

ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ

# ΤΙΤΛΟΣ: ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΣΕ ΔΟΜΙΚΑ ΕΡΓΑ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΝΑΣΤΟΥΛΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΚΑΚΑΒΑΣ-ΠΑΠΑΝΙΑΡΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

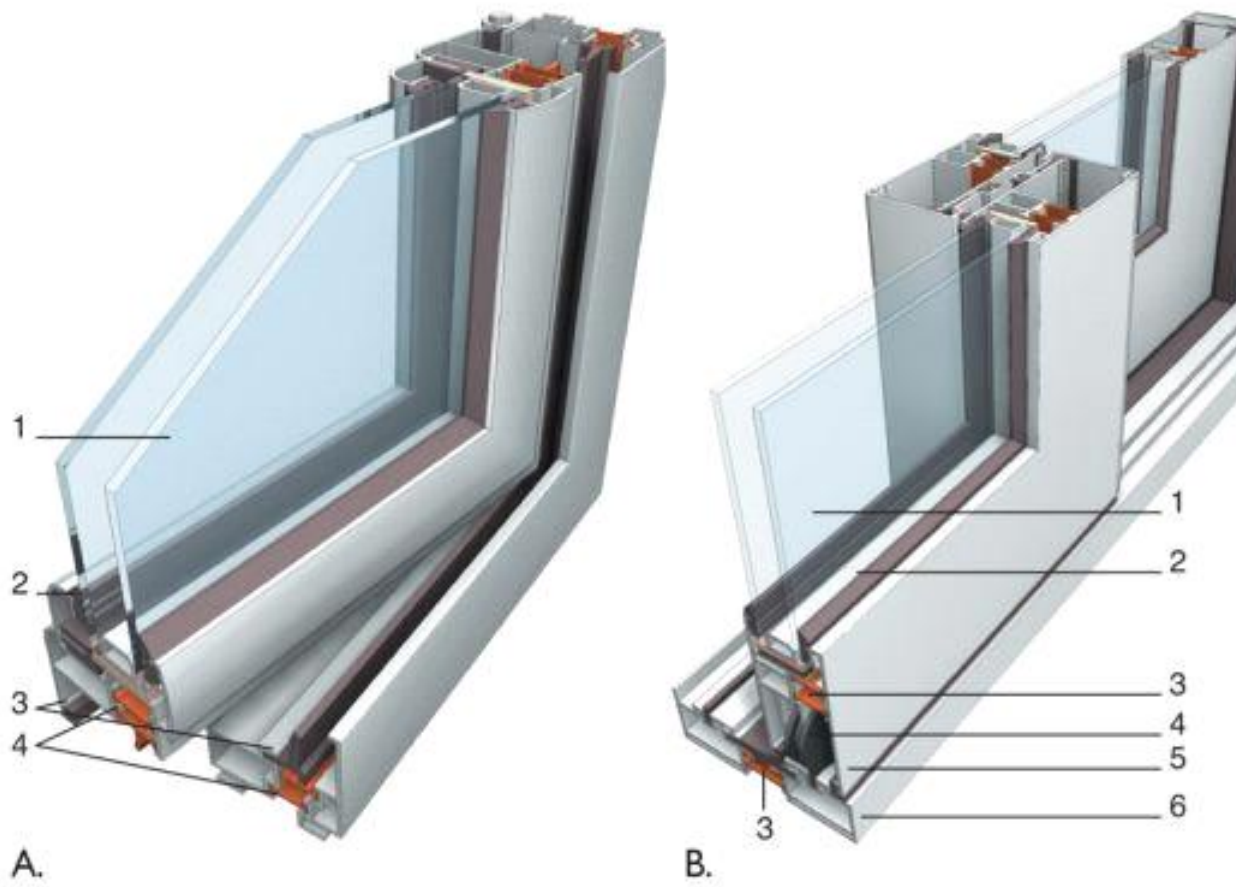
ΠΑΤΡΑ 2019



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

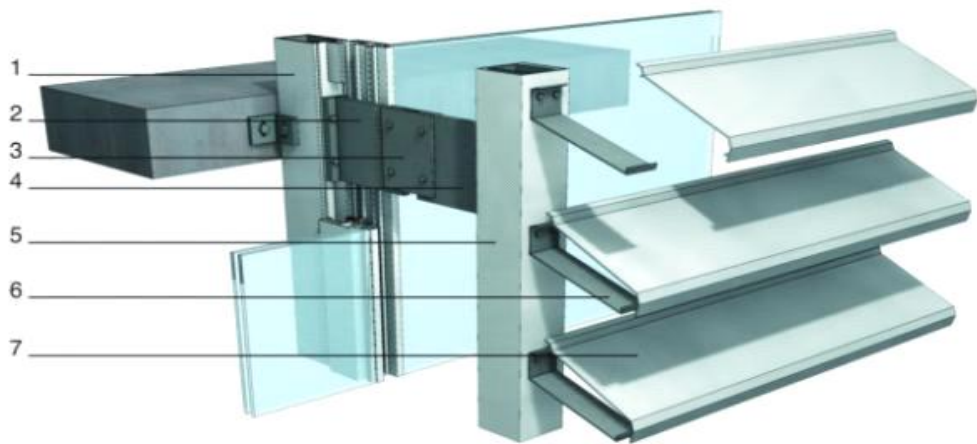
Η χρήση των κραμάτων αλουμινίου ως δομικού στοιχείου αποτελεί μία σχετικά νέα τάση στο πεδίο του πολιτικού μηχανικού. Τα κράματα αυτά έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί στην επιστήμη της αεροναυτικής, και μάλιστα με μεγάλη επιτυχία, από την εποχή των αεροσκαφών Zeppelin και Schwartz, μέχρι και σήμερα. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται πλέον και σε άλλους τομείς των μεταφορών, όπως οι βιομηχανίες σιδηροδρόμων, αυτοκινήτων και ναυπηγίας.

**Ανοιγόμενο κούφωμα αλουμινίου.**

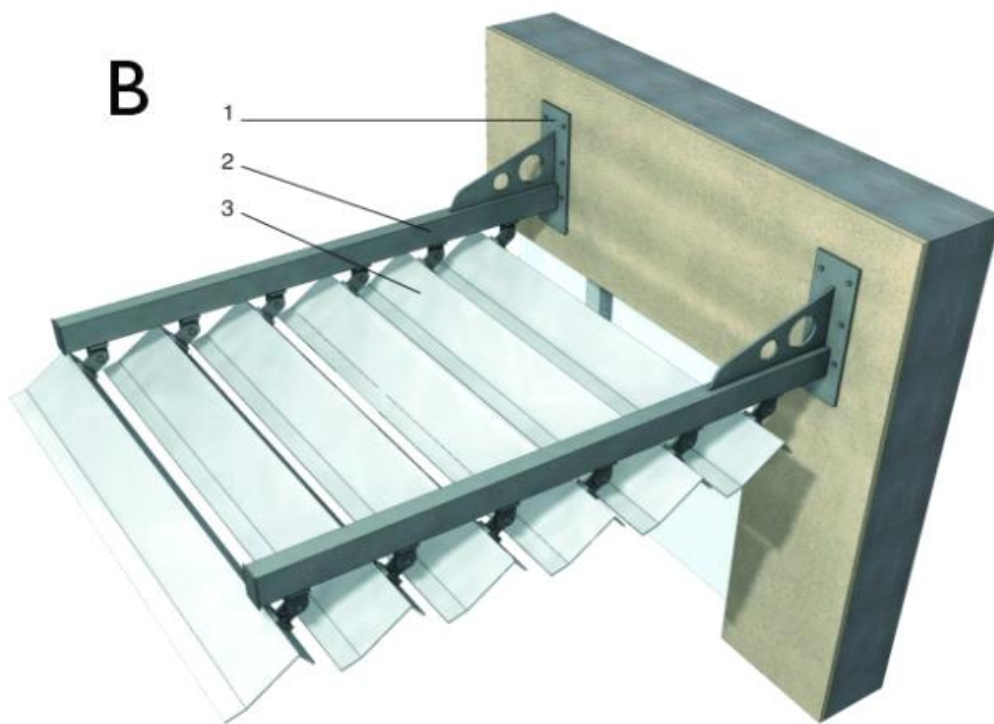


**A. Σύστημα σκίασης στηριζόμενο σε υαλοπετάσματα.**

**B. Σύστημα σκίασης στηριζόμενο σε τοιχοποιία.**



**A**



**B**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ .....	7
1.1 Το στοιχείο του αλουμινίου.....	7
1.2 Φυσικές ιδιότητες.....	8
1.3 Παραγωγή Προϊόντων Αλουμινίου.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 9.....	18
2.1 Ιδιότητες του υλικού για ελατά κράμματα αλουμινίου .....	18
2.2 Στατική ανάλυση.....	19
2.3 Σχεδιασμός διατομών αλουμινίου .....	22
2.4 Αντοχή μελών σε λυγισμό.....	24
2.5 Βάσεις σχεδιασμού.....	26
2.6 Παραδοχές σχεδιασμού.....	27
2.7 ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ .....	30
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	44
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	44

## ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 2- 1 Η μείωση της αντοχής με την θερμοκρασία .....	34
Σχήμα 2- 2 Μεταβολή της αντοχής με τη θερμοκρασία.....	35
Σχήμα 2- 3 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης.....	36
Σχήμα 2- 4 Διάβρωση σε mm με τον χρόνο (σε έτη).....	37

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

## 1.1 Το στοιχείο του αλουμινίου

Το αλουμίνιο είναι ένα μεταλλικό στοιχείο το οποίο διεθνώς συμβολίζεται ως Al, έχει ατομικό αριθμό 13 και ατομικό βάρος 27. Ο πυρήνας του αλουμινίου περιέχει 13 πρωτόνια και 14 νετρόνια (συνολικά 81 quarks. Το αλουμίνιο είναι το τρίτο πιο κοινό στοιχείο στον φλοιό της γης, μετά το οξυγόνο και το πυρίτιο. Αποτελεί το 8% του γήινου φλοιού και είναι το μέταλλο που απαντάται σε μεγαλύτερη αφθονία. Στη διεθνή βιβλιογραφία το αλουμίνιο απαντάται με δύο όρους, τον Αμερικάνικο όρο aluminum και τον Ευρωπαϊκό όρο aluminium. Το όνομα προτάθηκε από τον Sir Humphrey Davy γύρω στο 1807, ο οποίος βασίσθηκε στην λατινική λέξη alumen. Η πρόταση του Davy ήταν η συντομότερη εκδοχή aluminium, ωστόσο όταν πλέον ξεκίνησε η εμπορική παραγωγή του αλουμινίου το 1850 το επιπλέον i είχε ήδη καθιερωθεί.

Το αλουμίνιο αποτελεί σημαντικό βιομηχανικό μέταλλο μόλις από το 1886, οπότε και εφευρέθηκε η σύγχρονη διαδικασία εκκαμίνευσης. Κατά συνέπεια, υπήρξε διαθέσιμο για περιορισμένο χρονικό διάστημα σε σχέση με τα χιλιάδες χρόνια που χρησιμοποιούμε τον σίδηρο, το χαλκό ή το μπρούτζο. Σήμερα άνετα ηγείται των μη σιδηρούχων μετάλλων σε ευρεία χρήση. Προτιμάται αντί του χάλυβα σε εκείνους τους τομείς όπου οι ιδιότητές του (ελαφρύ & λαμπερό) το καθιστούν αντάξιο του κόστους του. Υπάρχουν αρκετές εφαρμογές όπου το αλουμίνιο έχει κατακτήσει τη θέση που δικαιωματικά του ανήκει και άλλες όπου βρίσκεται στη διαδικασία της καθιέρωσης. Το αλουμίνιο είναι ιδιαίτερος κατάλληλο για καλούπωμα. Για περιπτώσεις μεγάλων μεγεθών -όπως καλούπια από άμμο-, το αλουμίνιο συχνά προτιμάται σαν εναλλακτική έναντι του χυτοσιδήρου. Για περιπτώσεις μικρότερων μεγεθών παρέχει μία ισχυρή εναλλακτική έναντι του ψευδαργύρου.

## 1.2 Φυσικές Ιδιότητες

### Βάρος

Η πυκνότητα του καθαρού αλουμινίου σχετίζεται με αυτήν του χάλυβα ως εξής:

Καθαρό Αλουμίνιο  $\rho_{al} = 2.70 \text{ g/cm}^3$

Δομικός Χάλυβας  $\rho_{st} = 7.90 \text{ g/cm}^3$ .

