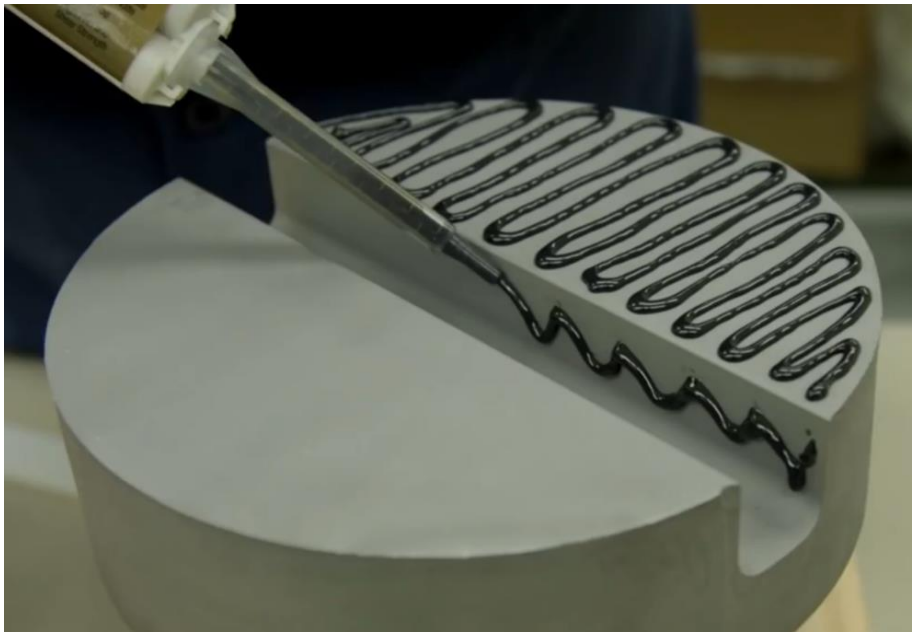
Σχήμα 2 – 252: Εφαρμογή σε μαλακό πάνω στρώμα



Σχήμα 2 – 253: Ιδανική εφαρμογή self piercing rivet

Τελευταίος τρόπος είναι η χρήση ισχυρής ειδικά διαμορφωμένης κόλλας για τη σύνδεση μελών. Καινούριος τρόπος σύνδεσης, με συνεχόμενη εξέλιξη. Οι επιφάνειες πρέπει να είναι καθαρές και στεγνές. Μπορούμε να τις τρίψουμε ελαφρώς, κάνοντας την επιφάνεια πιο τραχιά, για ένα καλύτερο αποτέλεσμα. Οι συγκεκριμένες κόλλες είναι 2 στοιχείων. Έτσι αποφεύγουμε την ενδεχόμενη σκλήρυνση της κόλλας πριν την εφαρμογή της. Αναμειγνύοντας τα 2 στοιχεία, που προηγουμένως ήταν σε αδράνεια, έχουμε την κόλλα μας. Η ανάμειξη μπορεί να γίνει, είτε από εμάς, είτε από μηχανισμό στη συσκευή τοποθέτησης της κόλλας. Για μεγαλύτερη ακρίβεια και σιγουριά το κάνουμε εμείς. Μετά την εφαρμογή το αφήνουμε

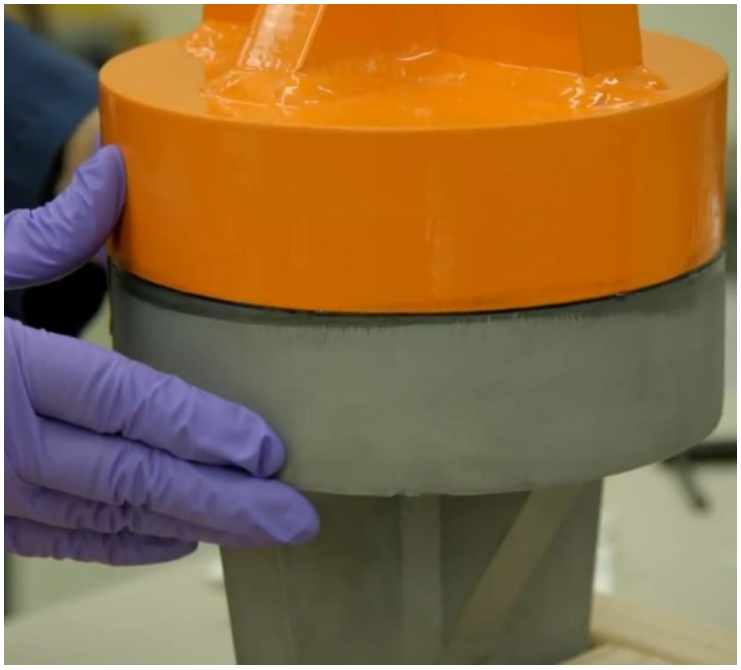
να σκληρύνει για μερικές ώρες. Ζεσταίνοντας την περιοχή σε θερμοκρασίες της τάξης, 120ºC για κόλλα ενός στοιχείου, και 60ºC για κόλλα 2 στοιχείων, σκληραίνει σε μερικά λεπτά. Αυτό γίνεται με χρήση αέρα, φωτός, κουβέρτας. Για να μην έχουμε καταστροφή του εξοπλισμού, τον καθαρίζουμε γρήγορα με νερό και σαπούνι μετά την χρήση. Ιδανικός τρόπος σύνδεσης για διάτμηση και θλίψη, όχι τόσο για εφελκυσμό, και όχι για δυναμικά φορτία, όπως κραδασμούς. Έχουν συνήθως, αντοχή της τάξης των 20MPa ή αλλιώς το 10% της αντοχής του αλουμινίου. Ιδανική για την σύνδεση φύλλων και πλακών αλουμινίου, καθώς και ειδικά διαμορφωμένων κομματιών από extrusion. Η επαφή με το νερό για μεγάλα χρονικά διαστήματα απαγορεύεται. Επιφάνειες με επεξεργασία (sandblasting, anodization) δεν αξίζει να τις κολλάμε. Υπάρχουν κόλλες που δεν ρέουν μετά την τοποθέτηση, ιδανικές για κάθετες επιφάνειες. Δουλεύουν καλά σε χαμηλές θερμοκρασίες 40ºC max, υπάρχουν βέβαια και κάποιες που αντέχουν για χρήση στους 160ºC. Ιδανικό πάχος 0.3mm – 0.6mm, διαφέρει ανά κόλλα. Μεγάλοι συντελεστές ασφαλείας, γιατί δεν το εμπιστευόμαστε ακόμα.



Σχήμα 2 – 254: Εφαρμογή κόλλας στο ένα κομμάτι

Σχήμα 2 – 255: Εφαρμογή κόλλας στο άλλο κομμάτι

Σχήμα 2 – 256: Ένωση των κομματιών με προσοχή γιατί δεν μπορούμε να πάμε πίσω, απλώς πετάμε τα κομμάτια και παίρνουμε άλλα



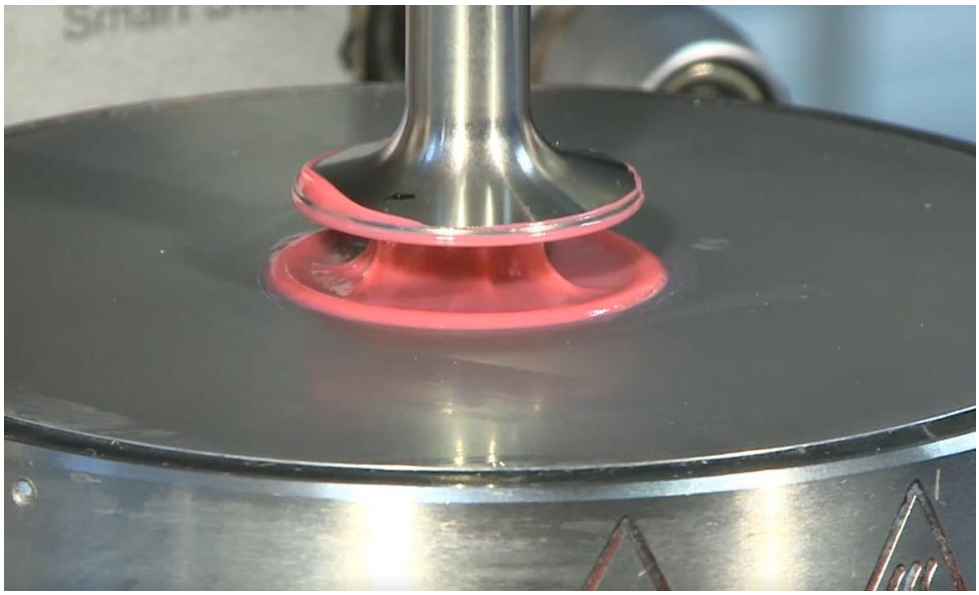
Σχήμα 2 – 257: Τα κομμάτια ενωμένα

Σχήμα 2 – 258: Δοκιμή της αποτελεσματικότητας της κόλλας

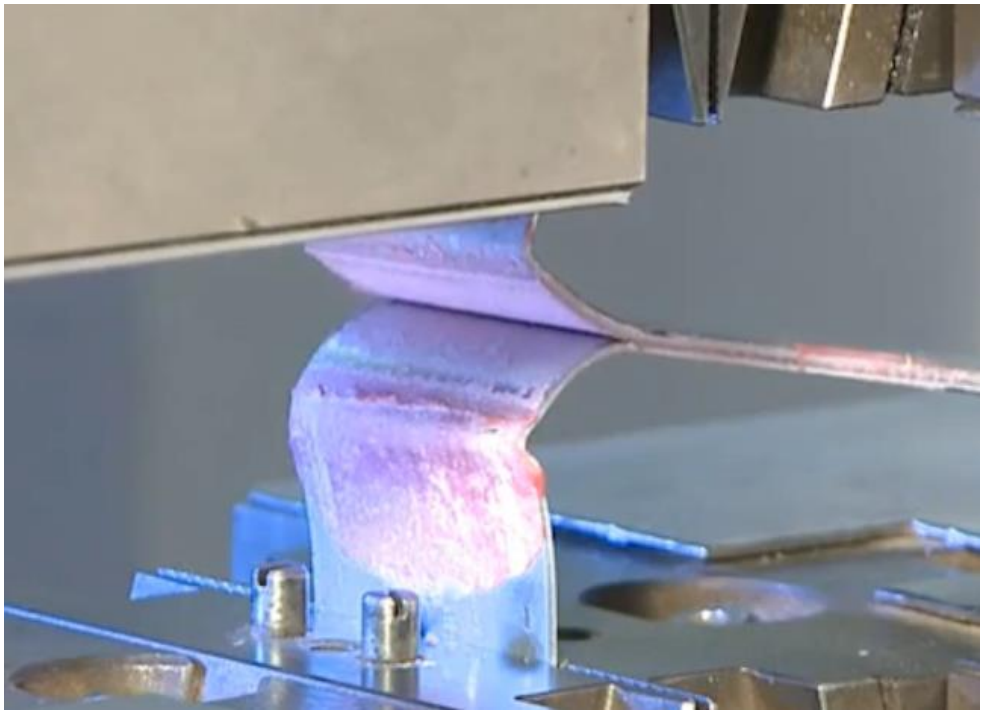
Σχήμα 2 – 259: «Κλείδωμα» των κομματιών για σωστή και επιτυχή εφαρμογή της κόλλας

Σχήμα 2 – 260: Τραχιές επιφάνειες για καλύτερο αποτέλεσμα μετά την εφαρμογή της κόλλας

Σχήμα 2 – 261: Δοκιμή αντοχής κόλλας σε διάτμηση

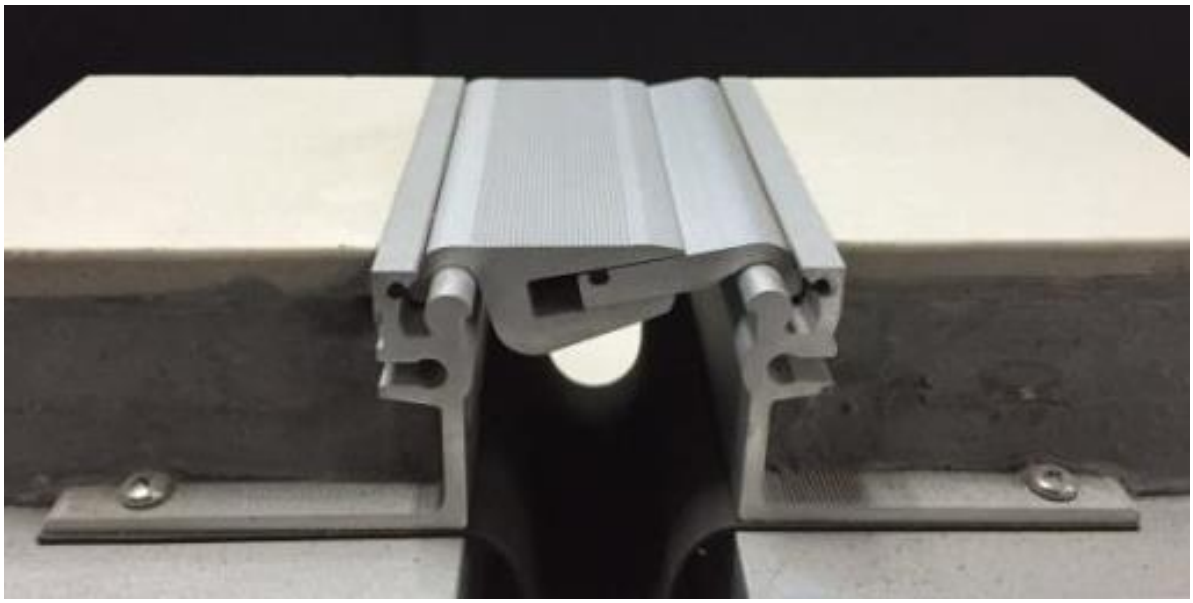


Σχήμα 2 – 262: Δοκιμή αντοχής κόλλας σε εφελκυσμό



Σχήμα 2 – 263: Δοκιμή αντοχής κόλλας σε αποφλοίωση

Οι συνδέσεις είναι το σημείο συγκέντρωσης των ατελειών και η αστοχία τους είναι ψαθυρή. Προτιμούμε να συνδέουμε κομμάτια αλουμινίου με βίδες, καρφιά, ήλους, κοχλίες, κρύες μεθόδους γενικά. Οι συγκολλήσεις αποδυναμώνουν το αλουμίνιο λόγω της υψηλής και συγκεντρωμένης θερμοκρασίας. Ένας άλλος τρόπος σύνδεσης είναι με interlocks, κάτι που γίνεται με την βοήθεια κατάλληλα διαμορφωμένων κομματιών από extrusion.

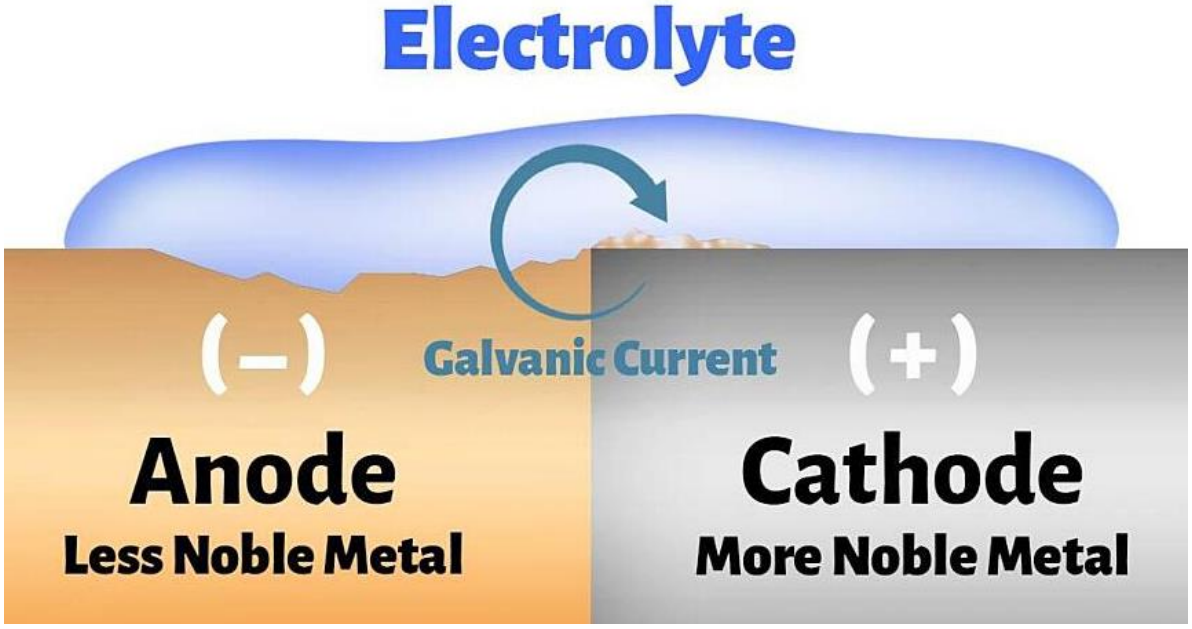


Σχήμα 2 – 264: Σύστημα με interlocks

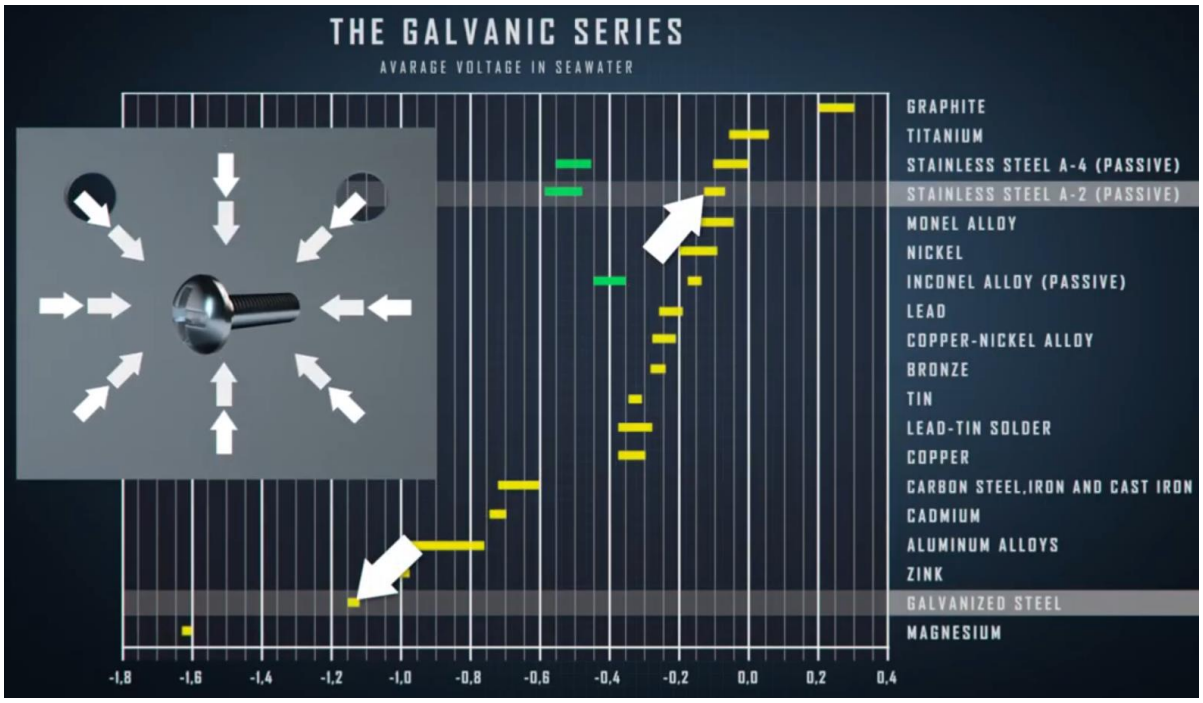
Υπάρχει ένα πρόβλημα που προκύπτει κατά τις συνδέσεις, και συγκεκριμένα όταν συνδέονται διαφορετικά μέταλλα. Το πρόβλημα αυτό λέγεται γαλβανική διάβρωση. Το ευγενές μέταλλο είναι το + και το λιγότερο ευγενές το -. Παρουσία ηλεκτρολύτη, όπως το νερό, το + «κλέβει» το υλικό του -. Ευγενές είναι ένα μέταλλο με μεγάλη αντίσταση στη οξείδωση. Ένα μέτρο προστασίας είναι το βάψιμο με μπογιά ψευδαργύρου (Zn). Σημαντικό ρόλο, στην ταχύτητα και στην κλίμακα του φαινομένου έχει το πόσο πιο ευγενές είναι το ένα μέταλλο σε σχέση με το άλλο, και το πόσο πιο μεγάλη είναι η επιφάνεια και όγκος του ευγενούς σε σχέση με το λιγότερο ευγενές μέταλλο. Για παράδειγμα, μία γαλβανισμένη βίδα είναι το μέσο σύνδεσης μίας πινακίδας από ανοξείδωτο ατσάλι. Η βίδα είναι πολύ μικρότερη της πινακίδας και πολύ λιγότερο ευγενής, οπότε θα διαβρωθεί πολύ γρήγορα. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν περιπτώσεις που λόγω απαιτούμενων αντοχών και περιστάσεων συνδέουμε πολύ ευγενή με, αρκετά λιγότερο ευγενή μέταλλα. Σε περιπτώσεις όπως για παράδειγμα off – shore πλατφόρμες πετρελαίου, γίνεται χρήση θυσιαζόμενων ελασμάτων στις συνδέσεις, καθώς μία αστοχία μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες.

Σχήμα 2 – 265: Παράδειγμα γαλβανικής διάβρωσης στη βίδα

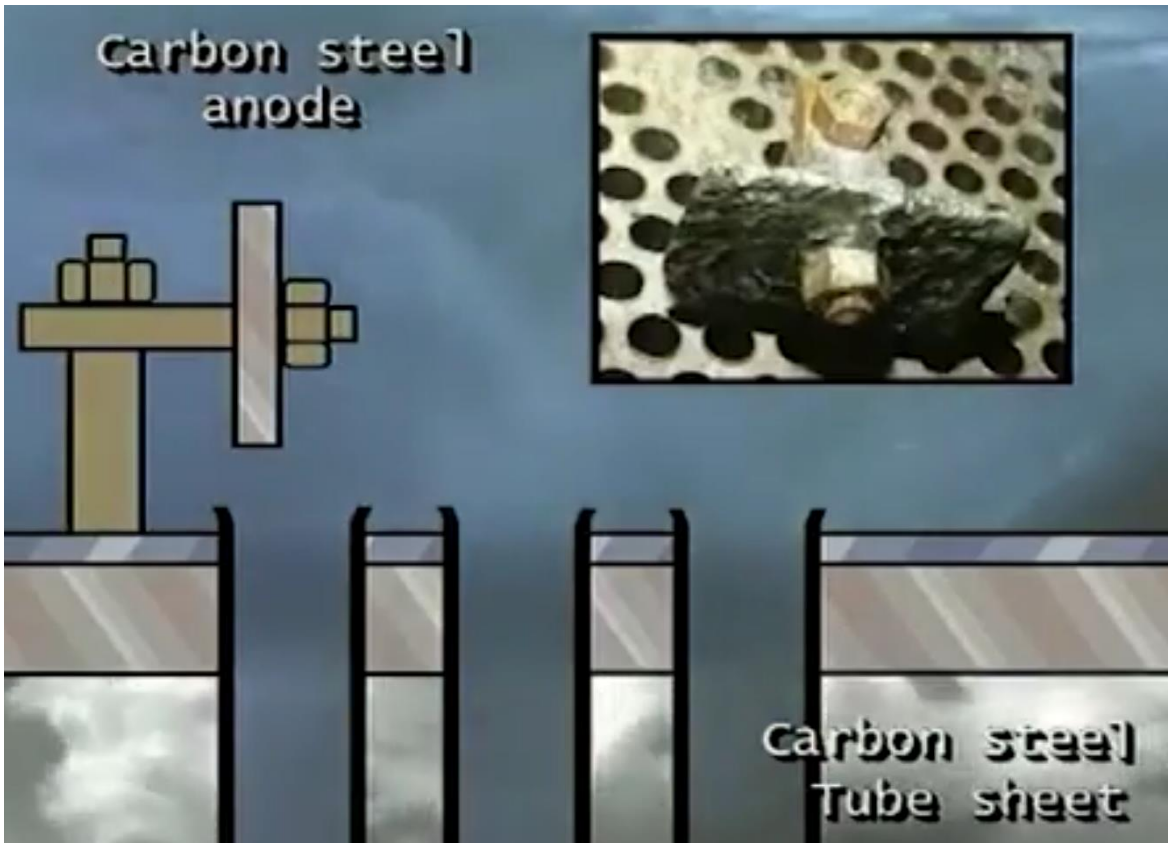
Σχήμα 2 – 266: Παράδειγμα γαλβανικής διάβρωσης στο έλασμα



Σχήμα 2 – 267: Αναπαράσταση της μεταφοράς υλικού μεταξύ ευγενούς και λιγότερο ευγενούς μετάλλου



Σχήμα 2 – 268: Πίνακας ευγένειας μετάλλων



Σχήμα 2 – 269: Χρήση θυσιαζόμενου ελάσματος για την αποφυγή γαλβανικής διάβρωσης

2.6 ΧΡΗΣΕΙΣ

Το αλουμίνιο χρησιμοποιείτε περισσότερο στον τομέα μεταφορών, αεροπλάνα, τρένα, αυτοκίνητα, πλοία. Μετά ακολουθεί ο τομέας συσκευασίας προϊόντων, αλουμινόχαρτο, κουτάλια αναψυκτικών. Τέλος

ακολουθεί η εφαρμογή σε κτίρια. Τα δύο τρίτα έχουν να κάνουν με ρολά – sheet και πλάκες, πανέλα επικάλυψης, και το υπόλοιπο ένα τρίτο με κουφώματα και curtain walls, τα οποία προέρχονται από extrusion.

Σχήμα 2 – 270: Χειροποίητος αλουμινένιος σκελετός αυτοκινήτου

Σχήμα 2 – 271: Συσκευασία προϊόντων με αλουμίνιο

Σχήμα 2 – 272: Πλάκες αλουμινίου

Σχήμα 2 – 273: Κουφώματα αλουμινίου

Σχήμα 2 – 274: Curtain walls

Λόγω του βάρους του αλουμίνιου η διαδικασίας ανέγερσης γίνεται εύκολα και γρήγορα.

Σχήμα 2 – 275: Ανέγερση ανεμογεννήτριας

Σχήμα 2 – 276: Ανέγερση οροφής σχήματος γεωδαιτικού θόλου

Σχήμα 2 – 277: Μεταφορά αλουμινένιας πεζογέφυρας με ελικόπτερο

Σχήμα 2 – 278: Μεταφορά αλουμινένιας πεζογέφυρας με φορτηγό

Υπάρχουν και ξυλότυποι αλουμινίου, με αποτέλεσμα, λείες επιφάνειες σκυροδέματος, ακριβείς διαστάσεις, ταχύτητα, και προστασία του περιβάλλοντος με λιγότερα απόβλητα.

Σχήμα 2 – 279: Ξυλότυπος αλουμινίου σε δράση

Με την εξέλιξη των γερανών, και της τεχνολογίας που περιβάλλει το αλουμίνιο, υπάρχει πλέον η δυνατότητα προκατασκευής και μεταφοράς ολόκληρων off – shore πλατφορμών εξόρυξης πετρελαίου.

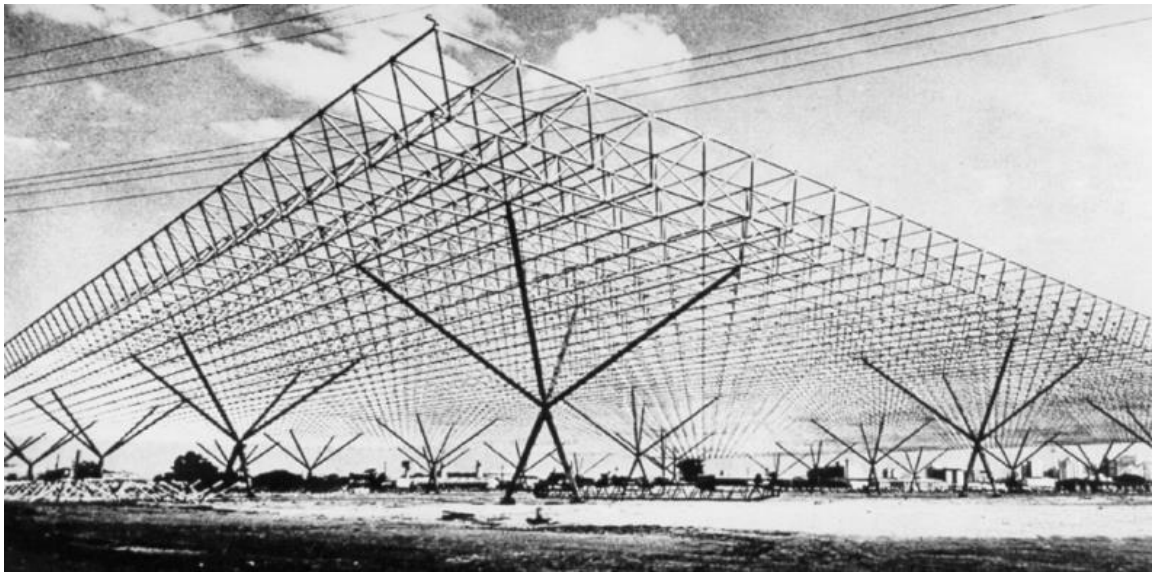
Σχήμα 2 – 280: Προκατασκευή κτιρίου για το προσωπικό με ενσωματωμένο ελικοδρόμιο off – shore πλατφόρμας.

