

25

**Τ.Ε.Ι. ΠΑΤΡΩΝ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑΛΛΩΝ &  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗ ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ  
ΜΕ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΙ Σ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ**

**ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ Β. ΧΡΗΣΤΟΣ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΕΣ**

**ΚΑΘ. ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΚΑΝΕΛΛΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ  
ΚΑΘ. ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΚΑΠΠΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**



**ΠΑΤΡΑ 2001**

ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ	3136
----------------------	------

Μέρος πρώτο

ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ ΜΕΓΑΛΩΝ

Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1	2
1. Γενικά για την συγκόλληση των μετάλλων	2
1.1 Η εξέλιξη των συγκολλήσεων	2
1.2 Μέθοδοι συγκόλλησης	2
1.2.1 Χαρακτηρισμός της συγκολλητής σύνδεσης	5
1.3 Πηγές θερμότητας συγκόλλησης	6
1.3.1 Χημική ενέργεια	6
1.3.2 Ηλεκτρική ενέργεια	7
1.3.3 Θερμότητα Joule - Lenz	11
1.3.4 Ροή πλάσματος	12
1.3.5 Δέσμη ηλεκτρονίων ή ηλεκτρονοδέσμη	13
1.3.6 Δέσμη των Laser	15
1.3.7 Εξωθερμικές αντιδράσεις	16
1.3.8 Θερμότητα τριβής	16
Κεφάλαιο 2	17
2. Ψαθυρότητα και μηχανική των θραύσεων	17
2.1 Ψαθυρότητα των χαλύβων και των συγκολλητών συνδέσεων	17
2.2 Γενικά χαρακτηριστικά της ψαθυρότητας των χαλύβων.	17
2.3 Μηχανισμός ανάπτυξης θραύσματος - θεωρία Griffith	18
2.4 Παράγοντες που προξενούν την ψαθυρότητα των χαλύβων	21
2.4.1 Επίδραση των συνθηκών εργασίας τον υλικού στην κατασκευή	21
2.4.2 Κατάσταση τάσεων και ταχύτητα παραμόρφωσης	22
2.4.3 Θερμοκρασία μετάβασης ή μεταλλαγής από πλαστική κατάσταση σε ψαθυρή. Έννοια της θερμοκρασίας ψαθυρότητας	22
2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την ψαθυρότητα των χαλύβων	24
2.5.1 Η στρωματική δομή και τα μη μεταλλικά εγκλείσματα	25
2.5.2 Συνθήκες λειτουργίας της κατασκευής	25
2.5.3 Η διάβρωση	25
2.6 Μέθοδοι δοκιμασιών της ψαθυρότητας των χαλύβων	25
2.6.1 Γενική σκιαγράφηση της μηχανικής των θραύσεων	26
2.6.2 Ελαστική-γραμμική μηχανική των θραύσεων	26
2.6.3 Διάδοση της ρωγμής σύμφωνα με τη θεωρία του Griffith και του Irwin	27
2.6.4 Η θεωρία της θραύσης κατά τον Irwin	28
2.6.5 Γενικά δεδομένα για τον καθορισμό του K <sub>IC</sub> , με βάση τις εργαστηριακές δοκιμασίες	31
2.6.6 Επιλογή μεγεθών δοκιμών για τις δοκιμασίες	34
2.6.7 Ανάλυση των αποτελεσμάτων και υπολογισμός του K <sub>IC</sub>	36
2.6.8 Αναλυτικός τρόπος καθορισμού του συντελεστή εντάσεως των τάσεων K <sub>IC</sub>	38
Κεφάλαιο 3	40
3. Αντοχή των συγκολλητών συνδέσεων	40
3.1 Αντοχή σε θραύση	40
3.2 Συγκέντρωση τάσεων στις συγκολλητές συνδέσεις	41
3.3 Αντοχή των συγκολλητών συνδέσεων σε εναλλασσόμενα φορτία	43
3.3.1 Είδη φορτίσεων	44
3.3.2 Διαγράμματα κόπωσης	45

3.4 Η επίδραση της μεθόδου συγκόλλησης και του εναποτιθέμενου υλικού	48
3.5 Η επίδραση των σφαλμάτων στις συγκολλητές συνδέσεις	48
Κεφάλαιο 4	52
4. Τάσεις και παραμορφώσεις	52
4.1 Ανάπτυξη των τάσεων συγκόλλησης, συνέπειες και η αντιμετώπιση τους	52
4.2 Εσωτερικές τάσεις	52
4.3 Κατανομή των ιδίων τάσεων	54
4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος των τάσεων συγκόλλησης	57
4.5 Συνέπειες των τάσεων συγκολλησεως στις συγκολλητές κατασκευές	58
4.6 Τρόποι μείωσης των παραμορφώσεων και των τάσεων συγκόλλησης	60
4.7 Εκτέλεση κολλήσεων συγκράτησης για τη συγκόλληση εξαρτημάτων μεγάλου μήκους	62
4.8 Εφαρμοζόμενες θερμικές κατεργασίες στις συγκολλητές συνδέσεις	63
4.9 Εγκάρσια και διαμήκη συστολή	63
4.10 Επίδραση της συστολής στο μέγεθος της κάμψης	67
Κεφάλαιο 5	68
5.1 Ηλεκτρόδια με επένδυση, σύρματα, συλλιπάσματα, προστατευτικά αέρια	68
5.1.1 Ηλεκτρόδια με επένδυση	68
5.1.2 Στοιχεία της επένδυσης των ηλεκτροδίων	68
5.1.3 Είδη επενδεδυμένων ηλεκτροδίων	69
5.1.4 Χημική σύσταση και μηχανικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου υλικού	71
5.1.5 Κωδικοποίηση των ηλεκτροδίων	72
5.1.6 Ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση κραματωμένων χαλύβων	75
5.1.7 Δείκτες που χαρακτηρίζουν την απόδοση συγκόλλησης με ηλεκτρόδια επενδεδυμένα	80
5.1.8 Ηλεκτρόδια συγκόλλησης μη τηκόμενα	81
5.1.9 Ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση χυτοσιδήρου	82
5.1.10 Ηλεκτρόδια για την αναγώμωση των χαλύβων	87
5.1.11 Ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση μη σιδηρούχων μετάλλων	89
5.2 Σύρματα-ράβδοι	93
5.2.1 Σύρματα για τη συγκόλληση χαλύβων	93
5.2.2 Σύρματα και ράβδοι για τη συγκόλληση μη σιδηρούχων μετάλλων	96
5.3 Συλλιπάσματα	104
5.3.1 Διάκριση των συλλιπασμάτων	104
5.3.2 Τηκόμενα συλλιπάσματα	107
5.3.3 Κεραμικά συλλιπάσματα	108
5.4.1 Αργό	111
5.4.2 Άζωτο	111
5.4.3 Ήλιο	112
5.4.4 Διοξείδιο του άνθρακα	112
5.4.5 Οξυγόνο	113
5.4.6 Υδρογόνο	113
5.4.7 Μίγματα αερίων	114
Κεφάλαιο 6	115
6. Χειρωνακτική συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο (MMA)	115

6.1 Χαρακτηριστικά της μεθόδου	115
6.1.1 Γενικά	115
6.1.2 Ρεύμα συγκόλλησης	115
6.2 Λειτουργίες της επένδυσης του ηλεκτροδίου	118
6.2.1 Προστασία του λουτρού συγκόλλησης	118
6.2.2 Σταθερότητα του τόξου	119
6.2.3 Επίδραση του συλλιπάσματος στη διαμόρφωση του μετώπου της κόλλησης	119
6.2.4 Διαμόρφωση των κολλήσεων σε εξαναγκασμένες θέσεις	120
6.2.5 Επιλογή της χημικής σύστασης του μετάλλου της κόλλησης	121
6.2.6 Προσθήκη κραματικών στοιχείων	121
6.2.7 Αποξείδωση	122
6.2.8 Ακαθαρσίες	122
6.2.9 Ρόλος των διάφορων συστατικών του συλλιπάσματος	122
6.3 Παράμετροι συγκόλλησης	123
6.3.1 Ένταση ρεύματος συγκόλλησης	123
6.3.2 Τάση του τόξου	123
6.3.3 Ταχύτητα συγκόλλησης	124
6.3.4 Διάμετρος επενδεδυμένου ηλεκτροδίου	125
Κεφάλαιο 7	128
7. Συγκόλληση τόξου στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων	128
7.1 Συγκόλληση τόξου με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο σε προστατευτική ατμόσφαιρα αερίων, με τη μέθοδο GTA (TIG)	128
7.1.1 Χαρακτηριστικά της μεθόδου	128
7.1.2 Παράμετροι συγκόλλησης	130
7.1.3 Τεχνολογία και τεχνική συγκόλλησης	142
7.2 Συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων—GMA (MIG)	147
7.2.1 Χαρακτηριστικά της μεθόδου	147
7.2.2 Παράμετροι συγκόλλησης	150
7.2.3 Τεχνολογία και τεχνική συγκόλλησης	165
Κεφάλαιο 8	170
8. Συγκόλληση ηλεκτροσκωριακή-Electroslag	170
8.1. Χαρακτηριστικά της μεθόδου	170
8.2 Μηχανές συγκόλλησης για την ηλεκτροσκωριακή συγκόλληση	171
8.3 Χρησιμοποίηση της ηλεκτροσκωριακής συγκόλλησης	173
Κεφάλαιο 9	175
9. Συγκόλληση με πίεση	175
9.1 Χαρακτηρισμός των μεθόδων συγκόλλησης με πίεση	175
9.1.1 Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση	175
9.2 Διαχωρισμός των μεθόδων συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση	178
9.2.1 Συγκόλληση μετωπική	178
9.2.2 Συγκόλληση βραχυκύκλωσης	179
9.2.3 Συγκόλληση σπινθηρισμού	180
9.2.4 Συγκόλληση σημειακή	182
9.2.5 Παράμετροι συγκόλλησης	184
9.2.6 Ένταση και πυκνότητα ρεύματος	184