Η αντίστοιχη τιμή για την περίπτωση κραμάτων τα οποία χρησιμοποιούνται για σφυρήλατα υλικά κυμαίνεται μεταξύ 2.67 και 2.80g/cm<sup>3</sup>. Η στρογγυλοποιημένη τιμή των 2.70g/cm<sup>3</sup> χρησιμοποιείται συνήθως οδηγώντας στο σχηματισμό των ακόλουθων σχέσεων:

	Μάζα	Βάρος
Διατομές	0.0027 A kg/m	0.027A N/m
Ελάσματα, Φύλλα	2.7 kg/m	2.27t N/m <sup>2</sup>

όπου A είναι το εμβαδόν της διατομής σε mm<sup>2</sup> και t το πάχος του ελάσματος σε (mm).

Ακολουθεί σύγκριση του αλουμινίου με άλλα μέταλλα:

Στοιχείο , Συμβολισμός , Πυκνότητα (g/cm<sup>3</sup>) , Αναλογία προς την πυκνότητα του Αλουμινίου

Λίθιο	Li	0.53	0.20
Μαγνήσιο	Mg	1.74	0.64
Αλουμίνιο	Al	2.70	1.00
Τιτάνιο	Ti	4.51	1.67
Ψευδάργυρος	Zn	7.13	2.64
Κασσίτερος	Sn	7.28	2.70
Σίδηρος	Fe	7.87	2.92
Χαλκός	Cu	8.93	3.31
Ασήμι	Ag	10.50	3.89
Μόλυβδος	Pb	11.134	4.20
Χρυσός	Au	19.28	7.15



Όσμιο Os 22.58 8.37

### Ελαστικές Σταθερές

Το αλουμίνιο είναι ένα ελαστικό μέταλλο με σχετικά μικρό μέτρο ελαστικότητας (E). Για το καθαρό μέταλλο σε θερμοκρασίες δωματίου συγκρίνεται με το χάλυβα ως εξής: Καθαρό Αλουμίνιο  $E = 69 \text{ kN/mm}^2$  Δομικός Χάλυβας  $E = 205 \text{ kN/mm}^2$

ενώ η αντίστοιχη τιμή του μέτρου ελαστικότητας για κράματα αλουμινίου κυμαίνεται από 69 έως 72  $\text{kN/mm}^2$ . Για σχεδιαστικούς λόγους ο Βρετανικός Κανονισμός BS.8118 υιοθετεί την τιμή  $E = 70 \text{ kN/mm}^2$ , η οποία είναι ανάλογη με εκείνη του γυαλιού. Το μέτρο ελαστικότητας του αλουμινίου μειώνεται σταδιακά με την αύξηση της θερμοκρασίας, παίρνοντας την τιμή των 67  $\text{kN/mm}^2$  στους 100ο C και των 59  $\text{kN/mm}^2$  στους 200ο C. Ο λόγος του Poisson ( $\nu$ ) είναι υψηλότερος από την τιμή 0.30 η οποία έχει καθιερωθεί

στην περίπτωση του χάλυβα και θα πρέπει να λαμβάνεται ίση με 0.33, σύμφωνα με την εργασία των Baker και Roderick (Cambridge, 1948).

Η αντίστοιχη τιμή για το μέτρο διατμήσεως (G), για τις προαναφερθείσες τιμές των E, είναι:

$$G = E / 2(1 + \nu) = 26 \text{ kN/mm}^2$$

### Θερμική διαστολή

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής  $\alpha$ , για το καθαρό αλουμίνιο σε θερμοκρασία δωματίου σχετίζεται με τα αντίστοιχα μεγέθη του χάλυβα ως εξής:

Καθαρό Αλουμίνιο  $\alpha = 23.5 \times 10^{-6} / \text{Βαθμούς Κελσίου}$

Δομικός Χάλυβας  $\alpha = 12.0 \times 10^{-6} / \text{Βαθμούς Κελσίου}$

ενώ η αντίστοιχη τιμή στην περίπτωση κραμάτων αλουμινίου μεταβάλλεται στο διάστημα 22 - 24.5  $\times 10^{-6}$ . Ο Βρετανικός Κανονισμός BS.8118 υιοθετεί την στρογγυλοποιημένη

τιμή των 23  $\times 10^{-6} / (\text{Βαθμούς Κελσίου})$  για σχεδιαστικούς σκοπούς. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι ο

συντελεστής  $\alpha$ , μεταβάλλεται ανάλογα με την θερμοκρασία, φθάνοντας την τιμή των 26  $\times 10^{-6} / (\text{Βαθμούς Κελσίου})$  στους 200 Βαθμούς Κελσίου.

### Σημείο τήξης

Η τιμή του σημείου τήξης είναι 600 Βαθμοί κελσίου για καθαρό αλουμίνιο.

Το σημείο βρασμού είναι 1800 Βαθμοί κελσίου.

### Θερμικές Σταθερές

Το αλουμίνιο είναι ένα αξιόπιστο υλικό όταν πρόκειται για χρήση σε εναλλάκτες θερμότητας αντί του χαλκού, καθώς η θερμική αγωγιμότητα του καθαρού μετάλλου είναι 240 Βαθμοί κελσίου, τετραπλάσια δηλαδή σε σχέση με εκείνη του χάλυβα.

Ωστόσο, η θερμική του αγωγιμότητα μειώνεται δραστικά κατά την παραγωγή κραμάτων, ακόμη και στο 50% για ορισμένα κράματα. Η συνήθης θερμοκρασία του αλουμινίου σε θερμοκρασία δωματίου

είναι 22 cal/g Βαθμοί κελσίου (περίπου διπλάσια από του χάλυβα)

### Ηλεκτρική Αγωγιμότητα

Το καθαρό αλουμίνιο συναγωνίζεται τον χαλκό σε μερικές ηλεκτρικές συσκευές και είναι το βασικό υλικό στους αγωγούς των εναέριων γραμμών μετάδοσης. Η αντίσταση του καθαρού αλουμινίου είναι 2.7μΩ cm σε θερμοκρασία δωματίου.

Και πάλι στην περίπτωση των κραμάτων η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη, έτσι για ορισμένα κράματα είναι διπλάσια από την προαναφερθείσα τιμή.

### Σύγκριση με το Χάλυβα

Το αλουμίνιο σε μορφή κράματος είναι ένα ισχυρό και όλκιμο μέταλλο και παρουσιάζει αρκετή ομοιότητα με το δομικό χάλυβα. Οι μηχανικές του ιδιότητες έχουν την τάση να είναι κατώτερες εκείνων του χάλυβα, καθώς τα ισχυρότερα κράματα είναι μεν

συγκρίσιμα σε αντοχή, υστερούν ωστόσο σε ολκιμότητα. Αντίθετα από το χάλυβα, το αλουμίνιο δεν είναι μαγνήτης.

Πλεονεκτήματα του αλουμινίου

## Ελαφρότητα

Το αλουμίνιο είναι ελαφρύτερο από το χάλυβα (σχεδόν ίσο με το ένα τρίτο του βάρους του χάλυβα)

## Αντίσταση στην σκουριά

Το αλουμίνιο δεν σκουριάζει και μπορεί να χρησιμοποιηθεί δίχως βάψιμο. Ωστόσο, τα ισχυρότερα κράματα διαβρώνονται σε ορισμένα «εχθρικά» περιβάλλοντα και ενδέχεται να χρίζουν προστασίας.

## Η διαδικασία της διέλασης

Η τεχνική αυτή, η οποία είναι η τυπική μέθοδος κατασκευής διατομών από αλουμίνιο, είναι περισσότερο εύχρηστη από της τεχνικές εξέλασης οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παραγωγή του χάλυβα.

## Ηλεκτροσυγκόλληση

Τα περισσότερα κράματα μπορούν να συγκολληθούν με την ίδια ευκολία με την οποία συγκολλάται και ο χάλυβας, χρησιμοποιώντας διαδικασίες με προστασία έναντι αερίων (gas – shielded processes). Οι ταχύτητες συγκόλλησης είναι μεγαλύτερες.

## Εργασιμότητα

Η άλεση είναι μία οικονομική μέθοδος παρασκευής αλουμινίου λόγω του ότι μεγάλοι ρυθμοί απομάκρυνσης μετάλλων είναι εφικτοί.

## Συγκολλησιμότητα

Η χρήση συγκολλήσεων έχει εδραιωθεί ως αξιόπιστη μέθοδος για την κατασκευή συνδέσεων από αλουμίνιο.

## Απόδοση σε χαμηλές Θερμοκρασίες

Το αλουμίνιο είναι απολύτως κατάλληλο για κρυογενείς εφαρμογές, διότι δεν υπόκειται σε ψαθυρή θραύση σε χαμηλές θερμοκρασίες όπως ο χάλυβας. Οι μηχανικές του ιδιότητες βελτιώνονται σταθερά με τη μείωση της θερμοκρασίας.

## Μειονεκτήματα του αλουμινίου

### Κόστος

Το κόστος του αλουμινίου (υπό μορφή διατομών, ελάσματος ή φύλλου) ισούται κατά κανόνα 1.5 φορά το κόστος χάλυβα ίσου όγκου. Παρά ταύτα, το κόστος κατασκευής είναι μειωμένο λόγω του ευκολότερου χειρισμού, της χρήσης ευφυών μεθόδων εξόλκευσης, της μεγαλύτερης εργασιμότητας, του γεγονότος ότι δε χρειάζεται βαφή και της απλούστερης ανέγερσης. Κατά συνέπεια, σε όρους συνολικού κόστους η επιλογή του αλουμινίου ως δομικού υλικού είναι τελικά πολύ φθηνότερη από ότι κανείς φαντάζεται. Σημαντικός παράγοντας είναι και η μεγάλη αξία που έχει το αλουμίνιο ως πρώτη ύλη, ειδικά όταν πρόκειται για την επιλογή υλικού κατασκευής με μειωμένη διάρκεια ζωής.

Ωστόσο, η μεγάλη αξία πρώτης ύλης δεν είναι πάντα θετική αν αναλογιστεί κανείς τον κίνδυνο από επιτήδειους που αφαιρούν τμήματα της μεταλλικής κατασκευής προκειμένου

να τα πουλήσουν ως πρώτη ύλη.

### Λυγισμός

Λόγω του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας, το φορτίο αστοχίας σε λυγισμό μέλους από αλουμίνιο είναι χαμηλότερο από εκείνο χαλύβδινου μέλους ίδιας λεπτότητας.

## Επίδραση της Θερμοκρασίας

Το αλουμίνιο χάνει την αντοχή του πιο γρήγορα από το χάλυβα με την άνοδο της θερμοκρασίας. Μερικά κράματα ξεκινούν να χάνουν την αντοχή τους για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 100 βαθμών κελσίου.

## Μείωση Αντοχής στην περιοχή των Ηλεκτροσυγκολλήσεων

Υπάρχει η τάση έντονης μείωσης της αντοχής τοπικά στην περιοχή που επηρεάζεται από τη θερμοκρασία (heataffectedzone – HAZ) σε ηλεκτροσυγκολλημένες συνδέσεις σε μερικά κράματα.

## Κόπωση

Η αστοχία λόγω κοπώσεως είναι πιο συνήθης στα στοιχεία από αλουμίνιο από ότι στα στοιχεία από χάλυβα.

## Θερμική Διαστολή

Το αλουμίνιο διαστέλλεται και συστέλλεται με τη θερμοκρασία δύο φορές περισσότερο σε σχέση με το χάλυβα. Ωστόσο, λόγω του χαμηλότερου μέτρου ελαστικότητας, οι τάσεις λόγω θερμοκρασίας σε δεσμευμένα μέλη είναι μόλις τα δύο τρίτα των αντιστοίχων τάσεων σε χαλύβδινα μέλη.

## Ηλεκτρολυτική διάβρωση

Στις περιοχές των συνδέσεων με άλλους τύπους μετάλλων είναι δυνατόν να εμφανισθεί έντονη διάβρωση, η οποία αποφεύγεται εφ' όσον ληφθούν οι απαραίτητες προϋποθέσεις.

Η διάβρωση εμφανίζεται ακόμη και στην περίπτωση κραμάτων τα οποία είναι κατά τα άλλα μεγάλης αντοχής.