Σχήμα 2 – 281: Συναρμολόγηση προκατασκευασμένων κομματιών off – shore πλατφόρμας

Σχήμα 2 – 282: Μεταφορά προκατασκευασμένου κτιρίου – κομματιού off – shore πλατφόρμας Ιδανικό και για χρήση σε δικτυώματα με σκοπό την δημιουργία μεγάλων στεγάστρων.

Σχήμα 2 – 283: Στέγαστρο του Riocentro, Rio de Janeiro, Brazil

Σχήμα 2 – 284: Κτίριο του golf club Hato Grande, Bogota, Colombia



Σχήμα 2 – 285: Η οροφή του Interamerican Exhibition Centre, San Paolo, Brazil

Χρήση σε πολύπλοκες κατασκευές και γεωδαιτικούς θόλους.

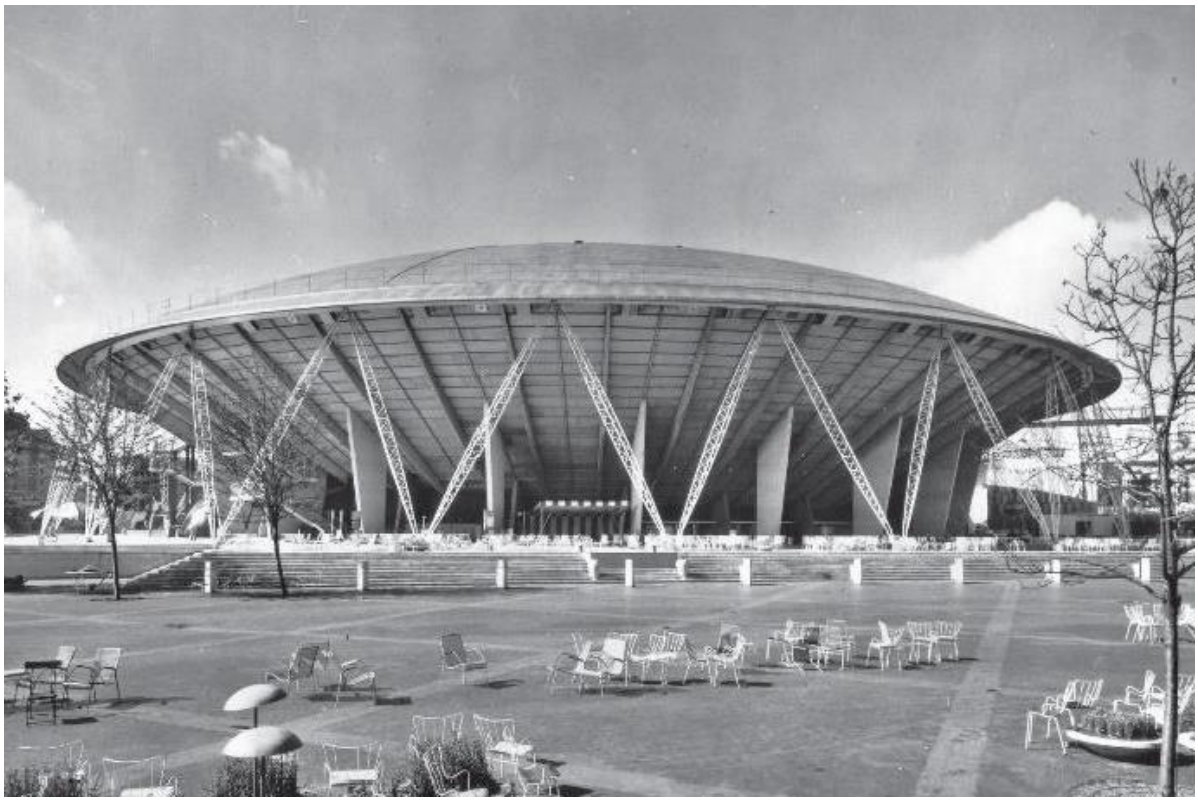
Σχήμα 2 – 286: 'Aluminum centrum', Houten, Netherlands

Σχήμα 2 – 287: 'Aluminum centrum' τη νύχτα, Houten, Netherlands

Σχήμα 2 – 288: Palais des sports, Paris

Σχήμα 2 – 289: Γεωδαιτικός θόλος στην Ανταρκτική

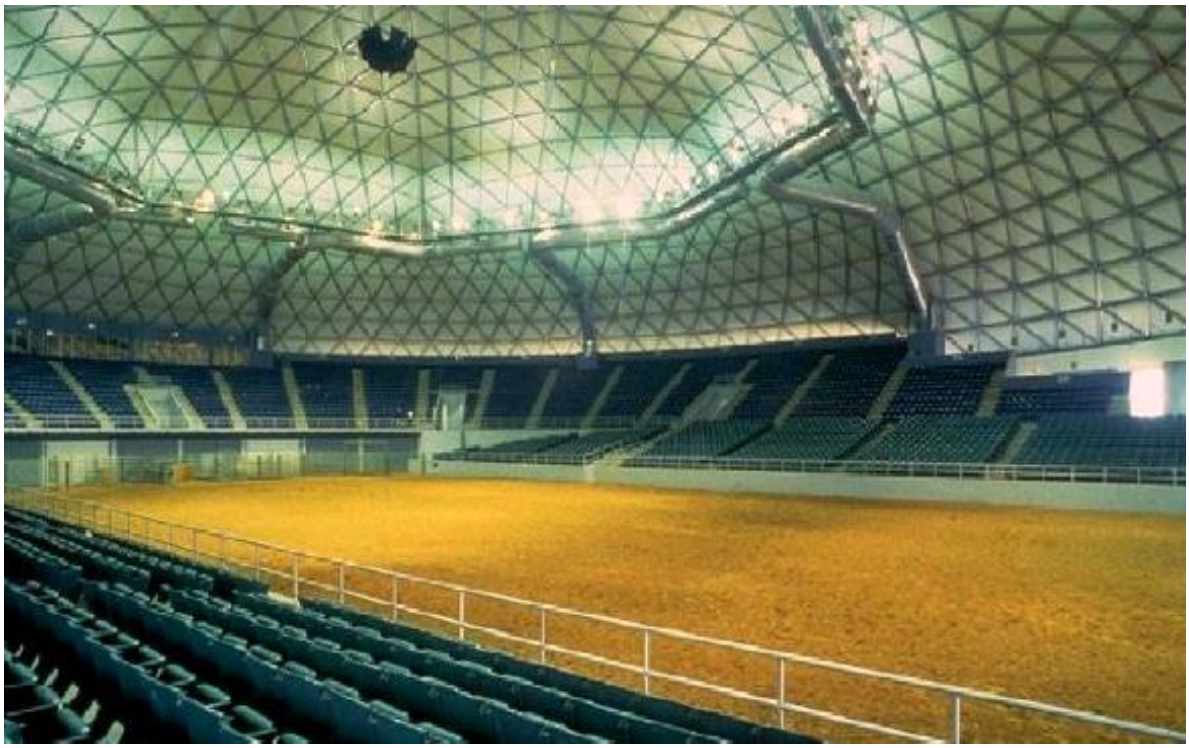
Σχήμα 2 – 290: Θόλος γηπέδου στο πανεπιστήμιο του Connecticut



Σχήμα 2 – 291: Dome of Discovery, London

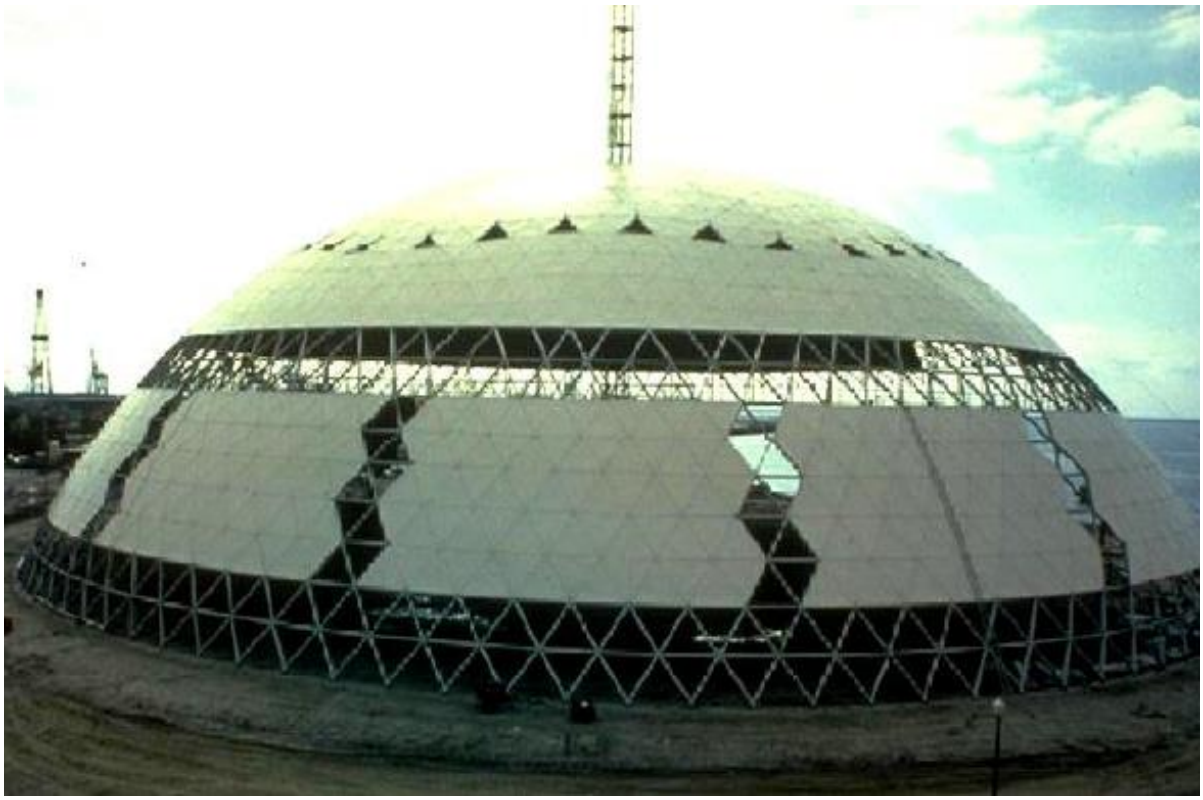
Σχήμα 2 – 292: Epcot center, Orlando, Florida

Σχήμα 2 – 293: ENEL aluminum dome, Rome, Italy



Σχήμα 2 – 294: Bell Country Arena, Temple, Texas, USA

Σχήμα 2 – 295: Baylor University Ferrell Events Centre, Waco, Texas, USA

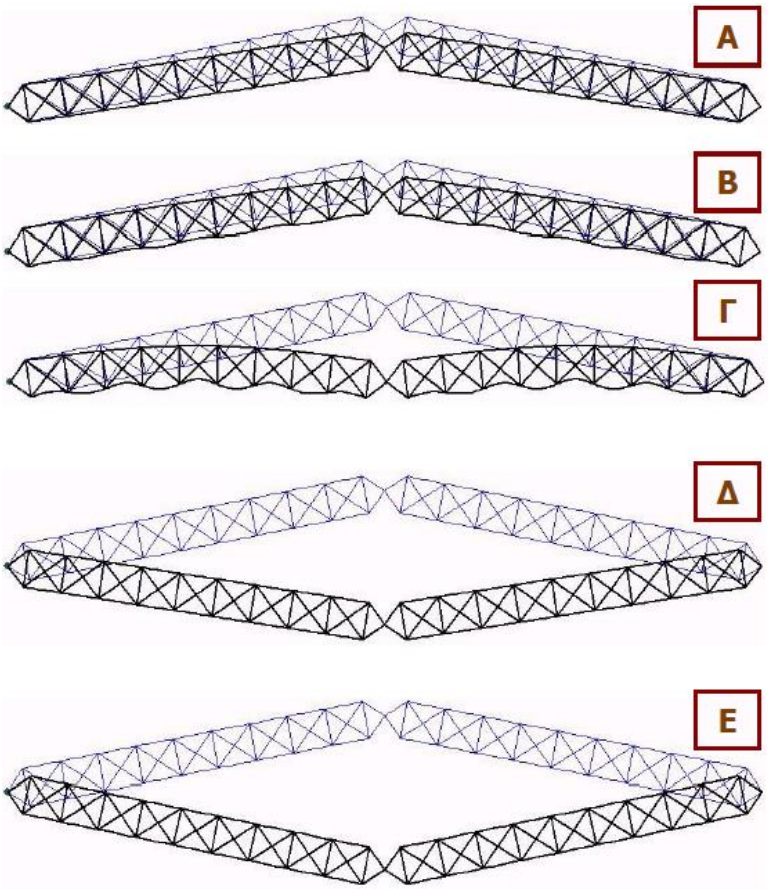


Σχήμα 2 – 296: The 'Spruce Goose' dome, Long Beach, USA, (erection phases)

Σχήμα 2 – 297: The 'Spruce Goose' dome, Long Beach, USA, (erection phases)

Στους θόλους αυτούς υπάρχει ο κίνδυνος δημιουργίας μηχανισμών snap – through, για αυτό δεν σχεδιάζουμε με μεγάλες ακτίνες καμπυλότητας. Αυτό το προσέχουμε και σε στέγες μεγάλων αμβλειών γωνιών.

Σχήμα 2 – 298: Μηχανισμός snap – through ομπρέλας



Σχήμα 2 – 299: Στάδια μηχανισμού snap – through στην περίπτωση στέγης με μέλη μορφής δικτυώματος

Οι αλουμινένιες κατασκευές δεν χρειάζονται ιδιαίτερη συντήρηση λόγω της μεγάλης αντίστασής τους στην διάβρωση. Για αυτό το λόγο προτιμούμε το αλουμίνιο για κατασκευές σε δύσβατα σημεία, όπου η συντήρηση είναι δύσκολη και σε σημεία όπου προκαλεί προβλήματα, όπως για παράδειγμα, στην μετακίνηση των αυτοκινήτων.

Σχήμα 2 – 300: Πινακίδα σε αυτοκινητόδρομο

Σχήμα 2 – 301: Πυλώνας ηλεκτροδότησης

Αρχίζει και γίνεται όλο και πιο διαδεδομένο στην κατασκευή γεφυρών, κυρίως πεζογεφυρών, αλλά και γέφυρες διέλευσης οχημάτων, λόγω των όλο και πιο δυνατών κραμάτων και της αντίστασής τους στην διάβρωση.

Σχήμα 2 – 302: Πεζογέφυρα που επιπλέει στο νερό

Σχήμα 2 – 303: Πεζογέφυρα

Σχήμα 2 – 304: Ανέγερση πεζογέφυρας

Σχήμα 2 – 305: Πεζογέφυρα

Σχήμα 2 – 306: Πεζογέφυρα

Γέφυρες διέλευσης οχημάτων

Σχήμα 2 – 307: Γέφυρα 'Arvida', Quebec, Canada

Σχήμα 2 – 308: Γέφυρα διέλευσης οχημάτων πάνω από κανάλι, Amsterdam, Netherlands

Γέφυρες όλο και μεγαλύτερων ανοιγμάτων, της τάξης 100m, για πεζούς και μικρά οχήματα

Σχήμα 2 – 309: Γέφυρα Montmerle, ποταμός Saone, France

Σχήμα 2 – 310: Γέφυρα Montmerle, ποταμός Saone, France, για μικρά οχήματα και πεζούς

Figure 10.31 The Trevoux Bridge on the Saône river (France)

Σχήμα 2 – 311: Γέφυρα Trevoux, ποταμός Saone, France

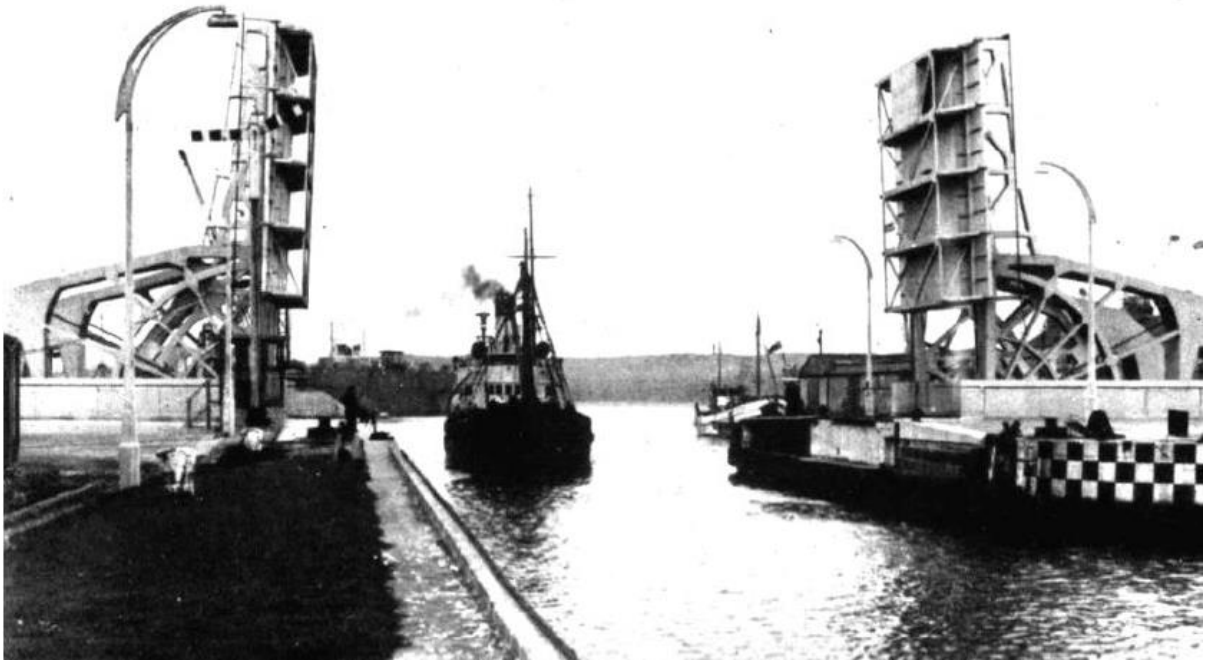
Σχήμα 2 – 312: Γέφυρα Trevoux, ποταμός Saone, France, για πεζούς

Σχήμα 2 – 313: Γέφυρα Groslee, ποταμός Rhone, France, για μικρά οχήματα και πεζούς, εκτιμώμενο άνοιγμα 177m

Σχήμα 2 – 314: Γέφυρα 'Real Ferdinando', ποταμός Garigliano, Italy, για πεζούς

Σχήμα 2 – 315: Γέφυρα 'Real Ferdinando', ποταμός Garigliano, Italy

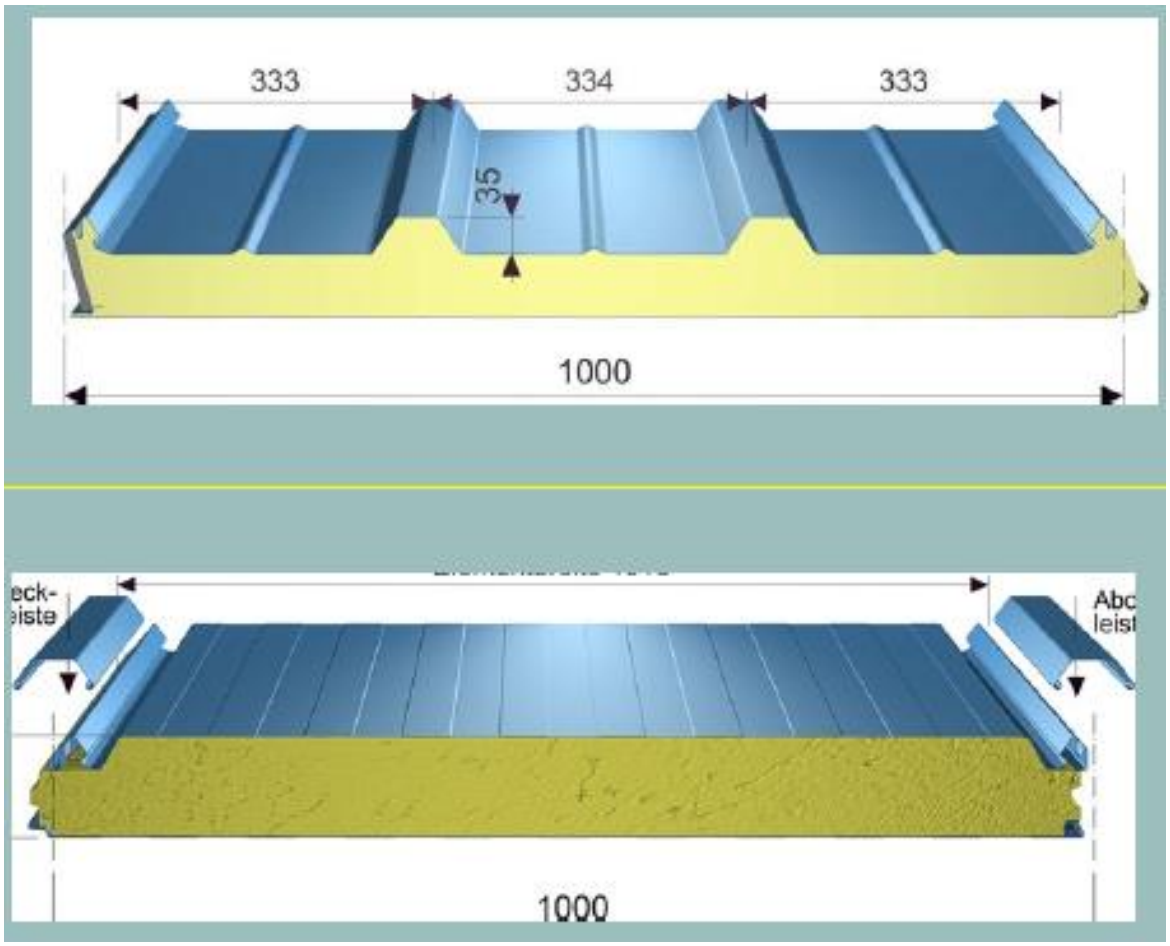
Χρήση σε κινητές γέφυρες



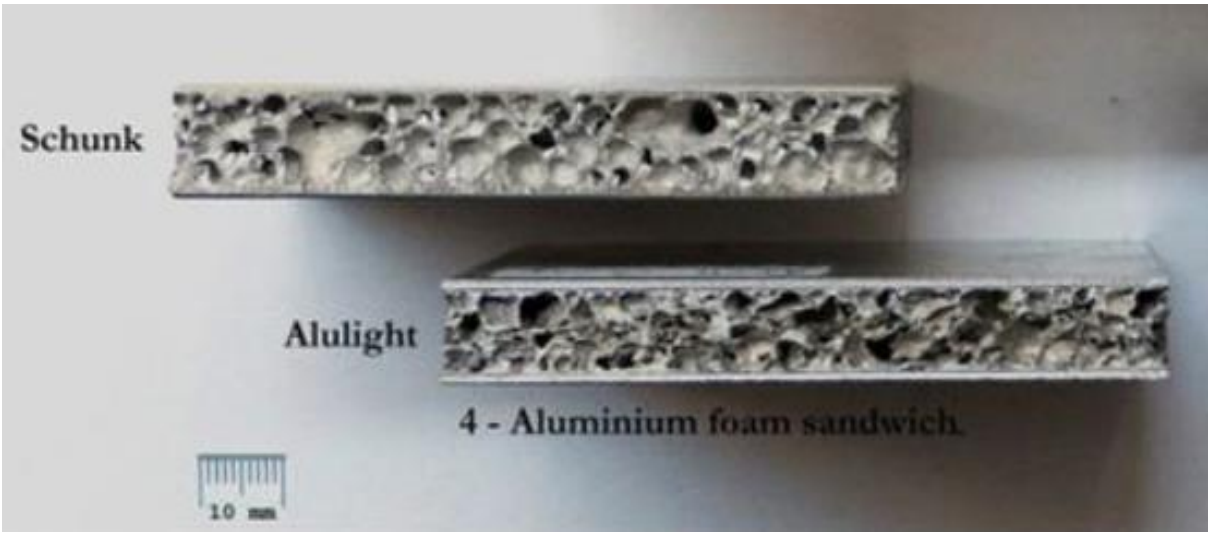
Σχήμα 2 – 316: Κινητή γέφυρα του λιμανιού Aberdeen, Scotland

Σχήμα 2 – 317: Κινητή γέφυρα

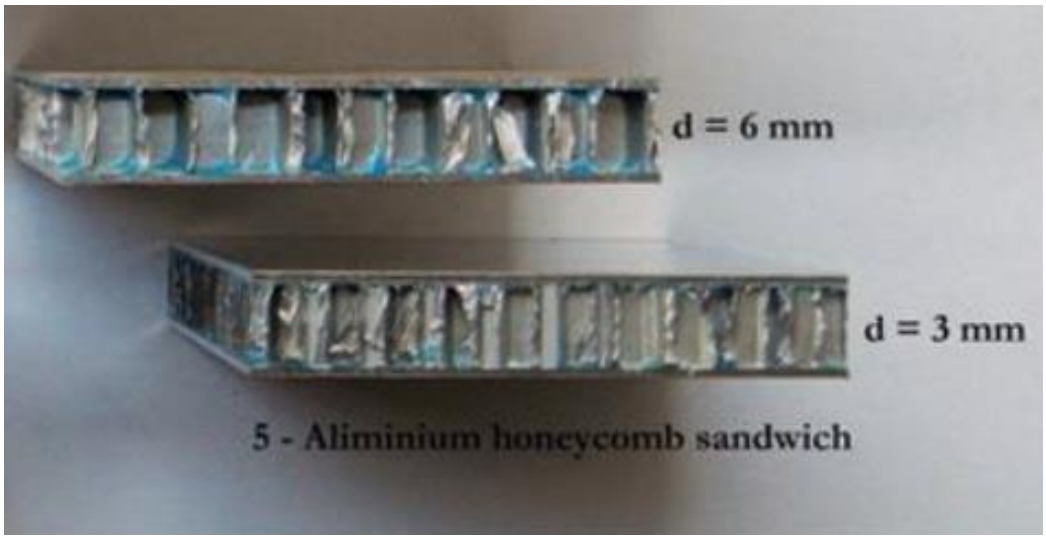
Για τα πανέλα sandwich μπορεί να είναι και το περίβλημα, αλλά και το εσωτερικό. Το δεύτερο σε μορφή φυσαλίδων, για ηχομόνωση.



Σχήμα 2 – 318: Πανέλο sandwich

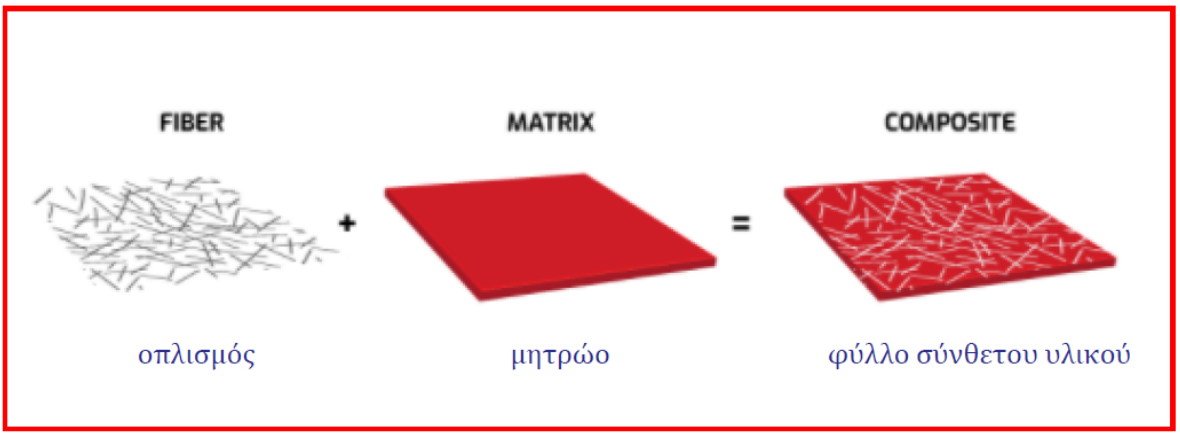


Σχήμα 2 – 319: Εσωτερικό πανέλου sandwich από φυσαλίδες αλουμινίου



Σχήμα 2 – 320: Εσωτερικό πανέλου sandwich από αλουμινίου σε μορφή κερήθρας

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε μορφή σύνθετου υλικού, ως μητρώο, σε δισκόφρενα και πιστόνια.