9.2.7 Ηλεκτρόδια	186
9.2.8 Απαιτήσεις που αναφέρονται στα υλικά των ηλεκτροδίων	186
9.2.9 Κατασκευή μηχανής σημειακής συγκόλλησης ηλεκτροπόντα	187
9.2.10 Συγκόλληση γραμμική	187
9.2.11 Ηλεκτρόδια	190
9.2.12 Συγκόλληση με προεξοχές	191
9.3 Συγκόλληση με πυκνωτές (δυναμικής πίεσης)	192
9.3.1 Περιοχή χρησιμοποίησης	194
9.3.2 Παράμετροι συγκόλλησης	194
9.4 Συγκόλληση με τριβή	194
9.4.1 Περιοχή χρησιμοποίησης	196
9.4.2 Παράμετροι συγκόλλησης	197
9.5 Συγκόλληση με έκρηξη	198
9.5.1 Τα βασικά συστήματα και η διαδικασία της συγκόλλησης με έκρηξη	199
9.5.2 Εφαρμογές της συγκόλλησης με έκρηξη	200
9.6 Συγκόλληση με υπέρηχους	200
9.6.1 Παράμετροι συγκόλλησης με υπέρηχους.	201
9.6.2 Περιοχή συγκόλλησης	202
9.7 Θερμοσυγκόλληση	203
9.7.1 Θερμιτοσυγκόλληση με τήξη	203
9.7.2 Θερμιτοσυγκόλληση με πίεση	204
9.7.3 Συγκόλληση σιδηρογραμμών με συνδυαστική μέθοδο	205
Κεφάλαιο 10	207
10.1 Συγκόλληση με εστιασμένη δέσμη ενέργειας	207
10.1.1 Συγκόλληση με πλάσμα - πλασμική συγκόλληση	209
10.1.2 Πλασμική συγκόλληση GTA-Χαρακτηριστικά της μεθόδου	211
10.1.3 Πλασμική συγκόλληση GMA	215
10.2 Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων-Χαρακτηρισμός της μεθόδου	217
10.2.1 Δημιουργία της δέσμης ηλεκτρονίων	218
10.2.2 Τεχνολογία και τεχνική συγκόλλησης	221
10.3 Συγκόλληση με δέσμη των laser-Χαρακτηρισμός της μεθόδου	222
10.3.1 Συσκευές συγκόλλησης Laser	223
10.3.2 Τεχνολογία και τεχνική συγκόλλησης	224
Κεφάλαιο 11	230
11. Αυτόματη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο SAW Submerged Arc Welding	230
11.1.1 SAW Submerged Arc Welding	230
11.1.2 Αυτόματη μηχανή συγκολλήσεις με βυθιζόμενο τόξο	231
11.1.3 Επιλογή συνθηκών συγκόλλησης και μορφή των κολλήσεων	232
11.2 Τεχνική εκτέλεσης των κολλήσεων	233
11.2.1 Τεχνική εκτέλεσης μετωπικών κολλήσεων	233
11.2.2 Τεχνική εκτέλεσης αυχενικών κολλήσεων	238
11.3 Τεχνολογία συγκόλλησης με βυθιζόμενο τόξο	239
11.3.1 Κατασκευαστικοί ανθρακοχάλυβες και ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες λεπτά ελάσματα	239
11.3.2 Κατασκευαστικοί ανθρακοχάλυβες και ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες χοντρά ελάσματα	240

11.3.3 Κραματωμένοι χάλυβες	240
11.3.4 Συγκόλληση χαλύβων ισχυρά κραματωμένων, ανοξειδωτων και οξύμαχων	240
11.3.5 Αναγόμευση με βυθιζόμενο τόξο	240
Κεφάλαιο 12	242
12. Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι συγκολλητών συνδέσεων	242
12.1.1 Γενικός χαρακτηρισμός των μη καταστρεπτικών ελέγχων	242
12.1.2 Οπτικός έλεγχος (Visual testing)	243
12.1.3 Ραδιογραφικός έλεγχος (Radiography testing) Φυσικές ιδιότητες- χαρακτηριστικά ραδιογραφικού ελέγχου	244
12.1.4 Ηλεκτρομαγνητικοί έλεγχοι (Electromagnetic testing)	245
12.2 Καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου συγκολλητών συνδέσεων	248
12.2.1 Έλεγχος μηχανικών ιδιοτήτων	248
12.2.2 Μεταλλογραφικός έλεγχος	255
12.3 Χημικός έλεγχος	257
12.4 Έλεγχος στη διάβρωση	257



## Εισαγωγή

Η συγκόλληση είναι μία από τις βασικές τεχνικές δημιουργίας και επισκευής διαφόρων μεταλλικών κατασκευών. Η ευρύ χρήση της συγκόλλησης οφείλεται στη δυνατότητα δημιουργίας κατασκευών και βιομηχανικών προϊόντων που χαρακτηρίζονται από πολλά πλεονεκτήματα. Η τεχνική της συγκόλλησης αποτελεί μια μέθοδο σύνδεσης και κοπής των μετάλλων, παραμερίζοντας την διαδικασία της σφυρηλασίας, χύτευσης αλλά και την χρήση ήλων.

Οι μηχανές για τη συγκόλληση ή την κοπή με τόξο, τη συγκόλληση ή την κοπή με πλάσμα, τη συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση ή με τριβή, τη συγκόλληση ή την κοπή με δέσμη ηλεκτρονίων όπως και την κοπή ή συγκόλληση με ακτίνες *Laser* μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε συγκεντρωμένη ροή θερμικής ενέργειας ικανής για την τοπική τήξη την δυνατότητα σύνδεσης ή κοπής των μετάλλων. Η εργασία της συγκόλλησης με τη χρησιμοποίηση των προαναφερθέντων μηχανών συγκόλλησης διενεργείται χειρωνακτικά, μηχανοποιημένα, ημιαυτόματα, αυτόματα και με ρομποτικά συστήματα.

Ο σχεδιασμός διαφόρων τύπων κατασκευών και η τεχνολογία σύνδεσης, κοπής ή αναγόμεσης πραγματοποιείται με τη χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων *CAD/CAM* και *CAE*. Η χρησιμοποίηση αισθητηρίων σημάτων της ποιότητας της σύνδεσης επιτρέπουν τον έλεγχο των διαδικασιών συγκόλλησης σε προγραμματισμένο χρόνο, εξασφαλίζοντας συνδέσεις συγκολλήσεων χωρίς σφάλματα. Η αντοχή και η ποιότητα της σύνδεσης των μετάλλων με συγκόλληση εξαρτάται κυρίως από το είδος του χρησιμοποιούμενου υλικού των εξαρτημάτων, τον τύπο της κατασκευής και την εφαρμοζόμενη τεχνολογία συγκόλλησης. Οι παράγοντες αυτοί ασκούν καθοριστική επίδραση στην ικανότητα συγκόλλησης των κατασκευαστικών εξαρτημάτων. Η έννοια της ικανότητας συγκόλλησης έχει ιδιαίτερη σημασία κατά τη συγκόλληση χαλύβων με αυξημένη αντοχή (σκληρότητα). Οι χάλυβες αυτοί σε σύγκριση με τους κοινούς, μαλακούς, χάλυβες, παρουσιάζουν χαμηλή ικανότητα συγκόλλησης. Επειδή τα αυτά υλικά δεν συγκολλούνται εύκολα, υπάρχουν πιθανότητες σφαλμάτων, με αποτέλεσμα τη μείωση της πλαστικότητας του μετάλλου και αύξηση της πιθανότητα θραύσης του υλικού. Έτσι λοιπόν η θραύση των χαλύβων, συγκεκριμένα η ψαθυρή θραύση στις κατασκευές με συγκόλληση μπορεί να θεωρηθεί αποτέλεσμα της διαδικασίας συγκόλλησης. Οι εργαζόμενοι μηχανικοί και τεχνικοί των συγκολλήσεων πρέπει, να έχουν γνώσεις των νεώτερων λύσεων στον κλάδο της τεχνολογίας των συγκολλήσεων, όπως και με ευρείες γνώσεις στην περιοχή των υλικών, της μεταλλουργίας, την κατασκευή των μηχανών, της φυσικής, της χημείας, της πληροφορικής και της ηλεκτρονικής. Αυτή η πτυχιακή εργασία θα παρουσιάσει την επιστήμη και την τεχνική των συγκολλήσεων, ώστε οι ενδιαφερόμενοι αναγνώστες που ασχολούνται να βοηθηθούν στην επίλυση των προβλημάτων σχεδιασμού-εκτέλεσης και ελέγχου των κατασκευών με συγκόλληση. Περιγράφονται αναλυτικά όλες οι τεχνολογίες συγκόλλησης που εφαρμόζονται ευρέως στη βιομηχανία.

## Κεφάλαιο 1

### 1. Γενικά για την συγκόλληση των μετάλλων

#### 1.1 Η εξέλιξη των συγκολλήσεων

Η συγκόλληση των μετάλλων είναι ένας ιδιαίτερος κλάδος της τεχνολογίας, που συνδέει τις απλές μηχανουργικές τεχνικές λύσεις με τα πλέον ερευνητικά επιτεύγματα των θετικών επιστημών. Η σύνδεση των μετάλλων με θέρμανση ήταν ήδη γνωστή στην αρχαιότητα και στο Μεσαίωνα. Ίδη τότε τα κατασκευάσματα από χρυσό, ασήμι, χαλκό, μπρούντζο, ορείχαλκο και αργότερα από χάλυβα, με τη θέρμανση τους σε εστίες φωτιάς. Στην αρχική περίοδο των συγκολλήσεων, οι μέθοδοι παραγωγής, συνδέονται με τη χρησιμοποίηση της φλόγας αερίων και του ηλεκτρικού τόξου για τη σύνδεση των μετάλλων. Η χρησιμοποίηση της συγκόλλησης σαν μεθόδου σύνδεσης κατασκευαστικών στοιχείων γίνεται στις αρχές του 20ου αιώνα, όπου εμφανίζονται οι πρώτες κατασκευές στην ναυπηγική και στην υπόλοιπη βιομηχανία, όπου η συμμετοχή των κατασκευών με συγκόλληση στην συνολική ποσότητα των συνδέσεων είναι σημαντική. Σήμερα με τις εμπειρίες που αποκτήθηκαν, με την εφαρμογή συγχρόνων μεθόδων συγκόλλησης, (συγκόλληση με συγκεντρωμένη δέσμη ενέργειας, συγκόλληση με έκρηξη) και με τη συμμετοχή της τεχνολογίας πετυχαίνονται κατασκευές υψηλής αντοχής και εξασφαλισμένης ποιότητας. Τώρα δημιουργούνται όλο και πιο πολύπλοκες κατασκευές, ενώ το σύστημα *TQM* απαιτεί τη διατήρηση της αρχής των ανύπαρκτων σφαλμάτων στις συγκολλητές συνδέσεις.