## Παραμορφώσεις

Λόγω και πάλι του μικρότερου μέτρου ελαστικότητας, η ελαστική παραμόρφωση αποτελεί σημαντικότερο παράγοντα στον σχεδιασμό στην περίπτωση του αλουμινίου σε σύγκριση με την περίπτωση του χάλυβα.

## Ιστορική Αναδρομή

Τα κάτωθι είναι μία περίληψη του πως από το 1845 έως το 1945, το αλουμίνιο έγινε το δεύτερο σημαντικότερο βιομηχανικό μέταλλο.

Το στάδιο του πολύτιμου μετάλλου

Το 1825 ο Δανός επιστήμονας Hans Oersted πέτυχε να απομονώσει στοιχειώδη σωματίδια του μετάλλου του αλουμινίου. Πεπεισμένος πως το μέταλλο ήδη υπήρχε

το ενδιαφέρον του και στράφηκε στη μελέτη του ηλεκτρομαγνητισμού.

Δύο χρόνια αργότερα ο Friedrich Wöhler, καθηγητής χημείας στο Πανεπιστήμιο Göttingen της Γερμανίας, ξεκίνησε να αναπαράγει τα πειράματα του Oersted. Επέμεινε για είκοσι χρόνια και τελικά παρήγαγε τους πρώτους σβώλους αλουμινίου, οι οποίοι στάθηκαν ικανοί για να αναδείξουν τις ιδιαίτερες ιδιότητες του μετάλλου, ειδικότερα την ελαφρότητα και την λαμπρότητα.

Το βήμα από το πεδίο της επιστήμης στην εμπορική παραγωγή έγινε το 1850 από το Γάλλο χημικό Henry Ste – Claire Deville, καθηγητή στο Πανεπιστήμιο της Σορβόνης του Παρισιού. Όντας γνώστης της δουλειάς του Wöhler προκάλεσε το ενδιαφέρον του Ναπολέοντος του τρίτου, ο οποίος τον χρηματοδότησε προκειμένου να το αναπτύξει εμπορικά. Η διαδικασία του Wöhler για την παραγωγή αλουμινίου βασιζόταν στο ποτάσα το υψηλό κόστος του οποίου έκανε απαγορευτική την εμπορική αξιοποίηση του αλουμινίου.

Οι Πρώτες Εφαρμογές

Στα χρόνια που ακολούθησαν το έτος 1886, το νέο διαθέσιμο μέταλλο δοκιμάστηκε για μία πληθώρα χρήσεων, μερικές από τις οποίες ήταν επιτυχημένες ενώ άλλες όχι και τόσο.

Ένα διάσημο παράδειγμα από εκείνη την εποχή είναι το άγαλμα του Έρωτα στο τσίρκο του Piccadilly στο Λονδίνο (1893). Ένα δεύτερο παράδειγμα είναι η οροφή του θόλου του ναού SanGiacchino στη Ρώμη. (1897).

Υπήρξαν αρκετές προσπάθειες για την ανάπτυξη του αλουμινίου ως δομικού υλικού, μερικές από τις οποίες αρχικά εγκαταλείφθηκαν και τελικά ήρθαν και πάλι στην επιφάνεια πενήντα χρόνια αργότερα.

Το αλουμίνιο χρησιμοποιήθηκε ως επένδυση βαγονιών σιδηροδρόμων. Το 1986 χρησιμοποιήθηκε ως θωράκιση τορπιλοβόλου. Ορισμένα από τα πρώτα αυτοκίνητα είχαν αλουμίνιο στο αμάξωμά τους.

## Η πρώτη μεγάλη αγορά

Η χρήση η οποία καθιέρωσε το αλουμίνιο ως δομικό υλικό ήταν η χρήση του στην αεροναυτική, αρχικά στα αερόπλοια και εν συνεχεία και στα αεροπλάνα.

Ο πρωτοπόρος των αερόπλοιων ήταν ο Γερμανός στρατηγός Count Ferdinand von Zeppelin, ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως ο πατέρας του δομικού αλουμινίου. Το πρώτο zeppelin το οποίο έκανε το παρθενικό του ταξίδι πάνω από τη λίμνη Constance της

Γερμανίας το 1900, ήταν 130 m σε μήκος ενώ η διάμετρος του ήταν 11.5 m. Ο σκελετός κατασκευάστηκε από μικρά τμήματα αποτελούμενα από λωρίδες.

Στο LZ1 οι λωρίδες αυτές ήταν από καθαρό αλουμίνιο, ωστόσο στα μεταγενέστερα σχέδια ο Zeppelin κατόρθωσε να ελαφρύνει την κατασκευή χρησιμοποιώντας το duralumin του Wilm.

Τα αερόπλοια με σκελετό από αλουμίνιο χρησιμοποιούνταν μέχρι και το 1937 οπότε και εγκαταλήφθηκαν μετά από κάποιες θεαματικές καταστροφές-το υδρογόνο ήταν πολύ επικίνδυνο.

Το μεγάλο βήμα μπροστά για το αλουμίνιο ήταν η χρήση του στα στρατιωτικά αεροπλάνα στο δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο.

.

## Το Αλουμίνιο από το 1945

### Η ανάπτυξη στην παραγωγή

Η ετήσια παραγωγή αλουμινίου το 1943, την περίοδο της αιχμής του λόγω του πολέμου ήταν περίπου δύο εκατομμύρια τόνοι (τέσσερις φορές όσο το 1933). Το 1945 η αγορά

στέρεψε και η βιομηχανία του αλουμινίου έπρεπε σύντομα να ανακαλύψει νέες διεξόδους. Τούτο δεν στάθηκε σημαντικό πρόβλημα καθώς το αλουμίνιο μπορούσε να

χρησιμεύσει ως αντικαταστάτης των συμβατικών υλικών τα οποία τότε δεν ήταν διαθέσιμα, ενώ παράλληλα είχε γίνει πολύ φθηνότερο από ότι πριν τον πόλεμο.

Το αλουμίνιο απέκτησε θέση σε αρκετές νέες αγορές. Κάποιες από αυτές ήταν προσωρινές και εξαφανίσθηκαν όταν ο χάλυβας ήταν και πάλι διαθέσιμος σε αφθονία, αλλά οι περισσότερες παρέμειναν και γρήγορα αναπτύχθηκαν. Σε κάποιο στάδιο η ετήσια

παραγωγή του αλουμινίου διπλασιαζόταν κάθε επτά χρόνια.

Η σημερινή παραγωγή είναι δεκαπλάσια από εκείνη του 1943, περίπου είκοσι εκατομμύρια τόνοι ανά έτος εκ των

οποίων το ένα τέταρτο αντιστοιχία στις συσκευασίες. Η κατανάλωση του χάλυβα είναι δώδεκα φορές μεγαλύτερη.

Η αεροπλοΐα εξακολουθεί να παρέχει μία σημαντική αγορά αλλά ένα πολύ μεγαλύτερο κομμάτι αντιστοιχεί σε άλλες χρήσεις. Ακολουθως, παρουσιάζεται η εξέλιξη του αλουμινίου ως δομικού μετάλλου.

### Το Αλουμίνιο στο πεδίο του Πολιτικού Μηχανικού

Η ευρεία χρήση του αλουμινίου ως δομικού υλικού ξεκίνησε στις ΗΠΑ το 1931 όταν χρησιμοποιήθηκε στο 46 m ζευκτό ενός γερανού, στις εργασίες για τις επιχωματώσεις του ποταμού Mississippi. Περισσότερο γνωστή είναι η ανακατασκευή της γέφυρας Smithfield Street στο Pittsburg των ΗΠΑ, μήκους 220 m, της οποίας το κατάστρωμα επενδύθηκε με αλουμίνιο (1934). Άλλη μία από τις πρώτες εφαρμογές ήταν η σιδηροδρομική γέφυρα του ποταμού Grasse στη Νέα Υόρκη, όπου ένα από τα ανοίγματα 26 m κατασκευάστηκε από αλουμίνιο αντί για χάλυβα, σαν πείραμα (1938). Σε όλες αυτές οι πρώτες κατασκευές χρησιμοποιήθηκε φυσικά ωριμασμένο κράμα αλουμινίου της σειράς 2xxx (duralumin), το οποίο θα κρινόταν ακατάλληλο για τα σύγχρονα δεδομένα.

Το κατάστρωμα της γέφυρας Smithfield Street άντεξε για 40 έτη, παρά την επιλογή του συγκεκριμένου κράματος και εν συνεχεία, αντικαταστάθηκε από διαφορετικό κράμα αλουμινίου (της σειράς 6xxx). Αμέσως μετά τον πόλεμο, υπήρχε έλλειψη χάλυβα και καθώς μία από τις διαθέσιμες εναλλακτικές ήταν το αλουμίνιο, το τελευταίο τελικά εξειδικεύτηκε για διάφορους τύπους κατασκευών, όπως οροφές εργοστασίων και γεραμούς, παρά το επιπλέον κόστος.

Αρκετά μεγάλο κομμάτι της αγοράς αυτής σύντομα εξαφανίστηκε αν και το αλουμίνιο εξακολούθησε να χρησιμοποιείται σε οροφές μεγάλων ανοιγμάτων. Σήμερα εμφανίζεται ακόμη σε αντίστοιχες περιπτώσεις οροφών. Στις γέφυρες το αλουμίνιο χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον κυρίως σε αυτές που κατασκευάστηκαν για στρατιωτικούς σκοπούς και οι οποίες επιβάλλεται να ανεγείρονται και να είναι έτοιμες προς χρήση σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Το αλουμίνιο εμφανίζεται ωστόσο και σε κοινές γέφυρες σε απόμακρες τοποθεσίες, όπου μένουν άβαφες.

Υπάρχει η υποθετική περίπτωση χρήσης αλουμινίου για γέφυρες μεγάλων ανοιγμάτων, όπου το ίδιο βάρος είναι ένα σημαντικός παράγοντας, ωστόσο δεν έχει



γίνει ακόμα κάποιο βήμα προς αυτήν την κατεύθυνση. Μία πιο πρόσφατη εξέλιξη στο πεδίο των κατασκευών είναι η χρήση σε παραθαλάσσιες κατασκευές, όπου το αλουμίνιο κερδίζει έδαφος ως αξιόπιστο υλικό για την περίπτωση μονάδων οι οποίες εδράζονται σε σταθερές πλατφόρμες, όπου το κόστος εγκατάστασης εξαρτάται άμεσα από το βάρος. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων είναι οι πλατφόρμες ελικοπτέρων και οι πλωτές μονάδες διαμονής. Οι τελευταίες είναι πενταόροφα κτίσματα από αλουμίνιο που χρησιμοποιούνται ως ξενοδοχεία.

### Επίγειες Μεταφορές

Από το 1945 το αλουμίνιο σταδιακά αντικατέστησε το χάλυβα στις σιδηροδρομικές άμαξες. Οι προγενέστερες κατασκευές αποτελούνταν από συμβατικό σκελετό με μεταλλικά πλαίσια. Πλέον η μέθοδος αυτή αντικαθίσταται από σχέδια τα οποία κάνουν χρήση πλατιών κοίλων διατομών προκειμένου να παράγουν έναν αξιόπιστο, Συγκολλησιμο τύπο κατασκευής διπλής όψεως.

Τα επίπεδα τάσεων θα πρέπει να κρατιούνται σε χαμηλά επίπεδα, λόγω του κινδύνου της κοπώσεως, καθιστώντας έτσι

Οικονομική τη χρήση του τύπου της σειράς 6xxx που παρουσιάζει τη χαμηλότερη αντοχή αλλά εξαιρετική εργασιμότητα.

Το αλουμίνιο χρησιμοποιήθηκε επίσης με επιτυχία στην

Κατασκευή μεγάλων βαγονιών τα οποία μεταφέρουν προϊόντα εξόρυξης.

## 1.3 Παραγωγή Προϊόντων Αλουμινίου

Το πρώτο βήμα στην παραγωγή του αλουμινίου είναι η παραλαβή του σε ρευστή μορφή (first fusion) από το ορυκτό του βωξίτη, του οποίου συστατικά είναι η αλουμίνα, το οξειδίο του σιδήρου, το πυρίτιο και ύδωρ.