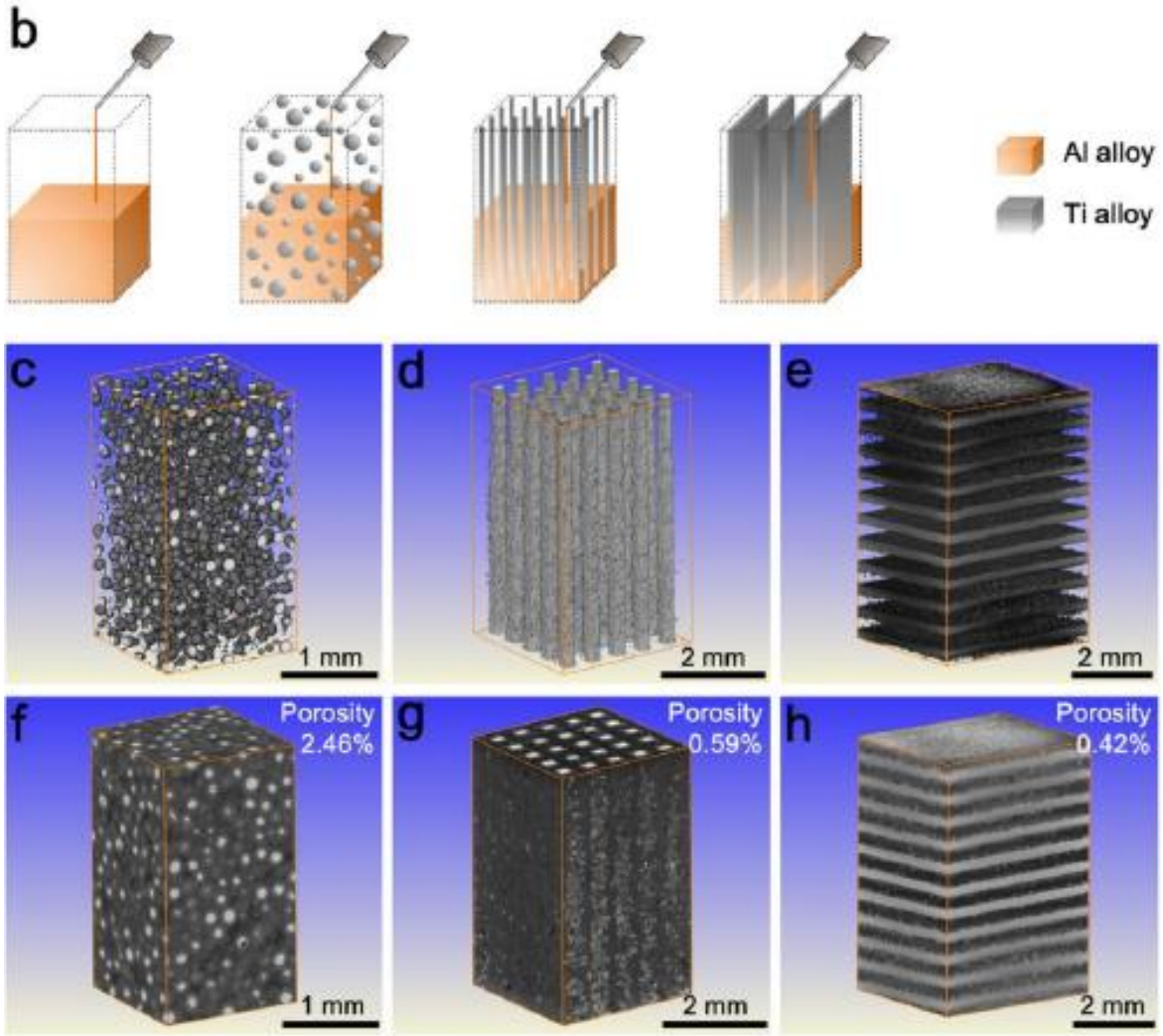


Σχήμα 2 – 321: Μορφή σύνθετου υλικού

Σχήμα 2 – 322: Πιστόνια μηχανής αυτοκινήτου

Σχήμα 2 – 323: Δισκόφρενα αυτοκινήτου

Σχήμα 2 – 324: Μορφή σύνθετου υλικού με αλουμίνιο ως μητρώο



Σχήμα 2 – 325: Σύνθετο υλικό με μητρώο αλουμινίου και οπλισμό τιτανίου

Συγκεκριμένα κράματα είναι ιδανικά για συγκεκριμένες μορφές διατομών. Για τις διατομές που μας ενδιαφέρουν και που χρησιμοποιούνται σε δομικές εφαρμογές, διπλά Τ, κοίλες κυκλικές και ορθογωνικές, μορφής L και U, τα κράματα που χρησιμοποιούνται είναι της ομάδας 6xxx. Τα πιο ευρέως διαδεδομένα είναι το EN AW 6063 T5 και το EN AW 6082 T6, το T6 είναι η θερμική επεξεργασία μετά την παραγωγή του μέλους. Οι διατομές έχουν πάχη της τάξης των 10mm με δυνατότητα για 1mm αλλά και 25mm σε κάποιες κοίλες κυκλικές. Μήκη και πλάτη της τάξης των 100mm με δυνατότητα για 10mm αλλά και 300mm. Υπάρχουν άμεσα διαθέσιμες διατομές, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα για παραγγελία, κάτι που μας συμφέρει σε μεγάλες ποσότητες. Στην παραγγελία θα βόλευε να δώσουμε διαστάσεις ίδιες με HEA για παράδειγμα, που είμαστε πιο εξοικειωμένοι, με μέγεθος της τάξης HEA200 και κάτω. Αυτό γιατί μεγάλες και ψηλές διατομές αλουμινίου είναι πολύ ευαίσθητες σε τοπικούς λυγισμούς. Το HEA1000 δηλαδή που έχουμε διαθέσιμο στους πίνακες για το χάλυβα είναι HEA300 για το αλουμίνιο. Υπάρχουν εννοείται και ψηλότερες διατομές χάλυβα και αλουμινίου, πάνω από 1m, αλλά χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις όπως γέφυρες, είναι αποτέλεσμα συγκολλήσεων μεμονωμένων πλακών, και γίνεται χρήση πολλών πλευρικών εξασφαλίσεων. Στο αλουμίνιο οι διατομές που μας ενδιαφέρουν είναι αποτέλεσμα extrusion. Διατομές με διαστάσεις της τάξης 0,5m είναι πολύ σπάνιες, πόσο μάλλον 1m.

SH	Sheet (EN 485)
ST	Strip (EN 485)
PL	Plate (EN 485)
ET	Extruded Tube (EN 755)
EP	Extruded Profiles (EN 755)
ER/B	Extruded Rod and Bar (EN 755)
DT	Drawn Tube (EN 754)
FO	Forgings (EN 586)
(SHT)	Tread plate (EN 1386)

Σχήμα 2 – 326: Συμβολισμός διαφορετικών ομάδων διατομών

Συμβολισμός κράματος		Τύπος προϊόντος
Αριθμητικά	Χημικά σύμβολα	
EN AW-3004	EN AW-AlMn1Mg1	SH,ST,PL
EN AW-3005	EN AW-AlMn1Mg0,5	SH,ST,PL
EN AW-3103	EN AW-Al Mn1	SH,ST,PL,ET,EP, ER/B
EN AW-5005	EN AW-AlMg1(B)	SH,ST,PL,
EN AW-5049	EN AW-AlMg2Mn0,8	SH,ST,PL
EN AW-5052	EN AW-Al Mg2,5	SH,ST,PL, ET[2)],ER/B
EN AW-5083	EN AW-Al Mg4,5Mn0,7	SH,ST,PL, ET[2)],ER/B,DT, FO
EN AW-5454	EN AW-Al Mg3Mn	SH,ST,PL, ET[2)],ER/B
EN AW-5754	EN AW-Al Mg3	SH,ST,PL, ET[2)],ER/B,DT,FO
EN AW-6060	EN AW-Al MgSi	ET,EP,ER/B,DT
EN AW-6061	EN AW-Al Mg1SiCu	SH, ST,PL,ET,EP,ER/B,DT
EN AW-6063	EN AW-Al Mg0,7Si	ET,EP,ER/B,DT
EN AW-6005A	EN AW-Al SiMg(A)	ET,EP,ER/B
EN AW-6082	EN AW-Al Si1MgMn	SH,ST,PL,ET,EP,ER/B,DT,FO
EN AW-6106	EN AW-AlMgSiMn	EP
EN AW-7020	EN AW-Al Zn4,5Mg1	SH,ST,PL,ET,EP,ER/B,DT
EN AW-8011A	EN AW-AlFeSi	SH, ST, PL

Σχήμα 2 – 327: Αντιστοίχιση κραμάτων με ομάδες διατομών

Συμβολισμός κραμάτων	
Αριθμητικός	**Χημικός συμβολισμός**
EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3
EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6
EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)
EN AC-43300	EN AC-AlSi9Mg
EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)
EN AC-51300	EN AC-Al Mg5

Σχήμα 2 – 328: Συμβολισμός κραμάτων για προϊόντα casting

Σχήμα 2 – 329: Διαστάσεις διατομών διπλών Τ άμεσα διαθέσιμων

Σχήμα 2 – 330: Διαστάσεις διατομών διπλών Τ άμεσα διαθέσιμων

cosmos

Rectangular tubes

Rechteckrohre

10

Notes:

* The weight of each profile is calculated by measuring it's cross-sectional area and multiplying it by the material density. The aluminium density is considered to be 2,70 gr/cm3.

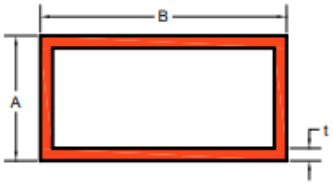
** Alloy and Length is subject to customer's request.

*** Radii less than 1mm are not stated.

A=Width

B=Height

t=thickness



EXPERTS IN ALUMINIUM™

Profile Code	A (mm)	B (mm)	t (mm)	Additional charge	Area *Flaeche* (mm^2)	Weight *Gewicht* (Kg/m)
10-0100	20	10	1.2		66	0,18
10-0014	20	10	1.5		81	0,22
10-0015	20	10	2		104	0,28
10-0131	20	15	1.5		96	0,26
10-0016	20	15	2		124	0,33
10-0195	25	10	2		124	0,34
10-0017	25	15	1.5		111	0,30
10-0018	25	15	2		144	0,39
10-0134	25	20	1.5		126	0,34
10-0167	25	20	2		164	0,44
10-0000	30	10	1.5		111	0,30
10-0097	30	10	2		144	0,39
10-0099	30	15	1.5		126	0,34
10-0001	30	15	2		164	0,44
10-0002	30	20	1.5		141	0,38
10-0003	30	20	2		184	0,50
10-0148	30	20	3		264	0,71
10-0181	30	25	2		204	0,55

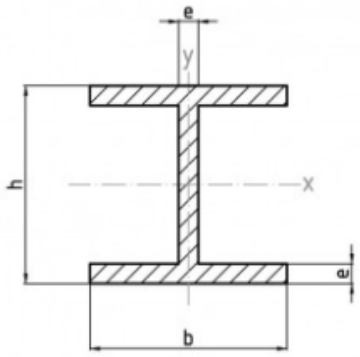
Σχήμα 2 – 331: Διαστάσεις κοίλης ορθογωνικής διατομής ελληνικής εταιρείας, minimum

Θα μπορούσαμε να παραγγείλουμε αντί για την κοίλη ορθογωνική με διαστάσεις 200 x 100 x 5 (mm), μία 200 x 100 x 6,3 (mm), η οποία υπάρχει στους πίνακες των χαλύβδινων κοίλων ορθογωνικών. Θα πρέπει όμως να είναι κοντά στις διαστάσεις που είναι διαθέσιμες στους καταλόγους των αλουμινένιων διατομών, για να γλιτώσουμε παραπάνω χρεώσεις και για να μην μας πει η εταιρεία ότι δεν μπορεί να παράξει αυτό που θέλουμε.

Profile Code	A (mm)	B (mm)	t (mm)	Additional charge	Area *Flaeche* (mm^2)	Weight *Gewicht* (Kg/m)
10-0087	160	60	4		1696	4,58
10-0088	160	60	5		2100	5,67
10-0089	160	80	4		1856	5,01
10-0166	180	18	2		776	2,10
10-0199	180	40	2.5	*	1075	2,91
10-0090	180	40	4		1696	4,58
10-0091	180	50	4		1776	4,80
10-0092	180	60	3		1404	3,79
10-9001	180	60	4		1856	5,01
10-0093	180	80	4		2016	5,44
10-0187	180	80	6		2976	8,06
10-0142	200	18	2		856	2,31
10-0198	200	20	2		864	2,34
10-0202	200	25	2		884	2,40
10-0153	200	30	2.8		1257	3,39
10-0116	200	40	3		1404	3,79
10-0094	200	50	2.5		1225	3,31
10-0216	200	50	3		1464	3,95
10-0095	200	50	4		1936	5,23
10-0205	200	60	3		1524	4,13
10-0096	200	60	4		2016	5,44
10-0144	200	65	3		1554	4,20
10-0172	200	80	4		2176	5,88
10-0171	200	100	4		2336	6,31
10-0223	200	100	5		2900	7,83

Σχήμα 2 – 332: Διαστάσεις κοίλης ορθογωνικής διατομής ελληνικής εταιρείας, maximum, το * αντιστοιχεί σε επιπλέον χρέωση διότι τα μικρά πάχη σε μεγάλες διατομές είναι δύσκολο να παραχθούν σωστά μέσω του extrusion

ALUMINIUM DOUBLE T-PROFILES



- Material available in stock

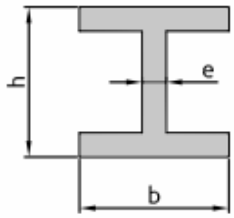
- Material on request

h x b	e	Weight	Ixc	Iyx	Wx	Wy	6063	6082
46 x 25	2.5	0.645	7.356	0.656	3.195	0.525		-
80 x 60/50	6.0	3.028	105.812	17.172	35.271	4.081		
80 x 150	12.0	12.111	438.041	675.806	109.510	90.107		-
200 x 150	13.0	14.510	438.041	675.806	43.804	90.107		

Σχήμα 2 – 333: Διαστάσεις διατομής διπλού Τ ευρωπαϊκής εταιρείας, μέχρι IPE200 δηλαδή (200 x 100)

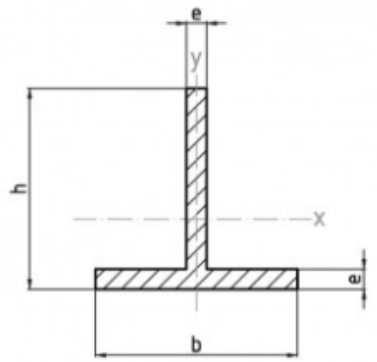
Request for items not in catalogue

Name*
E-mail*
Company
Town/City
b mm
h mm
e mm
Quantity Kg
Alloy Simagaltok 63 / EN AW 6063
Enviar Restablecer



Σχήμα 2 – 334: Φόρμα παραγγελίας διπλού Τ

ALUMINIUM T-PROFILES



- Material available in stock

- Material on request

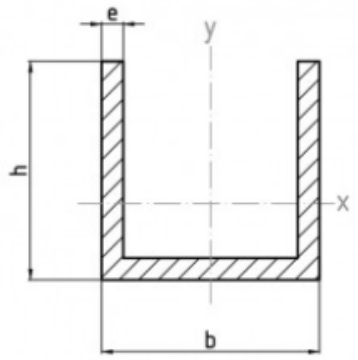
b x h	e	Weight	Ixc	Iyx	Wx	Wy	6063	6082
15 x 15	1.5	0.121	0.091	0.043	0.085	0.057		-
20 x 20	1.5	0.164	0.224	0.101	0.155	0.101		-
20 x 20	2.0	0.215	0.288	0.135	0.202	0.135		-
25 x 25	1.5	0.206	0.447	0.196	0.246	0.157		-
25 x 25	2.0	0.272	0.579	0.262	0.321	0.210		-

Σχήμα 2 – 335: Διαστάσεις διατομής Τ ευρωπαϊκής εταιρείας

100 x 52	2.0	0.851	6.597	16.670	1.558	3.334		-
100 x 60	2.0	0.896	9.866	16.671	2.056	3.334		-
100 x 60	5.0	2.197	23.004	41.724	4.910	8.345		-
100 x 70	4.0	1.882	29.118	33.369	5.384	6.674		-
100 x 100	4.0	2.223	78.524	33.385	10.682	6.677		-
100 x 100	10.0	5.387	180.004	84.083	25.240	16.817		-
104 x 80	6/8	3.447	75.808	56.559	13.178	10.877		
120 x 40	2.0	0.896	3.231	28.803	0.945	4.800		-
150 x 100	10.0	6.804	202.625	282.000	26.574	37.600		
300 x 200	10.0	13.892	1737.349	2251.583	111.208	150.106		

Σχήμα 2 – 336: Διαστάσεις διατομής Τ ευρωπαϊκής εταιρείας, μέχρι μισό HEA300 δηλαδή (300 x 290/2)

ALUMINIUM U-PROFILES



- Material available in stock

- Material on request

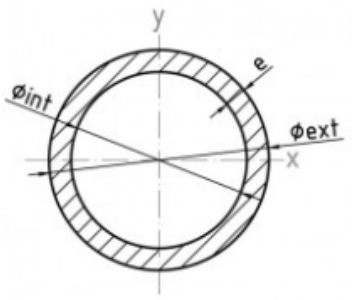
b x h	e	Weight	Ixc	Iyx	Wx	Wy	6063	6082
10 x 10	1.5	0.115	0.039	0.059	0.064	0.118	■	-
10 x 15	1.5	0.157	0.123	0.086	0.141	0.173	□	-
12 x 12	1.5	0.140	0.071	0.109	0.095	0.182	□	-
15 x 10	1.5	0.136	0.046	0.159	0.069	0.212	□	-
15 x 15	1.5	0.179	0.143	0.227	0.152	0.303	□	-
15 x 15	2.0	0.232	0.181	0.278	0.196	0.370	■	-
15 x 20	1.5	0.221	0.319	0.296	0.263	0.395	□	-

Σχήμα 2 – 337: Διαστάσεις διατομής U ευρωπαϊκής εταιρείας

150 x 75	4.0	3.311	64.972	415.263	11.864	55.368	□	-
150 x 75	10/13	9.044	172.503	1076.620	34.409	143.549	□	■
160 x 80	10.0	8.505	177.967	1130.000	31.592	141.250	-	■
180 x 80	8.0	7.348	152.934	1241.434	26.267	137.937	□	-
200 x 75	14.0	12.780	206.720	2413.372	38.430	241.337	■	-
200 x 100	12.0	12.792	420.025	2668.698	59.497	266.870	□	■
203.2 x 58.1	6.4	5.521	51.848	1080.886	11.491	106.386	-	□
300 x 125	6/8	10.501	586.661	5409.582	65.277	360.639	□	□

Σχήμα 2 – 338: Διαστάσεις διατομής U ευρωπαϊκής εταιρείας, μέχρι U300 δηλαδή (300 x 100)

ROUND ALUMINIUM TUBES



O- Material available in stock

◎- Material on request

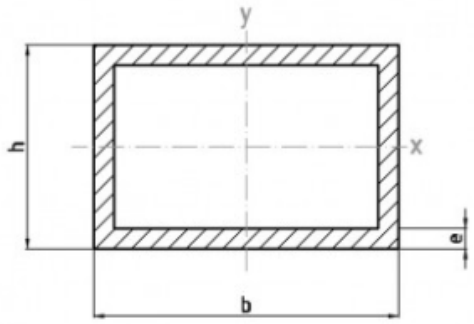
Øext x Øint	e	Weight	Ixc=Iyc	Wxc=Wyc	6063	6082
8 x 5	1.50	0.087	0.017	0.043	◎	-
8 x 6	1.00	0.062	0.014	0.034	◎	-
9.9 x 5.6	2.15	0.148	0.042	0.086	◎	-
10 x 8	1.00	0.080	0.029	0.058	O	-
11 x 8	1.50	0.127	0.052	0.094	◎	-

Σχήμα 2 – 339: Διαστάσεις διατομής Ο ευρωπαϊκής εταιρείας

200 x 180	10.00	16.922	2700.984	270.098	O	-
200 x 184	8.00	13.680	2227.444	222.744	O	-
200 x 190	5.00	8.684	1456.865	145.686	◎	-
200 x 194	3.00	5.264	900.908	90.091	O	-
210 x 200	5.00	9.129	1692.582	161.198	O	-
250 x 240	5.00	10.910	2888.744	231.099	O	-
260 x 250	5.00	11.356	3256.997	250.538	O	-
300 x 292	4.00	10.545	4074.500	271.633	◎	-
312 x 300	6.00	16.352	6753.709	432.930	O	-
400 x 379	10.50	36.425	24382.996	1219.150	O	-

Σχήμα 2 – 340: Διαστάσεις διατομής Ο ευρωπαϊκής εταιρείας, μέχρι Ο406,4 δηλαδή (406,4 x 10)

RECTANGULAR ALUMINIUM TUBES



- Material available in stock

- Material on request

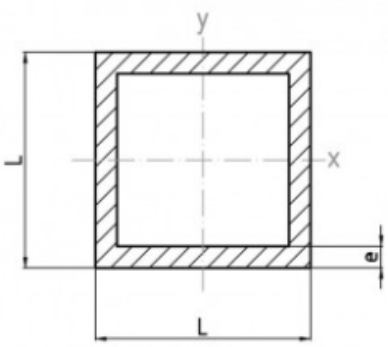
b x h	e	Weight	Ixc	Iyx	Wxc	Wyc	6063	6082
20 x 10	1.5	0.230	0.118	0.380	0.236	0.380	■	-
20 x 10	2.0	0.295	0.138	0.462	0.276	0.462	■	-
20 x 15	1.5	0.272	0.318	0.509	0.424	0.509	■	-
20 x 15	2.0	0.352	0.385	0.625	0.513	0.625	□	-
25 x 12	1.5	0.289	0.226	0.764	0.377	0.611	□	-
25 x 15	1.5	0.315	0.386	0.888	0.515	0.711	■	-

Σχήμα 2 – 341: Διαστάσεις διατομής ευρωπαϊκής εταιρείας

200 x 80	4.0	6.169	256.137	1086.601	64.034	108.660	■	-
200 x 100	2.5	4.182	273.432	796.557	54.686	79.656	■	-
200 x 100	4.0	6.623	420.766	1240.286	84.153	124.029	■	-
230 x 60	3.0	4.831	120.067	1025.759	40.022	89.196	□	-
250 x 40	3.0	4.831	53.415	1092.411	26.708	87.393	□	-
280 x 100	3.0	6.362	436.833	2179.521	87.367	155.680	■	-
300 x 100	5.0	11.057	738.250	4208.250	147.650	280.550	□	-
300 x 110	4.0	9.117	745.227	3587.475	135.496	239.165	□	-
300 x 120	5.0	11.624	1103.417	4643.417	183.903	309.561	■	-

Σχήμα 2 – 342: Διαστάσεις διατομής ευρωπαϊκής εταιρείας, μέχρι 260x180 δηλαδή (260 x 180 x 6,3)

SQUARE ALUMINIUM TUBES



■ - Material available in stock

□ - Material on request

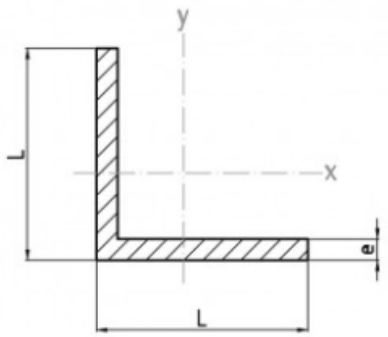
l x l	e	Weight	Ixc=Iyc	Wxc=Wyc	6063	6082
10 x 10	1.0	0.102	0.049	0.098	□	-
12 x 12	2.0	0.227	0.139	0.231	□	-
15 x 15	1.5	0.230	0.249	0.332	■	-
15 x 15	2.0	0.295	0.300	0.400	■	-
16 x 16	1.5	0.247	0.308	0.385	■	-

Σχήμα 2 – 343: Διαστάσεις διατομής □ ευρωπαϊκής εταιρείας

120 x 120	4.0	5.262	416.734	69.456	□	-
120 x 120	5.0	6.521	507.917	84.653	■	-
125 x 125	2.0	2.790	248.181	39.709	□	-
135 x 135	2.0	3.016	313.756	46.482	□	-
135 x 135	3.0	4.491	460.231	68.182	■	-
150 x 150	3.0	5.001	635.569	84.743	■	-
150 x 150	4.0	6.623	830.526	110.737	■	-
150 x 150	5.0	8.222	1017.417	135.656	■	-
150 x 150	8.0	12.882	1531.934	204.258	■	-
160 x 160	3.0	5.341	774.261	96.783	■	-
200 x 200	5.0	11.057	2473.250	247.325	■	-

Σχήμα 2 – 344: Διαστάσεις διατομής □ ευρωπαϊκής εταιρείας, μέχρι □ 200 δηλαδή (200 x 200 x 6,3)

ALUMINIUM BRACKETS WITH EQUAL SIDES



- Material available in stock

- Material on request

l x l	e	Weight	Ixc=Iyc	Wxc=Wyc	6063	6082
10 x 10	1.5	0.079	0.025	0.036	∟	-
10 x 10	2.0	0.102	0.031	0.046	∟	-
10 x 10	3.0	0.145	0.042	0.065	∟	-
15 x 15	1.0	0.082	0.064	0.059	∟	-
15 x 15	1.5	0.121	0.091	0.085	L	-
15 x 15	2.0	0.159	0.116	0.110	∟	-
15 x 15	3.0	0.230	0.159	0.156	∟	-

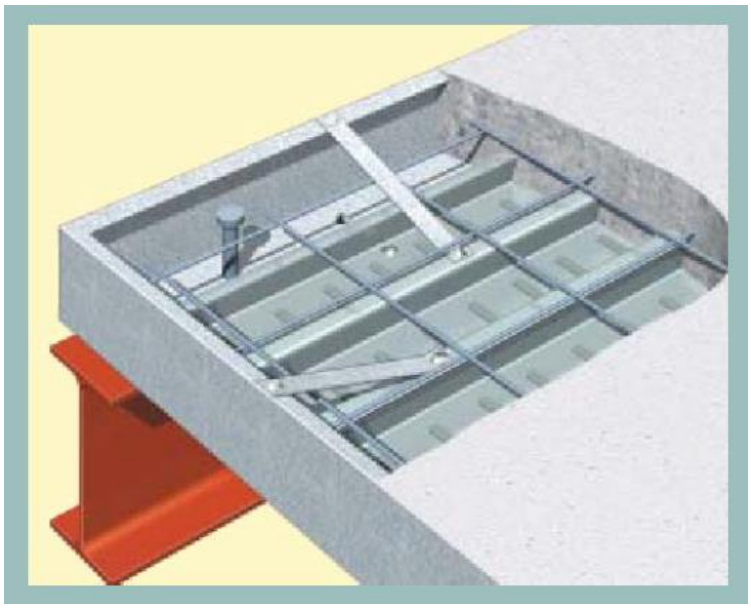
Σχήμα 2 – 345: Διαστάσεις διατομής ∟ ευρωπαϊκής εταιρείας

90 x 90	10.0	4.820	129.181	20.240	L	-
100 x 100	1.5	0.844	30.557	4.105	∟	-
100 x 100	2.0	1.123	40.441	5.446	∟	-
100 x 100	5.0	2.764	96.726	13.225	∟	-
100 x 100	6.0	3.300	114.390	15.719	L	L
100 x 100	8.0	4.355	148.173	20.568	∟	-
100 x 100	10.0	5.387	180.004	25.240	L	L
120 x 120	8.0	5.262	261.015	29.990	∟	-
120 x 120	10.0	6.521	318.525	36.907	L	-
140 x 140	10.0	7.655	514.546	50.796	∟	-

Σχήμα 2 – 345: Διαστάσεις διατομής ∟ ευρωπαϊκής εταιρείας, μέχρι ∟120x10 δηλαδή (120 x 120 x 10)

2.7 ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ VS ΧΑΛΥΒΑΣ

Το αλουμίνιο άρχισε να χρησιμοποιείται μετά τον χάλυβα με τον οποίο υπήρχε μεγαλύτερη εξοικείωση. Το 1923 κυκλοφόρησαν τα πρώτα εγχειρίδια για τον χάλυβα, ενώ το 1967 για το αλουμίνιο. Για αυτό οι κανονισμοί, η κατηγοριοποίηση των διατομών και ο τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων για το αλουμίνιο έχουν γίνει με βάση τους αντίστοιχους για το χάλυβα. Έχουμε σύμμικτα συστήματα σκυρόδεμα – χάλυβα, αλλά και σκυρόδεμα – αλουμίνιο.