#### 1.2 Μέθοδοι συγκόλλησης

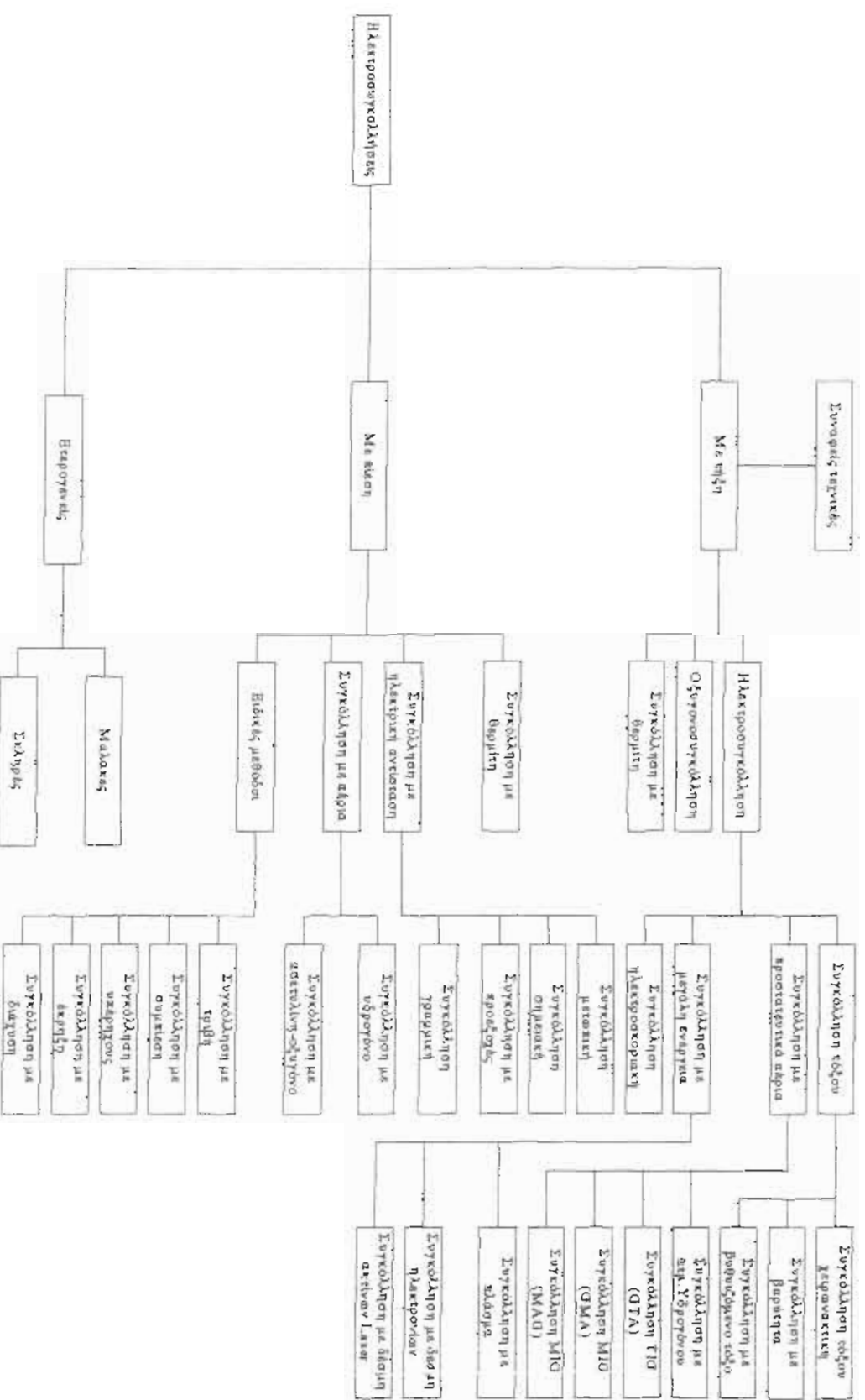
Οι συγκολλήσεις είναι μία από τις βασικές τεχνικές δημιουργίας και επισκευής διαφόρων μεταλλικών κατασκευών. Η συγκόλληση πετυχαίνεται με τη θέρμανση των συνδεόμενων μετάλλων σε κατάλληλη θερμοκρασία για κάθε περίπτωση, με πίεση ή μη και με χρησιμοποίηση ή μη πρόσθετου υλικού. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, οι συγκολλήσεις διακρίνονται σε άμεσες, αυτογενείς και ετερογενείς. **Άμεσες** είναι οι συγκολλήσεις που πετυχαίνονται με θέρμανση των προς συγκόλληση μετάλλων σε θερμοκρασία χαμηλότερη της τήξης τους, έως ότου καταστεί εύπλαστο το μέταλλο. Η συγκόλληση αυτή πετυχαίνεται με πίεση ή με σφυρηλασία, χωρίς τη χρησιμοποίηση πρόσθετου υλικού. **Αυτογενείς** είναι συγκολλήσεις που πετυχαίνονται με τη θέρμανση των μετάλλων προς συγκόλληση μέχρι την τήξη τους και με την προσθήκη ή μη πρόσθετου αυτογενούς μετάλλου. Στην περίπτωση αυτή έχουμε σύντηξη του βασικού μετάλλου με το εναποτιθέμενο υλικό. Εναποτιθέμενο υλικό είναι αυτό το οποίο προέρχεται από το πρόσθετο υλικό (του ηλεκτροδίου) και σχηματίζεται η κόλληση της σύνδεσης. **Ετερογενείς** είναι οι συγκολλήσεις που πετυχαίνονται με τη βοήθεια περισσότερο εύτηκτου υλικού διαφορετικής χημικής σύστασης. Οι συγκολλήσεις αυτού του είδους δεν είναι τόσο ισχυρές όσο οι αυτογενείς. Οι ετερογενείς συγκολλήσεις διακρίνονται σε μαλακές και σκληρές. Στις **μαλακές** (κασσιτεροκολλήσεις) η θερμοκρασία

θέρμανσης δεν υπερβαίνει τους  $400[^\circ\text{C}]-500[^\circ\text{C}]$ . Στις σκληρές (μπρουτζοκολλήσεις - ασημοκολλήσεις), απαιτείται θερμοκρασία θέρμανσης άνω των  $500[^\circ\text{C}]$ . Σε κάθε κατηγορία των αναφερθέντων μεθόδων διακρίνονται διάφοροι τρόποι συγκόλλησης. Υπάρχουν, επίσης, και πολλές άλλες συναφείς διαδικασίες με τη συγκόλληση στις οποίες χρησιμοποιούνται οι ίδιες πηγές θερμότητας. Τέτοιες συναφείς διαδικασίες είναι: η αναγόμωση, η θερμική κοπή των μετάλλων. Στο *σχήμα 1* παρουσιάζονται ταξινομημένοι οι διάφορες μέθοδοι συγκόλλησης. Κατά τη συγκόλληση των μετάλλων επηρεάζουν και λαμβάνουν χώρα οι εξής παράγοντες:

1. Το είδος των συγκολλούμενων μετάλλων
2. Η χρησιμοποιούμενη πηγή ενέργειας και θερμότητας
3. Η τεχνολογία συγκόλλησης
4. Το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η συγκόλληση

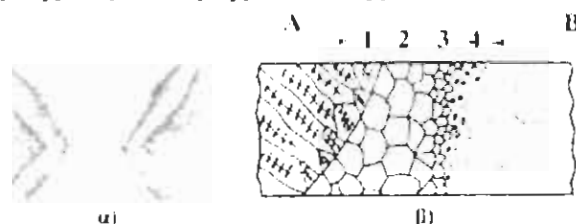
Η αντοχή της σύνδεσης των μετάλλων με συγκόλληση εξαρτάται από δύο βασικούς παράγοντες:

1. Από την παραγόμενη, μετά τη στερεοποίηση, κρυσταλλική δομή στην συγκόλληση και στη ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά,
2. Από τις δημιουργούμενες τάσεις και παραμορφώσεις μετά ή κατά τη διαδικασία συγκόλλησης.



Σχήμα 1 Ταξινόμηση μεθόδων συγκόλλησης

### 1.2.1 Χαρακτηρισμός της συγκολλητής σύνδεσης



Σχήμα 2 Σύνδεση συγκόλλησης α) μονόπλευρη συγκόλληση: Α κόλληση, Β μητρικό υλικό (μέταλλο βάσεως), 1 ζώνη σύντηξης, 2 ζώνη υπερθέρμανσης, 3 ζώνη εξομάλυνσης, 4 ζώνη μη πλήρους εξομάλυνσης β) μακροδομή δίπλευρης συγκολλητής σύνδεσης.

Η σύνδεση αυτή σε σχήμα Χ αποτελείται από το μητρικό υλικό που πρόκειται να συνδεθεί και από την κόλληση [Α]. Επιπλέον εδώ εμφανίζεται και τρίτο στοιχείο πάρα πολύ σημαντικό, η ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά ΖΕΘ, δηλαδή στρώμα μητρικού μετάλλου που εφάπτεται με την κόλληση, στο οποίο, από το αποτέλεσμα της θερμότητας συγκόλλησης εμφανίζονται συγκεκριμένα φυσικά φαινόμενα. Το πλάτος της ζώνης που επηρεάζεται θερμικά εξαρτάται από την προσαγόμενη θερμική ενέργεια καθώς και από το βαθμό συγκέντρωσης της πηγής θερμότητας. Στην περιοχή ΖΕΘ παρατηρούνται όλα τα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν σε θερμαινόμενο μέταλλο κάτω της θερμοκρασίας *Solidus*  $T_s$ . Η ζώνη που επηρεάζεται θερμικά ανάλογα με τη θερμοκρασία θέρμανσης, είναι δυνατόν να διαιρεθεί σε μικρότερες περιοχές, όπως προκύπτει από το *σχήμα 2α*. Η σύνδεση συγκόλλησης έχει ισχυρή ανομοιογένεια στη δομή, άρα και ανομοιογενείς μηχανικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες της σύνδεσης συγκόλλησης κόλληση και ΖΕΘ διαφέρουν σημαντικά από τις ιδιότητες του μητρικού υλικού. Στη ζώνη που επηρεάζεται θερμικά συνήθως έχουμε μείωση των πλαστικών ιδιοτήτων. Μερικές φορές εμφανίζονται επίσης και ρωγμές στη ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά. Επιπλέον, στην κόλληση μπορούν να εμφανισθούν πόροι, σκουριές, κρυσταλλική ρηγμάτωση και άλλα σφάλματα. Οι δομικές και θερμικές μεταβολές που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια της θέρμανσης και ψύξης του μετάλλου προξενούν γύρω από τη συγκολλούμενη σύνδεση ισχυρό πεδίο εσωτερικών τάσεων. Η σημερινή τεχνική συγκόλλησης επιτρέπει την εκτέλεση συνδέσεων με συγκόλληση για διάφορα υλικά. Οι ιδιότητες όμως αυτών των συνδέσεων μπορούν να διαφέρουν πάρα πολύ από τις ιδιότητες του μητρικού υλικού και, πρακτικά, η χρησιμοποίησή τους να δημιουργεί ερωτηματικά. Οι συγκολλητές συνδέσεις δεν έχουν πρακτική εφαρμογή, όταν εμφανιστούν ρωγμές στην κόλληση και στη ΖΕΘ. Ο βαθμός της δομικής ανομοιογένειας καθώς και τα σφάλματα στην κόλληση εξαρτώνται από την πορεία των μεταλλουργικών φαινομένων κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, ενώ η πορεία αυτών των φαινομένων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι είναι αποφασιστικοί για τις ιδιότητες που θα αποκτήσουν οι συγκολλητές συνδέσεις. Οι παράγοντες αυτοί είναι αποφασιστικοί για τις ιδιότητες της συγκολλητής σύνδεσης και, επίσης, ορίζουν τη χαρακτηριστική ιδιότητα του συγκολλημένου υλικού, που ονομάζεται συγκολλητότητα.

### 1.3 Πηγές θερμότητας συγκόλλησης

Οι πηγές θερμότητας που χρησιμοποιούνται στην τεχνική των συγκολλήσεων έχουν σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μιας σειράς φυσικό-χημικών και μεταλλουργικών φαινομένων.