Προκειμένου να είναι έτοιμο για τη διαδικασία παραγωγής, το αλουμίνιο φέρεται σε μορφή ράβδου κατάλληλου μεγέθους.

Σημαντική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη για την παραγωγή του αλουμινίου. Σύμφωνα με την τεχνική των Hall–Heroult, περίπου 25 - 30 kWh ήταν απαραίτητες για την παραγωγή ενός χιλιόγραμμου αλουμινίου.

Πλέον, η ίδια ποσότητα παράγεται με 13 – 14 kWh ενώ η θεωρητική οριακή τιμή είναι 9 kWh.

Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίον η πρώτη τήξη (first fusion) του αλουμινίου συνήθως λαμβάνει χώρα σε περιοχές με αφθονία φθηνής ηλεκτρικής ενέργειας. Σημειώνεται πως γιαυτό τα πρώτα

Κέντρα παραγωγής αλουμινίου βρίσκονταν κοντά σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια.

Από την άλλη, λόγω του χαμηλού σημείου τήξης του αλουμινίου (660 °C), η κατασκευή κραμάτων αλουμινίου δεν απαιτεί μεγάλη ποσότητα ενέργειας.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 9**

### **2.1 Ιδιότητες του υλικού για ελατά κράμματα αλουμινίου**

Στον ευρωκώδικα 9 δίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές του συμβατικού ορίου διαρροής  $0,2\% f$  και της αντοχής θράυσης  $f$  των ελατών κραμάτων αλουμινίου για διάφορες επεξεργασίες και διάφορα πάχη.

1) προιόντα φύλλων , λωρίδων και πλακών

2) Ράβδους, σωλήνες και προφίλ διέλασης και εξηλασμένους σωλήνες

3) προιόντα σφυρηλάτησης

Επιπρόσθετα δίνονται οι χαρακτηριστικές τιμές για τις θερμικά επηρεασμένες ζώνες , οι συντελεστές απομείωσης, η κατηγορία λυγισμού και ο εκθέτης στην έκφραση Ramberg-Osgood για την πλαστική αντοχή.

Απομείωση αντοχής

1) Για θερμοκρασίες λειτουργίας μεταξύ 80°C και 100°C πρέπει να ληφθεί υπόψη η απομείωση της αντοχής.

2) Μεταξύ 80°C και 100°C η μείωση των τιμών αντοχής είναι αναστρέψιμη, για παράδειγμα τα υλικά ανακτούν την αντοχή τους όταν η θερμοκρασία κατεβαίνει. Για θερμοκρασίες άνω των 100°C θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η μείωση του μέτρου

ελαστικότητας καθώς και πρόσθετες μη αναστρέψιμες, εξαρτώμενες από το χρόνο, απομειώσεις της αντοχής.

Τιμές σχεδιασμού των σταθερών υλικού

Σταθερές υλικού που υιοθετούνται στους υπολογισμούς για τα κράματα αλουμινίου

- Μέτρο ελαστικότητας  $E = 70\ 000\ \text{N/mm}^2$
- Μέτρο διάτμησης  $G = 27\ 000\ \text{N/mm}^2$
- Λόγος Poisson  $\nu = 0,3$
- Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής  $\alpha = 23 \times 10^{-6}$  ανά ο C
- Πυκνότητα  $\rho = 2\ 700\ \text{kg/m}^3$

Ανθεκτικότητα

1) Σε κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι κατασκευές αλουμινίου από κράματα που είναι καταχωρημένα στους Πίνακες του Ευρωκώδικα 9 μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς την ανάγκη για επιφανειακή προστασία προκειμένου να αποφύγουν απώλεια της φέρουσας ικανότητας.

2) Ο EN 1999-1-1 παρέχει πληροφορίες αναφορικά με την αντοχή διάβρωσης για το αλουμίνιο, οδηγίες για την επιφανειακή προστασία του αλουμινίου, καθώς και πληροφορίες για τις συνθήκες όπου προτείνεται η αντιοξειδωτική προστασία.

3) Μέλη που υπόκεινται σε διάβρωση και έντονη έκθεση σε οξειδωτικό περιβάλλον, μηχανική αποτριβή ή κόπωση, θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε η επιθεώρηση, η συντήρηση και η ανακατασκευή να μπορούν να διενεργηθούν ικανοποιητικά και να είναι δυνατή η πρόσβαση για επιτόπου επιθεώρηση και συντήρηση.

## 2.2 Στατική ανάλυση

Προσομοίωμα στατικής ανάλυσης

1) Το υπολογιστικό προσομοίωμα και οι βασικές παραδοχές για τους

υπολογισμούς πρέπει να αντανakλούν τη συμπεριφορά του φορέα στην αντίστοιχη οριακή κατάσταση με ικανοποιητική ακρίβεια και να αντανakλούν τον αναμενόμενο τύπο συμπεριφοράς των διατομών, μελών, κόμβων και εδράσεων.

2) Για να αποφασισθεί εάν οι επιρροές της συμπεριφοράς των κόμβων στην ανάλυση πρέπει να ληφθούν υπόψη, θα πρέπει να γίνει μία διάκριση μεταξύ των μοντέλων κόμβων όπως παρακάτω:

- απλός, όπου ο κόμβος μπορεί να θεωρηθεί ότι δεν μεταφέρει καμπτικές ροπές
- συνεχής, όπου η δυσκαμψία και η αντοχή του κόμβου επιτρέπουν πλήρη συνέχεια των μελών που θεωρούνται στην ανάλυση
- ημισυνεχής, όπου η συμπεριφορά του κόμβου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση

Μέθοδοι ανάλυσης

Τα εντατικά μεγέθη μπορούν να υπολογίζονται χρησιμοποιώντας:

- α) Ελαστική καθολική ανάλυση
- β) Πλαστική καθολική ανάλυση

1) Η ελαστική καθολική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιείται σε όλες τις Περιπτώσεις

2) Η πλαστική στατική ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιείται μόνο όπου η κατασκευή έχει ικανοποιητική στρωφική ικανότητα στις πραγματικές θέσεις των πλαστικών αρθρώσεων, είτε αυτή είναι στα μέλη είτε στους κόμβους.

Οριακές καταστάσεις αστοχίας μελών αλουμινίου

Χαρακτηριστική τιμή αντοχής

$F_o$ : χαρακτηριστική τιμή της αντοχής για κάμψη και πλήρη διαρροή υπό εφελκυσμό και θλίψη

$F_u$ : χαρακτηριστική τιμή της αντοχής για την φέρουσα ικανότητα της καθαρής διατομής σε εφελκυσμό ή θλίψη

Για ελατά κράματα αλουμινίου Στον Ευρωκώδικα 9 δίνονται χαρακτηριστικές τιμές του συμβατικού ορίου διαρροής  $f_o$  0,2% και της αντοχής θραύσης  $f_u$ .

Επιμέρους συντελεστές ασφαλείας

Αντοχή συνδέσεων: Κεφάλαιο 8

Αντίσταση διατομών σε εφελκυσμό έως θραύση:  $\gamma M 2$

Αντοχή μελών σε ευστάθεια υπολογισμένη από ελέγχους μελών:  $\gamma M 1$

Αντίσταση διατομών ανεξάρτητα από την κατηγορία τους:  $\gamma M 1$

Οι επιμέρους συντελεστές ασφαλείας  $\gamma M_i$  καθορίζονται στο Εθνικό Προσάρτημα.

Προτείνονται οι παρακάτω αριθμητικές τιμές:  $\gamma M 1 = 1,10$   $\gamma M 2 = 1,25$

Ταξινόμηση διατομών

1) Στον Ευρωκώδικα 9 διακρίνονται 4 κατηγορίες διατομών.

2) Κατάταξη μιας διατομής εξαρτάται από το λόγο του πλάτους προς το πάχος των τμημάτων της που υπόκεινται σε θλίψη (παράμετρος  $\beta = b/t$ )

3) Τα διάφορα θλιβόμενα στοιχεία σε μια διατομή (όπως ο κορμός ή το πέλμα) μπορούν να ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες. Η διατομή κατατάσσεται ανάλογα με τη μεγαλύτερη (λιγότερο ευμενή) κατηγορία των θλιβόμενων στοιχείων της.

## 2.3 Σχεδιασμός διατομών αλουμινίου

Κατηγορία 4: Εκείνες στις οποίες ο τοπικός λυγισμός θα επέλθει πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής σε ένα ή περισσότερα μέρη της διατομής

Εάν  $\beta > \beta_3$ , όπου  $\beta_3$  ισούται με 6 για προεξέχον τμήμα και 22 για εσωτερικό τμήμα, τότε ο τοπικός λυγισμός θα επέλθει προτού η θλιβόμενη τάση πλησιάσει το συμβατικό όριο διαρροής  $0,2\% f_0$  σε ένα ή περισσότερα μέρη της διατομής. Σ' αυτήν την περίπτωση, η διατομή ανήκει στην κατηγορία 4 και χαρακτηρίζεται λυγηρή.

### Διατομές κατηγορίας 1,2,3

Κατηγορία 1: Εκείνες που μπορούν να σχηματίσουν πλαστική άρθρωση με την απαιτούμενη από την πλαστική ανάλυση δυνατότητα στροφής χωρίς απομείωση της αντοχής τους.

Κατηγορία 2: Εκείνες που μπορούν να αναπτύξουν την πλαστική ροπή αντοχής τους αλλά έχουν περιορισμένη δυνατότητα στροφής λόγω τοπικού λυγισμού.

Κατηγορία 3: Εκείνες στις οποίες η τάση στην ακραία θλιβόμενη ίνα του χαλύβδινου μέλους μπορεί να φτάσει την αντοχή διαρροής, αλλά ο τοπικός λυγισμός είναι πιθανόν να εμποδίσει την ανάπτυξη της πλαστικής ροπής αντοχής.

Εξασθένηση ΘΕΖ παρακείμενη των συγκολλήσεων

1) Κατά το σχεδιασμό των συγκολλητών κατασκευών με χρήση κραμάτων είτε από εργοσκληρυνση είτε από τεχνητή ωρίμανση και σκλήρυνση από καθίζηση, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η απομείωση των αντοχών στην περιοχή που είναι παρακείμενη των συγκολλήσεων

2) Εξαιρέσεις από αυτόν τον κανόνα, όπου δεν υπάρχει εξασθένηση παρακείμενα των συγκολλήσεων αποτελούν τα κράματα σε κατάσταση O ή εάν το υλικό είναι σε κατάσταση F και η αντοχή σχεδιασμού βασίζεται στις ιδιότητες κατάστασης O

3) Για λόγους σχεδιασμού θεωρείται ότι σε κάθε σημείο της θερμικά επηρεασμένης ζώνης (ΘΕΖ) οι ιδιότητες αντοχής μειώνονται σε ένα σταθερό επίπεδο

4) Η απομείωση επηρεάζει το συμβατικό όριο διαρροής 0,2% του υλικού σε μεγαλύτερο βαθμό από την εφελκυστική αντοχή θραύσης. Η επηρεαζόμενη περιοχή εκτείνεται ακριβώς γύρω από την συγκόλληση, πέρα από την οποία οι αντοχές ανακτώνται πλήρως.

5) Ακόμα και μικρές συγκολλήσεις, όπως αυτές που συνδέουν ένα μικρό προσάρτημα σε ένα βασικό μέλος, μπορεί να μειώσουν αισθητά την αντοχή του μέλους λόγω της παρουσίας της ΘΕΖ. Στο σχεδιασμό δοκών είναι συχνά καλύτερο να τοποθετούνται οι συγκολλήσεις και τα προσαρτήματα σε περιοχές μικρής έντασης, δηλαδή κοντά στον ουδέτερο άξονα ή μακριά από περιοχές με μεγάλη ροπή κάμψης.

6) Για κάποια θερμικώς επεξεργασμένα κράματα αλουμινίου είναι πιθανό να μετριαστούν οι συνέπειες της εξασθένησης ΘΕΖ μέσω εφαρμογής τεχνικής ωρίμανσης μετά τη συγκόλληση.

### **Αντίσταση διατομών**

#### Ιδιότητες διατομών

Πλήρης διατομή: Οι ιδιότητες της πλήρους διατομής ( $A_0$ ) πρέπει να καθορίζονται χρησιμοποιώντας τις ονομαστικές της διαστάσεις.