Σχήμα 2 – 329: Σύμμικτο σύστημα

Το αλουμίνιο δεν αντέχει όση ζέστη ο χάλυβας. Λιώνει στους 660°C, ενώ ο χάλυβας στους 1500°C. Λίγο πιο πάνω στους 1800°C το αλουμίνιο βράζει. Παρ' όλο που το αλουμίνιο έχει συγκρίσιμη αντοχή με τον χάλυβα, το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας κάνει επίφοβη την χρήση του σε φέροντα στοιχεία. Η διάβρωση δεν είναι πρόβλημα για το αλουμίνιο, ενώ για τον χάλυβα είναι. Η γαλβανική διάβρωση είναι πρόβλημα για το αλουμίνιο, αλλά διαλέγοντας με τι μέταλλο το συνδέουμε και πώς, αντιμετωπίζεται. Ο χάλυβας είναι φθηνότερος από το αλουμίνιο, στην πάροδο του χρόνου όμως το κόστος συντήρησης, καθιστά το χάλυβα ακριβότερο. Ανοξείδωτος χάλυβας είναι ο χάλυβας με χρώμιο στη σύνθεσή του. Υπάρχει κόστος συντήρησης και για το αλουμίνιο, με τη μορφή όμως ενός απλού καθαρισμού.

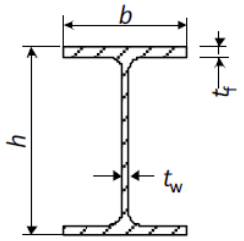
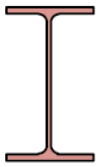
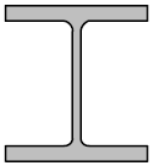
Πίνακας 2 – 1: Αναλογικά κόστη αγοράς και αγοράς + συντήρηση για αλουμίνιο και χάλυβα

ΚΟΣΤΟΣ	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	ΧΑΛΥΒΑΣ	ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ
ΣΤΗΝ ΑΡΧΗ	1,2€	0,3€	1,4€
ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΚΑΙΡΟ	2€	1€	4,7€

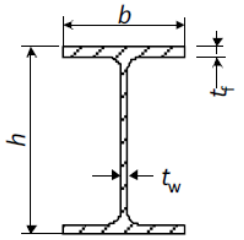
Πίνακας 2 – 2: Αναλογικά τα μεγέθη των ιδιοτήτων για αλουμίνιο και χάλυβα

	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	ΧΑΛΥΒΑΣ	ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΟΣ ΧΑΛΥΒΑΣ
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	1	2,9	2,7
ΒΑΡΟΣ	1	3	3
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	2700 kg/m^3	7900 kg/m^3	7900 kg/m^3

Για να εκμεταλλευτούμε το ελαφρύ αλουμίνιο, οι διατομές πρέπει να είναι εμφανώς ψηλότερες και πλατύτερες από τις αντίστοιχες του χάλυβα με λίγο μεγαλύτερα πάχη ειδικά στα πέλματα. Το βάρος πέφτει έτσι, κοντά στο μισό της αντίστοιχης διατομής από χάλυβα.

				
Material	steel	aluminium	aluminium	aluminium
Moment of inertia I/mm^4	$38.9 \cdot 10^6$	$116.6 \cdot 10^6$	$116.7 \cdot 10^6$	$117.3 \cdot 10^6$
EI/MNm^2	8,17	8,17	8,17	8,17
h/mm	240	240	300	330
b/mm	120	240	200	200
t_w/mm	6.2	12	6	6
t_f/mm	9.8	18.3	12,9	10
Weight $/\mathrm{kg/m}$	30,7	30,3	18,4	15,8
Weight in % of steel beam	100%	99%	60%	51%

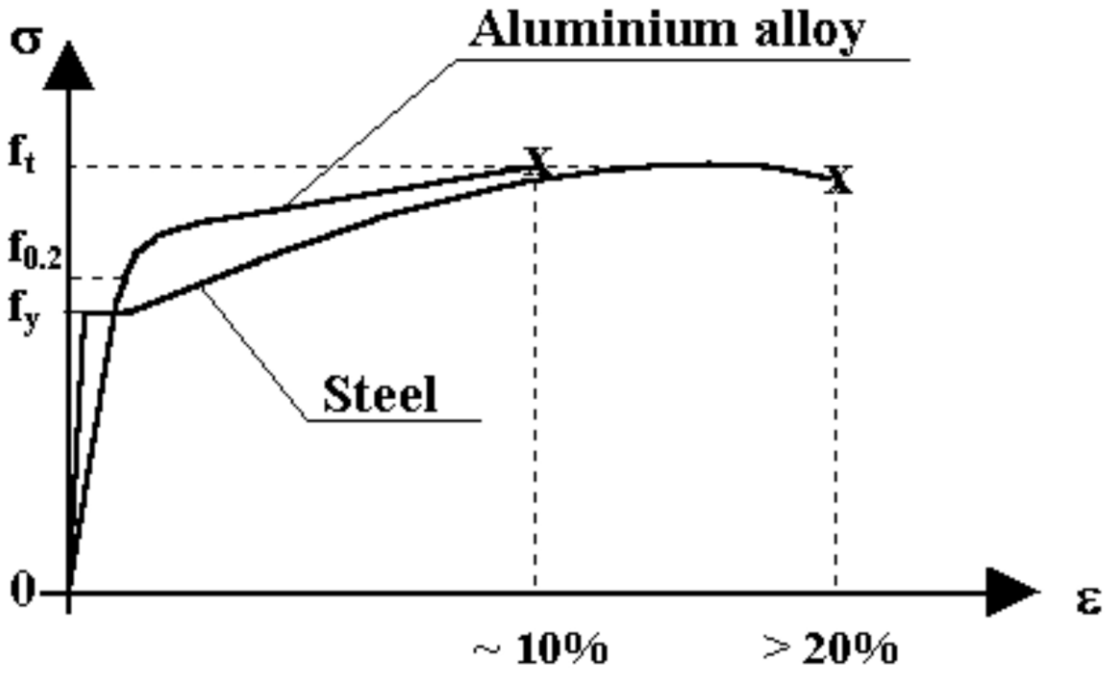
Σχήμα 2 – 330: Διαφορές διατομής διπλού Τ από χάλυβα και αλουμίνιο με ίδια «σκληρότητα» - EI

				
Material	steel	aluminium	aluminium	aluminium
f_y or f_o /MPa	355	260	260	260
Moment resistance /kNm	108	108	108	108
h/mm	240	240	300	330
b/mm	120	120	120	120
t_w/mm	6.2	8.0	7.0	6.0
t_f/mm	9.8	14.2	11.5	11.0
Weight /kg/m	30.7	13.8	12.9	12.3
Weight in % of steel beam	100%	45%	42%	40%

Σχήμα 2 – 331: Διαφορές διατομής διπλού Τ από χάλυβα και αλουμίνιο με ίδια ροπή αντοχής

Με «ψηλές» διατομές δηλαδή εκμεταλλευόμαστε το μικρό βάρος του αλουμινίου. Τα κριτήρια για την καταλληλόλητα των μελών είναι πιο αυστηρά από εκείνα του χάλυβα, με ποσοστά της τάξης του, 99% των μελών να είναι εντός προδιαγραφών, A class για κτίρια, και 90%, B class. Ένα μεγάλο καλό που έχει ο χάλυβας σε σχέση με το αλουμίνιο είναι η μεγάλη παραμόρφωση που μπορεί να αντέξει αφού φτάσει

το όριο διαρροής του, μέχρι και 30% σε σχέση με το περίπου 10% του αλουμινίου. Μας «προειδοποιεί» δηλαδή, πριν αστοχήσει τελείως. Το αλουμίνιο είναι γενικά πιο ευαίσθητο σε τοπικούς λυγισμούς. Αντέχει το 1/3 της τάσης για την εμφάνιση των πρώτων τοπικών κιόλας, λυγισμών, σε σχέση με το χάλυβα. Όπως και στο χάλυβα για την αντίσταση στη στρέψη χρησιμοποιούμε κοίλες διατομές. Ο συνδυασμός τάσεων όπως κάμψη, θλίψη, στρέψη είναι επικίνδυνος.



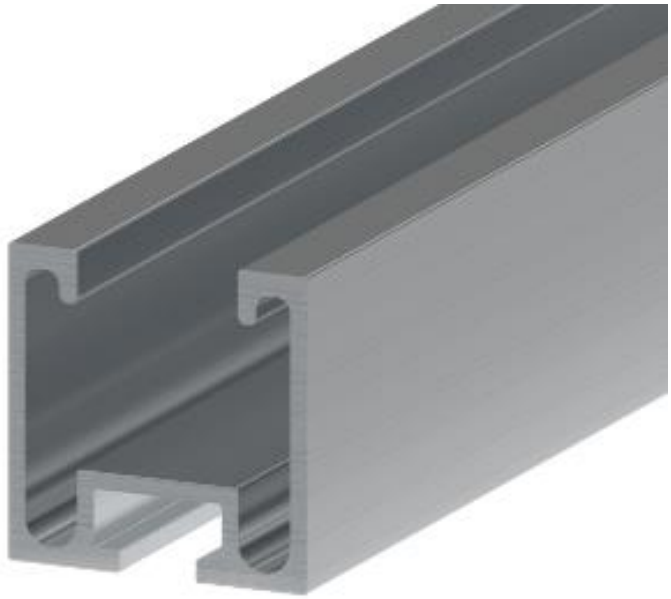
Σχήμα 2 – 332: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης για αλουμίνιο και χάλυβα

Λόγω των εκτενών πειραμάτων διαφορετικών διατομών αλουμινίου, έχουμε πίνακες για τα φορτία που αντέχουν. Είναι όμως αρκετά συντηρητικοί, καθώς θεωρούν την μικρότερη αντοχή υλικού.

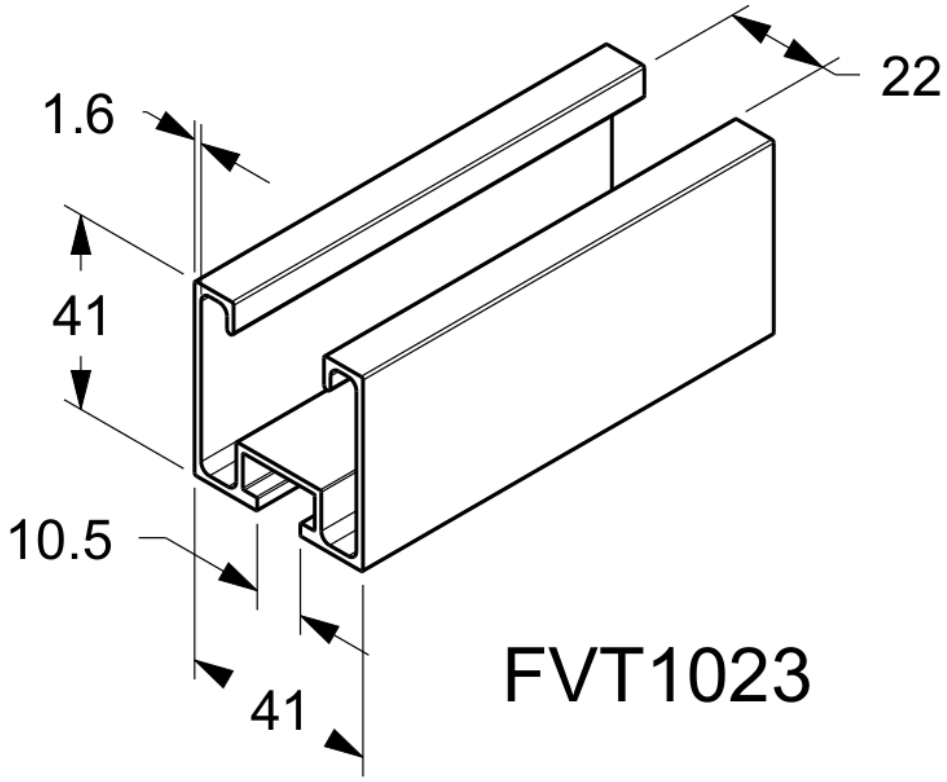
π.χ. για μία πλάκα από 6061-T6 μέσω extrusion έχουμε 145 MPa αντοχή,

ενώ μέσω cold rolling 131 MPa,

κρατάμε το 131 MPa



Σχήμα 2 – 333: Διατομή FVT 1023 thickness 1,6mm



Σχήμα 2 – 334: Διατομή FVT 1023 thickness 1,6mm

Aluminium EN AW6060 Quenching T6

Specific weight	27	KN/m³
Longitudinal elasticity module	69000	N/mm²
Tangential elasticity module	26000	N/mm²
Linear thermal dilatation coefficient	2,3*10-5	1/°C
Resistance to the last limit fy	190	N/mm²
Resistance to the yield strength limit fy	-	N/mm²
Resistance to the yield limit f0,2	150	N/mm²

Σχήμα 2 – 335: Υλικό διατομής FVT 1023 thickness 1,6mm

Simple profile FVT1023 thickness 1,6 mm

Mechanical features			
Section area	A	293,4	mm²
Linear meter weight	pp	0,79	daN/m
Moment of inertia X	Jx	60429	mm4
Moment of inertia Y	Jy	71873	mm4
Resistant moment X	Wx	2542	mm³
Resistant moment Y	Wy	3506	mm³
Inertia ray X	ix	14,4	mm
Inertia ray Y	iy	15,7	mm

Σχήμα 2 – 336: Χαρακτηριστικά διατομής FVT 1023 thickness 1,6mm

Table of the allowable loads (with Fmax <L/250)

Beam length L (mm)	Uniform load distribution (daN/m)	Load at the centerline (daN)
500	934	305
750	303	142
1000	128	80
1250	65	51
1500	37	36
1750	23	26
2000	16	20

Σχήμα 2 – 337: Φορτία που μπορεί να παραλάβει η διατομή FVT 1023 thickness 1,6mm για διαφορετικά ανοίγματα

Στον χάλυβα σε ειδικές περιπτώσεις κατασκευών εξετάζουμε τις αντοχές και την συμπεριφορά στην πλαστική περιοχή. Στο αλουμίνιο εξετάζουμε την πλαστική περιοχή, σε αυτοκίνητα (crash test), και στα κιγκλιδώματα στους δρόμους. Τα δυναμικά φορτία καταπονούν τις κατασκευές από αλουμίνιο. Η συνεχής μεταφορά φορτίων, η προσπέλαση αυτοκινήτων, τα κύματα, είναι σημαντικά δυναμικά φορτία. Ο αέρας παρ' όλο που είναι, δεν είναι και τόσο δυνατό, προκαλεί όμως συντονισμό, το οποίο είναι σημαντικό. Αντιμετωπίζεται με αποσβεστήρες, κρεμάμενες μάζες. Για αυτό είναι σημαντικό να προσδιορίσουμε τι είναι γέφυρα και τι όχι. Έχουμε 12% μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας από ότι στα κτίρια, προκειμένου να δώσουμε σημασία στα δυναμικά φορτία.

π.χ. ένα κτίριο στην οροφή του οποίου υπάρχουν γερανοί θεωρείται γέφυρα, μία πινακίδα όχι

Μάλιστα σε γερανούς και δεξαμενές αλουμινίου υπό πίεση, όπου έχουμε δυναμικότητα και πολλούς κύκλους φόρτισης, καθώς και υψηλής σημασίας κατασκευές, έχουμε συντελεστές της τάξης του 4 και 5.

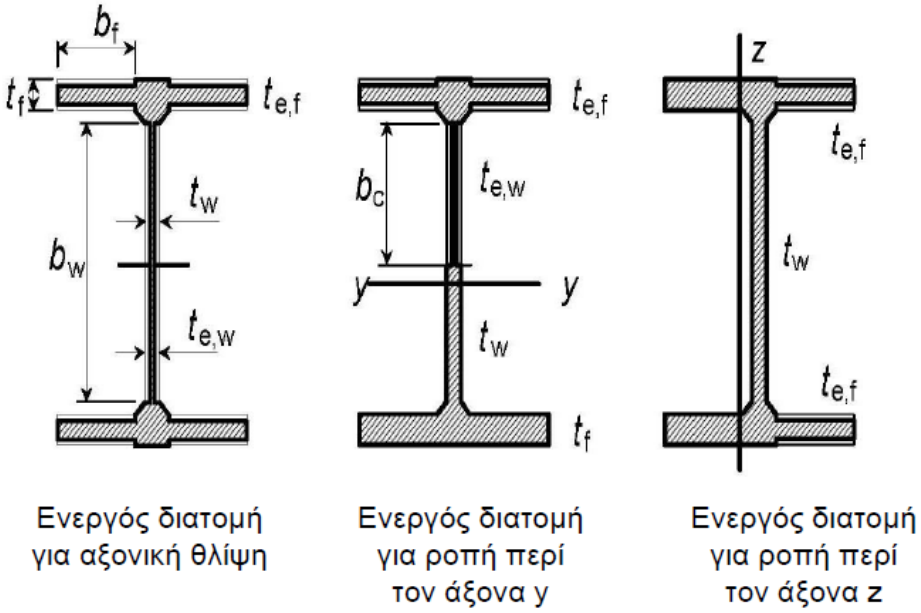
Σχήμα 2 – 338: Κτίριο με κινούμενους γερανούς στην κορυφή, θεωρείται γέφυρα

Σχήμα 2 – 339: Πινακίδα αυτοκινητοδρόμου, καταπονείται από φορτία ανέμου, δεν θεωρείται γέφυρα

Η κόπωση είναι ένα θέμα το οποίο δεν έχουμε «κατακτήσει» πλήρως. Είναι η αντοχή του μέλους σε πολλούς κύκλους φόρτισης. Μας ενδιαφέρει σε κατασκευές υψηλής σημασίας, όπου αν κάτι πάει στραβά, θα έχουμε απώλειες πολλών ανθρώπινων ζωών.

π.χ. αεροπλάνα, γέφυρες, νοσοκομεία

Οι ατέλειες μειώνουν τον αριθμό κύκλων που μπορεί να αντέξει το μέλος μας. Για 20000 κύκλους και πάνω μας ενδιαφέρει η κόπωση, σε κατασκευές όπως δεξαμενές, σωλήνες, γερανούς, γερανογέφυρες. Το αλουμίνιο έχει ½ με ¼ της αντοχής του χάλυβα σε κόπωση. Για το αλουμίνιο εξετάζουμε την ενεργή διατομή, η οποία ανάλογα με τη φόρτιση έχει απομειωμένο πάχος.



Σχήμα 2 – 340: Απομείωση του πάχους αλουμινένιας διατομής για διαφορετικές φορτίσεις

3 ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

3.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ

Σε ό,τι αφορά τους ευρωκώδικες, μοιάζουν αρκετά. Λόγω όμως της φύσης του αλουμινίου, το οποίο είναι πιο ευαίσθητο στη θερμότητα – σε θερμοκρασία >80-100°C πέφτει η αντοχή – και έχει μικρότερες αντοχές, υπάρχουν κάποιες διαφορές. Για αυτό και έχουμε μεγαλύτερους συντελεστές ασφαλείας στο αλουμίνιο. Και εξυπακούεται, διαφορετικές σταθερές υλικού.

Πίνακας 3 – 1: Σύγκριση σταθερών υλικού και συντελεστών ασφαλείας

ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΥΛΙΚΟΥ	**ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ**	**ΧΑΛΥΒΑΣ**
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ E (MPa)	70.000	210.000
ΜΕΤΡΟ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ G (MPa)	27.000	81.000
ΛΟΓΟΣ POISSON ν	0,3	0,3
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ a_t (1 / ^{O}C)	0,000023	0,000012
ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ρ (kg/m^3)	2.700	7.850
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ		
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ γ_{M0}		1,00
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ γ_{M1}	1,10	1,00
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ γ_{M2}	1,25	1,25

Σε ό,τι αφορά την κατάταξη των διατομών ακολουθείται μία παρόμοια διαδικασία με το c/t του χάλυβα, μήκος/πάχος δηλαδή διαφορετικών τμημάτων της διατομής, για κορμούς και πέλματα. Στο αλουμίνιο δίνεται και σημασία στο αν υπάρχει συγκόλληση ή όχι. Η διατομή είναι ίδιας κλάσης με το δυσμενέστερο κομμάτι της, συμβολίζεται με: $\beta = \frac{b}{t}$

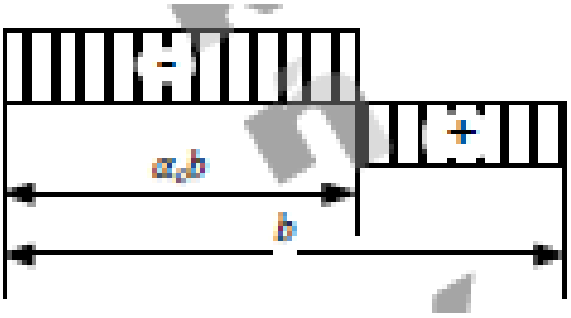
Για τις κλάσεις των διατομών: αν $\beta < \frac{\beta_3}{\varepsilon}$ έχουμε κλάση 4, αν $\frac{\beta_3}{\varepsilon} < \beta < \frac{\beta_2}{\varepsilon}$ έχουμε κλάση 3

Το ε είναι: $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}}$, f_0 σε MPa

Πίνακας 3 – 2: Κατάταξη για κλάση 3 και 4

Weld	Buckling Class	Internal part		Outstand part	
		β_2/ε	β_3/ε	β_2/ε	β_3/ε
Without welds	A	16	22	4,5	6
	B	16	20	4,5	5,5
	C	16	18	4,5	5
With welds	A	13	18	4	5
	B	13	16,5	3,8	4,5
	C	13	15	3,5	4

Για τις κλάσεις 1 και 2 με συγκολλήσεις έχουμε επιβάρυνση 0,80 στα β. Δηλαδή διαιρούμε το $\beta = \frac{b}{t}$ με 0,80 για το μεγαλώσουμε. Όσο πιο μεγάλο τόσο πέφτουμε σε πιο αδύναμη κλάση (κλάση 4 η πιο αδύναμη). Στην κατάταξη σε κλάση 1 και 2 παίζει ρόλο και το μέρος κάθε κομματιού της διατομής που βρίσκεται σε θλίψη. Το α_c είναι μεταξύ 0 και 1. Όσο πιο μεγάλο μέρος του κομματιού θλίβεται τόσο πιο δυσμενής γίνεται ο έλεγχος. Μικραίνει δηλαδή το αντίστοιχο β/ε.



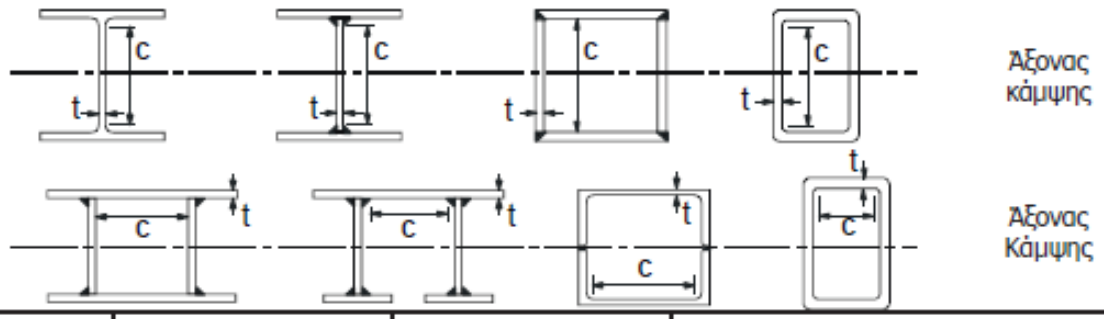
Σχήμα 3 – 1: Μέρος κομματιού (μήκος) διατομής που βρίσκεται σε θλίψη (-) και σε εφελκυσμό (+)

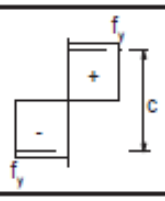
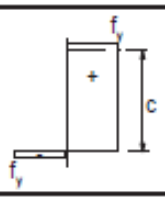
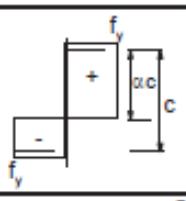
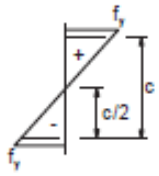
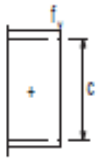
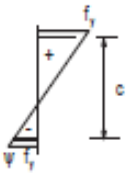
Πίνακας 3 – 3: Κατάταξης για κλάση 1 και 2

Cross – section	Internal part		Outstand part	
	$\alpha_c \leq 0{,}5$	$\alpha_c > 0{,}5$	Peak compression at supported edge	Peak compression at unsupported edge
Class 1	$\leq \frac{16\varepsilon}{\alpha_c}$	$\leq \frac{56\varepsilon}{5{,}5\alpha_c - 1}$	$\leq \frac{4\varepsilon}{\alpha_c}$	$\leq \frac{4\varepsilon}{{\alpha_c}^{1,5}}$
Class 2	$\leq \frac{19\varepsilon}{\alpha_c}$	$\leq \frac{88\varepsilon}{6{,}53\alpha_c - 1}$	$\leq \frac{4{,}5\varepsilon}{\alpha_c}$	$\leq \frac{4{,}5\varepsilon}{{\alpha_c}^{1,5}}$

Κατάταξη εσωτερικών ελασμάτων (EN1993-1-1 §5.5, Πίν. 5.2α)

Εσωτερικά θλιβόμενα τμήματα



Κατηγορία	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη	Τμήμα που υπόκειται σε θλίψη	Τμήμα που υπόκειται σε κάμψη και θλίψη
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)			
1	$c/t \le 72 \cdot \varepsilon$	$c/t \le 33 \cdot \varepsilon$	όταν $\alpha > 0{,}5$: $c/t \le \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1}$ όταν $\alpha \le 0{,}5$: $c/t \le \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha}$
2	$c/t \le 83 \cdot \varepsilon$	$c/t \le 38 \cdot \varepsilon$	όταν $\alpha > 0{,}5$: $c/t \le \frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1}$ όταν $\alpha \le 0{,}5$: $c/t \le \frac{41{,}5 \cdot \varepsilon}{\alpha}$
Κατανομή τάσεων στα τμήματα (θλίψη θετική)			
3	$c/t \le 124 \cdot \varepsilon$	$c/t \le 42 \cdot \varepsilon$	$\psi > -1$: $c/t \le \frac{42 \cdot \varepsilon}{0{,}67 + 0{,}33 \cdot \psi}$ $\psi \le -1^{*)}$: $c/t \le 62 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \psi) \cdot \sqrt{(-\psi)}$

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) $\psi \le -1$ εφαρμόζεται όπου η θλιπτική τάση $\sigma < f_y$ είτε η εφελκυστική παραμόρφωση $\varepsilon_y > f_y/E$

Σχήμα 3 – 2: Πίνακας για την κατάταξη των διατομών χάλυβα

Για το αλουμίνιο, ανάλογα με το κράμα, την επεξεργασία του, και τον τύπο διατομής (πλάκα, διπλό Τ), του αντιστοιχούν συντελεστές απομείωσης του πάχους, ρ. Υπάρχουν και πίνακες με συντελεστές απομείωσης όταν έχουμε MIG welding, TIG welding, casting, forging. Για τις δομικές εφαρμογές που μας ενδιαφέρουν το πιο ευρέως διαδεδομένο κράμα είναι το 6082.