#### 1.3.1 Χημική ενέργεια

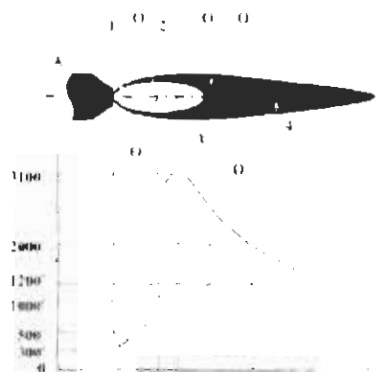
Η χημική ενέργεια για τη συγκόλληση μετάλλων και κραμάτων παρέχεται συνήθως με μορφή φλόγας αερίων. Τις περισσότερες φορές ως αέριο καύσης χρησιμοποιείται η ασετιλίνη, σπάνια το υδρογόνο, το φωταέριο, το μεθάνιο, το προπάνιο. Η ασετιλίνη χρησιμοποιείται περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο αέριο, γιατί παρουσιάζει πολύ μεγάλη θερμοκρασία φλόγας περίπου  $3000[^\circ\text{C}]$  επίσης παράγεται ευκολότερα. Η ασετιλίνη αποθηκεύεται σε φιάλη με μέγιστη πίεση  $15[at]$ , σε θερμοκρασία  $15[^\circ\text{C}]$ , διαλυμένη σε ακετόνη. Επιπλέον, η φιάλη είναι γεμάτη με πορώδη μάζα για τη διατήρηση της ασετιλίνης, που βρίσκεται υπό πίεση. Η χωρητικότητα της φιάλης είναι συνήθως  $40[l]$  ύδατος και περιέχει  $5.5[Kgr] C_2H_2$ . **Φλόγα αερίων.** Για τη συγκόλληση και την κοπή των μετάλλων χρησιμοποιείται, συνήθως, φλόγα που πετυχαίνεται με την καύση ασετιλίνης, με τη βοήθεια προσθήκης οξυγόνου **σχήμα 3** Η κανονική φλόγα ασετιλίνης οξυγόνου που πετυχαίνεται έχει τρεις διαφορετικές ζώνες. Η πρώτη ζώνη ονομάζεται και πυρήνας της φλόγας, αποτελείται από το μίγμα  $C_2H_2+O_2$  και σχηματίζει έναν λαμπερό κώνο. Σε λεπτό στρώμα της ζώνης αυτής δημιουργείται η πρωτογενής καύση του οξυγόνου και της ασετιλίνης, σε ογκομετρική αναλογία  $1:1$  με βάση την αντίδραση:  $C_2H_2+O_2=2CO+H_2+\Delta Q$  Από αυτήν την αντίδραση αποδεσμεύεται θερμότητα και η θερμοκρασία των αερίων ανέρχεται στους  $3100[^\circ\text{C}]$ . Στη συνέχεια της πρωτογενούς καύσης έχουμε τα αέρια  $CO$  και  $H_2$ . Η με έντονες αναγωγικές ιδιότητες. Τα αέρια αυτά, με την εμφύσηση της φλόγας, βγαίνουν έξω από τον πυρήνα και δημιουργούν τη δευτερογενή ζώνη, η οποία ονομάζεται «αναγωγική ζώνη της φλόγας». Τα αναγωγικά αυτά αέρια καίγονται με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα και δίνουν την τριτογενή ζώνη  $2CO+O_2=2CO_2$ ,  $2H_2+O_2=2H_2O$  Η θερμοκρασία καύσης σε αυτήν τη ζώνη είναι κατά πολύ χαμηλότερη αυτής της πρωτογενούς καύσης. Σύμφωνα με την αναλογία  $O_2/C_2H_2$  διακρίνονται οι εξής χαρακτηριστικές φλόγες **σχήμα 4**.

- Ουδέτερη φλόγα όταν  $O_2/C_2H_2=1-1.2$  (πυρήνας)
- Ανθρακωτική φλόγα  $O_2/C_2H_2=1$  (επιμήκης φλόγα)
- Οξειδωτική φλόγα  $O_2/C_2H_2=1.2$  (μικρή φλόγα)

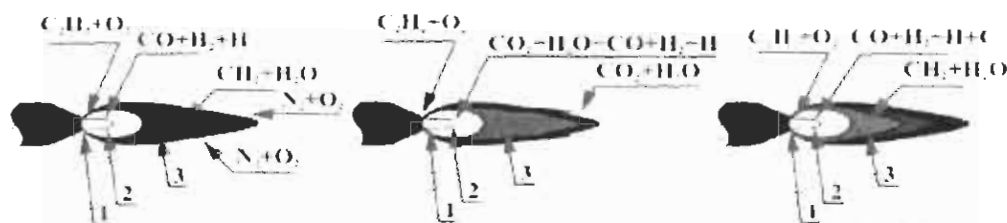
Η θερμική ισχύς της φλόγας αερίων υπολογίζεται από τη μέση τιμή της ζώνης καύσεως (αναγωγική ζώνη). Για τη φλόγα ασετιλίνης-οξυγόνου η

γραμμική ενέργεια υπολογίζεται από τη σχέση: 
$$E = 0,0135 \frac{V_{C_2H_2}}{V_S} \cdot \eta \left( \frac{KJ}{cm} \right)$$

όπου:  $V_{C_2H_2}$  παροχή ασετιλίνης, απ' την οποία τροφοδοτείται ο καυστήρας  $[dm^3/h]$   $V_S$  ταχύτητα συγκόλλησης  $[cm/h]$ .



Σχήμα 3 Διάκριση ζωνών φλόγας και θερμοκρασιών της φλόγας ασετιλίνης-Οξυγόνου



Σχήμα 4 Είδη φλογών ασετιλίνης - οξυγόνου: α) οξειδωτική, β) ουδέτερη, γ) ανθρακωτική

Ο συντελεστής  $[\eta]$  της αποδοτικής θέρμανσης του θερμαινόμενου υλικού δίνετε στον πίνακα 1. Η γραμμική ενέργεια κατά τη θερμική κοπή με φλόγα αερίων και με ροή οξυγόνου κατά προσέγγιση υπολογίζεται ως εξής:

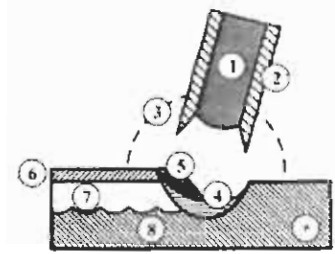
$$E = 0,4220(13,5 - g)g \left( \frac{KJ}{cm} \right) \text{ Όπου } [g] \text{ το πάχος του υλικού.}$$

Nr του ακροφυσίου	Παροχή $C_2H_2$ $V_{C_2H_2} [dm^3/h]$	$\eta$
1	100	0,92
2	160	0,98
3	250	0,72
4	400	0,58
5	680	0,48
6	1000	0,40
7	1000	0,32

Πίνακας 1 Η απόδοση θέρμανσης με φλόγα ασετιλίνης - οξυγόνου, ανάλογα με την παροχή ασετιλίνης

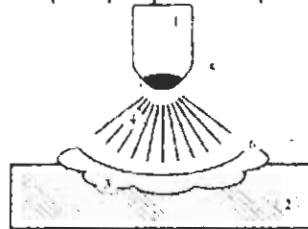
### 1.3.2 Ηλεκτρική ενέργεια

Η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση των μετάλλων παρέχεται συνήθως με μορφή ηλεκτρικού τόξου. Η δημιουργία του ηλεκτρικού τόξου συγκόλλησης πετυχαίνεται με τη χρησιμοποίηση συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος. Το είδος του ρεύματος που χρησιμοποιείται εξαρτάται από τη μέθοδο συγκόλλησης και από τον τύπο του συγκολλούμενου μετάλλου. Ως πηγές του συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται ηλεκτροπαραγωγό ζεύγη (κινητήρας-γεννήτρια) και ανορθωτές ενώ ως πηγές εναλλασσόμενου ρεύματος οι μετασχηματιστές



**Σχήμα 5** Συγκόλληση με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο: 1 πυρήνας ηλεκτροδίου, 2 επένδυση, 3 προστατευτική ατμόσφαιρα, 4 λουτρό του μετάλλου, 5 ρευστή σκουριά, 6 σκουριά σε στερεή κατάσταση, 7 κόλληση, 8 συγκολλούμενο αντικείμενο

**Διαδικασία συγκόλλησης με επενδυσμένο ηλεκτρόδιο.** Στο **σχήμα 5** φαίνεται η διαδικασία συγκόλλησης με επενδυσμένο ηλεκτρόδιο. Η θερμότητα του τόξου δημιουργεί το λουτρό [4] του μετάλλου. Στην επιφάνεια του λουτρού επιπλέει η ρευστή σκουριά [5] και, μετά τη στερεοποίηση της κόλλησης σχηματίζεται σ' αυτήν σε στερεή κατάσταση η εύθραυστη σκουριά [6]. **Ιδιότητες του ηλεκτρικού τόξου.** Για το άναμμα του τόξου έρχεται σε επαφή τρίβεται το ηλεκτρόδιο με το συγκολλούμενο αντικείμενο και τότε κλείνει το κύκλωμα του ρεύματος, ενώ η ηλεκτρική αντίσταση η οποία είναι μεγαλύτερη κατά την επαφή, προξενεί την υπερθέρμανση του άκρου του ηλεκτροδίου, στη συνέχεια, με την ελαφρά ανύψωση του ηλεκτροδίου, σχηματίζεται το τόξο. Το μήκος του τόξου, κατά προσέγγιση, είναι ίσο με τη διάμετρο του ηλεκτροδίου.



**Σχήμα 6** Τόξο συγκόλλησης: [1] ηλεκτρόδιο, [2] συγκολλούμενο τμήμα, [3] λουτρό του μετάλλου, [4] στήλη του τόξου, [5] ζώνη της καθόδου πτώσεως τάσεως [6] ζώνη της ανόδου πτώσεως τάσεως

Για να μπορεί να δημιουργηθεί το τόξο, το στρώμα του ατμοσφαιρικού αέρα κατά τη διέλευση του ρεύματος πρέπει να υποστεί ιονισμό, δηλαδή πρέπει να γίνει καλός αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος. Η πηγή του ιονισμού είναι η κάθοδος **σχήμα. 6** η οποία σε υψηλές θερμοκρασίες και με κατάλληλη υψηλή ηλεκτρική τάση εκπέμπει προς την άνοδο ηλεκτρόνια με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο. Τα ηλεκτρόνια κατά τη διαδρομή τους, συγκρούονται με μόρια των αερίων και ατμών - αφαιρούν απ' αυτά ηλεκτρόνια - και τότε τα μόρια αυτά καθίστανται ιόντα με θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Τα ηλεκτρόνια έλκονται από την άνοδο, ενώ τα ιόντα από την κάθοδο. Η απαραίτητη ηλεκτρική τάση περίπου 20[V]-35[V] για τη διατήρηση του τόξου εξαρτάται από το μήκος του τόξου, την ένταση του ρεύματος και από άλλες συνθήκες. Διακρίνονται τρεις ζώνες στις οποίες προξενείτε η πτώση της τάσεως:

1. Η ζώνη της καθόδου [5], με πάχος της τάξεως 1[mm]
2. Η ζώνη της ανόδου [6], με παρόμοιο πάχος.
3. Η στήλη του τόξου [4], με μορφή θερμικού πλάσματος, αποτελούμενου από ηλεκτρόνια και ιόντα.

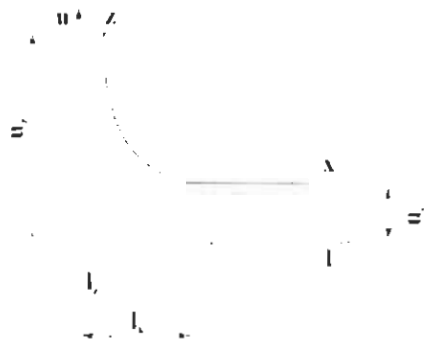


Η θερμοκρασία της καθόδου με συνεχές ρεύμα και αρνητική πολικότητα είναι περίπου  $2100[^\circ\text{C}]-2400[^\circ\text{C}]$ , της ανόδου  $2300[^\circ\text{C}]-2600[^\circ\text{C}]$ , ενώ στον άξονα της στήλης ανέρχεται πάνω από  $5000[^\circ\text{C}]$ . Το μήκος του τόξου είναι ευθέως ανάλογο της τάσης του. Η αύξηση του μήκους προξενεί την αύξηση της τάσης και για δεδομένη ισχύ την πτώση της έντασης. Αντίθετο αποτέλεσμα προξενεί η σμίκρυνση του τόξου. Η χρησιμοποίηση τόξου με όσο το δυνατόν μικρότερο μήκος είναι ωφέλιμη, διότι έχουμε λιγότερες απώλειες θερμότητας και μικρότερη επίδραση του περιβάλλοντος. Η παρουσία στο τόξο του μετάλλου του ηλεκτροδίου διαφόρων προσμίξεων με τη μορφή σταγόνων ατμών και αερίων διευκολύνουν τον ιονισμό στο χώρο του τόξου και η διατήρηση του αναμμένου τόξου πετυχαίνεται χωρίς διαλείμματα.