Καθαρή διατομή: Η καθαρή επιφάνεια μιας διατομής ( $A_{net}$ ) πρέπει να λαμβάνεται ως η ολική της επιφάνεια μείον τις κατάλληλες μειώσεις για όλες τις οπές, για άλλα ανοίγματα και για θερμικά επηρεασμένες ζώνες (ΘΕΖ)

Υπό την προϋπόθεση ότι οι οπές των κοχλιών δεν έχουν διάταξη μορφής ζικ-ζακ, η συνολική επιφάνεια που θα αφαιρεθεί για οπές κοχλιών πρέπει να είναι το μέγιστο άθροισμα των επιφανειών των οπών σε κάθε διατομή κάθετη στον άξονα του μέλους.

Αντοχή μελών αλουμινίου σε λυγισμό

#### *Θλιβόμενα μέλη*

*Μέλη υπό κάμψη*

*Μέλη υπό κάμψη και αξονική θλίψη*

*Κατηγορίες λυγισμού*

1) Οι μικρές παραμένουσες τάσεις στις ελατές διατομές σημαίνουν ότι οι καμπύλες λυγισμού δεν εξαρτώνται από τη μορφή της διατομής (όπως στον χάλυβα)

2) Η καμπύλη λυγισμού εξαρτάται από το υλικό και τη διαμήκη συγκόλληση

3) Η κατηγορία λυγισμού του υλικού A ή B εξαρτάται από το διάγραμμα σ-ε για μικρές παραμορφώσεις

## **2.4 Αντοχή μελών σε λυγισμό**

Έλεγχος έναντι καμπτικού και στρεπτικού ή στρεπτοκαμπτικού λυγισμού:  
 $N_{ed}/N_{b,rd} \leq 1,0$

$N_{Ed}$  η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης

$N_{b,Rd}$  η αντοχή σχεδιασμού λυγισμού του θλιβόμενου μέλους

### **Συνδέσεις αλουμινίου**

Οι κόμβοι δομικών μελών αλουμινίου διακρίνονται στους κόμβους σε συνήθεις κατασκευές (primary structures), όπου τα ονομαστικά πάχη των στοιχείων είναι μεγαλύτερα από 3mm και στους κόμβους σε λεπτότοιχες κατασκευές (thin-walled structures).

1) Στις συνήθεις κατασκευές, οι βασικές τεχνικές σύνδεσης είναι οι εξής:

1) Συγκολλήσεις

2) Συνδέσεις με μηχανικά μέσα



- 3) Συνδέσεις με τη χρήση συγκολλητικών ουσιών
- 4) Υβριδικές συνδέσεις

2) Όσον αφορά τις συνδέσεις σε λεπτότοιχες κατασκευές, οι πρόσθετες τεχνικές είναι οι παρακάτω

- 1) Ηλώσεις με διακόπτη μαντρελιού
  - 2) Σημειακές συγκολλήσεις
- 3) Ειδικές συνδέσεις
- 1) Συγκολλήσεις με χρήση ημιαγωγών υλικών
  - 2) Συνδέσεις όπου υπάρχουν χυτά συντρέχοντα μέλη
  - 3) Ταχυσυνδέσεις, ελατές συνδέσει.

### **Συνδέσεις αλουμινίου με μηχανικά μέσα**

1) Κατά τον σχεδιασμό των συνδέσεων με μηχανικά μέσα, τα βασικά στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η μειωμένη πλαστικότητα του δομικού αλουμινίου και ο κίνδυνος της διάβρωσης.

2) Η υλοποίηση των συνδέσεων αυτών γίνεται με τη χρήση κοχλιών, ήλων ή πείρων, με τις κοχλιώσεις να αποτελούν τις συχνότερα χρησιμοποιούμενες μορφές μηχανικών συνδέσεων στις συνήθεις κατασκευές, ενώ στις λεπτότοιχες κατασκευές χρησιμοποιούνται μερικές φορές ειδικά κατασκευασμένοι ήλοι.

3) Όσον αφορά το υλικό των κοχλιών, παρατηρείται εκτεταμένη χρήση των κραμάτων αλουμινίου 2024-T4, 6061-T6 και 7075, ενώ χρησιμοποιούνται συχνά κοχλίες από ανοξείδωτο χάλυβα σειράς 300, καθώς και χαλύβδινοι κοχλίες, των οποίων η χρήση επιτρέπεται μόνον εφόσον υπάρχει επιφανειακή προστασία του χάλυβα από την επερχόμενη οξείδωση, δηλαδή μόνον όταν οι κοχλίες είναι γαλβανισμένοι ή βαμμένοι με κατάλληλη βαφή.

4) Σε μερικές περιπτώσεις προτιμούνται οι κοχλίες αλουμινίου, αφού η αντοχή τους σε διάβρωση είναι μεγάλη και δεν προκαλούνται μεταβολές στον βαθμό σύσφιγξης λόγω της θερμικής διαστολής που προκαλείται στην περίπτωση των χαλύβδινων κοχλιών.

5) Οι κοχλιωτές συνδέσεις αποτελούν τις πιο συνηθισμένες μορφές συνδέσεων κυρίως λόγω της επί τόπου συναρμολόγησης στο εργοτάξιο και πλεονεκτούν έναντι των συγκολλήσεων, καθώς δεν προκαλούν φαινόμενα απομείωσης της αντοχής της σύνδεσης με την δημιουργία των θερμικά επηρεασμένων ζωνών.

6) Εξάλλου, συμβάλλουν θετικά στην αντιμετώπιση της κόπωσης και συνιστούν ένα ικανό σύστημα απόσβεσης, το οποίο στην περίπτωση των συγκολλήσεων απουσιάζει.

7) Ωστόσο, οι συγκολλήσεις παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, όπως η εξοικονόμηση του υλικού και του εργατικού κόστους, η απουσία διαδικασίας διάτρησης και η εξάλειψη φαινομένων ρηγμάτωσης λόγω διάβρωσης κυρίως στην περίπτωση των εσωραφών.

8) Μέσω της διαδικασίας της διέλασης, αντιμετωπίζονται σε ένα βαθμό πολλά προβλήματα, όπως η εξασθένηση της αντοχής στις θερμικά επηρεασμένες ζώνες.

## **2.5 Βάσεις σχεδιασμού**

1) Οι προδιαγραφές για τις συνδέσεις αλουμινίου αφορούν τις δομικές ιδιότητες των συνδέσεων, δηλαδή την αντοχή, την ακαμψία και την ικανότητα παραμόρφωσης, ενώ λαμβάνονται υπόψη και οι μη δομικές ιδιότητες, οι οποίες σχετίζονται με το κόστος, την ανθεκτικότητα και την αισθητική τους

2) Η ακαμψία της σύνδεσης είναι πολύ σημαντική ιδιότητα, αφού καθορίζει σε ένα μεγάλο βαθμό και την συνολική ακαμψία της κατασκευής, ενώ επιδρά στην κατανομή των δυνάμεων στην σύνδεση και στον καταμερισμό των φορτίων.

3) Η μειωμένη ικανότητα παραμόρφωσης μπορεί να προκαλέσει ψαθυρή θραύση, ενώ σε περίπτωση που η σύνδεση μπορεί να παραμορφωθεί επαρκώς, ο κίνδυνος της τοπικής υπερφόρτωσης μπορεί να αποφευχθεί.

4) Επιμέρους συντελεστές ασφάλειας

5) Η αντοχή του κόμβου πρέπει να καθορίζεται με βάση τις αντοχές των

μεμονωμένων κοχλιών, των συγκολλήσεων και των άλλων στοιχείων της σύνδεσης.

6) Κατά το σχεδιασμό του κόμβου πρέπει να εφαρμόζεται γραμμική-ελαστική ανάλυση. Εναλλακτικά μπορεί να εφαρμοστεί μη-γραμμική ανάλυση, εφόσον λαμβάνονται υπόψη τα χαρακτηριστικά φόρτισης-παραμόρφωσης όλων των στοιχείων της σύνδεσης.

7) Εάν το προσομοίωμα σχεδιασμού βασίζεται στις γραμμές διαρροής, όπως διατμητική απόσχιση, η επάρκεια του πρέπει να αποδεικνύεται με βάση εργαστηριακές δοκιμές.

## **2.6 Παραδοχές σχεδιασμού**

1) Οι θεωρούμενες εσωτερικές δυνάμεις και ροπές βρίσκονται σε ισορροπία με τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις και ροπές

2) Το κάθε στοιχείο του κόμβου είναι ικανό να παραλάβει τις δυνάμεις και τις τάσεις που προσδιορίζονται στην ανάλυση

3) Οι παραμορφώσεις που συνεπάγονται από αυτή την κατανομή είναι εντός της ικανότητας παραμόρφωσης των μέσων σύνδεσης ή των συγκολλήσεων και των συνδεόμενων στοιχείων

4) Οι παραμορφώσεις που θεωρούνται σε κάθε μοντέλο σχεδιασμού, το οποίο βασίζεται σε γραμμές διαρροής, βασίζονται σε στροφές στερεού σώματος (και σε παραμορφώσεις εντός επιπέδου) που είναι φυσικώς πιθανές

5) Οι εσωτερικές δυνάμεις θα ακολουθήσουν τη διαδρομή με την μεγαλύτερη ακαμψία. Αυτή η διαδρομή πρέπει να είναι ξεκάθαρα αναγνωρισμένη και να ακολουθείται κατά το σχεδιασμό του κόμβου

6) Παραμένουσες τάσεις και τάσεις οφειλόμενες στην σύσφιξη των κοχλιών καθώς και τάσεις οφειλόμενες στη συνήθη ακρίβεια κατεργασία κατά την διαμόρφωση του κόμβου δεν λαμβάνονται υπόψη

## Ταξινόμηση κόμβων

Οι συνδέσεις αλουμινίου ταξινομούνται ανάλογα με την ικανότητα τους να αποκαθίστανται οι ιδιότητές της συμπεριφοράς τους και η επιμέρους κατάταξη τους αφορά τις δομικές ιδιότητες των κόμβων, δηλαδή την ακαμψία, την αντοχή και την πλαστιμότητα τους.

Σε αντιστοιχία με την καθολική συμπεριφορά του συνδεόμενου μέλους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες

- (1) Συνδέσεις πλήρους αποκατάστασης
- (2) Συνδέσεις μερικής αποκατάστασης

Ταξινόμηση κόμβων ανάλογα με την ακαμψία

Ανάλογα με την ακαμψία, οι κόμβοι διακρίνονται σε

- 1) Άκαμπτους (rigid)
- 2) Ημιάκαμπτους (semi-rigid)

Ταξινόμηση κόμβων ανάλογα με την αντοχή

Αναφορικά με την αντοχή, οι συνδέσεις διακρίνονται σε συνδέσεις πλήρους αντοχής και συνδέσεις μερικής αντοχής.

Η ταξινόμηση αυτή εξαρτάται από το αν η οριακή αντοχή του συνδεόμενου μέλους αποκαθίσταται ή όχι, ανεξάρτητα από την ακαμψία και την πλαστιμότητα

Ταξινόμηση κόμβων ανάλογα με την πλαστιμότητα

Σε αντιστοιχία με την πλαστιμότητα, οι συνδέσεις διακρίνονται σε πλάστιμες και ψαθυρές, ανάλογα με το αν η συνολική πλαστιμότητα της σύνδεσης είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από εκείνη του συνδεόμενου μέλους.

## Όρια Μεγέθους και Πάχους

### Μήκος

Για υλικά στα οποία η κατεργασία μέσω ψεκασμού κρίνεται ως ακατάλληλη, όπως αυτά της σειράς 2xxx ή 7xxx, το μέγιστο μήκος καθορίζεται από τον τύπο της θερμικής κατεργασίας. Με μία χονδρικά εκτίμηση τυπικά μεγέθη είναι τα 6m για κατακόρυφη

Κατεργασία και τα 10m για οριζόντια. Τα παραπάνω δεν ισχύουν για υλικά της σειράς 6xxx για τα οποία πιθανός περιορισμός είναι η μεταφορά.

### Πλάτος

Δεν υπάρχει καμία δυσκολία στην παραλαβή διατομών πάχους μέχρι και 300mm, για τις οποίες διατίθενται αρκετές πρέσες με αρκετά ευρύχωρο κοντέινερ. Το διπλάσιο αυτού του πλάτους είναι εφικτό από τις μεγάλες πρέσες των 600 ή περισσότερων χιλιοστών, οι

Οποίες ωστόσο είναι διαθέσιμες μονάχα σε λίγες χώρες.