Πίνακας 3 – 4: Συντελεστές απομείωσης για το κράμα 6082

Alloy EN AW	Product form	Temper	Thickness (mm)	f_o[a]	f_u[a]	A[e,b]	$f_{o,haz}$[d]	$f_{u,haz}$[d]	HAZ-factor		BC[f]	n_p[g]
				N/mm²		%	N/mm²		$\rho_{o,haz}$	$\rho_{u,haz}$		
6082	EP, ET, ER/B	T4	$t \leq 25$	110	205	14	100	160	0,91	0,78	C	8
	EP	T5	$t \leq 5$	230	270	8	125	185	0,54	0,69	A	28
	EP, ET	T6	$t \leq 5$	250	290	8	125	185	0,50	0,64	A	32
			$5 < t \leq 15$	260	310	10			0,48	0,60	A	25
	ER/B	T6	$t \leq 20$	250	295	8			0,50	0,63	A	27
			$20 < t \leq 150$	260	310	8			0,48	0,60	A	25
	DT	T6	$t \leq 5$	255	310	8			0,49	0,60	A	22
			$5 < t \leq 15$	240	310	10			0,52	0,60	B	17

EP είναι extruded profiles (διπλά T), ET είναι extruded tubes (κοίλες)

f_o[a] είναι το συμβατικό όριο διαρροής 0,2% f_o

f_u[a] είναι η αντοχή θραύσης

$f_{o,haz}$[d] είναι το συμβατικό όριο διαρροής 0,2% f_o στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη ΘΕΖ

$f_{u,haz}$[d] είναι η αντοχή θραύσης στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη ΘΕΖ

$\rho_{o,haz}$ συντελεστής απομείωσης f_o[a] για ΘΕΖ

$\rho_{u,haz}$ συντελεστής απομείωσης f_u[a] για ΘΕΖ

A[e,b] = 8% επιμήκυνση

BC[f] = A κατηγορία λυγισμού

$\rho_{o,haz} = \frac{f_{o,haz}}{f_o}$ $\rho_{u,haz} = \frac{f_{u,haz}}{f_u}$ $\rho * t$ (απομειωμένο πάχος)

Οι έλεγχοι επάρκειας του μέλους μοιάζουν αρκετά με εκείνους του χάλυβα, η διαφορά είναι ότι σε όλα μπαίνει το απομειωμένο πάχος, οι ελαφρώς μεγαλύτεροι συντελεστές ασφαλείας και κάποιοι συντελεστές είναι μεγαλύτεροι ή μικρότεροι, ό,τι επιβαρύνει τον έλεγχο περισσότερο.

ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

Πίνακας 3 – 5: Σύγκριση βασικών τύπων εφελκυσμού για αλουμίνιο και χάλυβα

		ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	ΧΑΛΥΒΑΣ
		$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1{,}0$	
$N_{t,Rd}$	Γενική διαρροή κατά μήκος του μέλους	$N_{o,Rd} = A_{eff} f_o / \gamma_{M1}$	$N_{pl,Rd} = A f_y / \gamma_{M0}$
	Τοπική αστοχία σε περιοχή σύνδεσης	$N_{net,Rd} = 0{,}9 A_{net} f_u / \gamma_{M2}$	$N_{u,Rd} = 0{,}9 A_{net} f_u / \gamma_{M2}$
	Τοπική αστοχία	$N_{u,Rd} = A_{u,eff} f_u / \gamma_{M2}$	

A_{eff}	Πλήρης διατομή μειωμένη κατά $\rho_{o,haz}$	A	Πλήρης διατομή
A_{net}	Διατομή μείον τις τρύπες και μειωμένη κατά $\rho_{u,haz}$	A_{net}	Διατομή μείον τις τρύπες
$A_{u,eff}$	Ενεργός διατομή μειωμένη κατά $\rho_{u,haz}$		

ΘΛΙΨΗ

Πίνακας 3 – 6: Σύγκριση βασικών τύπων θλίψης για αλουμίνιο και χάλυβα

		ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	ΧΑΛΥΒΑΣ	
		$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1{,}0$		
$N_{c,Rd}$	Γενική διαρροή κατά μήκος του μέλους	$N_{o,Rd} = A_{eff} f_o / \gamma_{M1}$	$A f_y / \gamma_{M0}$	
	Τοπική αστοχία σε περιοχή σύνδεσης	$N_{net,Rd} = A_{net} f_u / \gamma_{M2}$	$A_{eff} f_u / \gamma_{M0}$	
	Τοπική αστοχία	$N_{u,Rd} = A_{u,eff} f_u / \gamma_{M2}$		
A_{eff}		Πλήρης διατομή μειωμένη κατά $\rho_{o,haz}$	A	Πλήρης διατομή, για κατηγορία 1 2 3
A_{net}		Διατομή μείον τις τρύπες και μειωμένη κατά $\rho_{u,haz}$	A_{eff}	Διατομή με απομείωση του πάχους, για κατηγορία 4
$A_{u,eff}$		Ενεργός διατομή μειωμένη κατά $\rho_{u,haz}$ ή ρ_c , όποιο είναι μικρότερο, για κλάση 4		

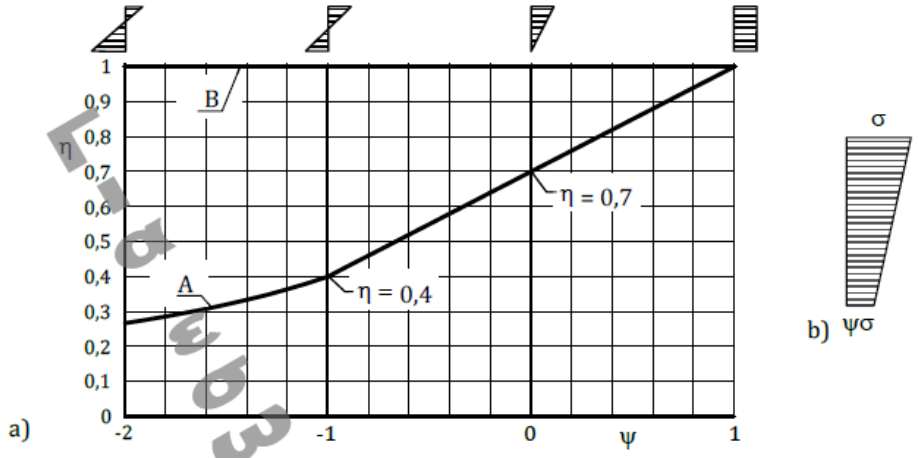
Το ρ_c αφορά την μείωση του πάχους παρουσία τοπικών λυγισμών για κλάσης 4 διατομές. Το $\beta = \frac{b}{t}$ γίνεται $\beta = \eta \frac{b}{t}$, το η έχει τα κάνει με την διαφορά των τάσεων στις άκρες του μέλους. Οι τύποι υπολογισμού του αλλάζουν ανάλογα με την μορφή (mode) του τοπικού λυγισμού σε περίπτωση που υπάρχουν ενισχύσεις. Κάνουμε χρήση διαγραμμάτων για να βρούμε το η σε περίπτωση που έχουμε κλάση 3 και πάνω, με ενισχύσεις. Για την εύρεση του η σε κλάση 4 χρησιμοποιούμε τύπους ή διαγράμματα. Μέσα στους δύο αυτούς τρόπους συμπεριλαμβάνεται το ψ, ο λόγος των τάσεων στα άκρα ενός κομματιού διατομής. Έχοντας βρει το ψ , η , β , και χρησιμοποιώντας πίνακες για την εύρεση κάποιων επιπλέον συντελεστών C_1 , C_2 βρίσκουμε το ρ_c .

Πίνακας 3 – 7: Τύποι για την εύρεση του ρ_c

$\rho_c = 1$	$\frac{\beta}{\varepsilon} \leq \frac{1}{2}\left(C_1 + \sqrt{C_1^2 - C_2(3+\psi)}\right)$
$\rho_c = \frac{C_1}{\left(\frac{\beta}{\varepsilon}\right)} - \frac{(3+\psi)C_2}{4\left(\frac{\beta}{\varepsilon}\right)^2}$	$\frac{\beta}{\varepsilon} > \frac{1}{2}\left(C_1 + \sqrt{C_1^2 - C_2(3+\psi)}\right)$

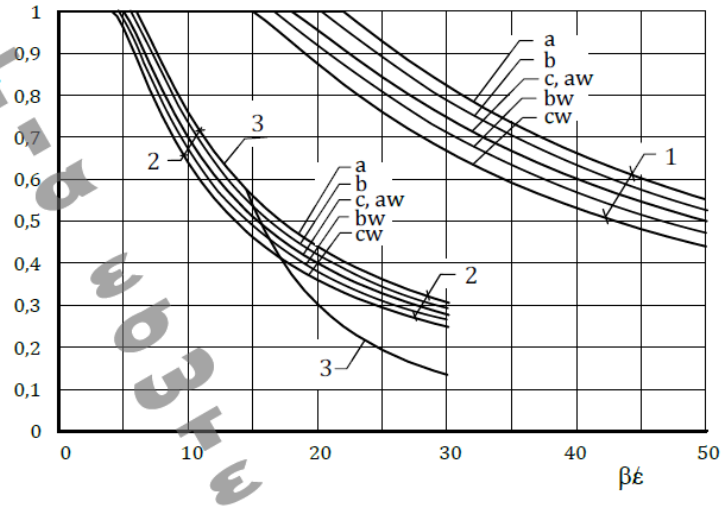
Πίνακας 3 – 8: Εύρεση των σταθερών C_1 C_2 , με σκοπό την εύρεση του ρ_c

	Buckling Class	Curve	Internal part		Outstand part	
			C_1	C_2	C_1	C_2
Without welds	A	a	32	220	10	24
	B	b	30,5	209	9,5	22
	C	c	29	198	9	20
With welds	A	aw	29	198	9	20
	B	bw	28,2	193	8,5	18
	C	cw	27,6	189	8	16



For internal parts or outstands (peak compression at root) use curve A.
For outstands with peak compression at toe use line B (ηB = 1,0).

Σχήμα 3 – 3: Εύρεση του η, το οποίο μπαίνει μπροστά από το b/t, μέσω διαγράμματος και με τη βοήθεια του λόγου των τάσεων ψ στα άκρα ενός κομματιού διατομής



Key

1 internal parts and round tubes;
2 symmetrical outstands;
3 asymmetrical outstands.

Σχήμα 3 – 4: Καμπύλες για την εύρεση του ρ_c

ΚΑΜΨΗ

Πίνακας 3 – 9: Σύγκριση βασικών τύπων κάμψης για αλουμίνιο και χάλυβα

		ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	ΧΑΛΥΒΑΣ	
		$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1{,}0$		
$M_{c,Rd}$	Γενική διαρροή κατά μήκος του μέλους	$M_{o,Rd} = \alpha W_{el} f_o / \gamma_{M1}$	$W_{pl} f_y / \gamma_{M0}$	κατηγορία 1 2
	Τοπική αστοχία σε περιοχή σύνδεσης	$M_{net,Rd} = W_{net} f_u / \gamma_{M2}$	$W_{el,min} f_u / \gamma_{M0}$	κατηγορία 3
	Τοπική αστοχία	$M_{u,Rd} = W_{u,eff} f_u / \gamma_{M2}$	$W_{eff,min} f_u / \gamma_{M0}$	κατηγορία 4
α		Συντελεστής σχήματος, $\alpha \leq 1$		
W_{el}		Ελαστική ροπή αντίστασης πλήρους διατομής		
W_{net}		Ελαστική ροπή αντίστασης διατομής μείον τις τρύπες και μειωμένη κατά $\rho_{u,haz}$		
$W_{u,eff}$		Ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης διατομής μειωμένη κατά $\rho_{u,haz}$ ή ρ_c , όποιο είναι μικρότερο, για κλάση 4		

Πίνακας 3 – 10: Τιμές για το συντελεστή σχήματος α

Cross – section class	Without welds	With longitudinal (διαμήκης) welds
1	W_{pl}/W_{el}	$W_{pl,haz}/W_{el}$
2	W_{pl}/W_{el}	$W_{pl,haz}/W_{el}$
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	W_{pl}/W_{el}	$W_{eff,haz}/W_{el}$
W_{pl}	Πλαστική ροπή αντίστασης πλήρους διατομής	
$W_{pl,haz}$ $W_{el,haz}$	Ενεργός πλαστική/ελαστική ροπή αντίστασης πλήρους διατομής μειωμένη κατά $\rho_{o,haz}$	
$W_{eff,haz}$	Ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης πλήρους διατομής μειωμένη κατά $\rho_{o,haz}$ ή ρ_c , όποιο είναι μικρότερο, για κλάση 4	
$\alpha_{3,u}$	1 ή $\left[1 + \frac{(\beta_3 - \beta)}{(\beta_3 - \beta_2)}\left(\frac{W_{pl}}{W_{el}} - 1\right)\right]$ $\beta_2 < \beta \leq \beta_3$, κλάση 2	
$\alpha_{3,w}$	$W_{el,haz}/W_{el}$ ή $\left[\frac{W_{el,haz}}{W_{el}} + \frac{(\beta_3 - \beta)}{(\beta_3 - \beta_2)}\left(\frac{W_{pl,haz} - W_{el,haz}}{W_{el}}\right)\right]$ $\beta_2 < \beta \leq \beta_3$, κλάση 2	

ΤΕΜΝΟΥΣΑ

$V_{Ed}/V_{pl,Rd} \leq 1{,}0$ με $V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \dfrac{A_v \cdot (f_y/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}}$

		Εμβαδόν διάτμησης A_v
Ελατές διατομές I και H	Φορτίο παράλληλο στον κορμό	$\max\begin{Bmatrix} A - 2\cdot b\cdot t_f + (t_w + 2\cdot r)\cdot t_f \\ \eta\cdot h_w\cdot t_w \end{Bmatrix}$
Ελατές διατομές U		$A - 2\cdot b\cdot t_f + (t_w + r)\cdot t_f$
Ελατές διατομές T		$0{,}9\cdot(A - b\cdot t_f)$
Συγκολλητές διατομές I και H, Κιβωτιοειδείς διατομές		$\eta\cdot\sum(h_w\cdot t_w)$
Συγκολλητές διατομές I και H, Κιβωτιοειδείς διατομές	Φορτίο παράλληλο στα πέλματα	$A - \sum(h_w\cdot t_w)$
Ελατές κοίλες ορθογωνικές διατομές	Φορτίο παράλληλο στο ύψος	$A\cdot h/(b+h)$
	Φορτίο παράλληλο στο πλάτος	$A\cdot b/(b+h)$
Κοίλες κυκλικές διατομές		$2\cdot A/\pi$
Συμπαγείς διατομές		A

b είναι το συνολικό πλάτος

h είναι το συνολικό ύψος

h_w είναι το ύψος του κορμού

r είναι η ακτίνα συναρμογής κορμού-πέλματος

t_f είναι το πάχος του πέλματος

t_w είναι το πάχος του κορμού (= min·t_w, για μη σταθερό πάχος κορμού).

η=1,20 για χάλυβες μέχρι και S460. Για χάλυβες υψηλότερης αντοχής ή συντηρητικά λαμβάνεται ίσος με 1,0 (EN1993-1-5 §5.1)

Μη ενισχυμένοι κορμοί με $h_w/t_w > 72\cdot\varepsilon/\eta$ πρέπει να ελέγχονται έναντι κύρτωσης

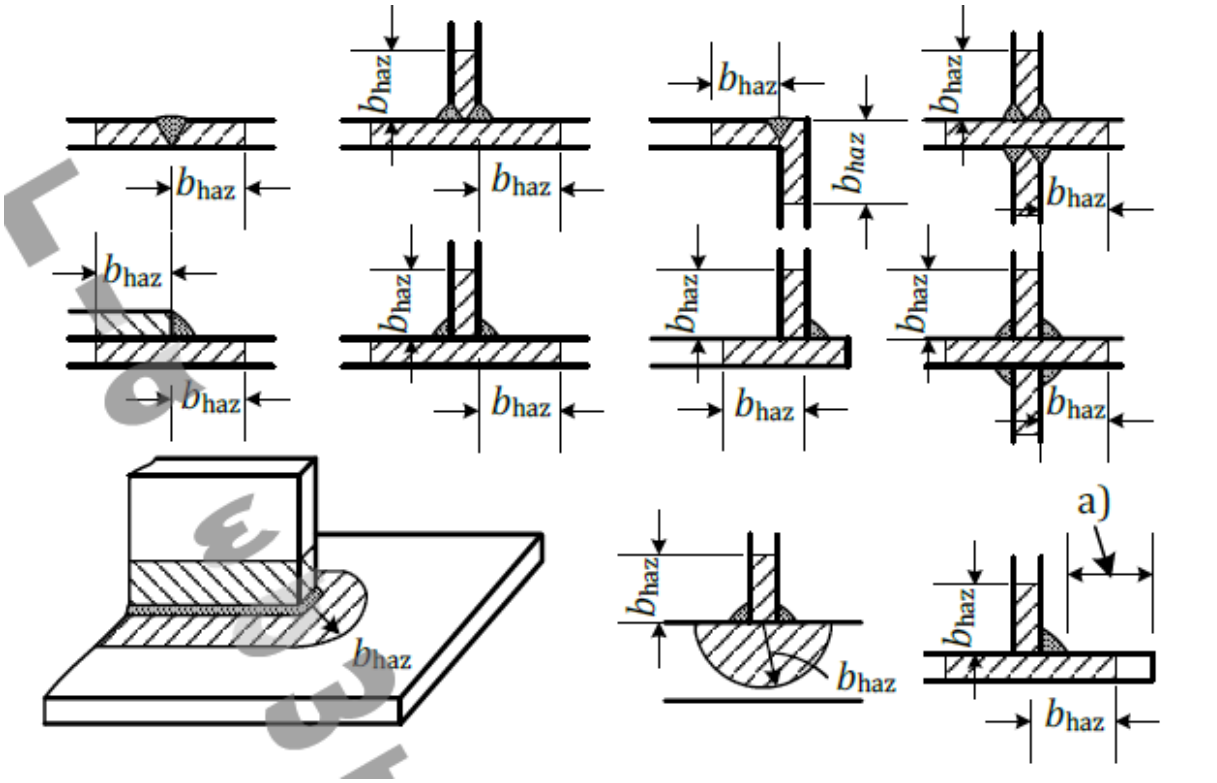
Σχήμα 3 – 5: Τύποι τέμνουσας για το χάλυβα

Για λυγηρές διατομές $\frac{h_w}{t_w} > 39\varepsilon$, μπαίνουν επιπλέον μειωτικοί συντελεστές στους τύπους.

Πίνακας 3 – 11: Τύποι τέμνουσας για το αλουμίνιο

$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1{,}0$	
$\gamma\iota\alpha\ \ \frac{h_w}{t_w} < 39\varepsilon\ \ \acute{\varepsilon}\chi o\upsilon\mu\varepsilon$:	
V_{Rd}	$A_v \frac{f_o}{\sqrt{3}\gamma_{M1}}$
A_v	Επιφάνεια επιπέδου διάτμησης
	$\sum_{i=1}^{n}[\left(h_w - \sum d_0\right)(t_w)_i - (1-\rho_{o,haz})b_{haz}(t_w)_i]$
	$A_v = \eta_v A_e$

η_v	0,8 για συμπαγή ράβδο ή 0,6 για σωλήνα
A_e	Εμβαδόν πλήρους μη συγκολλητής διατομής ή εμβαδόν συγκολλητής διατομής μειωμένη κατά $\rho_{o,haz}$
h_w	Ύψος κορμού μεταξύ των πελμάτων
b_{haz}	Το πλάτος της ΘΕΖ
t_w	Το πάχος του κορμού
d_0	Η διάμετρος των οπών κατά μήκος του επιπέδου διάτμησης
n	Το πλήθος των κορμών



Σχήμα 3 – 6: Εύρεση του b_{haz} ανάλογα με τη μορφή της συγκόλλησης

ΚΑΜΠΤΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ

Πολύ παρόμοια διαδικασία και στα δύο υλικά. Στο αλουμίνιο υπάρχει ένας επιπλέον μειωτικός συντελεστής.

Πίνακας 3 – 12: Σύγκριση τύπων για τον καμπτικό λυγισμό

	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ		ΧΑΛΥΒΑΣ	
	$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1{,}0$			
$N_{b,Rd}$	$\chi f_o A_{eff}/\omega_x \gamma_{M1}$	χωρίς συγκολλήσεις	$\chi f_y A/\gamma_{M1}$	κατηγορία 1 2 3
	$\chi_{haz} f_u A_{u,eff}/\omega_{x,haz} \gamma_{M1}$	με συγκολλήσεις	$\chi f_y A_{eff}/\gamma_{M1}$	κατηγορία 4

χ	Συντελεστής απομείωσης, από τις καμπύλες λυγισμού
χ_{haz}	Ο ίδιος συντελεστής απομείωσης, τον οποίο βρίσκουμε μέσω ενός πιο επιβαρυμένου $\overline{\lambda_{haz}}$ και των ίδιων καμπυλών
A_{eff}	Πλήρης διατομή μειωμένη κατά $\rho_{o,haz}$ για κλάση 4, A_g για κλάση 1 2 3
$A_{u,eff}$	Ενεργός διατομή μειωμένη κατά $\rho_{u,haz}$ ή ρ_c , όποιο είναι μικρότερο, για κλάση 4
$\omega_{x,haz}$	Ένας επιπλέον μειωτικός συντελεστής ο οποίος λαμβάνει υπ' όψη την θέση μιας τοπικής συγκόλλησης κατά μήκος του μέλους, συνήθως 1

Πίνακας 3 – 13: Σύγκριση τύπων για τον καμπτικό λυγισμό

	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ	ΧΑΛΥΒΑΣ
χ	$\frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}}$	
φ	$0{,}5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \overline{\lambda_o}) + \bar{\lambda}^2)$	$0{,}5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0{,}2) + \bar{\lambda}^2)$
$\bar{\lambda}$	$\frac{L_{cr}}{i}\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{A_{eff}}{A}\frac{f_o}{E}}$	$\frac{L_{cr}}{i}\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{A_{eff}}{A}\frac{f_y}{E}}$ για κατηγορία 4

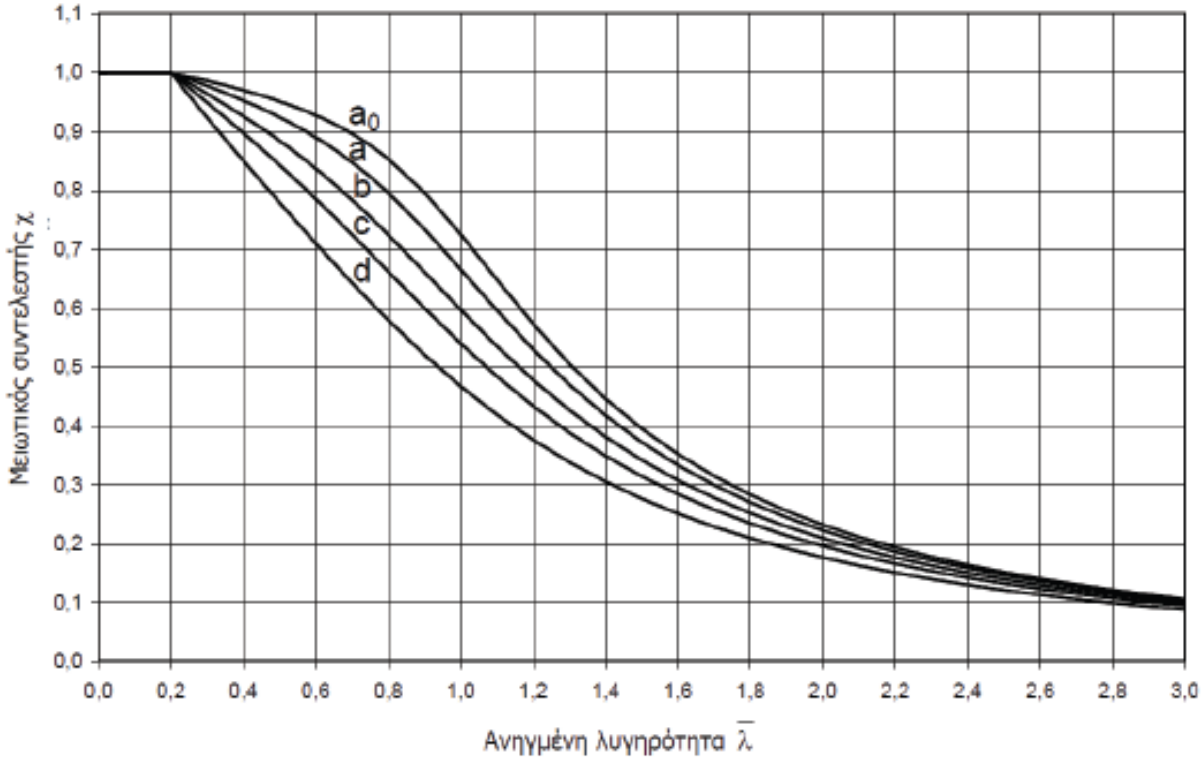
Πίνακας 3 – 14: Συντελεστές ατελειών α και $\overline{\lambda_o}$ για το αλουμίνιο, καμπτικός λυγισμός

Weld	Buckling Class	Curve	α	$\overline{\lambda_o}$
Without welds	A	a	0,18	0,10
	B	b	0,30	0,15
	C	c	0,56	0,14
With longitudinal welds	A	aw	0,36	0,16
	B	bw	0,54	0,22
	C	cw	0,92	0,24

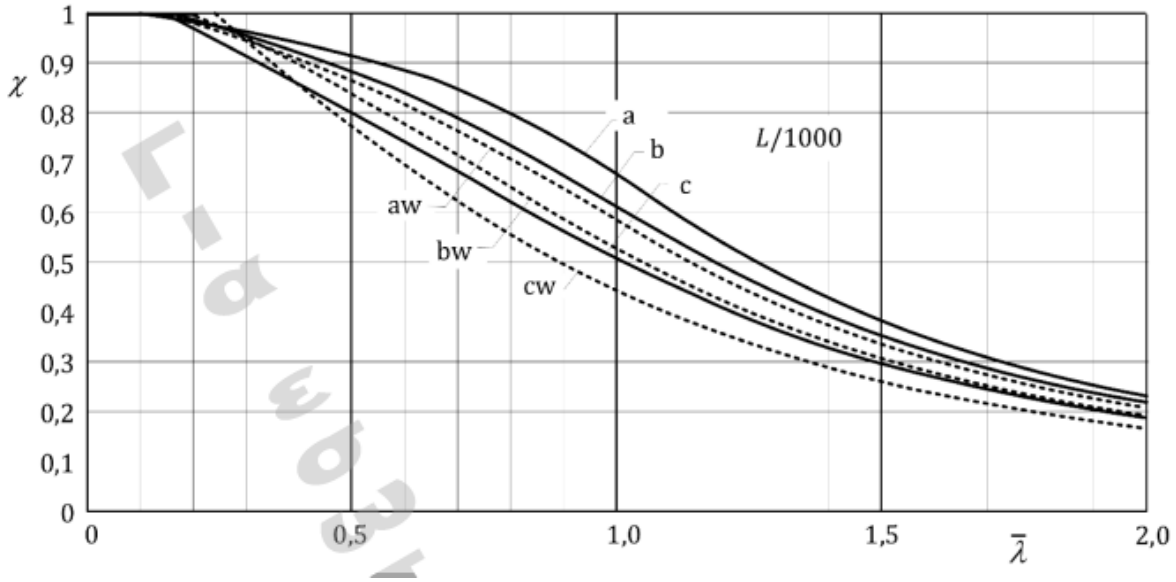
Καμπύλη λυγισμού	a_0	a	b	c	d
Συντελεστής ατελειών α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Σχήμα 3 – 7: Πίνακας συντελεστών ατελειών α για τον χάλυβα

Και οι καμπύλες λυγισμού μοιάζουν αρκετά, ακολουθούν τις ίδιες περίπου τιμές. Έχουμε όμως 5 καμπύλες στον χάλυβα και 6 στο αλουμίνιο.



Σχήμα 3 – 8: Καμπύλες λυγισμού για τον χάλυβα



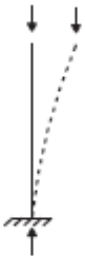
Σχήμα 3 – 9: Καμπύλες λυγισμού για το αλουμίνιο

Οι συντελεστές για τα μήκη λυγισμού είναι ελαφρώς μεγαλύτεροι (μικραίνουν το χ) ανά περίπτωση στήριξης για το αλουμίνιο.

End conditions		k
1. Rotation: clamped – clamped; displacement: fixed – fixed		0,7
2. Rotation: clamped – hinge; displacement: fixed – fixed		0,85
3. Rotation: hinge – hinge; displacement: fixed – fixed (not relevant)		1,0
4. Rotation: clamped – clamped; displacement: fixed – free		1,25
5. Rotation: clamped – partially restrained; displacement: fixed – free		1,5
6. Rotation: clamped – free; displacement: fixed – free (cantilever)		2,1
7. Rotation: hinge – elastically clamped; displacement: fixed – free		≧2,1[a]
[a] Depends on stiffness at the clamped end.		