Μέταλλα		Στοιχεία ατμοσφαιρικού αέρα	Προστατευτικά αέρια
K 43	Ti 6.8	O 13.6	H 13.5
Na 5.1	Mn 7.4		CO <sub>2</sub> 14.4
Ca 6.1	Fe 7.8	N 14.5	Ar 15.7
-	-	-	He 24.5

Πίνακας 2 Το δυναμικό ιονισμού μερικών υλικών

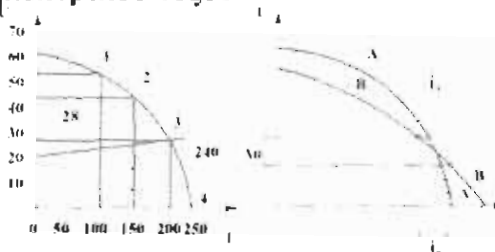
Η απαιτούμενη ενέργεια για την αφαίρεση ηλεκτρονίου από το άτομο, μετρούμενη σε ηλεκτρονιοβόλτ, ονομάζεται δυναμικό ιονισμού. Υλικά με χαμηλό δυναμικό ιονισμού διευκολύνουν το άναμμα του τόξου και επιδρούν θετικά στη διατήρησή του. Από τον πίνακα 2 συμπεραίνεται ότι για το σκοπό αυτό προσφέρονται καλύτερα τα αλκαλικά μέταλλα, όπως το νάτριο Na, το ασβέστιο Ca, και το κάλιο K, ενώ ο σίδηρος και τα αέρια έχουν υψηλό δυναμικό ιονισμού. Για το λόγο αυτό, όπως θα δούμε και στη συνέχεια στην περιγραφή των ηλεκτροδίων, στην επένδυση των ηλεκτροδίων εισάγονται τέτοιου είδους στοιχεία που διευκολύνουν τον ιονισμό. **Τάση και ένταση συγκόλλησης** Για το άναμμα του τόξου απαιτείται υψηλότερη τάση απ' ό,τι κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και όσο αυξάνεται ο ιονισμός στο χώρο του τόξου η τάση πέφτει, δηλαδή έχουμε φθίνουσα χαρακτηριστική **σχήμα 7**. Η αρχική τάση, αναγκαία για το άναμμα του τόξου και αυξημένη με την τιμή της πτώσης της τάσης στους ηλεκτραγωγούς, είναι η ελάχιστη τάση που πρέπει να έχει η μηχανή συγκόλλησης στην «εν κενό λειτουργία» της.



Σχήμα 7 Χαρακτηριστική του τόξου: Z σημείο έναρξης του ανάμματος του τόξου,  $U_z$  τάση ανάμματος,  $I_z$  ένταση,  $KX$  γραμμική σταθερή πορεία της τάσης  $U_c$

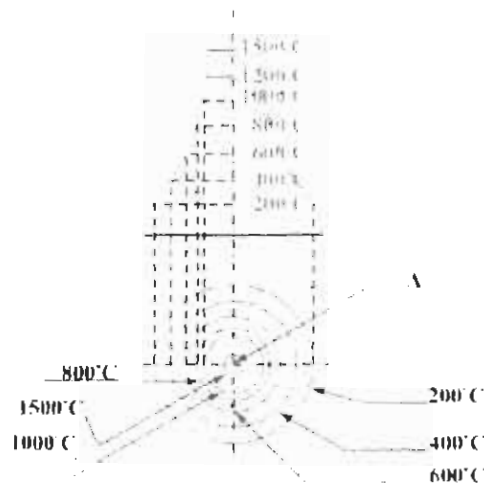
Αυτή η πτώση υπάρχει στους ακροδέκτες, επειδή το κύκλωμα του ρεύματος είναι ανοιχτό, δηλαδή το ηλεκτρόδιο ακόμη δεν ήρθε σε επαφή με το αντικείμενο.

Η αρχική ηλεκτρική τάση για τα τηκόμενα ηλεκτρόδια από χάλυβα για συνεχές ρεύμα είναι  $40[V]-50[V]$  ενώ για εναλλασσόμενο  $50[V]-90[V]$ . Μετά το άναμμα του τόξου η τάση στους ακροδέκτες του ρεύματος πέφτει στα όρια  $25[V]-30[V]$  και διατηρείται σταθερή. Στην πράξη ως συμβατική τάση εργασίας στους ακροδέκτες του κυκλώματος συγκόλλησης και για ένταση του ρεύματος μέχρι  $600[A]$  γίνεται αποδεκτή:  $U=20+0.04 \cdot I[V]$ , Άνω των  $600[A]$ ,  $U=44[V]$  Για τη χειρωνακτική συγκόλληση χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια με μεταλλικό πυρήνα διαμέτρου  $1:1.5:2.5:3.25:4:5:6[mm]$  και ο υπολογισμός της έντασης ρεύματος γίνεται κατά προσέγγιση με τον ακόλουθο τύπο:  $I=15+6 \cdot d[A]$  η διάμετρος του πυρήνα του ηλεκτροδίου. Σαν πρώτη συνθήκη της διατήρησης και ελαστικότητας του ηλεκτρικού τόξου



**Σχήμα 8** Στατικές χαρακτηριστικές: α) φθίνουσα στατική χαρακτηριστική: P ανοιχτό το ηλεκτρικό κύκλωμα,  $60[V]$ , στο σημείο 4 βραχυκύκλωση (αντίσταση του ίδιου κυκλώματος), επιτυγχάνεται η μέγιστη ένταση,  $240[A]$ . Χαράσσοντας τη γραμμή της ονομαστικής τάσης εργασίας επιτυγχάνεται η ένταση εργασίας, περίπου  $200[A]$  με τάση  $28[V]$ , β) για δεδομένη αύξηση ή πτώση της τάσης  $[V]$ , οι μεταβολές της έντασης ρεύματος στην περίπτωση πιο πτωτικής χαρακτηριστικής  $[A]$  είναι μικρότερες (πιο ωφέλιμες  $i_A < i_B$ ).

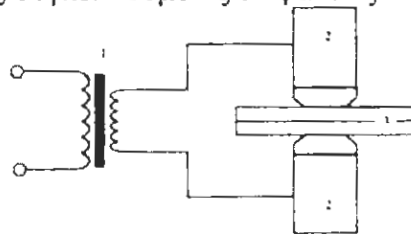
(δυνατότητα επιμήκυνσης του σε ανεκτά όρια) είναι η χαρακτηριστική στατική η οποία εκφράζει την σχέση της τάσης στους ακροδέκτες της πηγής του ρεύματος, ως προς το μέγεθος του ρεύματος συγκόλλησης **σχήμα 8**. **Κατανομή της θερμοκρασίας** κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης Όταν το τόξο κατευθύνεται προς το σημείο A και δε μετατοπίζεται **σχήμα 9**, η θερμότητα κατανέμεται προς όλες τις διευθύνσεις, ενώ οι ισόθερμες (καμπύλες με την αυτή θερμοκρασία) είναι κύκλοι, στους οποίους το κέντρο είναι το σημείο A. Όσο απομακρύνονται απ' αυτό το σημείο τόσο η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη. Όταν το τόξο μετατοπίζεται με ευθεία πορεία, οι ισόθερμες μετατρέπονται με ελλειψοειδή μορφή, και επιμηκύνονται τόσο περισσότερο όσο η ταχύτητα μετακινήσεως του ηλεκτροδίου στο αντικείμενο είναι μεγαλύτερη. Η παρεχόμενη ισχύς του ηλεκτρικού τόξου με συνεχές ρεύμα υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:  $q=U \cdot I [W/s]$  Για εναλλασσόμενο ρεύμα:  $q=U \cdot I \cdot \cos\phi [W/s]$  όπου:  $I$  ένταση ρεύματος συγκόλλησης,  $U$  τάση του τόξου  $[V]$ , η συντελεστής απόδοσης θερμότητας, ο οποίος εξαρτάται από τη μέθοδο συγκόλλησης καθώς και από το μήκος του τόξου και κυμαίνεται στα όρια:



Σχήμα 9 Κατανομή της θερμοκρασίας για μη κινούμενο τόξο

### 1.3.3 Θερμότητα Joule - Lenz

Η θερμότητα που εκλύεται κατά τη συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση, είναι αποτέλεσμα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική ενέργεια. Η θερμική ισχύς ισούται:  $q=I^2R$  [J/sec] όπου:  $I$  ένταση ρεύματος [A] και  $R$  αντίσταση [ $\Omega$ ]. Η συγκόλληση δεδομένου μετάλλου είναι τόσο ευκολότερη, όσο μεγαλύτερη είναι η ηλεκτρική αντίσταση και χαμηλότερη η θερμοκρασία τήξης του μετάλλου. Η συνολική αντίσταση στην περιοχή συγκόλλησης εξαρτάται από την αντίσταση των συγκολλούμενων μετάλλων και τη μεταβολή αυτής της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας, από την αντίσταση ανάμεσα στις επιφάνειες των ηλεκτροδίων και των συγκολλούμενων αντικειμένων καθώς και από τη μέθοδο συγκόλλησης και τη δύναμη πίεσεως. Κατά τη σημειακή και γραμμική συγκόλληση η μεγαλύτερη ποσότητα της θερμότητας εκλύεται ανάμεσα στις εσωτερικές συγκολλούμενες επιφάνειες.



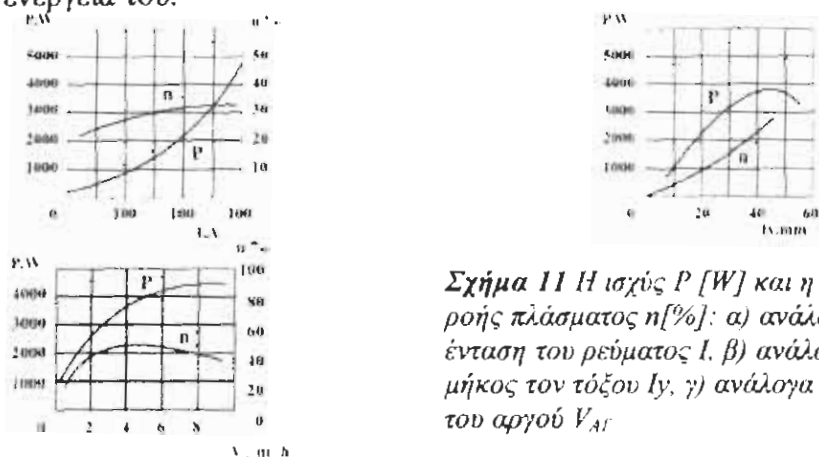
Σχήμα 10 Ηλεκτρολογικό κύκλωμα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική: 1 μετασχηματιστής, 2 ηλεκτρόδια, 3 συνδεόμενα μεταλλικά εξαρτήματα.