### Πάχος

Ο σχεδιαστής επιθυμεί συχνά την κατασκευή όσο το δυνατόν λεπτότερων διατομών, για λόγους οικονομίας. Το ελάχιστο πάχος εξαρτάται αφ'ενός από το τι μπορεί να παραχθεί μέσω διέλασης, ανάλογα με το είδος το κράματος, και αφ'ετέρου από την επίδραση της παραμόρφωσης. Εν γένει αποτελεί συνάρτηση του γενικότερου μεγέθους της διατομής.

Μία πολύ χονδρική εκτίμηση για το ελάχιστο πάχος μίας μη κοίλης διατομής του λιγότερου ανθεκτικού από τους τύπους της σειράς 6xxx (όπως ο 6063) είναι το μέγιστο των a) 1.2mm ή b) του 1% του μεγέθους της διατομής.

Τονίζεται σε αυτό το σημείο πως τα παραπάνω αποτελούν προσεγγιστικές τιμές και πως το πραγματικό πάχος μπορεί τελικά ανάλογα με το επιλεγθέν προφίλ να είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο.

Η τιμή b) είναι πιθανότερο να επιτευχθεί όταν επιλεγθεί η κατάσταση T5 (airquenched). Για κοίλες διατομές, το ελάχιστο πάχος είναι συνήθως κατά 25% μεγαλύτερο από αυτό των μη κοίλων.

Για τον ισχυρότερο από τους τύπους της σειράς 6xxx, το ελάχιστο δυνατό πάχος τείνει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο. Για τον λιγότερο ανθεκτικό από τους τύπους της σειράς 7xxx, είναι σημαντικά αυξημένο.

## 2.7 ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΑ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ

Τα κράματα αλουμινίου, τα οποία συνήθως αποκαλούνται ελαφριά κράματα, αναπτύχθηκαν προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή του καθαρού αλουμινίου, το οποίο είναι πολύ όλκιμο και ανθεκτικό σε διάβρωση. Σε αντίθεση με τα κράματα σιδήρου-άνθρακα (χάλυβας), τα κράματα αλουμινίου απαιτούν μικρή ποσότητα θερμικής ισχύος για την παραγωγή τους.

Φαίνεται σημαντικό να παρατηρήσουμε πως τα κράματα αλουμινίου απαιτούν πολύ μικρές ποσότητες προσθέτων. Τα βασικά συστατικά που χρησιμοποιούνται στα κράματα είναι το μαγνήσιο, το πυρίτιο, ο ψευδάργυρος, ο χαλκός και το μαγγάνιο. Το νικέλιο, το κοβάλτιο, το χρώμιο, ο σίδηρος, το τιτάνιο και το ζirkόνιο χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα.

Αναφορικά με την αντίδρασή τους στη θερμική κατεργασία τα κράματα αλουμινίου κατηγοριοποιούνται ως εξής:

α) Μη θερμικά κατεργαζόμενα κράματα, τα οποία επίσης ονομάζονται σκληρυνόμενα κράματα.

β) Θερμικά κατεργαζόμενα κράματα.

Στα μη θερμικά κατεργαζόμενα κράματα συγκαταλέγονται τα AlMn, AlMg και AlMgMn στα οποία η αντοχή αυξάνεται μέσω ψυχρής κατεργασίας, μέσω της οποίας αυξάνεται η αντοχή και μειώνεται η ολκιμότητα. Αν θερμανθεί στους 350 βαθμούς κελσίου τα κράματα επιστρέφουν στην αρχική τους κατάσταση. Η συγκόλληση επομένως προκαλεί μείωση της αντοχής στη θερμικά επηρεαζόμενη ζώνη Θ.Ε.Ζ (heat affected zone).

Στην κατηγορία των θερμικά κατεργασμένων κραμάτων ανήκουν τα AlMgSi, AlZnMgCu και AlCuMg. Η θερμική κατεργασία προσδίδει μεγαλύτερη αντοχή και μπορεί να διαχωρισθεί στα ακόλουθα στάδια:

- Θέρμανση στους 450 ή 530 βαθμούς κελσίου ανάλογα με το είδος του κράματος.

- Σκλήρυνση με αέρα ή νερό
- Ωρίμανση σε θερμοκρασία δωματίου (natural ageing)
- Ωρίμανση σε θερμοκρασία η οποία κυμαίνεται μεταξύ 120 και 180 βαθμούς κελσίου.

### Νέα Τεχνολογία

Το βασικό κομμάτι της τεχνολογίας του αλουμινίου είχε σχηματισθεί μέχρι το 1939 . Τα ακόλουθα αποτελούν μεταπολεμικές εξελίξεις στον δομικό τομέα.

### Χρήση Κραμάτων

Πριν τον πόλεμο τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα κράματα ήταν της σειράς 2xxx (duralumin, superdural). Από το 1945 οι σειρές 5xxx και 6xxx χρησιμοποιούνται ευρύτατα ενώ η σειρά 2xxx περιορίστηκε κυρίως στα αεροσκάφη. Μία άλλη εξέλιξη ήταν η εισαγωγή της συγκολλητής σειράς 7xxx.

### Μεγάλα Πριτσίνια

Εκατομμύρια πριτσινίων μικρού μεγέθους χρησιμοποιούνταν στα αεροσκάφη. Μετά το 1945 πριτσίνια μεγάλου μεγέθους αναπτύχθηκαν προς χρήση στο πεδίο του πολιτικού μηχανικού. Έπειτα από κάποιες δεκαετίες χρήσης τα πριτσίνια έδωσαν τη θέση τους στις συγκολλήσεις.

### Ηλεκτροσυγκολλήσεις

Η σημαντικότερη δομική εξέλιξη ήταν στις συγκολλήσεις. Πριν τον πόλεμο η μόνη διαθέσιμη τεχνική συγκόλλησης με ηλεκτρικό τόξο ήταν η συνήθης συγκόλληση με ράβδο και ηλεκτρόδια επενδυμένα με συλλίπασμα. Αυτή δεν ήταν αποδεκτή για το Αλουμίνιο καθώς τα απαραίτητα συλλιπάσματα ήταν έντονα διαβρωτικά και τα χαρακτηριστικά του τόξου καθιστούσαν δύσκολη την επίτευξη μίας ομαλής απόθεσης.

Η λύση βρισκόταν σε διαδικασίες που κάνουν χρήση αδρανών αερίων (αργό ή ήλιο) προκειμένου να προστατευθεί το τόξο. Η πρώτη διαδικασία που εμφανίστηκε ήταν η TIG η οποία κάνει χρήση ηλεκτροδίου από βολφράμιο και ξεχωριστού καλωδίου με πλήρωση. Στη συνέχεια εμφανίστηκε η ημι-αυτόματη διαδικασία MIG, η οποία χρησιμοποιούσε ηλεκτρόδιο καλωδίου συνεχούς πλήρωσης (το οποίο μετέπειτα χρησιμοποιήθηκε στην Διαδικασία με CO<sub>2</sub> στο χάλυβα).

Και οι δύο προαναφερθείσες διαδικασίες αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ γύρω στο 1950.

Από τότε αυτές οι διαδικασίες έγιναν συνήθης πρακτική στις κατασκευές από αλουμίνιο, εκτός των συνδέσεων στα πολύ ισχυρά κράματα για τα οποία η ηλεκτροσυγκόλληση δεν είναι αποδοτική.

### Διελασμένες Διατομές

Η εξέλαση του αλουμινίου ήταν ήδη μία βιώσιμη λειτουργία μέχρι το 1939. Από το 1945 υπήρξε σημαντική αύξηση στην χρήση των διατομών που έχουν παραχθεί μέσω αυτής της μεθόδου, κυρίως όσον αφορά στα κράματα της σειράς 6xxx. Οι διατομές έχουν λεπτοδουλεμένο και εφευρετικό σχήμα με έμφαση στα προφίλ τα οποία είναι πολύ λεπτά σε σχέση με το ολικό τους μέγεθος. Οι κοίλες διατομές έχουν γίνει πιο δημοφιλείς, ενώ η διαφορά στο κόστος μεταξύ αυτών και των μη κοίλων διατομών έχει σχεδόν μηδενισθεί.

Μία σημαντική εξέλιξη ήταν η ολοένα αυξανόμενη χρήση μεγάλων πρεσών με πλάτη διατομών μέχρι και 0.8m.

### Συγκολλήσεις

Υπάρχει ποικιλία δυνατών συγκολλήσεων οι οποίες είναι ιδιαίτερες κατάλληλες για τη δημιουργία συγκολλημένων δομικών ενώσεων από αλουμίνιο. Σε μερικές εφαρμογές αυτή είναι η προτιμώμενη εναλλακτική έναντι της ηλεκτροσυγκόλλησης και η χρήση της αναμένεται να διαδοθεί περαιτέρω.

### Άλεση

Μία άλλη εξέλιξη ήταν η εγκατάσταση ογκωδών μηχανών άλεσης οι οποίες κατέστησαν δυνατή την παραγωγή τεραστίων πάνελ από την επεξεργασία στερεών κομματιών. Η ανάπτυξη αυτή ενδιαφέρει κυρίως στο πεδίο της αεροναυτικής.

### Φυσικές Ιδιότητες

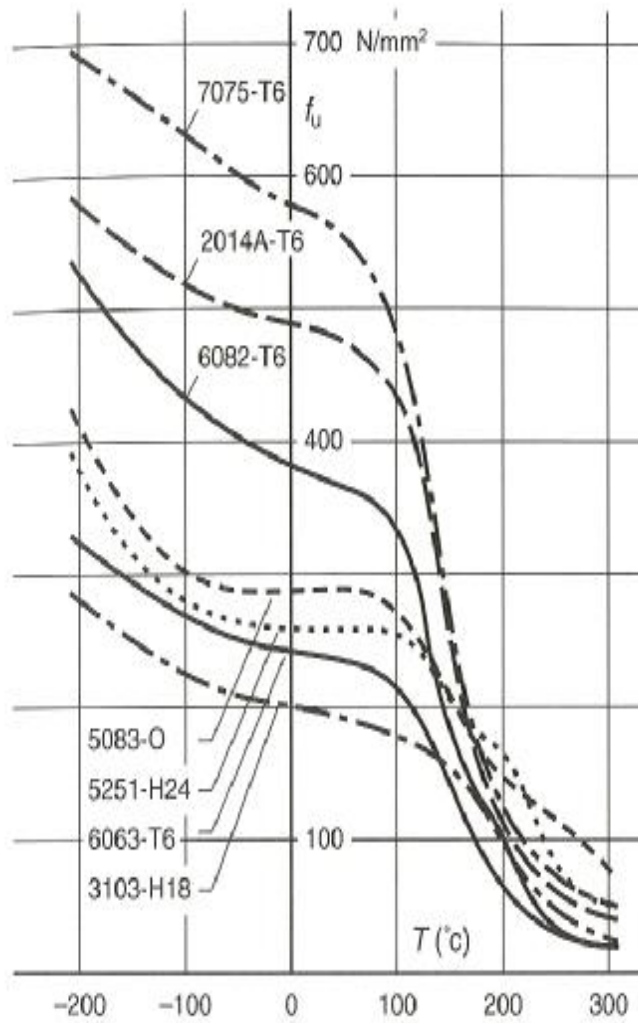
Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τις βασικές φυσικές ιδιότητες του αλουμινίου σε θερμοκρασία δωματίου και τις συγκρίνει με εκείνες του χάλυβα και του ανοξείδωτου χάλυβα.



## Μεταβολή της Αντοχής με την Θερμοκρασία

Μία από τις αδυναμίες που παρουσιάζει το αλουμίνιο ως δομικό υλικό είναι η δραστική μείωση της αντοχής με τη θερμοκρασία. Από την άλλη, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της σταθερής βελτίωσης των ιδιοτήτων του με την μείωση της θερμοκρασίας, δίχως να παρουσιάζει τα προβλήματα ψαθυρής θραύσης που συναντώνται στοχ άλυβα.