Σχήμα 3 – 10: Συντελεστές μηκών λυγισμού για το αλουμίνιο

Μήκος λυγισμού $L_{cr} = k \cdot L$

Μορφές λυγισμού χαρακτηριστικών τύπων υποστυλωμάτων						
Θεωρητικές τιμές k	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Συνθήκες στηρίξεως				άστρεπτα αμετάθετα		
				στρεπτά αμετάθετα		
				άστρεπτα μεταθετά		

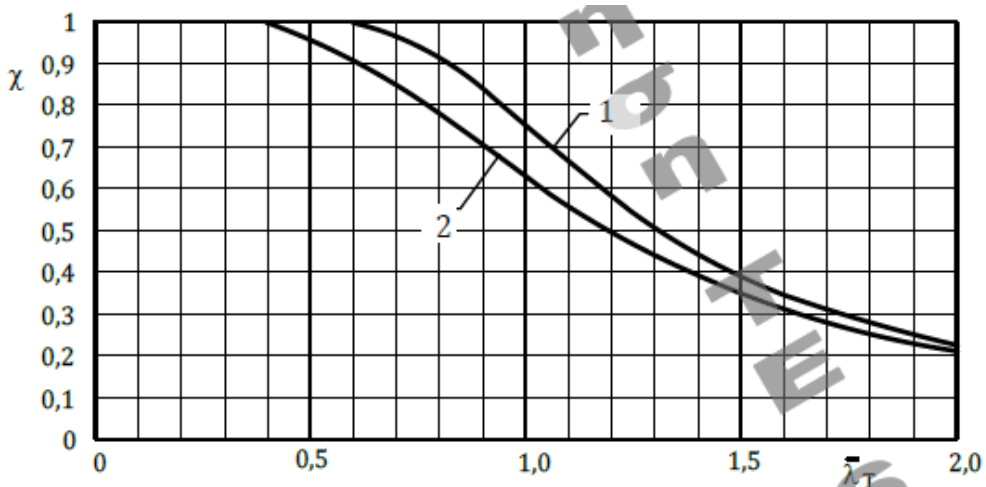
Σχήμα 3 – 11: Συντελεστές μηκών λυγισμού για τον χάλυβα

ΣΤΡΕΠΤΟΚΑΜΠΤΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ

Για το αλουμίνιο η διαδικασία μοιάζει αρκετά με τον καμπτικό λυγισμό του.

Πίνακας 3 – 15: Συντελεστές ατελειών α και $\overline{\lambda_o}$ για το αλουμίνιο, στρεπτοκαμπτικός λυγισμός

Το $\overline{\lambda_T}$ (T=torsional, LT=lateral torsional) είναι ελαφρώς επιβαρυμένο από κάποιους επιπλέον συντελεστές. Τα α και $\overline{\lambda_o}$ διαφέρουν από εκείνα του καμπτικού λυγισμού.			
Διατομή	α	$\overline{\lambda_o}$	A_{eff}
Γενικές a	0,35	0,4	A_{eff} a
Ακτινωτής μορφής b	0,20	0,6	A_g b
a: Συνήθεις διατομές με ενισχύσεις που λυγίζουν σύμφωνα με το mode 1, οι ενισχύσεις και το μέλος λυγίζουν με την ίδια καμπυλότητα δηλαδή.			
b: Γωνιακά, T, σταυροειδής μορφής, ακτινωτής μορφής			



Key

1 cross-sections composed of radiating outstands;

2 general cross-sections.

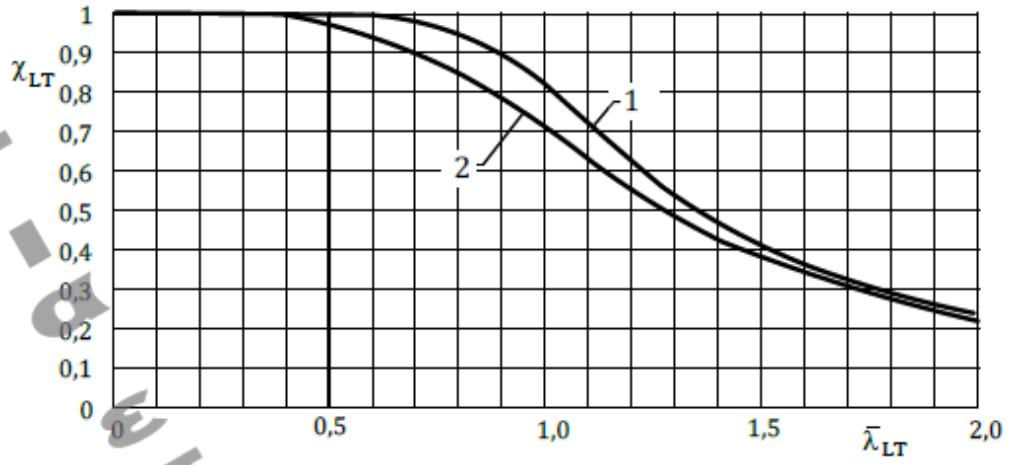
Σχήμα 3 – 12: Καμπύλες στρεπτοκαμπτικού λυγισμού για το αλουμίνιο

ΠΛΕΥΡΙΚΟΣ ΣΤΡΕΠΤΟΚΑΜΠΤΙΚΟΣ ΛΥΓΙΣΜΟΣ

Πίνακας 3 – 16: Σύγκριση βασικών τύπων κάμψης για αλουμίνιο και χάλυβα

Αγνοείται όταν υπάρχει κάμψη περί τον ασθενή κύριο άξονα και το φορτίο δεν εφαρμόζεται στο κέντρο διάτμησης. Όταν το μέλος είναι δεσμευμένο πλευρικά. Όταν το $\overline{\lambda_{LT}} < 0{,}4$ σε σχέση με το 0,2 του χάλυβα.			
	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ		ΧΑΛΥΒΑΣ
	$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1{,}0$		
$M_{b,Rd}$	$\left(\frac{\chi_{LT}}{\omega_{xLT}}\right)\alpha W_{el,y}\left(\frac{f_o}{\gamma_{M1}}\right)$		$\frac{\chi_{LT} W_y f_o}{\gamma_{M1}}$
	$\left(\frac{\chi_{LT,haz}}{\omega_{xLT,haz}}\right) W_{u,eff}\left(\frac{f_u}{\gamma_{M2}}\right)$		
α	Συντελεστής σχήματος, $\alpha \leq 1$		
W_{el}	Ελαστική ροπή αντίστασης πλήρους διατομής		
W_y	$W_{pl,y}$ για 1 2	$W_{el,y}$ για 3	$W_{eff,y}$ για 4
$W_{u,eff}$	Ενεργός ελαστική ροπή αντίστασης διατομής μειωμένη κατά $\rho_{u,haz}$ ή ρ_c , όποιο είναι μικρότερο, για κλάση 4		
Η διαδικασία εύρεσης του χ_{LT} πλέον, για το αλουμίνιο είναι η ίδια με πριν, και οι τύποι. Αυτό που αλλάζει είναι τα α_{LT} και $\overline{\lambda_{0,LT}}$ καθώς και οι καμπύλες.			
Class	α_{LT}		$\overline{\lambda_{0,LT}}$
1 και 2	0,10		0,6

3 και 4	0,20	0,4
$\overline{\lambda_{LT}}$	$\sqrt{\frac{aW_{el,y}f_o}{M_{cr}}}$	
M_{cr}	Κρίσιμη ελαστική ροπή	



Key

1 Class 1 and 2 cross-sections,

2 Class 3 and 4 cross-sections

Σχήμα 3 – 13: Καμπύλες πλευρικού στρεπτοκαμπτικού λυγισμού για το αλουμίνιο

Η διαδικασία για την εύρεση της κρίσιμης ροπής αλλά και των συντελεστών αλληλεπίδρασης μοιάζει αρκετά με εκείνη του χάλυβα, δεν κάνουμε κάτι τελείως διαφορετικό. Είναι όμως λίγο πιο πολύπλοκη.

ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

Σε μερικές περιπτώσεις προτιμώνται οι κοχλίες αλουμινίου. Έχουν αντοχή σε διάβρωση. Δεν προκαλούνται μεταβολές στον βαθμό σύσφιξης λόγω της θερμικής διαστολής σε αντίθεση με τους χαλύβδινους που προκαλείται.

Table 5.9 — Minimum values of 0,2 % proof strength, f_o, and ultimate strength, f_u, for bolts and solid rivets

Material	Type of fastener	Alloy Numerical designation: EN AW-.	Alloy Chemical designation: EN AW-	Temper or grade	Dia-meter mm	f_o[f] N/mm²	f_u[f] N/mm²
Aluminium alloy	Solid Rivets[a]	5019	AlMg5	H111	≤ 20	110	250
				H14, H34	≤ 18	210	300
		5754	AlMg3	H111	≤ 20	80	180
				H14, H34	≤ 18	180	240
		6082	AlSi1MgMn	T4	≤ 20	110	205
				T6	≤ 20	240	300
	Bolts[a]	5754	AlMg3	c	≤ 10	230	270
		(AL1)[b]			10 < d ≤ 20	180	250
		5019	AlMg5	c	≤ 14	205	310
		(AL2)[b]			14 < d ≤ 39	200	280
		6082	AlSi1MgMn	c	≤ 6	250	320
		(AL3)[b]			6 < d ≤ 39	260	310
Steel	Bolts[d]			4.6	≤ 39	240	400
				5.6	≤ 39	300	500
				8.8	≤ 39	640	800
				10.9	≤ 39	900	1000
Stainless Steel	Bolts[e]	A2, A4		50	≤ 39	210	500
		A2, A4		70	≤ 39	450	700
		A2, A4		80	≤ 39	600	800

[a] See 5.3.2.1 (3)

[b] Material designation according to EN 28839

[c] No grade designation in EN 28839

[d] Grade according to EN ISO 898-1

[e] Designation and grade according to EN ISO 3506-1

[f] The given values for solid rivets are the lesser values of EN 754 (drawn rods) or EN 1301 (drawn wire) of which solid rivets are manufactured by cold forming. For the 0,2-proof stress EN 1301 defines only typical values, but the above given values can all be regarded as being on the safe side. For the design of connections of category A (bearing mode) the ultimate strength value is the basis for the calculation of the bearing capacity of a bolt or a rivet.

Διδακτικό Χρήσης

Σχήμα 3 – 14: Πίνακας με κοχλίες αλουμινίου/χάλυβα και ήλους αλουμινίου

Οι κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων, οι αποστάσεις κοχλιών και οι μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις κοχλιών σχεδόν ταυτίζονται για τα δύο υλικά.

Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων (EN 1993-1-8 Πίν. 3.2)

Κατηγορία		Κριτήρια	Παρατηρήσεις
Συνδέσεις διάτμησης			
A	άντυγας	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Δεν απαιτείται προένταση. Κατηγορίες από 4.6 μέχρι και 10.9.
B	ανθεκτικές σε ολίσθηση στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Προεντεταμένοι κοχλίες κατηγορίας 8.8 ή 10.9.
C	ανθεκτικές σε ολίσθηση στην οριακή κατάσταση αστοχίας	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$	Προεντεταμένοι κοχλίες κατηγορίας 8.8 ή 10.9.
Συνδέσεις εφελκυσμού			
D	χωρίς προένταση	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Δεν απαιτείται προένταση. Κατηγορίες από 4.6 μέχρι και 10.9.
E	με προένταση	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Προεντεταμένοι κοχλίες κατηγορίας 8.8 ή 10.9.
Οι κοχλίες που υπόκεινται σε ταυτόχρονη διάτμηση και εφελκυσμό πρέπει να ικανοποιούν και τα κριτήρια που δίνονται στον Πίνακα 3.4 (§5.2)			

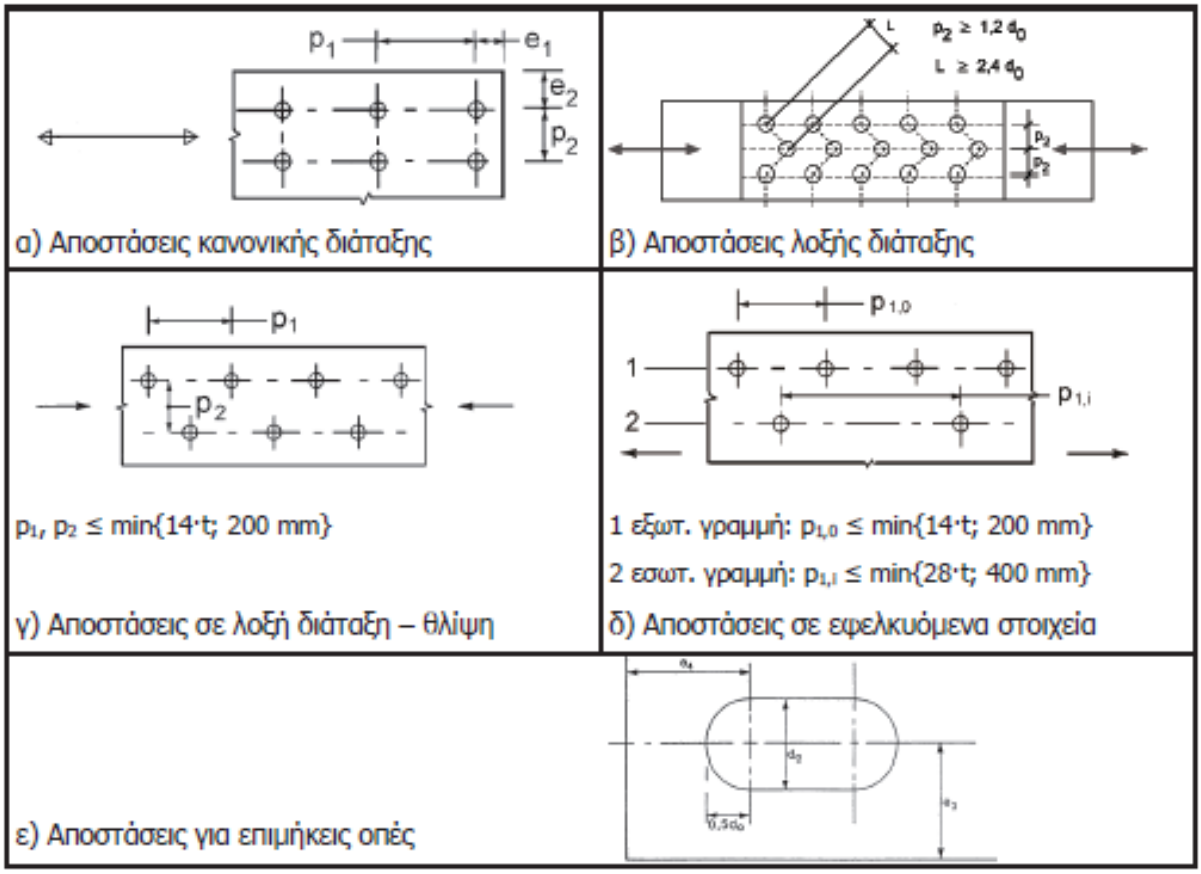
Σχήμα 3 – 15: Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων για τον χάλυβα

Table 10.2 — Categories of bolted connections

Shear connections		
Category	**Criteria**	**Remarks**
A Bearing type	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ For each of the connected parts the rule in 10.2 should be fulfilled in each net section.	No preloading required. Bolts in accordance with Table 5.9.
B Slip resistant at service-ability limit state	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ For each of the connected parts the rule in 10.2 should be fulfilled in each net section. At each bolt the design value of serviceability action tension effects in the connected members should not exceed $f_o/\gamma_{M,ser}$.	Preloaded bolts. No slip at the serviceability limit state.
C Slip resistant at ultimate limit state	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ For each of the connected parts the rule in 10.2 should be fulfilled in each net section. At each bolt the design value of serviceability action tension effects in the connected members should not exceed f_o/γ_{Ms}.	Preloaded bolts. No slip at the ultimate limit state.
Tension connections		
Category	**Criterion**	**Remarks**
D Non-preloaded	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Bolts in accordance with Table 5.9.
E Preloaded	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Preloaded 8.8 or 10.9 bolts.

Σχήμα 3 – 16: Κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων για το αλουμίνιο

Αποστάσεις κοχλιών (EN 1993-1-8 Σχ. 3.1)



Σχήμα 3 – 17: Αποστάσεις κοχλιών για τον χάλυβα

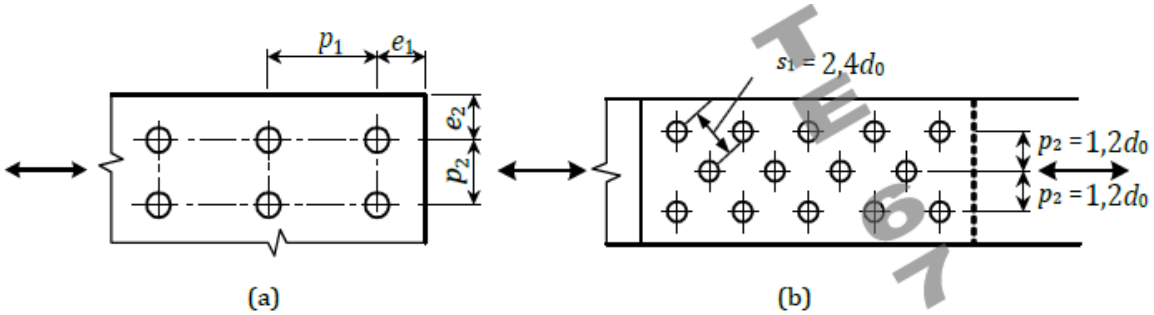


Figure 10.1 — Symbols for spacing of fasteners

Σχήμα 3 – 18: Αποστάσεις κοχλιών για το αλουμίνιο

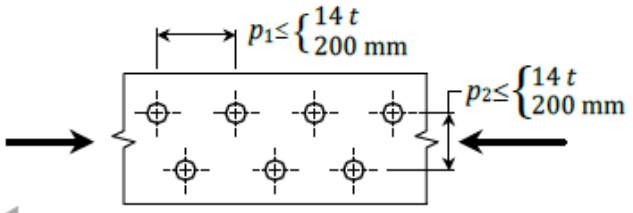


Figure 10.2 — Staggered spacing – compression

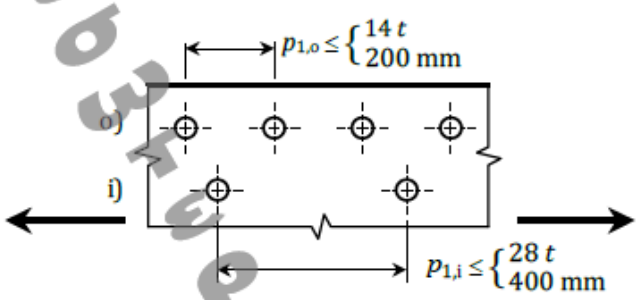


Figure 10.3 — Spacing in tension member, exposed to weather and corrosive influence

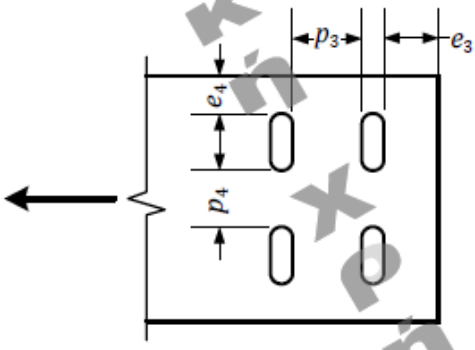


Figure 10.4 — Slotted holes

Σχήμα 3 – 19: Αποστάσεις κοχλιών για το αλουμίνιο

Μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις κοχλιών (EN 1993-1-8 Πίν. 3.3)

Αποστάσεις [mm], βλέπε Σχ. 3.1	Ελάχιστη	Μέγιστη[1) 2) 3)]		
		Κατασκευές από χάλυβες που συμφωνούν με το EN 10025 εκτός εκείνων που συμφωνούν με το EN 10025-5		Κατασκευές από χάλυβες που συμφωνούν με το EN 10025-5
		Χάλυβας εκτεθειμένος σε καιρικές συνθήκες ή άλλα διαβρωτικά περιβάλλοντα	Χάλυβας μη εκτεθειμένος	Χάλυβας χωρίς προστασία
Απόσταση από άκρο e_1	$1{,}2 \cdot d_0$	$4 \cdot t + 40$		$\max\{8 \cdot t; 125\}$
Απόσταση από άκρο e_2	$1{,}2 \cdot d_0$	$4 \cdot t + 40$		$\max\{8 \cdot t; 125\}$
Απόσταση e_3 σε επιμήκεις οπές	$1{,}5 \cdot d_0$			
Απόσταση e_4 σε επιμήκεις οπές	$1{,}5 \cdot d_0$			
Βήμα p_1	$2{,}2 \cdot d_0$	$\min\{14 \cdot t; 200\}$	$\min\{14 \cdot t; 200\}$	$\min\{14 \cdot t_{min}; 175\}$
Βήμα $p_{1,0}$		$\min\{14 \cdot t; 200\}$		
Βήμα $p_{1,i}$		$\min\{28 \cdot t; 400\}$		
Βήμα p_2 [5)]	$2{,}4 \cdot d_0$	$\min\{14 \cdot t; 200\}$	$\min\{14 \cdot t; 200\}$	$\min\{14 \cdot t_{min}; 175\}$

Σχήμα 3 – 20: Μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις κοχλιών για τον χάλυβα

Table 10.1 — Minimum, regular and maximum spacing, end and edge distances

1	2	3	4	5
Distances and spacings, see Figures 10.1 and 10.2	**Minimum**	**Regular distance**	**Maximum[a, b]**	
			Structures made of aluminium according to Table 5.1	
			Aluminium exposed to weather or other corrosive influences	**Aluminium not exposed to weather or other corrosive influences**
End distance e_1	$1{,}2d_0$	$3{,}0d_0$	$4t + 40$ mm	The larger of $12t$ or 150 mm
Edge distance e_2	$1{,}2d_0$	$1{,}5d_0$	$4t + 40$ mm	The larger of $12t$ or 150 mm
End distance e_3 for slotted holes	Slotted holes of category A see 10.5.1(5) – (10)			
Edge distance e_4 for slotted holes	Slotted holes of category A see 10.5.1(5) – (10)			
Compression members (see Figure 10.2): Spacing p_1	$2{,}2d_0$	$3{,}5d_0$	The smaller of $14t$ or 200 mm	The smaller of $14t$ or 200 mm
Tension members (see Figure 10.3): Spacing $p_1, p_{1,0}, p_{1,i}$	$2{,}2d_0$	$3{,}5d_0$	Outer lines: The smaller of $14t$ or 200 mm Inner lines: The smaller of $28t$ or 400 mm	1,5 times the values of column 4
Spacing p_2[c]	$2{,}4d_0$	$3{,}0d_0$	The smaller of $14t$ or 200 mm	The smaller of $14t$ or 200 mm

Σχήμα 3 – 21: Μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις κοχλιών για το αλουμίνιο

Για εσωτερική χρήση

5.2 Αντοχή κοχλιώσεων σε διάτμηση και εφελκυσμό

Αντοχή κοχλιών σε διάτμηση και/ή εφελκυσμό (EN 1993-1-8 Πίν. 3.4)

Μηχανισμός αστοχίας	Κοχλίες
Αντοχή σε διάτμηση ανά επίπεδο διάτμησης το οποίο διέρχεται από την πλήρη διατομή του κοχλία **A**	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_v = 0,6$
Αντοχή σε διάτμηση ανά επίπεδο διάτμησης το οποίο διέρχεται από το σπείρωμα του κοχλία $\mathbf{A_s}$	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_v = 0,6$ για κατηγορίες 4.6, 5.6 και 8.8 $\alpha_v = 0,5$ για κατηγορίες 4.8, 5.8, 6.8 και 10.9
Αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας [1), 3)]	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$ $\quad \alpha_b = \min\left\{\alpha_d ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1,0\right\}$ για τελευταία σειρά κοχλιών κατά τη διεύθυνση του φορτίου $\quad \alpha_d = \frac{e_1}{3 \cdot d_0}$ για εσωτερική σειρά κοχλιών κατά τη διεύθυνση του φορτίου $\quad \alpha_d = \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}$ για πλευρικά ακραίους κοχλίες κάθετα στη διεύθυνση του φορτίου $\quad k_1 = \min\left\{2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 ; 2,5\right\}$ για εσωτερικούς κοχλίες κάθετα στη διεύθυνση του φορτίου $\quad k_1 = \min\left\{1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 ; 2,5\right\}$
Αντοχή σε εφελκυσμό [2)]	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$, $k_2 = 0,9$ γενικά
Αντοχή σε διάτρηση	$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$
Ταυτόχρονη διάτμηση και εφελκυσμός	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0$

Σχήμα 3 – 22: Τύποι ελέγχου επάρκειας συνδέσεων για τον χάλυβα

Table 10.3 — Design resistance for bolts and rivets

Failure mode	Bolts	Rivets
Shear resistance per shear plane:	$F_{v,Rd} = \alpha_v f_{ub} A / \gamma_{M2}$	$F_{v,Rd} = 0{,}6 f_{ur} A_0 / \gamma_{M2}$ f_{ur} = characteristic ultimate strength of rivet material A_0 = cross-sectional area of the hole
	If the shear plane passes through the threaded portion of the bolt (A is the tensile stress area of the bolt, A_s): — for steel bolts of classes 4.6, 5.6 and 8.8: $\alpha_v = 0{,}6$ — for steel bolts of classe 10.9, stainless steel bolts and aluminium bolts: $\alpha_v = 0{,}5$	
	If the shear plane passes through the unthreaded portion of the bolt (A is the gross cross-section of the bolt): $\alpha_v = 0{,}6$ f_{ub} = characteristic ultimate strength of the bolt material	
Bearing resistance: a, b, c	$F_{b,Rd} = \alpha_b f_{ub} d t / \gamma_{M2}$ where - for end bolts: $\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{d_0}; \frac{3 f_{ub}}{f_u}; 3\right)$ c - for inner bolts: $\alpha_b = \min\left(\frac{p_1}{d_0} - \frac{1}{2}; \frac{3 f_{ub}}{f_u}; 3\right)$ c f_u is the characteristic ultimate strength of the material of the connected parts; d is the bolt diameter; d_0 is the hole diameter; e_1, p_1 see Figure 10.1.	
Tension resistance	$F_{t,Rd} = 0{,}9 f_{ur} A_s / \gamma_{M2}$	$F_{t,Rd} = 0{,}6 f_{ur} A_0 / \gamma_{M2}$ For solid rivets with head dimensions according to 10.5.15.2, Figure 10.11.a) or greater on both sides.
Punching shear resistance	$B_{p,Rd} = 0{,}6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2}$ where: d_m is the mean of the across points and across flats dimensions of the bolt head or the nut; or if washers are used, the outer diameter of the washer, whichever is smaller. For rivets with round head d_m is the diameter of the head. For countersunk bolts $B_{p,Rd} = 0{,}3 \pi (d_0 + t_p) t_p f_u / \gamma_{M2}$; t_p is the thickness of the plate under the bolt head or the nut; f_u is the characteristic ultimate strength of the member material.	
Combined shear and tension	$F_{v,Ed}/F_{v,Rd} + F_{t,Ed}/1{,}4 F_{t,Rd} \leq 1{,}0$	

Σχήμα 3 – 23: Τύποι ελέγχου επάρκειας συνδέσεων για το αλουμίνιο

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

4.1 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

ΑΣΚΗΣΗ ΚΑΜΨΗΣ (παράδειγμα 1 από book [3] page 55)

Το υλικό μας είναι EN-AW 6063 T6

Πίνακας 4 – 1: Χαρακτηριστικά του EN-AW 6063 T6

Alloy EN AW	Product form	Temper	Thickness (mm)	f_o[a]	f_u[a]	A[e,b]	$f_{o,haz}$[d]	$f_{u,haz}$[d]	HAZ-factor		BC[f]	n_p[g]
				N/mm²		%	N/mm²		$\rho_{o,haz}$	$\rho_{u,haz}$		
6063	EP, ET, ER/B	T5	$t \leq 10$	130	175	8	60	100	0,46	0,57	B	16
	EP		$10 < t \leq 25$	110	160	7			0,55	0,63	B	13
	EP, ET, ER/B	T6	$t \leq 25$	160	195	8	65	110	0,41	0,56	A	24
	DT		$t \leq 20$	190	220	10			0,34	0,50	A	31
	EP, ET, ER/B	T66	$t \leq 10$	200	245	8	75	130	0,38	0,53	A	22
	EP		$20 < t \leq 25$	180	225	8			0,42	0,58	A	21
	DT		$t \leq 20$	195	230	10			0,38	0,57	A	28

Έχουμε μία αμφιέρειστη δοκό μήκους L=4,2m, διατομής διπλού Τ. Φορτίζεται με ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο q=23,9kN/m. Σκοπός είναι να διαλέξουμε διαστάσεις για την διατομή μας προκείμενου να αντέχει το φορτίο. Για το αλουμίνιο θέλουμε να αποφύγουμε διατομές κλάσης 4 στις οποίες απομειώνεται το πάχος. Θέλουμε διατομές κλάσης 3 και πάνω χωρίς συγκολλήσεις αν γίνεται και που να είναι κλάσης λυγισμού A (BC=Buckling class).