Στην περιοχή αυτή δημιουργείται μερική τήξη των επιφανειών, ενώ η αντίσταση του ρευστού μετάλλου είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερη από την αντίσταση του μετάλλου σε στερεή κατάσταση. Με το μέτρο αύξησης της θερμοκρασίας  $T$  η αντίσταση του μετάλλου αυξάνεται σύμφωνα με τη σχέση:  $R_t=r(1+aT)$  όπου:  $r$  η αρχική αντίσταση [ $\Omega$ ],  $a$  συντελεστής, [ $1/^\circ\text{C}$ ], στην περιοχή μέχρι  $100[^\circ\text{C}]$  ο συντελεστής [ $a$ ] κυμαίνεται στα όρια  $0.004-0.006$ . Κατά τη συγκόλληση με την ηλεκτροσκοριακή μέθοδο γίνεται η αξιοποίηση της θερμότητας Joule-Lenz. Η αντίσταση της σκουριάς, στην οποία τήκεται το σύρμα του ηλεκτροδίου, εξαρτάται σημαντικά από τη θερμοκρασία της ρευστής

σκουριάς. Η πύρωση της τετηγμένης σκουριάς, περίπου κατά  $100[^\circ\text{C}]$ , αυξάνει την αγωγιμότητα περίπου στο διπλάσιο. Η ειδική αγωγιμότητα των χρησιμοποιούμενων σκουριών κατά την ηλεκτροσκληρωτική συγκόλληση είναι περίπου  $0.3[\text{cm}^{-1}]-0.45[\text{cm}^{-1}]$  στους  $1200[^\circ\text{C}]$  και περίπου  $0.6[\text{cm}^{-1}]-0.85[\text{cm}^{-1}]$  στους  $1400[^\circ\text{C}]$ . Η συνολική αντίσταση κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από την τηκόμενη σκουριά κατά την ηλεκτροσκληρωτική συγκόλληση είναι ευθέως ανάλογη του βάθους του λουτρού της σκουριάς και αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας αυτού του λουτρού καθώς και του βυθισμένου σ' αυτή σύρματος ηλεκτροδίου.

### 1.3.4 Ροή πλάσματος

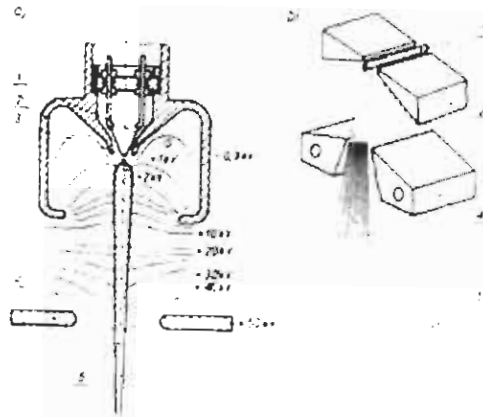
Το πλάσμα ως ιονισμένο αέριο αποτελείται από μίγμα θετικών ιόντων και ηλεκτρονίων. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες του μας θυμίζουν τις ιδιότητες των μετάλλων άρα το πλάσμα είναι καλός ηλεκτρικός αγωγός. Η χρησιμοποιούμενη ισχύς του πλάσματος ανέρχεται σε  $15[\text{KW}]-150[\text{KW}]$ , ενώ η θερμοκρασία του φτάνει από  $10[^\circ\text{C}]-30000[^\circ\text{C}]$ . Η ωφέλιμη ισχύς της ροής του πλάσματος αυξάνεται με την αύξηση της τιμής του ρεύματος, του μήκους του τόξου, και την αύξηση της πίεσης του πλάσματος *σχήμα 11*. Η θερμική ενέργεια μεταφερόμενη δια του πλάσματος προς την πλάκα μπορεί να υπολογιστεί:  $P = \alpha \cdot (T_1 - T_2) \cdot S$  όπου:  $R$  η επιφάνεια στην οποία γίνεται η μεταφορά θερμότητας,  $[\text{cm}^2]$ ,  $T_1$  και  $T_2$  οι θερμοκρασίες του πλάσματος και της πλάκας αντιστοίχως,  $\alpha$  συντελεστής μεταφοράς θερμότητας ανάμεσα στη ροή του πλάσματος, και της επιφάνειας του μετάλλου. Η απόδοση της θέρμανσης της πλάκας δια του πλάσματος είναι  $10\%-50\%$ . Η θερμική απόδοση της ροής πλάσματος αερίων με σημαντική ενθαλπία, όπως το  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NH}_3$ , είναι μεγαλύτερη από τη ροή πλάσματος αργού. Με την αύξηση του ρεύματος αυξάνεται καταρχήν η μέγιστη ενέργεια στο μέσο τμήμα της ροής του πλάσματος, ενώ η θερμική κηλίδα δε μεταβάλλει αναλογικά τις διαστάσεις της. Με την αύξηση της ταχύτητας διέλευσης της ροής αυξάνεται η θερμική ενέργεια του.



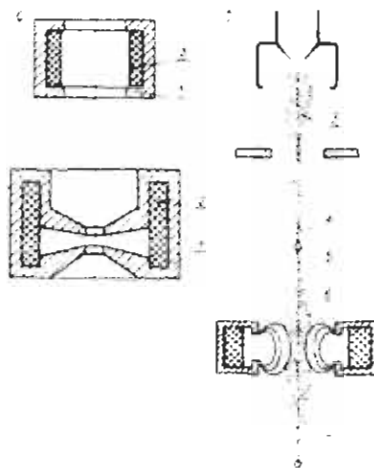
*Σχήμα 11 Η ισχύς  $P$  [W] και η απόδοση της ροής πλάσματος  $\eta$  [%]: α) ανάλογα με την ένταση του ρεύματος  $I$ . β) ανάλογα με το μήκος τον τόξου  $l$ . γ) ανάλογα με τη ροή του αργού  $V_{Ar}$*

### 1.3.5 Δέσμη ηλεκτρονίων ή ηλεκτρονοδέσμη

Κατά τη συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων, η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική προκύπτει από το αποτέλεσμα βομβαρδισμού του θερμαινόμενου αντικειμένου με ορμή στο ηλεκτρικό πεδίο. Για τη δημιουργία δέσμης ηλεκτρονίων χρησιμεύει η συσκευή που ονομάζεται γεννήτρια δέσμης, αποτελούμενη από την κάθοδο, το ηλεκτρόδιο καθοδήγησης της ισχύος της δέσμης, το λεγόμενο κύλινδρο *Wehnelt* καθώς και την άνοδο **σχήμα 12**. Τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια από την κάθοδο που βρίσκεται στο κενό επιταχύνονται και αποκτούν κινητική ενέργεια στο ηλεκτρικό πεδίο, διαμορφωμένο από την υψηλή τάση μεταξύ της καθόδου, του ηλεκτροδίου και της ανόδου. Η σχηματιζόμενη ηλεκτρονοδέσμη, ανάλογα με τις απαιτήσεις της διαδικασίας θέρμανσης μπορεί να δημιουργηθεί με μορφή κυλίνδρου, ορθογώνιου ή δακτυλίου. Ως τάση επιτάχυνσης εφαρμόζεται σταθερή τάση με τιμή  $30[KV]-150[KV]$ . Η ηλεκτρονοδέσμη αποτελείται από ορμητικά ηλεκτρόνια τα οποία, μετά την απελευθέρωση τους από τη γεννήτρια της δέσμης, μπορούν να συγκεντρωθούν από μαγνητικούς φακούς **σχήμα 13**. Μπορεί επίσης αυτή να αποκλίνει από το μαγνητικό πεδίο, πράγμα που διευκολύνει την ακριβή καθοδήγηση της ροής θερμότητας στη θερμαινόμενη θέση. Η συνθήκη θέρμανσης του υλικού στη θέση δράσης της ηλεκτρονοδέσμης είναι η μεγάλη ταχύτητα, δηλαδή η μεγάλη κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων. Το ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στο κενό μπορεί να επιταχυνθεί από τις δυνάμεις του ηλεκτρικού πεδίου, ενώ η αύξηση της κινητικής ενέργειας προκύπτει από το κόστος του έργου του ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο εξαρτάται από την τάση επιτάχυνσης  $[U_a]$ , εφαρμοσμένη μεταξύ καθόδου και ανόδου.



**Σχήμα 12** Γεννήτρια της δέσμης ηλεκτρονίων: α) κυλινδρική, β) επίπεδη: 1 πυρωμένη κάθοδος άμεσα, 2 ηλεκτρόδιο *Wehnelt* διαμόρφωση της δέσμης, 3 κωνικό τμήμα του ηλεκτροδίου *Wehnelt*, 4 άνοδος ή ηλεκτρόδιο επιτάχυνσης, 5 ηλεκτρονοδέσμη [6].



**Σχήμα 13** Συμπύκνωση της ηλεκτρονοδέσμης με μαγνητικούς φακούς: α) κατασκευή τυπικών φακών, β) γεννήτρια συμπυκνωμένης δέσμης με μαγνητικούς φακούς: 1 πυρήνας, 2 τολίγματα, 3 περιοχή δράσης του ηλεκτρικού πεδίου, 4 περιοχή μέγιστης συμπύκνωσης της δέσμης, 5 εστία συμπύκνωσης της δέσμης, 6 περιοχή δράσης του μαγνητικού πεδίου, 7 εστία μαγνητικής συμπύκνωσης [6].

Με την υπόθεση ότι η αρχική κίνηση των ηλεκτρονίων και η διεύθυνση δράσης των δυνάμεων του ηλεκτρικού πεδίου είναι σύμφωνες και με την παράλειψη της αρχικής ταχύτητας του ηλεκτρονίου ως πολύ μικρής συγκρινόμενης με την τελική ταχύτητα, η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου μπορεί να υπολογιστεί από τη

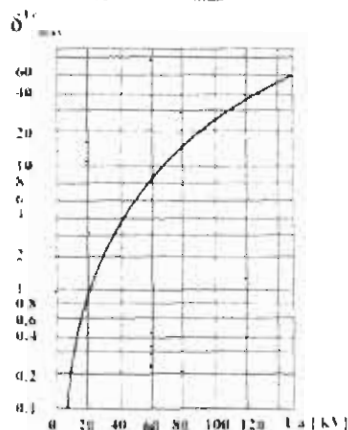
σχέση:  $E_c = \frac{m \cdot U_a^2}{2} = e \cdot U_a$  ενώ για  $n$  ηλεκτρόνια  $E_n = n \frac{m \cdot U_a^2}{2} = n \cdot e \cdot U_a$  όπου

$[E_c]$ ,  $[E_n]$  κινητική ενέργεια ηλεκτρονίου ή ηλεκτρονίων,  $m$  μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου,  $m = 9.11 \cdot 10^{-31} [Kgr]$  φορτίο του ηλεκτρονίου,  $e = 1.602 \cdot 10^{-19} C$ ,  $U_a$  τάση επιτάχυνσης ανάμεσα στην κάθοδο και στο ηλεκτρόδιο επιτάχυνσης, δηλαδή η άνοδος. Στις συσκευές για τη θέρμανση με ηλεκτρονοδέσμη, ο δρόμος της ροής των ηλεκτρονίων τελειώνει στο θερμαινόμενο εξάρτημα. Κατά τη σύγκρουση η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία εκλύεται σε λεπτό επιφανειακό στρώμα του υλικού. Η μέση ισχύς της ηλεκτρονοδέσμης στην περίπτωση της συνεχούς ροής μπορεί να γραφεί ως:  $P_a = U_a \cdot I_a$  όπου:  $P_a$  μέση ισχύς,  $U_a$  τάση επιτάχυνσης,  $I_a$  ρεύμα ροής των ηλεκτρονίων. Εάν η ροή των ηλεκτρονίων προσάγεται παλμικά, τότε η μέση ισχύς της δέσμης ισούται με:  $P_a = U_a \cdot I_{amax} \cdot t \cdot f_o$  όπου:  $I_{amax}$  μέγιστη τιμή του παλμού ρεύματος στη ροή ηλεκτρονίων,  $t$  χρόνος διάρκειας του παλμού,  $f_o$  συχνότητα επαναληψιμότητας των παλμών. Η ισχύς της ηλεκτρονοδέσμης καταναλώνεται για την τήξη και ατμοποίηση του μετάλλου και την κάλυψη των θερμικών απωλειών αγωγιμότητας και ακτινοβολίας καθώς και των απωλειών που δημιουργούνται από τη συνέπεια της διέγερσης και του ιονισμού των ευρισκόμενων ατόμων στη διαδρομή της ροής των ηλεκτρονίων. Η θερμική απόδοση της διαδικασίας συγκόλλησης με ηλεκτρονοδέσμη ισούται από 0.7-0.9. Στις συσκευές - μηχανές συγκόλλησης η δέσμη ηλεκτρονίων μπορεί να εστιασθεί σε επιφάνεια που ανέρχεται σε  $10^5 [mm^2]$ , πράγμα που επιτρέπει τη συγκέντρωση της θερμικής ροής σε επιφάνεια της τάξης των  $10^7 - 10^{10} [kW/m^2]$ . Οι τιμές της μοναδιαίας επιφανειακής ισχύος, που επιτυγχάνονται εδώ, υπερβαίνουν τις τιμές