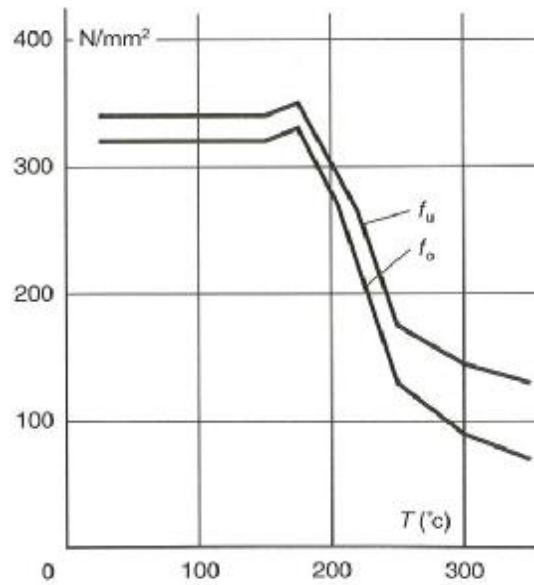
Το Σχήμα απεικονίζει την διακύμανση της εφελκυστικής αντοχής με την θερμοκρασία (T) για διάφορους τύπους κραμάτων. Οι καμπύλες σχεδιάστηκαν με βάση στοιχεία που παραχωρήθηκαν από την Ομοσπονδία Αλουμινίου (Aluminium Federation), από Πειράματα σε δοκίμια που κρατήθηκαν σε συγκεκριμένες θερμοκρασιακές συνθήκες. Η μείωση της αντοχής με την θερμοκρασία είναι ένας σημαντικός παράγοντας στον Σχεδιασμό των υπερηχητικών αεροσκαφών και ειδικά κράματα υψηλής αντοχής σχεδιάστηκαν για τον περιορισμό του φαινομένου.



**Σχήμα 2-1 Ημείωση της αντοχήςμετηνθερμοκρασία**

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η μείωση της αντοχής μετά απόσχετικά βραχυπρόθεσμη έκθεση σε αυξημένη θερμοκρασία (Σχήμα).

Το γεγονός αυτό είναι καθοριστικό στον τομέα της πυρασφάλειας των κατασκευών.

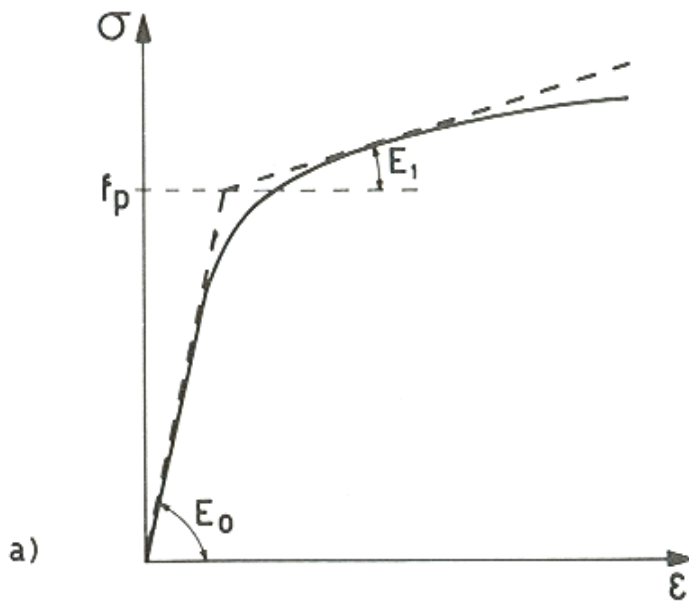


Σχήμα 2- 2 Μεταβολή της αντοχής με τη θερμοκρασία

### Καμπύλες Τάσης–Παραμόρφωσης

Γενικά

Το σχήμα της καμπύλης τάσεως–παραμόρφωσης ( $\sigma$ – $\epsilon$ ) δεν υπεισέρχεται απευθείας στο σχεδιασμό, είναι ωστόσο χρήσιμο για τον μηχανικό να έχει μία αίσθηση αυτής της σχέσης. Η απλούστερη μέθοδος για την προσομοίωσή της είναι μέσω ενός διγραμμικού διαγράμματος.



Σχήμα 2-3 Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης

#### Εμπειρικές Σχέσεις Τάσης–Παραμόρφωσης

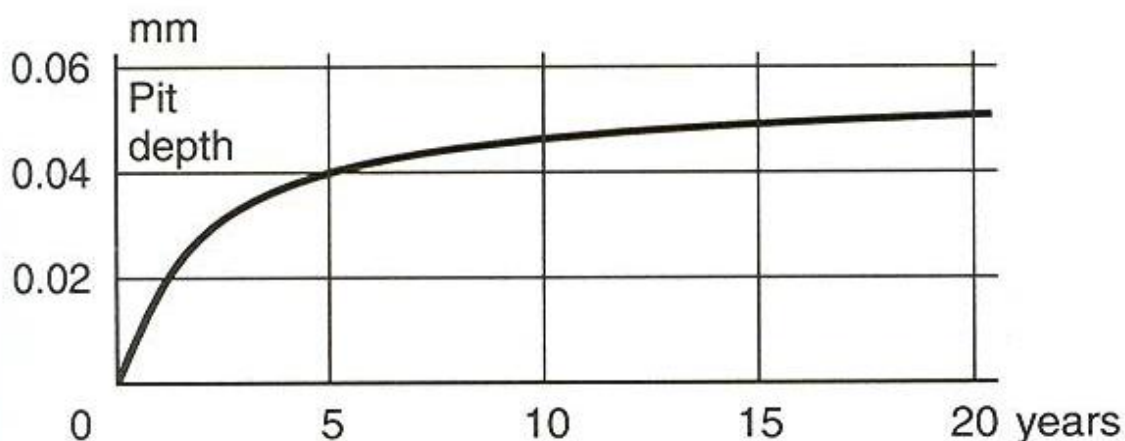
Υπάρχουν δύο τύποι τέτοιων σχέσεων, αυτές της μορφής  $\sigma = \sigma(\epsilon)$  και εκείνες της μορφής  $\epsilon = \epsilon(\sigma)$ . Στις πρώτες διακρίνει κανείς τρία τμήματα κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί στους τρεις κλάδους, δηλαδή τον γραμμικά ελαστικό, τον μη γραμμικά ελαστικό και τον κρατυνόμενο κλάδο.

#### Διάβρωση

Κάθε επιφάνεια από αλουμίνιο η οποία εκτίθεται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες αναπτύσσει λεπτή επίστρωση οξειδίου, η οποία είναι σκληρή, χημικά ευσταθής και σταθερά συνδεδεμένη με την μεταλλική επιφάνεια. Αν και πολύ λεπτή (με τυπικό πάχος της τάξεως του 0.005), το στρώμα αυτό αποτρέπει την περαιτέρω οξείδωση. Όταν φθαρθεί, αναμορφώνεται άμεσα, εφόσον υπάρχει διαθέσιμο οξυγόνο και είναι αυτό το στρώμα που δίνει στο αλουμίνιο την αντοχή του.

Η ατμοσφαιρική διάβρωση του αλουμινίου συχνά αναφέρεται και ως αλλοίωση (weathering) και διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από το σκούριασμα του χάλυβα.

Ατμοσφαιρικοί ρύποι, όπως το θειικό οξύ και το χλωριούχο νάτριο, προκαλούν την δημιουργία μικρών λάκκων, το βάθος των οποίων μπορεί να χρησιμεύσει ως μέτρο της προκαλούμενης ζημιάς. Αρχικά, το πάθος αυξάνεται με σχετικά γρήγορο ρυθμό, αλλά με το πέρασμα του χρόνου τα προϊόντα της διάβρωσης καταπνίγουν τη διαδικασία. Μετά από πέντε περίπου έτη, σταματά η περαιτέρω διάβρωση, όπως παρατηρεί κανείς και από το σχήμα.



Σχήμα 2- 4 Διάβρωση σε mm με τον χρόνο (σε έτη)

Το βάθος των λάκκων εξαρτάται από το κράμα και το περιβάλλον. Για πολύ ανθεκτικά κράματα, όπως το 3103, οι χειρότερες περιπτώσεις φθάνουν βάθος της τάξεως των 0.04mm σε αγροτικές το ποθεσίες και 0.16mm σε παραθαλάσσιες βιομηχανικές περιοχές.

Η επιφάνεια του διαβρωμένου αλουμινίου μοιάζει πάντα πολύ χειρότερη από ότι είναι στην πραγματικότητα, και ο μεγάλος όγκος προϊόντων διάβρωσης παράγει μία ψευδήαίσθηση για το μέγεθος της διάβρωσης.

Πειράματα εφελκυσμού σε ορισμένους τύπους

Κραμάτων τα οποία είχαν εκτεθεί σε μολυσμένο περιβάλλον, απέδειξαν ότι το μέταλλο χάνει μικρό μόνο μέρος της αντοχής του και εξακολουθεί να ικανοποιεί τις προδιαγεγραμμένες απαιτήσεις.

Ο μόνος πιθανός λόγος ανησυχίας είναι η μείωση της ολκιμότητας η οποία μπορεί να προκύψει για λεπτά υλικά.

Το χρώμα του διαβρωμένου αλουμινίου ποικίλει από απαλό γκρι-μπλε σε αγροτικό περιβάλλον σε βαθύ γκρι ή μαύρο σε βιομηχανικές περιοχές.

Όταν και οι δύο πλευρές  $b$  ενός στοιχείου  $w$  είναι εκτεθειμένες σε μολυσμένο περιβάλλον, η κατώτερη πλευρά εμφανίζεται περισσότερο καταπονημένη, διότι τα προϊόντα της διάβρωσης δεν ξεπλένονται από τη βροχή, όπως στην άνω επιφάνεια. Το συχνό πλύσιμο είναι σημαντικό για ανοδιωμένες επιφάνειες προκειμένου να διατηρήσουν την καλή τους εμφάνιση.

Πέρα από τον σχηματισμό λάκκων, είναι πιθανόν να εμφανισθούν περισσότερο ακανόνιστες μορφές διάβρωσης σε εκτεθειμένες επιφάνειες αλουμινίου, όπως:

Αποφλοιώση, η οποία εμφανίζεται ως ξεφλούδισμα στρωμάτων τα οποία είναι παράλληλα στην επιφάνεια του μετάλλου και είναι παρόμοια με το σκούριασμα του χάλυβα.

-Ενδοκρυσταλλική προσβολή ή διάβρωση λόγω έντασης. Αποτελεί τον πιο επικίνδυνο τύπο διάβρωσης και εμφανίζεται όταν μικρορωγμές αναπτύσσονται στις εντεινόμενες ζώνες λόγω παρουσίας των διαβρωτικών παραγόντων.

Ο πρώτος τύπος διάβρωσης είναι περισσότερο πιθανόν απροκύψει στους ισχυρούς τύπους κραμάτων (2xxx και 7xxx), όταν χρησιμοποιούνται χωρίς προστασία σε εχθρικό περιβάλλον. Ο δεύτερος τύπος διάβρωσης εμφανίζεται στα ανθεκτικότερα μέλη της σειράς 5xxx ( $Mg > 3.5\%$ ), όταν εκτίθενται για μεγάλο χρονικό διάστημα σε αυξημένες θερμοκρασίες (άνω των 70o C).

Επίσης, αποτελεί πρόβλημα στην θερμικά επηρεαζόμενη

ζώνη (Θ.Ε.Ζ) στις συγκολλήσεις. Ένας πρόσθετος κίνδυνος είναι το φαινόμενο του καταπλάσματος, το οποίο εμφανίζεται

όταν μία επιφάνεια αλουμινίου στερείται οξυγόνου και κατά συνέπεια συνεχίζει απεριόριστα να διαβρώνεται καθώς το στρώμα οξειδίου δεν μπορεί να αναμορφωθεί.

Έναν παράδειγμα τέτοιας περίπτωσης είναι όταν φύλλα αλουμινίου βρίσκονται σε επαφή με μονωτικά υλικά και τα χημικά της μόνωσης προσβάλλουν το αλουμίνιο.