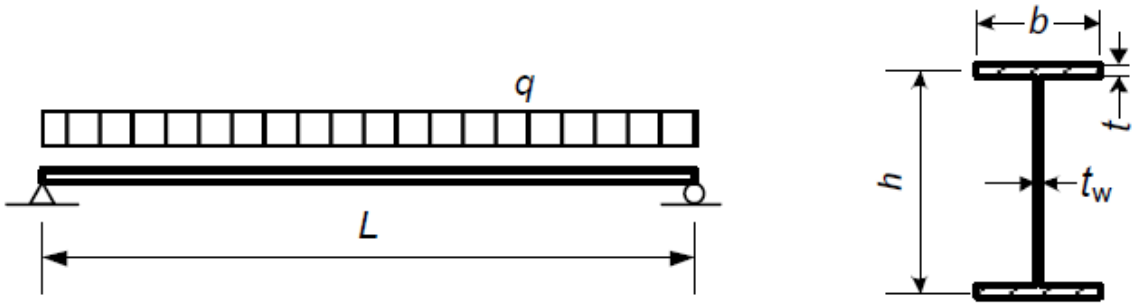


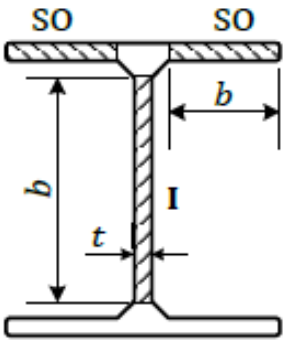
Figure 6.1: Simply supported beam and beam cross-section

Σχήμα 4 – 1: Αμφιέρειστη δοκός με διατομή διπλού Τ

Πίνακας 4 – 2: Κατάταξη για κλάση 3 και 4

Weld	Buckling Class	Internal part		Outstand part	
		β_2/ε	β_3/ε	β_2/ε	β_3/ε
Without welds	A	16	22	4,5	6
	B	16	20	4,5	5,5
	C	16	18	4,5	5
With welds	A	13	18	4	5
	B	13	16,5	3,8	4,5
	C	13	15	3,5	4

$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}}$, f_0 σε MPa f_0=160 MPa $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{160}} = 1{,}25$



Σχήμα 4 – 3: Το b και το t του προεξέχοντος τμήματος, το μισό του πέλματος στην περίπτωσή μας

$\beta = \frac{b}{t}$ Όπου b το μισό πλάτος του πέλματος

$$\frac{\beta}{\varepsilon} = \frac{\beta}{1{,}25} = 6\,, \qquad \beta = \frac{b}{t} = 7{,}5$$

Μέγιστη βύθιση: $w = \frac{5}{384}\frac{qL^4}{EI}$, $I_{req} = \frac{5}{384}\frac{qL^2}{Ew} = \frac{5}{384}\frac{23{,}9*4200^4}{70000*(4200/360)} = 1{,}18\ 10^8 mm$

$$I_{req} \approx 0{,}58 * A_f * h^2$$

$$\text{Έστω} \quad h = 308mm, \qquad A_f = \frac{1{,}18 * 10^8}{0{,}58 * 308^2} = 2144{,}36mm^2 \approx 2150mm^2$$

$$\mathrm{A_f = b_{πέλματος} t = 2bt = 15t^2}, \qquad 2150 = 15t^2, \qquad t = 11{,}97mm \approx 12mm$$

$$2150 = b_{πέλματος} * 12, \qquad b_{πέλματος} = 179{,}167mm \approx 180mm$$

$$\text{Έστω} \quad t_w = 6mm$$

$$I = 2 * b_{πελμ} * t * \left(\frac{h}{t}\right)^2 + \frac{t_w * h^3}{12}$$

$$I = 2 * 180 * \ 12 * (308/2)^2 + \frac{6 * 308^3}{12} = 117062176 \approx 1{,}17 * 10^8 \approx 1{,}18 * 10^8 \approx I_{req}$$

$$h_{ol} = 308 + \frac{12}{2} + \frac{12}{2} = 320mm$$

$$M_{Ed} = 23{,}9 * \frac{4{,}2^2}{8} = 52{,}7 \approx 53kNm$$

$$M_{oRd} = \frac{\alpha W_{el} f_o}{\gamma_{M1}}, a = \alpha_{3u}$$

Στην περίπτωσή μας μπορούμε να ακολουθήσουμε την απλοποιημένη μέθοδο.

8.4 Simplified analysis of resistance

(1) As an alternative to the general procedure in 8.1, 8.2 and 8.3 the following simplified formulae may be used to calculate the resistances of the cross-section and members, $N_{Rd} = \frac{\rho_{min} A_g f_o}{\gamma_{M1}}$.

(2) The cross-section resistance under axial compression and bending moment may be given by Formulae (8.84) and (8.85):

$$N_{Rd} = \frac{\rho_{min} A_g f_o}{\gamma_{M1}} \tag{8.84}$$

$$M_{Rd} = \frac{\rho_{min} W_{el} f_o}{\gamma_{M1}} \tag{8.85}$$

ΟΠΕΜ

Σχήμα 4 – 4: Απλοποιημένη μέθοδος για ευκολία και ταχύτητα υπολογισμών

Όπου το $\rho_{min} = 1$, διότι δεν έχουμε συγκολλήσεις και είμαστε κλάση 3

$$M_{Rd} = \frac{1 * (\frac{1{,}17 * 10^8}{308/2}) * 160}{1{,}1} = 110507674Nmm = 110{,}5kNm > 53kNm$$

Τελικά δηλαδή μας κάνει μία διατομή παρόμοιων διαστάσεων με μία IPE 330.

$$h = 330mm\,, b = 160mm\,, t_g = 11{,}5\,, t_s = 7{,}5mm$$

Σε σχέση με την διατομή μας

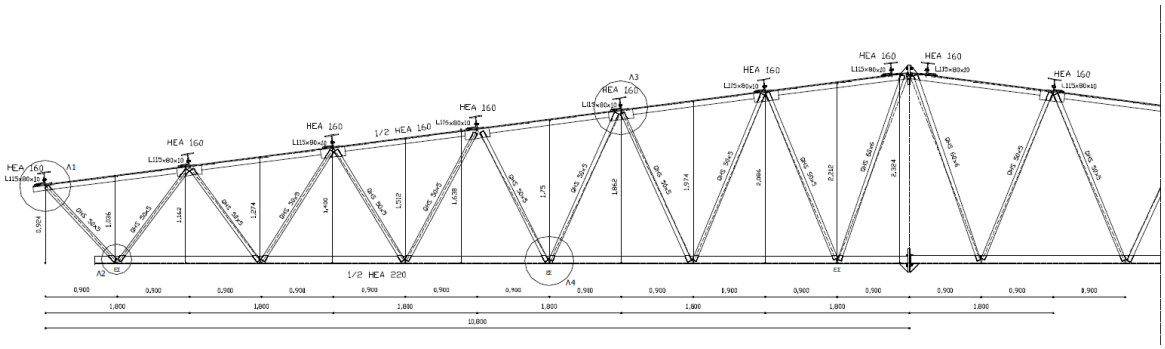
$$h = 320mm\,, b = 180mm\,, t_g = 12\,, t_s = 6mm$$

ΑΣΚΗΣΗ ΘΛΙΨΗΣ-ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (παράδειγμα των Χ. Κ. Μπανιωτόπουλος και Ε. Ευθυμίου σύμφωνα με παλαιότερη έκδοση του Ευρωκώδικα 9, προσαρμοσμένο στην τελευταία έκδοση για τις ανάγκες της διπλωματικής)

Το υλικό μας είναι EN-AW 6082 T6

Πίνακας 4 – 3: Χαρακτηριστικά του EN-AW 6082 T6

Alloy EN AW	Product form	Temper	Thickness (mm)	f_o[a]	f_u[a]	A[e,b]	$f_{o,haz}$[d]	$f_{u,haz}$[d]	HAZ-factor		BC[f]	n_p[g]
				N/mm²		%	N/mm²		$\rho_{o,haz}$	$\rho_{u,haz}$		
6082	EP, ET, ER/B	T4	$t \leq 25$	110	205	14	100	160	0,91	0,78	C	8
	EP	T5	$t \leq 5$	230	270	8	125	185	0,54	0,69	A	28
	EP, ET	T6	$t \leq 5$	250	290	8	125	185	0,50	0,64	A	32
			$5 < t \leq 15$	260	310	10			0,48	0,60	A	25
	ER/B	T6	$t \leq 20$	250	295	8			0,50	0,63	A	27
			$20 < t \leq 150$	260	310	8			0,48	0,60	A	25
	DT	T6	$t \leq 5$	255	310	8			0,49	0,60	A	22
			$5 < t \leq 15$	240	310	10			0,52	0,60	B	17

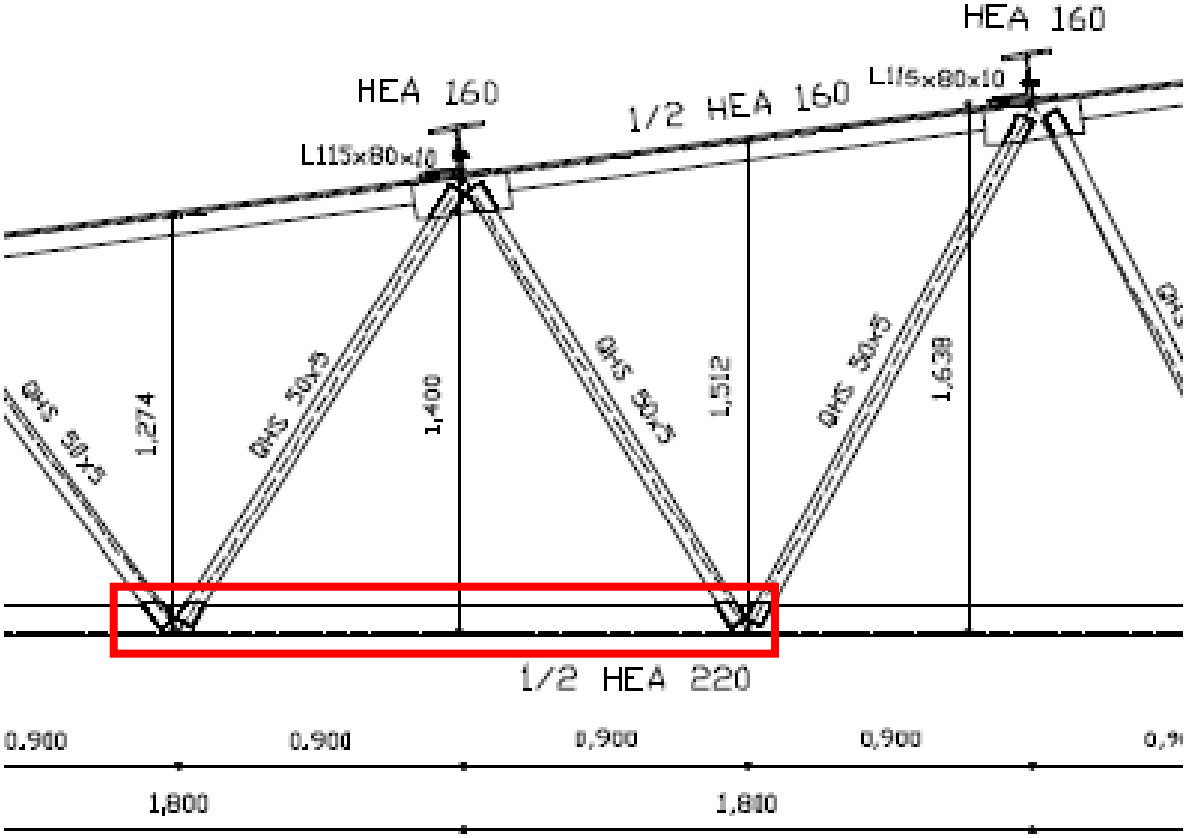


Σχήμα 4 – 5: Δικτυωτός φορέας προς εξέταση

Εξετάζουμε τα ½ HEA του κάτω πέλματος, ανοίγματος L=1,8m.

Θλίψη = -110,822kN

Εφελκυσμός = 146,8673kN



Σχήμα 4 – 6: Δικτυωτός φορέας προς εξέταση από πιο κοντά

Εφελκυσμός:

$$N_{o,Rd} = \frac{A_{eff} f_o}{\gamma_{M1}} = \rho_{ohaz} * A_g * \frac{26}{1,1} = 0,48 * A_g * \frac{26}{1,1} > 147kN$$

$A_g \geq 12,95cm^2$

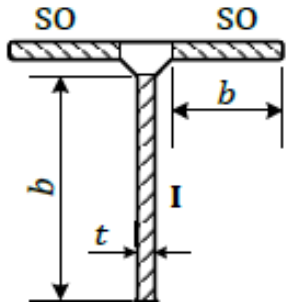
Οπότε ½ HEA 140, εύρεση του I μέσω του https://skyciv.com/free-moment-of-inertia-calculator/

Πίνακας 4 – 4: Χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν για την διατομή ½ HEA 140

$31,4/2 = 15,7cm^2$	$h = 133mm$	$t_s = 5,5mm$	$r = 12mm$	$h - 2c = 92mm$	$I_z = 37,5cm^2$
	$b = 140mm$	$t_g = 8,5mm$			

Πίνακας 4 – 5: Κατάταξη των διατομών

Weld	Buckling Class	Internal part		Outstand part	
		β_2/ε	β_3/ε	β_2/ε	β_3/ε
Without welds	A	16	22	4,5	6
	B	16	20	4,5	5,5
	C	16	18	4,5	5
With welds	A	13	18	4	5
	B	13	16,5	3,8	4,5
	C	13	15	3,5	4



Σχήμα 4 – 7: Ο κορμός (internal part) και το μισό πέλμα (external part) της διατομής μας

Πίνακας 4 – 6: Κατάταξη της διατομής ½ HEA 140

$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{260}} = 0{,}9806$	
κορμός (internal part)	μισό πέλμα (external part)
$\beta = \frac{b}{t} = \frac{\frac{92}{2}}{5{,}5} = 8{,}36$	$\beta = \frac{b}{t} = \frac{\frac{140}{2} - \frac{5{,}5}{2} - 12}{8{,}5} = \frac{55{,}25}{8{,}5} = 6{,}5$
$\frac{\beta}{\varepsilon} = \frac{8{,}36}{0{,}9806} = 8{,}53 < 13$	$\frac{\beta}{\varepsilon} = \frac{6{,}5}{0{,}9806} = 6{,}63 > 5$
Πάνω από κλάση 3	Κλάση 4
Άρα η διατομή μας είναι κλάση 4	

Θλίψη:

$$N_{o,Rd} = \frac{A_{eff} f_o}{\gamma_{M1}} = 0{,}48 * 15{,}7 * \frac{26}{1{,}1} = 178{,}12 > 111kN$$

Επαρκεί η διατομή μας. Επειδή όμως είναι κλάσης 4 έχουμε απομείωση της διατομής. Εξετάζουμε έναντι λυγισμού την διατομή. Κατά y-y έχουμε $L = L_{cr} = 1{,}8m$, και κατά z-z έχουμε $L = L_{cr} = 6{,}3m$. Διαφορετικά μήκη λυγισμού δηλαδή. Και επειδή όλα είναι αρθρωτά, λόγω του δικτυώματος $k = 1$

Λυγισμός:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_o}{\omega_x \gamma_{M1}}$$

Το $A_{eff} = \rho_{ohaz} * A_g$, όταν έχουμε διαμήκης (longitudinal) συγκολλήσεις, όπως στην περίπτωσή μας. Το $\omega_x = 1$, όταν ασκούνται στο μέλος αξονικές δυνάμεις μόνο.

Πίνακας 4 – 7: Τύποι για την εύρεση του συντελεστή χ, του λυγισμού

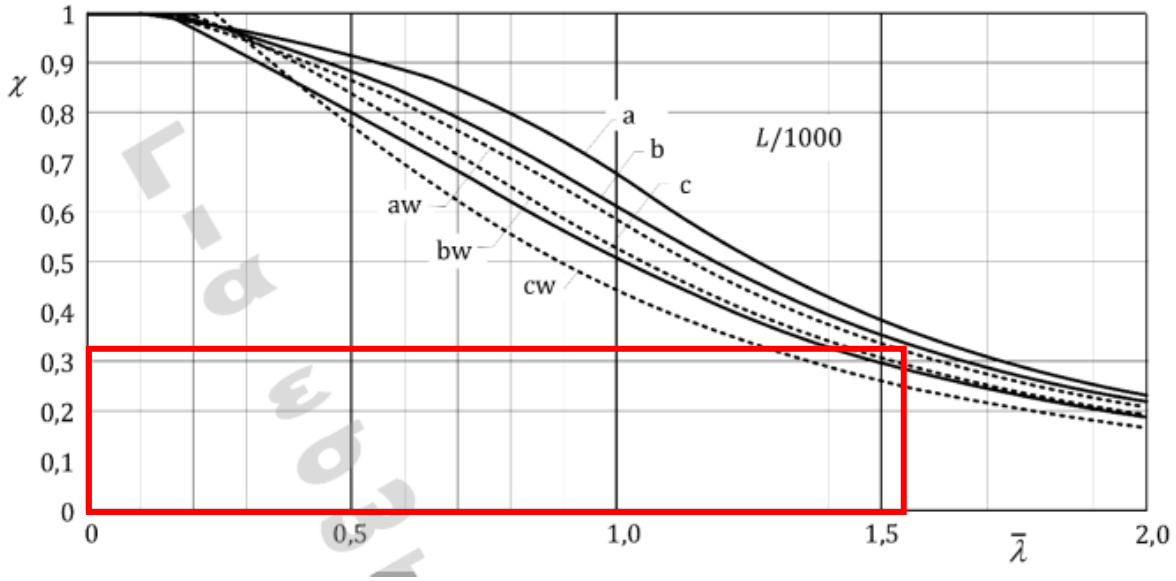
χ	$\frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}}$
φ	$0{,}5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \overline{\lambda_o}) + \bar{\lambda}^2)$
$\bar{\lambda}$	$\sqrt{\frac{A_{eff} * f_o}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i}\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{A_{eff}}{A}\frac{f_o}{E}}$
N_{cr}	$\frac{\pi^2 * E * I}{{L_{cr}}^2}$

Πίνακας 4 – 8: Εύρεση των α και $\overline{\lambda_o}$

Weld	Buckling Class	Curve	α	$\overline{\lambda_o}$
Without welds	A	a	0,18	0,10
	B	b	0,30	0,15
	C	c	0,56	0,14
With longitudinal welds	A	aw	0,36	0,16
	B	bw	0,54	0,22
	C	cw	0,92	0,24

Πίνακας 4 – 9: Εύρεση του χ

N_{cr}	$\frac{\pi^2 * E * I}{{L_{cr}}^2} = \frac{\pi^2 * 70000 * 100 * 37,5}{180^2} = 79962,1N$
$\bar{\lambda}$	$\sqrt{\frac{A_{eff} * f_o}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{\rho_{ohaz} * A_g * f_o}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,48 * 15,7 * 260 * 100}{79962,1}} = 1,565$
φ	$0,5\left(1 + \alpha\left(\bar{\lambda} - \overline{\lambda_o}\right) + \bar{\lambda}^2\right) = 0,5(1 + 0,36(1,565 - 0,16) + 1,565^2) = 1,9775$
χ	$\frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,9775 + \sqrt{1,9775^2 - 1,565^2}} = 0,316$



Σχήμα 4 – 8: Εύρεση του χ μέσω διαγράμματος

Από το διάγραμμα προκύπτει: $\chi = 0,32\ \gamma\iota\alpha\ \bar{\lambda} = 1,565$

Τελικά

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_o}{\omega_x \gamma_{M1}} = \frac{0,316 * 0,48 * 15,7 * 26000}{1 * 1,1} = 56287,1N = 56,3kN < 111kN$$

Δεν επαρκεί η διατομή ½ HEA 140

Κανονικά πρέπει να εξετάσουμε ξεχωριστά τον λυγισμό κατά y-y και z-z. Επειδή όμως τα μήκη λυγισμού έχουν τόσο μεγάλη διαφορά, 1,8m με 6,3m, εξετάζουμε το 6,3m, από το οποίο προκύπτει η δυσμενέστερη διατομή, η μεγαλύτερη δηλαδή. Αυτό το επιβεβαιώνουμε από την βιβλιογραφία όπου υπάρχει λυμένη η συγκεκριμένη άσκηση, σύμφωνα όμως με παλαιότερη έκδοση του Ευρωκώδικα 9. Υπάρχουν ενδιάμεσες δοκιμές και για τους 2 λυγισμούς, επειδή όμως επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία θα τις προσπεράσουμε.

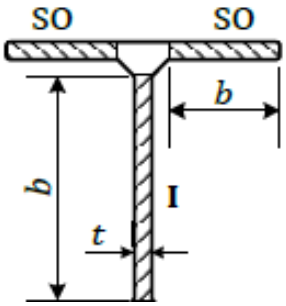
Τελικά έστω ότι έχουμε διατομή ½ HEA 220.

Πίνακας 4 – 10: Χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν για την διατομή ½ HEA 220

$64{,}3/2 = 32{,}15cm^2$	$h = 210mm$	$t_s = 7mm$	$r = 18mm$	$h - 2c = 152mm$	$I_y = 976{,}3cm^2$
	$b = 220mm$	$t_g = 11mm$			

Πίνακας 4 – 11: Κατάταξη των διατομών

Weld	Buckling Class	Internal part		Outstand part	
		β_2/ε	β_3/ε	β_2/ε	β_3/ε
Without welds	A	16	22	4,5	6
	B	16	20	4,5	5,5
	C	16	18	4,5	5
With welds	A	13	18	4	5
	B	13	16,5	3,8	4,5
	C	13	15	3,5	4



Σχήμα 4 – 9: Ο κορμός (internal part) και το μισό πέλμα (external part) της διατομής μας

Πίνακας 4 – 12: Κατάταξη της διατομής ½ HEA 220

$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{260}} = 0{,}9806$	
κορμός (internal part)	μισό πέλμα (external part)
$\beta = \frac{b}{t} = \frac{\frac{152}{2}}{7} = 10{,}86$	$\beta = \frac{b}{t} = \frac{\frac{220}{2} - \frac{7}{2} - 18}{11} = \frac{88{,}5}{11} = 8{,}05$
$\frac{\beta}{\varepsilon} = \frac{10{,}86}{0{,}9806} = 11{,}1 < 13$	$\frac{\beta}{\varepsilon} = \frac{8{,}05}{0{,}9806} = 8{,}2 > 5$
Πάνω από κλάση 3	Κλάση 4
Άρα η διατομή μας είναι κλάση 4	

Λυγισμός:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_o}{\omega_x \gamma_{M1}}$$

Το $A_{eff} = \rho_{ohaz} * A_g$, όταν έχουμε διαμήκης (longitudinal) συγκολλήσεις, όπως στην περίπτωσή μας. Το $\omega_x = 1$, όταν ασκούνται στο μέλος αξονικές δυνάμεις μόνο.

Πίνακας 4 – 13: Τύποι για την εύρεση του συντελεστή χ, του λυγισμού

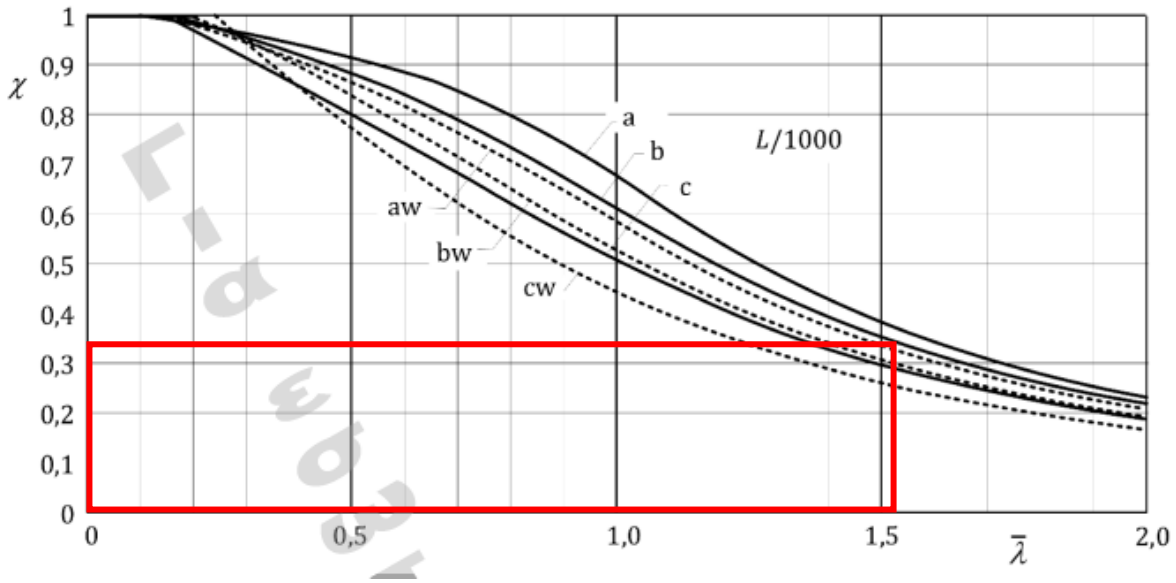
χ	$\frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}}$
φ	$0{,}5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \overline{\lambda_o}) + \bar{\lambda}^2)$
$\bar{\lambda}$	$\sqrt{\frac{A_{eff} * f_o}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i}\frac{1}{\pi}\sqrt{\frac{A_{eff}}{A}\frac{f_o}{E}}$
N_{cr}	$\frac{\pi^2 * E * I}{{L_{cr}}^2}$

Πίνακας 4 – 14: Εύρεση των α και $\overline{\lambda_o}$

Weld	Buckling Class	Curve	α	$\overline{\lambda_o}$
Without welds	A	a	0,18	0,10
	B	b	0,30	0,15
	C	c	0,56	0,14
With longitudinal welds	A	aw	0,36	0,16
	B	bw	0,54	0,22
	C	cw	0,92	0,24

Πίνακας 4 – 15: Εύρεση του χ

N_{cr}	$\frac{\pi^2 * E * I}{{L_{cr}}^2} = \frac{\pi^2 * 70000 * 100 * 976{,}3}{630^2} = 169941{,}7N$
$\bar{\lambda}$	$\sqrt{\frac{A_{eff} * f_o}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{\rho_{ohaz} * A_g * f_o}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{0{,}48 * 32{,}15 * 260 * 100}{169941{,}7}} = 1{,}5365$
φ	$0{,}5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \overline{\lambda_o}) + \bar{\lambda}^2) = 0{,}5(1 + 0{,}36(1{,}5365 - 0{,}16) + 1{,}5365^2) = 1{,}9282$
χ	$\frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1{,}9282 + \sqrt{1{,}9282^2 - 1{,}5365^2}} = 0{,}3234$



Σχήμα 4 – 10: Εύρεση του χ μέσω διαγράμματος

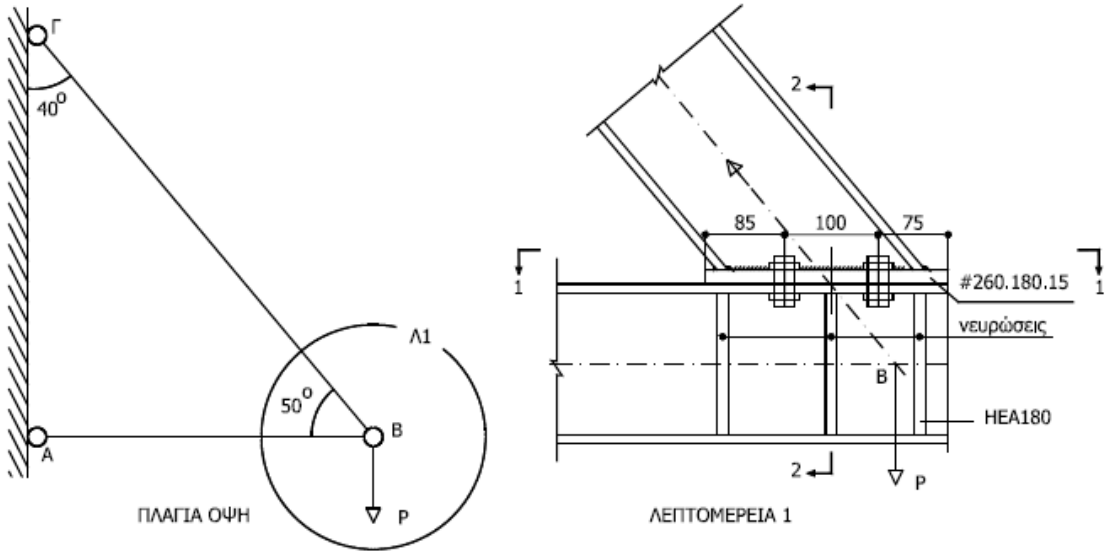
Από το διάγραμμα προκύπτει $\chi = 0{,}33\ \gamma\iota\alpha\ \bar{\lambda} = 1{,}5365$