που επιτυγχάνονται με άλλες μεθόδους συγκόλλησης. Το βάθος τήξης του μετάλλου στη θέση σύγκρουσης των ηλεκτρονίων για τα καθαρά μέταλλα

περιγράφει η σχέση:  $\delta_{max} = \alpha \cdot \frac{A}{Z} \cdot U_a^2$  όπου:  $\delta_{max}$ =μέγιστο βάθος εισχώρησης των

ηλεκτρονίων, στο οποίο η ταχύτητα των ηλεκτρονίων είναι ίση με μηδέν,  $\alpha$  σταθερά,  $A$  μαζικός αριθμός του στοιχείου,  $Z$  ατομικός αριθμός του στοιχείου,  $U_a$  τάση επιτάχυνσης. Για τον καθαρό σίδηρο το μέγιστο βάθος εισχώρησης των ηλεκτρονίων περιγράφεται με τη σχέση:  $\delta_{max}^{Fe} = 3 \cdot 10^{-9} \cdot U_a$



Σχήμα 14 Βάθος εισχώρησης ηλεκτρονίων στο σίδηρο και σε άλλα μέταλλα συναρτήσει της τάσης επιτάχυνσης

Η σχέση αυτή παρουσιάζεται γραφικά στο *σχήμα 14*. Από το διάγραμμα του *σχήματος 14* προκύπτει ότι το βάθος εισχώρησης των ηλεκτρονίων δεν είναι μεγάλο, αλλά παρά ταύτα το υλικό τήκεται σε σημαντικό βάθος. Απλοποιώντας, το φαινόμενο αυτό εξηγείται από τη μεγάλη πυκνότητα της ροής της θερμότητας, που, ως αποτέλεσμα αυτού, στη θέση σύγκρουσης των ηλεκτρονίων συμβαίνει αυτοστιγμεί ατμοποίηση του μετάλλου. Οι ατμοί του μετά εκτοξεύονται στο εξωτερικό, σχηματίζοντας με την ίδια πίεση διάκενο, στο οποίο εισχωρεί η δέσμη των ηλεκτρονίων προξενώντας την παραπέρα τήξη και ατμοποίηση του μετάλλου. Ο μηχανισμός που περιγράφηκε είναι σε μεγάλο βαθμό απλοποιημένος, στην πραγματικότητα το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά πολύπλοκο.

### 1.3.6 Δέσμη των Laser

Η χαρακτηριστική ιδιότητα της ακτινοβολίας των Laser είναι η δυνατότητα επίτευξης δέσμης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, που διακρίνονται με τη μεγάλη παραλληλότητα της ροής, την πυκνότητα της ενέργειας καθώς και τη μικρή σκέδαση. Η χρησιμοποίηση των διαφόρων τύπων ακτινοβολίας Laser προκύπτει από τις ιδιότητές τους:

- η περιοχή δράσης της υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι μόνο στην επιφάνεια του αντικειμένου
- η περιοχή ακτινοβολίας των ορατών κυμάτων χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη εισχώρηση για τη θέρμανση των αντικειμένων
- η περιοχή ακτινοβολίας κοντά στην υπεριώδη χαρακτηρίζεται με ακόμη

μεγαλύτερη εισχώρηση για τη θέρμανση των αντικειμένων σε σχέση με την ορατή ακτινοβολία.

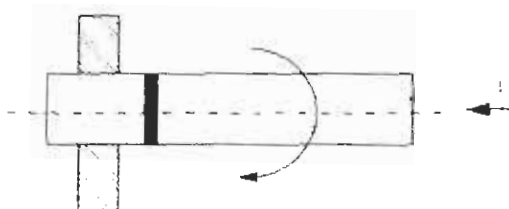
Για τις παραπάνω περιοχές ακτινοβολίας που έγινε αναφορά, χαρακτηριστικό είναι ότι, ανάλογα από τη χημική σύσταση των θερμαινόμενων υλικών και των φυσικό-χημικών ιδιοτήτων, ο συντελεστής ανάκλασης μεταβάλλεται σε μεγάλα όρια διαφορετική άρα η απόδοση θέρμανσης και εξαρτάται μεταξύ άλλων από το χρώμα των υλικών, με το οποίο είναι εκτελεσμένα τα συνδεόμενα εξαρτήματα. Η περιοχή ακτινοβολίας μακριά από την υπεριώδη είναι απαλλαγμένη από αυτά τα ελαττώματα. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη διεισδυτικότητα, ελάχιστο συντελεστή ανάκλασης, που δεν εξαρτάται από το χρώμα των θερμαινόμενων υλικών. Η ισχύς της δέσμης *Laser*, ανάλογα με τη μορφή εκπομπής, ανέρχεται: η παλμική σε  $10^4$ - $10^{11}$  [ $W/mm^2$ ] και η συνεχής  $10^2$ - $10^7$  [ $W/mm^2$ ]

### 1.3.7 Εξωθερμικές αντιδράσεις

Η θερμότητα από τις εξωθερμικές αντιδράσεις χρησιμοποιείται συνήθως για τη συγκόλληση ελασμάτων με μεγάλες διατομές. Η βάση των εξωθερμικών αντιδράσεων είναι η καύση μίγματος *Al* και οξειδίων του σιδήρου.  $Fe_2O_3 + 2Al = 2Fe + Al_2O_3 + 167.7 [KJ]$ . Η θερμοκρασία αυτής της αντίδρασης ανέρχεται στους  $2400 [^{\circ}C]$ . Άλλη μέθοδος χρησιμοποίησης της εξωθερμικής αντίδρασης αλλά με πορεία ασυγκρίτως καλύτερη, είναι η συγκόλληση με έκρηξη

### 1.3.8 Θερμότητα τριβής

Η παραγόμενη θερμότητα κατά τη διάρκεια της μηχανικής τριβής *σχήμα 15* χρησιμοποιείται συνήθως για τη μετωπική συγκόλληση αξόνων και σωλήνων. Η διεργασία αυτή γίνεται σε ειδικούς τόνους για το σκοπό αυτό. Στην προκειμένη περίπτωση αναπτύσσεται ξηρή τριβή μεταξύ περιστρεφόμενων επιφανειών, με αντίθετη φορά περιστροφής των συνδεόμενων αξόνων. Ο ένας άξονας μπορεί να είναι σταθερός



*Σχήμα 15* Διαδικασία συγκόλλησης με τριβή κυρίως αποτελέσματα με πολύ υψηλές και πίεση.



## Κεφάλαιο 2

### 2. Ψαθυρότητα και μηχανική των θραύσεων

#### 2.1 Ψαθυρότητα των χαλύβων και των συγκολλητών συνδέσεων

#### 2.2 Γενικά χαρακτηριστικά της ψαθυρότητας των χαλύβων.

Τα υλικά διαίρουνται σε: πλαστικά, ελαστικά και ψαθυρά. Ο χάλυβας ανήκει στα ελαστικό - πλαστικά υλικά. Στην καθημερινή πρακτική, για την πλαστικότητα ή την ψαθυρότητα ορισμένου υλικού αναφερόμαστε σε δοκίμιο με λεία επιφάνεια, που δοκιμάζεται σε εφελκυσμό, κάμψη ή στρέψη. Τα ψαθυρά υλικά θραύονται χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις ή με πάρα πολύ μικρές μη αντιληπτές πλαστικές παραμορφώσεις. Για το σπάσιμο τους καταναλίσκεται σχετικά ελάχιστο έργο. Τα πλαστικά και τα ελαστικό - πλαστικά υλικά καταστρέφονται μόνο με σημαντικές εκτεταμένες παραμορφώσεις, ενώ για το σπάσιμο ή τη θραύση τους επιβάλλεται η χρήση μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας απ' ό,τι για το σπάσιμο ψαθυρών υλικών, με τις ίδιες διαστάσεις των δοκιμίων. Η εκτίμηση της ψαθυρότητας ή της πλαστικότητας του υλικού, με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμασιών εφελκυσμού, στρέψης ή κάμψης λείων δοκιμίων, για πολλούς κλάδους της τεχνικής παρουσιάζεται μη ικανοποιητική. Τέτοια εκτίμηση είναι λιγότερο σημαντική για τους χάλυβες που χρησιμοποιούνται στις συγκολλητές κατασκευές. Υλικά τα οποία κατά τον εφελκυσμό ή την κάμψη λείων δοκιμίων παρουσίασαν πολύ μεγάλη επιμήκυνση και στένωση, στις συγκολλητές κατασκευές, σε πολλές περιπτώσεις, θραύονται ολικά κατά ψαθυρό τρόπο. Είναι γνωστές οι περιπτώσεις θραύσης γεφυρών, πλοίων, δεξαμενών και αεραγωγών, στις οποίες το υλικό έσπασε κατά ψαθυρό τρόπο, παρόλο που οι δοκιμασίες αποδοχής με τη βοήθεια των δοκιμασιών εφελκυσμού και κάμψης λείων δοκιμίων παρουσίαζε μεγάλη ικανότητα για πλαστικές παραμορφώσεις.

Το φαινόμενο αυτό κατά την αρχική χρονική περίοδο ήταν δύσκολο να κατανοηθεί και να εξηγηθεί, παρόλο που η ψαθυρή θραύση εμφανιζόταν με πολύ μικρές φορτίσεις, ενώ, μερικές φορές, και με παντελή έλλειψη εξωτερικών φορτίσεων. Το φαινόμενο **μετάβασης ή μεταλλαγής** του χάλυβα από πλαστική σε ψαθυρή κατάσταση μπορεί να εμφανισθεί σε διάφορες κατασκευές, αλλά πιο ισχυρά εμφανίζεται στις συγκολλητές κατασκευές. Η συγκόλληση ασφαλώς δημιουργεί ενοϊκές μεταλλουργικές και τάσεων συνθήκες για την ψαθυρή θραύση του υλικού. Μπορεί να ειπωθεί ότι η ψαθυρότητα του χάλυβα είναι στενά συνδεδεμένη με τη **συγκολλητότητά** του και επομένως με τη συγκόλληση. Οι σημαντικές αβαρίες των σκελετών πλοίων και, επιπλέον, οι αβαρίες άλλων συγκολλητών κατασκευών προξένησαν το ενδιαφέρον για το πρόβλημα της μεταλλαγής του χάλυβα σε ψαθυρή κατάσταση. Προς την κατεύθυνση αυτή πραγματοποιήθηκαν πάρα πολλές ερευνητικές εργασίες, Σταδιακά όμως το φαινόμενο αυτό αποτέλεσε αντικείμενο πολλών θεωρητικών ερευνών και δημιουργήθηκαν θεωρίες που καθορίζουν τη σχέση μεταξύ των γενικών φυσικών ιδιοτήτων του υλικού, την κατασκευή του και τη δυνατότητα της ψαθυρής θραύσης. Μεταξύ αυτών των θεωριών, με τη σημαντικότερη πρακτική εφαρμογή των τελευταίων ετών, είναι η ελαστική - γραμμική μηχανική των θραύσεων, που