Η αντίσταση σε διάβρωση των κραμάτων αλουμινίου εκτιμάται ανάλογα με τα στοιχεία πρόσμιξης:

- Το Μαγγάνιο σε μικρά ποσοστά δεν διαφοροποιεί την αντίσταση σε διάβρωση.
- Το Μαγνήσιο σε μικρά ποσοστά (5-6%) αυξάνει την αντίσταση σε διάβρωση.
- Το Ψυρίτιο συνήθως μειώνει την αντίσταση σε διάβρωση αν και σε συνδυασμό με το Μαγνήσιο, παρέχει αντίσταση όμοια με του καθαρού αλουμινίου.
- Ο Ψευδάργυρος σε συνδυασμό με το Μαγνήσιο παρέχει χ ικανή αντίσταση έναντι διαβρώσεως με κατάλληλη θερμική κατεργασία.
- Το Νικέλιο, ο Σίδηρος και ο Χαλκός ακόμη και σε συνδυασμό με τα

Προαναφερθέντα υλικά μειώνουν την αντίσταση σε διάβρωση.

## ΟΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ

### Επί Μέρους Συντελεστές Ασφαλείας

Το πρότυπο αυτό δίνει γενικές οδηγίες για το σχεδιασμό κατασκευών από αλουμίνιο, οι οποίες σχετίζονται με οριακές καταστάσεις μελών, όπως αστοχίας σε εφελκυσμό, αστοχία λόγω φαινομένων δευτέρας τάξεως, ή αστοχία των συνδέσεων.

Οι περισσότεροι κανόνες ρυθμίστηκαν με βάση πειραματικά δεδομένα προκειμένου να ληφθούν συνεπείς τιμές για τους συντελεστές ασφαλείας γ<sub>M</sub>.

### Ιδιότητες του Υλικού

#### Χαρακτηριστικές Τιμές

Οι ιδιότητες του υλικού αντιπροσωπεύονται από μία χαρακτηριστική τιμή  $X_k$  η οποία αντιστοιχεί σε κάποιο κλάσμα της στατιστικής κατανομής της συγκεκριμένης ιδιότητας.

Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται μία ονομαστική τιμή ως χαρακτηριστική. Στην περίπτωση των κατασκευών αλουμινίου η περίπτωση αυτή είναι και η συνήθης.

Μία ιδιότητα είναι πιθανό να διαθέτει δύο χαρακτηριστικές τιμές, την ανώτατη και την κατώτατη. Στις περισσότερες περιπτώσεις μόνο η δεύτερη λαμβάνεται υπόψη. Ωστόσο, υψηλότερες τιμές της τάσεως διαρροής  $f_{0.2}$  μπορούν να χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις όπου τα φαινόμενα υπεραντοχής μπορούν να οδηγήσουν σε περιορισμό της ασφάλειας.

### Τύποι κραμάτων κατά τον Ευρωκώδικα 9

Στους ακόλουθους πίνακες παρουσιάζονται οι τύποι σφυρήλατων και χυτών κραμάτων σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 9.

Χρησιμοποιείται η αριθμητική ονοματολογία τεσσάρων ψηφίων ωστόσο οι χαρακτήρες EN (από το European) και AW ή AC για σφυρήλατα ή χυτά κράματα αντίστοιχα. Επιπλέον, τα νούμερα που παρουσιάζονται στον χημικό συμβολισμό δηλώνουν το ποσοστό πρόσμιξης το οποίο δεν πρέπει να υπερβαίνεται από την ουσία στην οποία αντιστοιχούν.

Τιμές Σχεδιασμού για σταθερές του Υλικού

Οι σταθερές του υλικού που πρέπει να υιοθετούνται στους υπολογισμούς που ορίζονται στα πλαίσια του συγκεκριμένου Ευρωκώδικα θα λαμβάνονται ως ακολούθως:

- ΜέτροΕλαστικότητας:  $E=70000 \text{ N/mm}^2$

- ΜέτροΔιάτμησης:  $G=27000 \text{ N/mm}^2$

- ΛόγοςPoisson:  $\nu=0.3$

- ΣυντελεστήςΘερμικήςΔιαστολής:  $\alpha=23 \cdot 10^{-6} \text{ per } ^\circ\text{C}$

- Πυκνότητα:  $\rho=2700 \text{ kg/m}^3$

Ανθεκτικότητα και Προστασία σε Διάβρωση

Γενικά

Η καλή αντίσταση σε διάβρωση του αλουμινίου και των κραμάτων του αποδίδεται στην προστατευτική επίστρωση η οποία σχηματίζεται στην επιφάνεια του μετάλλου αμέσως μετά την έκθεσή του στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η επίστρωση αυτή είναι συνήθως διαφανής, σχετικά αδρανής και καθώς σχηματίζεται με την έκθεση σε οξυγόνο, η προστατευτική στρώση είναι κατά συνέπεια αυτό-προστατευόμενη.



Σε ήπιες περιβαλλοντικές συνθήκες οι επιφάνειες αλουμινίου διατηρούν την αρχική τους εμφάνιση για χρόνια και δεν απαιτείται πρόσθετη προστασία για τα περισσότερα κράματα. Σε μέσες βιομηχανικές συνθήκες η επιφάνεια σκληραίνει και το χρώμα της γίνεται πιο σκούρο.

Καθώς οι ατμοσφαιρικές συνθήκες γίνονται πιο εχθρικές, όπως σε ισχυρώς όξινα ή αλκαλικά περιβάλλοντα ο αποχρωματισμός της επιφάνειας και η σκλήρυνση εντείνονται, ενώ εμφανίζονται λευκά οξείδια σε μορφή σκόνης και μπορεί η επίστρωση να γίνει ευδιάλυτη. Το μέταλλο παύει να προστατεύεται πλήρως και επιπρόσθετη προστασία είναι απαραίτητη.

Οι συνθήκες αυτές μπορούν επίσης να εμφανισθούν σε ρωγμές λόγω έντονων τοπικών όξινων ή αλκαλικών συνθηκών, αλλά οι παράγοντες που έχουν αυτές τις ακραίες επιδράσεις είναι σχετικά λίγοι.

Σε παράκτια και θαλασσινά περιβάλλοντα, η επιφάνεια σκληραίνει και αποκτά ένα γκρίζο χρώμα και η προστασία κάποιων κραμάτων καθίσταται απαραίτητη.

Όπου το αλουμίνιο εμβαπτίζεται σε νερό, ειδικές προφυλάξεις είναι απαραίτητες.

Όπου εμφανίζεται επιφανειακή αλλοίωση, οι καμπύλες διάβρωσης – χρόνου για το αλουμίνιο και τα κράματα του ακολουθούν συνήθως εκθετικό νόμο, με αρχική απώλεια της αντανακλαστικότητας μετά από ελαφρά διάβρωση. Μετά από αυτό υπάρχει ελάχιστη περαιτέρω αλλαγή για περιόδους μεγάλης διάρκειας.

Με την ατμοσφαιρική έκθεση το αρχικό στάδιο μπορεί να διαρκέσει από λίγους μήνες ως δύο με τρία χρόνια, ακολουθούμενο από μικρή αν οποιαδήποτε αλλαγή, για περιόδους 20, 30 ή ακόμη και 80 ετών.

Τέτοια συμπεριφορά είναι ενιαία για συνθήκες ελεύθερης έκθεσης σε εξωτερικά περιβάλλοντα αλλά και για έκθεση σε εσωτερικές, προστατευόμενες συνθήκες εκτός από αυτές όπου μπορεί να εμφανισθούν ακραία αλκαλικά ή όξινα περιβάλλοντα. Τα τροπικά περιβάλλοντα γενικώς δεν απειλούν περισσότερο το αλουμίνιο από τα εύκρατα περιβάλλοντα αν και μερικά κράματα της σειράς 5000 επηρεάζονται από μακρά έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, ειδικά σε θαλάσσια περιβάλλοντα.

## Αντοχή

Τα κράματα αλουμινίου κατηγοριοποιούνται σε τρεις κατηγορίες αντοχής σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 9: A (άριστη), B και C σε φθίνουσα κατάταξη αντοχής.

Οι κατηγορίες αυτές χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της ανάγκης και του βαθμού της απαιτούμενης προστασίας. Στις κατασκευές που κάνουν χρήση περισσότερων του ενός κραμάτων, συμπεριλαμβανομένων και των μετάλλων πλήρωσης σε συγκολλημένες κατασκευές, οι προστασία πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές της κατώτατης των κατηγοριών αντοχής.

## Αντοχή Διατομής

### Αντοχή Σχεδιασμού

Η αντοχή σχεδιασμού διατομών μελών μπορεί να περιορίζεται από:

- την πλαστική αντίσταση της διατομής
- την αντοχή της καθαρής διατομής σε οπές
- τον έλεγχο τοπικής ευστάθειας στοιχείων της διατομής

Όπου κρίνεται απαραίτητο θα πρέπει να ελέγχεται και συνολικά η ευστάθεια.. Η αντοχή μελών με λεπτόκορμα στοιχεία μπορεί να μειώνεται σαν αποτέλεσμα πρόωρου τοπικού λυγισμού.

Ο σχεδιασμός μέλους υπό ομοιόμορφη θλίψη ή θλίψη λόγω κάμψης ελέγχεται μέσω κατάταξης της διατομής σε κατηγορίες ανάλογα με την επιδεκτικότητά της σε τοπικό λυγισμό.

## Ιδιότητες Διατομής

Οι ιδιότητες των διατομών θα προσδιορίζονται λαμβάνοντας υπόψη τις προκαθορισμένες διαστάσεις. Οπές συνδετήρων δεν απαιτείται να αφαιρούνται, αλλά θα πρέπει να υπολογίζονται μεγαλύτερα ανοίγματα .

Η καθαρή επιφάνεια (Anet) μέλους ή διατομής προκύπτει από την πλήρη διατομή αφαιρώντας οπές και άλλα ανοίγματα. Όταν υπολογίζονται οι ιδιότητες της καθαρής διατομής, η απομείωση για μία μόνο οπή ισούται με το ολικό εμβαδόν της οπής στο επίπεδο του άξονά της.

Υπό την προϋπόθεση ότι οι οπές δεν είναι επικαλυπτόμενες, το συνολικό εμβαδόν απομείωσης ισούται με το μέγιστο άθροισμα των εμβαδόν των οπών σε οποιαδήποτε διατομή κάθε τη στον άξονα του μέλους.

## Αντοχή Δοκών

### Αντοχή σε Μονοαξονική Κάμψη

Ελλείψει διατμητική δύναμης, η τιμή σχεδιασμού της καμπτικής ροπής MRd θα πρέπει να λαμβάνεται μικρότερη από  $M_{a,Rd}$  και  $M_{c,Rd}$

### Αντοχήσε Διατμητική Δύναμη

Η τιμή σχεδιασμού για την διατμητική δύναμη Ved σε κάθε διατομή θα πρέπει να ικανοποιεί:

$$V_{Ed} < V_{c,Rd}$$

Όπου  $V_{c,Rd}$  είναι η διατμητική αντοχή σχεδιασμού της διατομής η οποία εξαρτάται από την κατάταξη της διατομής για διάτμηση.

## Συνδυασμός Κάμψης και Διάτμησης

Η θεωρητική ροπή αντίστασης μίας διατομής μειώνεται λόγω παρουσίας τέμνουσας. Για μικρές τιμές διατμητικής δύναμης η από μείωση είναι τόσο μικρή που μπορεί να αμελείται. Ωστόσο, όταν η διατμητική δύναμη ξεπερνά το ήμισυ της διατμητικής αντοχής, θα πρέπει να εξετάζεται η επίδρασή της στην ροπή αντοχής.

Εφόσον η τιμή της τέμνουσας σχεδιασμού  $V_{ed}$  δεν ξεπερνά το 50% της διατμητικής αντοχής  $V_{r1,Rd}$  δεν θα πρέπει να πραγματοποιείται από μείωση της ροπής αντοχής. Διαφορετικά, η σχεδιαστική ροπή αντοχής θα πρέπει να απομειώνεται στην  $M_{V,Rd}$ .

## Αντοχή Εφελκόμενων Μελών

Για μέλη τα οποία υπόκεινται σε αξονικό εφελκυσμό, η τιμή σχεδιασμού της Εφελκυστικής δύναμης  $N_{Ed}$  σε κάθε διατομή θα πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$N_{Ed} \leq N_{t,Rd}$$

Όπου  $N_{t,Rd}$  είναι η εφελκυστική αντοχή της διατομής, η οποία λαμβάνεται ως η μικρότερη εκ των ακόλουθων δύο τιμών:

- γενικευμένη διαρροή κατά μήκος του μέλους
- τοπική αστοχία σε κρίσιμη διατομή

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Finite Element Analysis

Βιβλιοθήκη

Διαδίκτυο