Τελικά

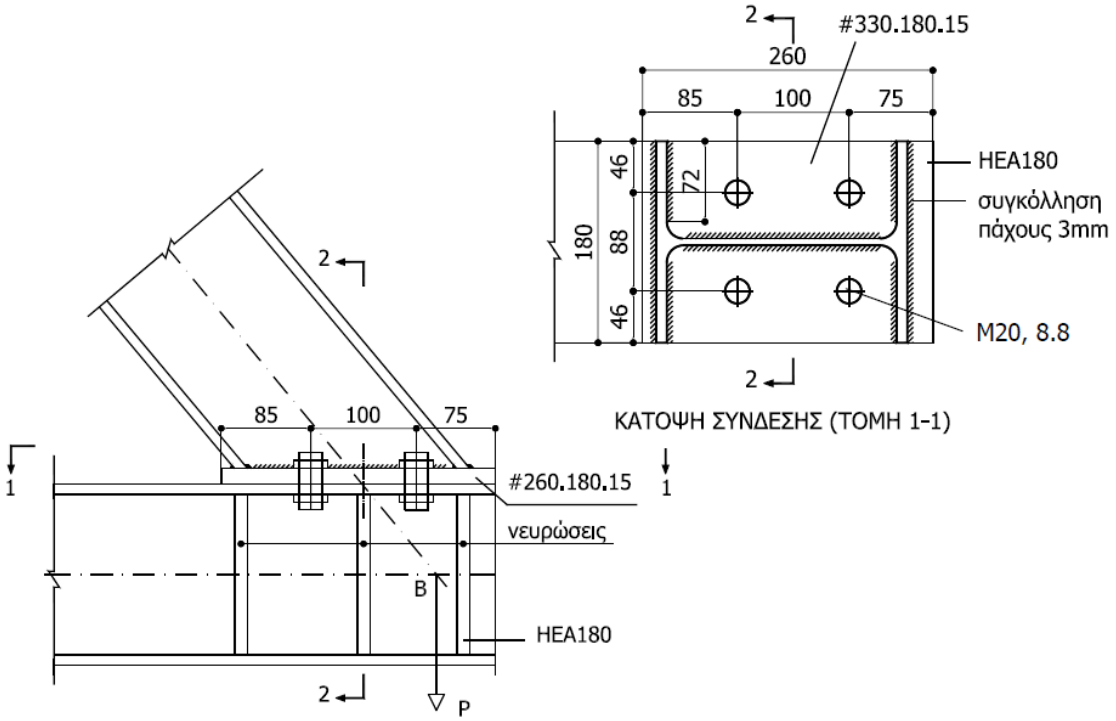
$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_o}{\omega_x \gamma_{M1}} = \frac{0{,}3234 * 0{,}48 * 32{,}15 * 26000}{1 * 1{,}1} = 117962{,}2N = 118kN > 111kN$$

Επαρκεί η διατομή ½ HEA 220

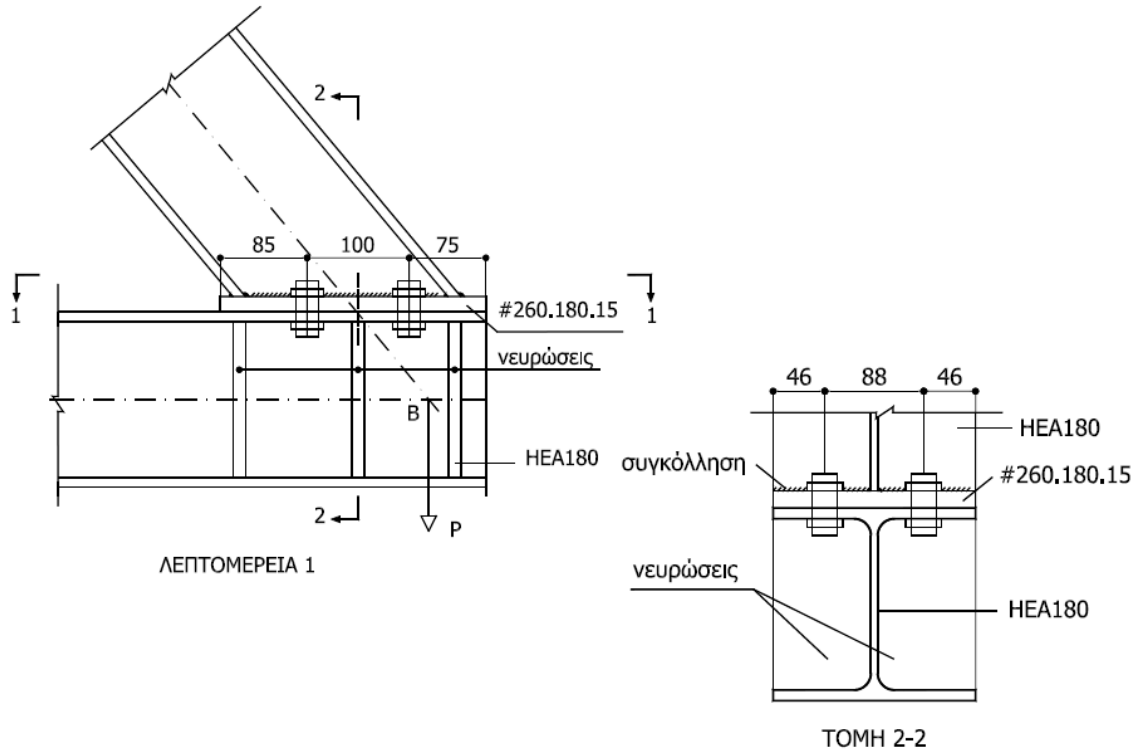
ΑΣΚΗΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ (σύνδεση με κοχλίες τύπου D, από τις παρουσιάσεις των ασκήσεων των σιδηρών Ι, Sidires1_2017-2018_Askisi03_parousiasi)



Σχήμα 4 – 11: Μορφή της σύνδεσης



Σχήμα 4 – 12: Μορφή της σύνδεσης



Σχήμα 4 – 13: Μορφή της σύνδεσης

Το κατακόρυφο φορτίο P προκύπτει στην αρχική άσκηση 217,5kN. Μετά την μετατροπή του υλικού σε αλουμίνιο και ύστερα από δοκιμές κρίνεται σκόπιμο να «ρίξουμε» το φορτίο στα 100kN κρατώντας όλες τις διατομές ως έχουν. Ο έλεγχος που «χτυπούσε» ήταν εκείνος της ταυτόχρονης διάτμησης και εφελκυσμού του κοχλία, $1{,}04 > 1$ για 120kN και $0{,}85 < 1$ για 100kN, οπότε κάπου στα 110kN είναι το

μέγιστο που μπορούμε να «πέσουμε», κρατώντας τις διατομές και τις διαστάσεις ως έχουν. Με τριγωνομετρία βρίσκουμε το φορτίο διάτμησης, 84kN, και το φορτίο εφελκυσμού είναι 100kN.

$$\frac{100}{\cos 40} * \cos 50 = 84kN$$

Επιλέγουμε κοχλίες M20 όπως πριν, αλουμινένιους από κράμα EN AW 6082.

Material	Type of fastener	Alloy Numerical designation: EN AW-.	Alloy Chemical designation: EN AW-	Temper or grade	Dia-meter mm	f_o[f] N/mm²	f_u[f] N/mm²
Aluminium alloy	Solid Rivets[a]	5019	AlMg5	H111	≤ 20	110	250
				H14, H34	≤ 18	210	300
		5754	AlMg3	H111	≤ 20	80	180
				H14, H34	≤ 18	180	240
		6082	AlSi1MgMn	T4	≤ 20	110	205
				T6	≤ 20	240	300
	Bolts[a]	5754	AlMg3	c	≤ 10	230	270
		(AL1)[b]			10 < d ≤ 20	180	250
		5019	AlMg5	c	≤ 14	205	310
		(AL2)[b]			14 < d ≤ 39	200	280
		6082	AlSi1MgMn	c	≤ 6	250	320
		(AL3)[b]			6 < d ≤ 39	260	310
Steel	Bolts[d]			4.6	≤ 39	240	400
				5.6	≤ 39	300	500
				8.8	≤ 39	640	800
				10.9	≤ 39	900	1000
Stainless Steel	Bolts[e]	A2, A4		50	≤ 39	210	500
		A2, A4		70	≤ 39	450	700
		A2, A4		80	≤ 39	600	800

Σχήμα 4 – 14: Χαρακτηριστικά κοχλιών

Λόγω της διαμέτρου, 20mm, έχουμε $f_o = 260\ MPa$, $f_u = 310\ MPa$

Για τις διατομές HEA180 επιλέγουμε EN AW 6082 T6, για το οποίο λόγω συγκολλήσεων έχουμε πτώση των αντοχών από $f_o = 260\ MPa$, $f_u = 310\ MPa$ σε $f_{ohaz} = 125\ MPa$, $f_{uhaz} = 185\ MPa$.

Για το ενδιάμεσο έλασμα επιλέγουμε EN AW 6005A T6 και αφήνουμε τις διαστάσεις ως έχουν, 15mm πάχος. Και εδώ λόγω των συγκολλήσεων παίρνουμε τα $f_{ohaz} = 115\ MPa$, $f_{uhaz} = 165\ MPa$.

Πίνακας 4 – 16: Χαρακτηριστικά του EN AW 6082 T6

Alloy EN AW	Product form	Temper	Thickness (mm)	f_o[a]	f_u[a]	A[e,b]	$f_{o,haz}$[d]	$f_{u,haz}$[d]	HAZ-factor		BC[f]	n_p[g]
				N/mm²		%	N/mm²		$\rho_{o,haz}$	$\rho_{u,haz}$		
6082	EP, ET, ER/B	T4	$t \leq 25$	110	205	14	100	160	0,91	0,78	C	8

	EP	T5	$t \leq 5$	230	270	8	125	185	0,54	0,69	A	28
	EP, ET	T6	$t \leq 5$	250	290	8	125	185	0,50	0,64	A	32
			$5 < t \leq 15$	260	310	10			0,48	0,60	A	25
	ER/B	T6	$t \leq 20$	250	295	8			0,50	0,63	A	27
			$20 < t \leq 150$	260	310	8			0,48	0,60	A	25
	DT	T6	$t \leq 5$	255	310	8			0,49	0,60	A	22
			$5 < t \leq 15$	240	310	10			0,52	0,60	B	17

Πίνακας 4 – 17: Χαρακτηριστικά του EN AW 6005A T6

Alloy EN AW	Product form	Temper	Thickness (mm)	f_o[a]	f_u[a]	A[e,b]	$f_{o,haz}$[d]	$f_{u,haz}$[d]	HAZ-factor		BC[f]	n_p[g]
				N/mm²		%	N/mm²		$\rho_{o,haz}$	$\rho_{u,haz}$		
6005A	EP/O, ER/B	T6	$t \leq 5$	225	270	8	115	165	0,51	0,61	A	25
			$5 < t \leq 10$	215	260	8			0,53	0,63	A	24
			$10 < t \leq 25$	200	250	8			0,58	0,66	A	20
	EP/H, ET	T6	$t \leq 5$	215	255	8			0,53	0,65	A	26
			$5 < t \leq 10$	200	250	8			0,58	0,66	A	20

Πιο μετά στους ελέγχους χρειαζόμαστε το μικρότερο πάχος από τα συνδεδεμένα ελάσματα και την μικρότερη αντοχή. Στην περίπτωσή μας, $t_{min} = 0{,}95cm$, $f_{uhaz} = 165\ MPa$, το πάχος του πέλματος του HEA180 και η αντοχή του ελάσματος σύνδεσης, αντίστοιχα.

Διάτμηση κοχλία:

$$F_{V,Rd} = n * \frac{a_V * A * f_{ub}}{\gamma_{M2}} * m = 4 * \frac{0{,}5 * 3{,}14 * 31}{1{,}25} * 1 = 155{,}744kN > 84kN$$

4 είναι ο αριθμός των κοχλιών, 1 είναι τα επίπεδα διάτμησης, 0,5 είναι συντελεστής για αλουμινένιους κοχλίες, (0,6 για χαλύβδινους), 3,14cm² είναι το εμβαδόν του κοχλία, 31kN/cm² η εφελκυστική αντοχή του κοχλία.

Επαρκούν οι κοχλίες μας έναντι διάτμησης.

Εφελκυσμός κορμού του κοχλία:

$$F_{t,Rd} = n * \frac{k_2 * A_s * f_{ub}}{\gamma_{M2}} = 4 * \frac{0{,}9 * 2{,}45 * 31}{1{,}25} = 218{,}736kN > 100kN$$

4 είναι ο αριθμός των κοχλιών, 0,9 είναι συντελεστής για τον εφελκυσμό κοχλιών, ίδιο για χαλύβδινους, 2,45cm² είναι η ενεργός διατομή του κοχλία, 31kN/cm² η εφελκυστική αντοχή του κοχλία.

Επαρκούν οι κοχλίες μας έναντι εφελκυσμού.

Συνδυασμός εφελκυσμού και διάτμησης:

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1{,}4 * F_{t,Rd}} = \frac{84}{155{,}744} + \frac{100}{1{,}4 * 218{,}736} = 0{,}866 < 1$$

Επαρκούν οι κοχλίες μας έναντι συνδυασμένου εφελκυσμού και διάτμησης.

Σύνθλιψη άντυγας οπών:

$$F_{b,Rd} = m * \frac{a_b * f_u * d * t_{min}}{\gamma_{M2}}$$

$$a_b = \min\left\{\frac{e_1}{d_o}, \frac{p_1}{d_o} - \frac{1}{2}, 3\frac{f_{ub}}{f_u}, 3\right\} = \min\left\{\frac{75}{22}, \frac{100}{22} - \frac{1}{2}, 3\frac{31}{16,5}, 3\right\} = \min\{3,41, 4,05, 5,636, 3\} = 3$$

$$F_{b,Rd} = 4 * \frac{3 * 16,5 * 2 * 0,95}{1,25} = 300,96kN > 100kN$$

4 είναι ο αριθμός των κοχλιών, 3 ο συντελεστής a_b , 16,5kN/cm^2 η αντοχή του πιο αδύναμου ελάσματος, του κράματος 6005A, 2cm είναι η διάμετρος του κοχλία, 0,95cm το λεπτότερο έλασμα, το πέλμα του HEA180.

Επαρκεί η σύνδεσή μας έναντι σύνθλιψης άντυγας.

Διάτρηση ελάσματος:

$$B_{P,Rd} = n * \frac{0,6 * \pi * d_m * t_p * f_u}{\gamma_{M2}} = 4 * \frac{0,6 * \pi * 3,23 * 0,95 * 16,5}{1,25} = 305,394kN > 100kN$$

4 είναι ο αριθμός των κοχλιών, 3,23cm είναι το d_m , 16,5kN/cm^2 η αντοχή του πιο αδύναμου ελάσματος, του κράματος 6005A, 0,95cm το λεπτότερο έλασμα, το πέλμα του HEA180.

$$d_m = \frac{s_k + s_p}{2} = \frac{3,46 + 3,0}{2} = 3,23cm$$

Επαρκεί η σύνδεσή μας έναντι διάτρησης ελάσματος.

Table 10.3 — Design resistance for bolts and rivets

Failure mode	Bolts	Rivets
Shear resistance per shear plane:	$F_{v,Rd} = \alpha_v f_{ub} A / \gamma_{M2}$ If the shear plane passes through the threaded portion of the bolt (A is the tensile stress area of the bolt, A_s): — for steel bolts of classes 4.6, 5.6 and 8.8: $\alpha_v = 0{,}6$ — for steel bolts of classe 10.9, stainless steel bolts and aluminium bolts: $\alpha_v = 0{,}5$ If the shear plane passes through the unthreaded portion of the bolt (A is the gross cross-section of the bolt): $\alpha_v = 0{,}6$ f_{ub} = characteristic ultimate strength of the bolt material	$F_{v,Rd} = 0{,}6 f_{ur} A_0 / \gamma_{M2}$ f_{ur} = characteristic ultimate strength of rivet material A_0 = cross-sectional area of the hole
Bearing resistance: a, b, c	$F_{b,Rd} = \alpha_b f_{ub} d t / \gamma_{M2}$ where - for end bolts: $\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{d_0}; \frac{3 f_{ub}}{f_u}; 3\right)$ c - for inner bolts: $\alpha_b = \min\left(\frac{p_1}{d_0} - \frac{1}{2}; \frac{3 f_{ub}}{f_u}; 3\right)$ c f_u is the characteristic ultimate strength of the material of the connected parts; d is the bolt diameter; d_0 is the hole diameter; e_1, p_1 see Figure 10.1	
Tension resistance	$F_{t,Rd} = 0{,}9 f_{ur} A_s / \gamma_{M2}$	$F_{t,Rd} = 0{,}6 f_{ur} A_0 / \gamma_{M2}$ For solid rivets with head dimensions according to 10.5.15.2, Figure 10.11.a) or greater on both sides.
Punching shear resistance	$B_{p,Rd} = 0{,}6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2}$ where: d_m is the mean of the across points and across flats dimensions of the bolt head or the nut; or if washers are used, the outer diameter of the washer, whichever is smaller. For rivets with round head d_m is the diameter of the head. For countersunk bolts $B_{p,Rd} = 0{,}3 \pi (d_0 + t_p) t_p f_u / \gamma_{M2}$; t_p is the thickness of the plate under the bolt head or the nut; f_u is the characteristic ultimate strength of the member material.	
Combined shear and tension	$F_{v,Ed}/F_{v,Rd} + F_{t,Ed}/1{,}4 F_{t,Rd} \leq 1{,}0$	

Σχήμα 4 – 15: Τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο επάρκειας της αλουμινένιας σύνδεσης

	Κοχλίας M	12	16	20	22	24	27
Διάμετρος mm	οπής d_0	13	17	22	23	25	28
	κορμού d	12	16	20	22	24	27
Εμβαδόν cm^2	κορμού A	1.13	2.01	3.14	3.8	4.52	5.73
	σπειρώματος A_s	0.843	1.57	2.45	3.03	3.53	4.59
Διαστάσεις κεφαλών (mm)	s_k	21.9	27.7	34.6	36.9	41.6	47.3
	s_p	19	24	30	32	36	41

Σχήμα 4 – 16: Χαρακτηριστικά του κοχλία M20, για την εύρεση του d_m

M	d [mm]	d_m [mm]	p [mm]	A [mm²]	A_s [mm²]	A_1 [mm²]	d_0 [mm]
12	12	20,5	1,75	113	84,3	76,3	d + 1
16	16	26	2	201	157	144	d + 2
20	20	32,5	2,5	314	245	225	
22	22	34,5	2,5	380	303	282	
24	24	39	3	452	353	324	
27	27	44	3	573	459	427	d + 3
30	30	49,5	3,5	707	561	519	
36	36	59,5	4	1018	817	759	

όπου: $A_s = \frac{\pi \cdot d_s^2}{4}$ ή $A_s = \frac{\pi \cdot (d - 0{,}94 \cdot p)^2}{4}$ και $d_s = \frac{d_1 + d_2}{2}$

Η μέση διάμετρος της κεφαλής του κοχλία d_m είναι ενδεικτική καθώς μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την ποιότητα και τις προδιαγραφές των κοχλιών.

Σχήμα 4 – 17: Χαρακτηριστικά του κοχλία M20, για την εύρεση του d_m και του A_s , της ενεργούς διατομής του κοχλία

5 ΠΕΡΙΛΗΨΗ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ

Είδαμε λοιπόν πώς από τη θεωρία ύπαρξης του αλουμινίου φτάσαμε να το απομονώσουμε και μάλιστα να κάνουμε μαζική παραγωγή του υλικού. Οι συνθήκες της εποχής, παγκόσμιοι πόλεμοι, και η επινοητικότητα του ανθρώπου, συνέβαλλαν στην εξέλιξη της τεχνολογίας που περιβάλλει το αλουμίνιο. Με την εξέλιξη αυτή καταφέραμε να πάμε από κουτάλια, σε γέφυρες και αεροπλάνα. Η μαζική εξόρυξή του γίνεται με φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο, και το γεγονός ότι είναι άπειρες σχεδόν φορές ανακυκλώσιμο μειώνει τις αρνητικές επιπτώσεις προς το περιβάλλον. Με την ανάμειξη μεγάλης ποσότητας καθαρού αλουμινίου με μικρές ποσότητες άλλων μετάλλων έχουμε ως αποτέλεσμα την δημιουργία πολλών διαφορετικών κραμάτων. Άλλα με υψηλή αντοχή, άλλα με μεγάλη αντίσταση στην διάβρωση, άλλα με μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα, άλλα με χαμηλό σημείο τήξης, και συνδυασμούς αυτών. Η πληθώρα κραμάτων δημιούργησε και μία πληθώρα τρόπων παραγωγής, με διαφορετικά κράματα να είναι ιδανικά για διαφορετικούς τρόπους παραγωγής. Η πιο ιδιαίτερη από τις μεθόδους είναι το extrusion. Η διαδικασία μοιάζει πολύ με την έξοδο της οδοντόκρεμας από το στόμιο του δοχείου που περιέχετε, υπάρχουν βέβαια κάποια επιπλέον βήματα. Αρκετά ιδιαίτερη είναι και η μέθοδος spinning, cold roll forming, και machining. Τα προϊόντα που προκύπτουν από τις διαφορετικές μεθόδους παραγωγής υποβάλλονται σε διαφορετικούς τρόπους επεξεργασίας με τους οποίους βελτιώνεται η εξωτερική τους επιφάνεια, η εμφάνισή τους και η αντοχή τους. Ο πιο αξιοσημείωτος τρόπος είναι η ανοδίωση, η δημιουργία δηλαδή επικάλυψης η οποία είναι κομμάτι του υλικού. Από τους τρόπους σύνδεσης ο πιο ξεχωριστός είναι η συγκόλληση τριβής, η ανάμειξη δηλαδή του υλικού 2 διαφορετικών κομματιών. Αρκετά ενδιαφέρον είναι και η σύνδεση με ήλους που ενώνουν πλάκες χωρίς την ύπαρξη τρύπας. Η ποιότητα των συνδέσεων αλλά και των προϊόντων, αυτών καθ' αυτών, μπορεί να ελεγχθεί με χρήση χρώματος και υπερήχων. Ένα πρόβλημα που προκύπτει βέβαια με την σύνδεση μετάλλων είναι η γαλβανική διάβρωση. Σε ό,τι τους τομείς όπου χρησιμοποιείται το αλουμίνιο, πρώτα έχουμε τον τομέα μεταφορών. Αυτοκίνητα, αεροπλάνα, τρένα, πλοία. Μετά έχουμε την συσκευασία προϊόντων. Αλουμινόχαρτο, κουτάκια αναψυκτικών. Και τέλος έχουμε την χρήση σε κτίρια ως κουφώματα, κύρια φέροντα στοιχεία, ακόμα και ξυλότυπους. Μεταλλότυπους στην περίπτωση αυτή. Λόγω του μικρού του βάρους είναι δυνατή η κατασκευή και μετακίνηση ολόκληρων προκατασκευασμένων δομημάτων. Η πληθώρα των διατομών είναι τεράστια. Εμάς μας ενδιαφέρουν οι διατομές που ξέρουμε από το χάλυβα. Δεν υπάρχουν IPE και HEA, υπάρχουν διατομές παρόμοιων διαστάσεων, οι οποίες έχουν διαστάσεις που διευκολύνουν το extrusion. Μέσω παραγγελίας μπορούμε να πάρουμε διαστάσεις HEA π.χ., αλλά μέχρι

HEA300 ή IPE200. Μεγαλύτερες διατομές δεν είναι εφικτές επειδή δεν υπάρχουν τόσο μεγάλα μηχανήματα extrusion. Το αλουμίνιο είναι ακριβότερο από τον χάλυβα, και αρκετά κιόλας. Δεν θέλει όμως ιδιαίτερη συντήρηση. Με τον καιρό όμως θα βελτιωθεί η διαδικασία ηλεκτρόλυσης, ο διαχωρισμός του αλουμίνιο από τον βωξίτη, η κύρια πηγή ακρίβειας στο αλουμίνιο, και θα δημιουργηθούν ακόμα καλύτερα κράματα. Έτσι θα φτάσει το αλουμίνιο τον χάλυβα, από άποψη αντοχών, και μαζί με τις επιπλέον ιδιότητές του, θα φτάσουμε να το σκεφτόμαστε αν θα χρησιμοποιήσουμε χάλυβα αντί αλουμινίου. Ό,τι έχει να κάνει με κανονιστικές διατάξεις και αριθμητικές εφαρμογές, το αλουμίνιο είναι κάτι ανάμεσα στις κατηγορίες 3 και 4 του χάλυβα. Πολύ παρόμοιοι έλεγχοι επάρκειας, κάποιοι ελαφρώς πολυπλοκότεροι, μεγαλύτεροι συντελεστές ασφαλείας και απομείωση πάχους και αντοχών λόγω συγκολλήσεων, εξαιτίας της ευαισθησίας που έχει το αλουμίνιο στις υψηλές θερμοκρασίες, της τάξης >80° C.

Είναι ένα ενδιαφέρον υλικό, πάνω στο οποίο υπάρχει χώρος για περαιτέρω εμβάθυνση και εξέλιξη. Είναι αρκετά δύσκολο να το απομονώσουμε. Είναι εύκολα διαχειρίσιμο. Οι έλεγχοι επάρκειας δεν έχουν ιδιαίτερη δυσκολία γιατί μοιάζουν πολύ με εκείνους για το χάλυβα.

Μελλοντικές εργασίες θα μπορούσαν να είναι κάθε κεφάλαιο σχεδόν της διπλωματικής. Μία που να αφορά την ιστορία, την παραγωγή, την ανακύκλωση και τα παραγόμενα κράματα. Άλλη μία για τους τρόπους παραγωγής. Ακόμα και μία που να έχει να κάνει μονάχα με το extrusion. Και μία που να συγκρίνει τύπο προς τύπο τις κανονιστικές διατάξεις, με παράλληλη επίλυση εφαρμογών για όλους του ελέγχους επάρκειας.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Federico M. Mazzolani. «Design of Aluminium Structures». Professor of Structural Engineering. University of Naples "Federico II", Italy. Chairman of CEN-TC 250/SC9.
2. J. Randolph Kissell, Robert L. Ferry. «Aluminium Structures, a quide to their Specifications design». Second Edition.
3. «Design of aluminium structures, Introduction to Eurocode 9 with worked examples». November 2020. Avenue de Tervueren 168-1150 Brussels, Belgium. Phone +32 2 775 63 63. European – aluminium.eu.
4. EUROCODE 9, pr1999EN 1999-1-1.
5. John Dwight (1999). «Aluminum Design and Construction». MSc, FI Struct E, Former Reader in Structural Engineering, University of Cambridge and Fellow of Magdalene College, Cambridge.
6. Χ. Κ. Μπανιωτόπουλος, Καθηγητής Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ, Ε. Ευθυμίου, Δπ. Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ. Ευρωκώδικας 9-ΕΝ 1999, Σχεδιασμός κατασκευών από αλουμίνιο.
7. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ. ΤΥΠΟΛΟΓΙΟ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΧΑΛΥΒΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΥΣ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ ΕΝ1993-1-1, ΕΝ1993-1-8 ΚΑΙ ΕΝ1998-1.

Την διπλωματική συνοδεύουν 2 επιπλέον αρχεία. Ένα το οποίο περιέχει όλες τις εικόνες και την προέλευσή τους. Και ένα το οποίο περιέχει τους τίτλους και την προέλευση των video από τα οποία προέρχονται κάποιες από αυτές τις εικόνες και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για άντληση πληροφοριών.