επεξεργάστηκε κυρίως επί τη βάση της θεωρίας του *Griffith* και *Irwin*, καθώς και η μηχανική των θραύσεων για σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις, επεξεργασμένη από την αγγλική σχολή (*general welding fracture mechanics*). Οι αρχές της ελαστικής - γραμμικής μηχανικής των θραύσεων επιτρέπουν τον καθορισμό με βάση τις εργαστηριακές δοκιμασίες του συντελεστή εντάσεως των τάσεων  $K$ , με τη διατήρηση των ελαστικών - γραμμικών ιδιοτήτων του υλικού στη βάση της εγκοπής. Η μηχανική των θραύσεων για σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις επιτρέπει, επίσης, να καθορισθούν οι συνθήκες των τάσεων ανάπτυξης της ρωγμής για υλικά που δεν πληρούν τις συνθήκες παραμόρφωσης στη ακμή της εγκοπής σύμφωνα με τις αρχές της ελαστικής - γραμμικής μηχανικής των θραύσεων. Τώρα, κατέχουμε το πρόβλημα της ψαθυρής θραύσης των χαλύβων αρκετά καλά και γνωρίζουμε ποια μέσα προφύλαξης πρέπει να χρησιμοποιηθούν, για να αποφευχθεί η εμφάνιση αυτού του φαινομένου. Παρά ταύτα πολλά προβλήματα παραμένουν άλυτα και επιβάλλεται η παραπέρα ερευνά τους. Αυτό αφορά ιδιαίτερα στις μεθόδους δοκιμασίας της ψαθυρής θραύσης όπως και στα κριτήρια ερμηνείας και εκτίμησης των αποτελεσμάτων έρευνας.

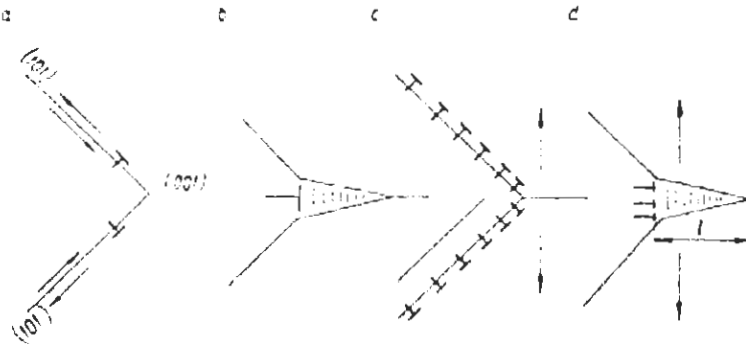
### 2.3 Μηχανισμός ανάπτυξης θραύματος - θεωρία *Griffith*

Μετά την επίτευξη της κρίσιμης φόρτισης, έχουμε απώλεια της συνοχής του κρυσταλλογραφικού πλέγματος, δηλαδή δημιουργείται θραύσμα. Με τη μακροσκοπική έννοια διακρίνονται τρία είδη θραυσμάτων: ψαθυρό, σχιστότητας και ολίσθησης. Το ψαθυρό θραύσμα, το οποίο χαρακτηρίζει τα τέλεια ψαθυρά υλικά, συμβαίνει τότε, όταν η φόρτιση προξενεί απώλεια συνοχής στο κρυσταλλογραφικό πλέγμα, στην περιοχή των ελαστικών παραμορφώσεων. Πριν την απώλεια της συνοχής, δεν εμφανίζονται καθόλου πλαστικές παραμορφώσεις.

Στο θραύσμα σχιστότητας όμως, πριν την απώλεια της συνοχής, εμφανίζονται κάποιες πλαστικές παραμορφώσεις. Άρα αυτό είναι, κατά κάποιο βαθμό, θραύσμα μικτό, προξενούμενο με ελαστική παραμόρφωση και, μερικώς, με πλαστική. Το θραύσμα ολίσθησης συμβαίνει στα ολισθητικά επίπεδα με το αποτέλεσμα ισχυρής παραμόρφωσης, άρα με εργοσκλήρυνση (ισχυροποίησης του μετάλλου). Το ψαθυρό θραύσμα και το θραύσμα σχιστότητας και ολίσθησης εύκολα διακρίνονται από την όψη της επιφάνειάς τους. Το θραύσμα σχιστότητας και το ψαθυρό έχουν κοκκώδη επιφάνεια. Η επιφάνεια του θραύματος ολίσθησης, όμως, έχει θαμπή και ινώδη όψη. Από τη μακροσκοπική άποψη, ο διαχωρισμός του θραύματος σχιστότητας από το ψαθυρό είναι δύσκολος. Το μεγαλύτερο, όμως, ποσοστό των ψαθυρών θραυσμάτων των πολυκρυσταλλικών σωμάτων μπορεί να θεωρείται θραύσμα σχιστότητας, επειδή, πριν την απώλεια της συνοχής, πάντοτε προϋπάρχουν ασήμαντες πλαστικές παραμορφώσεις στα κρυσταλλογραφικά επίπεδα που είναι διατεταγμένα στον πολυκρυστάλλο, με ωφέλιμο τρόπο για την ολίσθηση. Για το λόγο αυτό, στην πρακτική, τα εμφανιζόμενα ψαθυρά θραύσματα ονομάζονται θραύσματα σχιστότητας. Ο μηχανισμός ανάπτυξης του θραύματος στο πολυκρυσταλλικό υλικό επιτυγχάνεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η έναρξη της ρωγμής, το δεύτερο η διάδοση της σε όλη τη διατομή του πολυκρυστάλλου. Όσον αφορά την έναρξη των ρωγμών, περισσότερο διαδεδομένη θεωρία είναι αυτή που βασίζεται στο μοντέλο των γραμμοαταξιών. Σύμφωνα με τις ερευνητικές εργασίες [3] και [4], οι

θεωρίες, για την ανάπτυξη ρωγμών συνεπεία των γραμμοαταξιών διαίρουνται σε τρεις κατηγορίες:

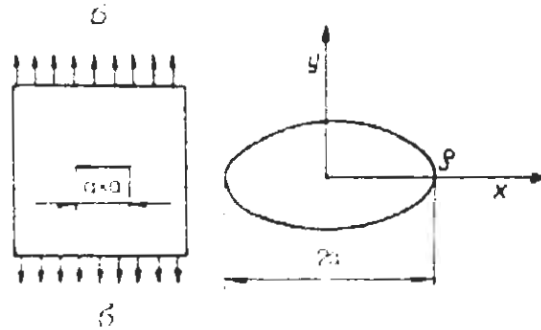
1. συσσωμάτωση συσσωρευμένων μετατοπιζομένων αταξιών στα ολισθητικά επίπεδα για κάθε είδος εμποδίων, όπως διδυμίας, σύνορα κόκκων, ξένες φάσεις,
2. αλληλεπίδραση των γραμμοαταξιών σε διασταυρωμένα ολισθητικά επίπεδα,
3. αλληλεπίδραση των γραμμοαταξιών, χωρίς τη συμμετοχή των εμποδίων ή στα αδύνατα εμπόδια.



Σχήμα 1 Σχήμα Cottrell δημιουργίας πυρήνωσης της αιχμής της ρωγμής με αποτέλεσμα τη διασταύρωση των ολισθητικών επιπέδων:

- a. γραμμοαταξίες από τα επίπεδα (101) συναντώνται στο επίπεδο (001) και σχηματίζουν νέα γραμμοαταξία σ' αυτό το επίπεδο
- b. η οποία είναι γραμμοαταξία ακμής με μεγάλο διάνυσμα Burgers,
- c. οι επόμενες γραμμοαταξίες προωθούν τον πυρήνα.
- d. ο πυρήνας προωθείται στη ρωγμή.

Το αποτέλεσμα συσσωμάτωσης των γραμμοαταξιών, με το οποίο προξενείται η έναρξη των ρωγμών φαίνεται καλύτερα στο σχήμα Cottrell [3] σχήμα 1. Εκτός από το σχήμα Cottrell, υπάρχουν, ακόμη, και άλλα σχήματα και θεωρίες που εξηγούν την έναρξη των ρωγμών [3, 4, 5, 6, 7]. Η έναρξη της ρωγμής, παρά την προξένηση ασυνέχειας, δεν είναι επικίνδυνη, από την άποψη του πολυκρυσταλλικού θραύσματος σε όλη τη διατομή. Για τη διάδοση της ρωγμής επιβιβάζεται η ύπαρξη κατάλληλων συνθηκών τάσεων. Τις συνθήκες διάδοσης της ρωγμής στα τέλεια ψαθυρά υλικά τις εξηγεί ο Griffith. Βασίζομενος στο ότι η θεωρητική αντοχή του μετάλλου, που προκύπτει από τις δυνάμεις διατομικής αλληλεπίδρασης, είναι σημαντικά υψηλότερη από την πραγματική, υπέθεσε ότι σ' αυτό πρέπει να υπάρξουν ασυνέχειες με χαρακτήρα ρωγμών, οι οποίες εξασθενούν τη συνοχή. Στα άκρα αυτών, των ρωγμών πρέπει να εμφανισθεί ισχυρή συγκέντρωση τάσεων. Ο Griffith δέχθηκε ως μοντέλο πλάκα με πάχος ίσο με την μονάδα, η οποία είχε ασυνέχεια με μορφή ρωγμής ελλειπτικής διατομής σχήμα 2. Για αυτό το μοντέλο καθόρισε τη σχέση ανάμεσα στην εφαρμοσμένη τάση που αναπτύσσει τη ρωγμή και το μήκος της ασυνέχειας  $2a$ . Με τη θεωρία του Griffith, η ρωγμή θα αναπτύσσεται, εάν η πτώση της ελαστικής ενέργειας προξενούμενη από την αύξηση του μήκους του διακένου  $a$  είναι μεγαλύτερη από ό,τι η αύξηση της επιφανειακής ενέργειας που προξενείται από την αύξηση της αναπτυσσόμενης επιφάνειας της ρωγμής.



Σχήμα 2 Υποθετικό διάκενο του Griffith  $a$  ακτίνα στρογγύλευσης της ακμής του διαστήματος,  $2a$  μήκος του διάκενου,  $\sigma$  τάση.

Η κρίσιμη τάση ανάπτυξης της ρωγμής εκφράζεται με τον τύπο,  $\sigma_{kp} = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot a}}$

όπου:  $E$  ελαστικό μέτρο,  $\gamma$  μοναδιαία επιφανειακή ενέργεια,  $a$  μήκος του διάκενου. Εάν η τάση είναι μεγαλύτερη από την  $\sigma_{kp}$ , η ρωγμή θα προωθείται. Η αύξηση του διακένου μειώνει την τιμή της  $\sigma_{kp}$  και γι' αυτό η ρωγμή που άρχισε να προωθείται, θα απαιτεί όλο και μικρότερη κρίσιμη τάση. Η θεωρία του Griffith επιβεβαιώθηκε πειραματικά σε τέλεια ψαθυρά υλικά. Για τα μέταλλα, ο μηχανισμός διάδοσης της ρωγμής είναι λίγο διαφορετικός, επειδή στην περιοχή της ακμής της εγκοπής, κατά την έναρξη ανάπτυξης ακόμη και εύθραυστου θραύσματος, σχηματίζεται κάποια πλαστική παραμόρφωση. Απ' αυτήν την άποψη, για τους κατασκευαστικούς χάλυβες ο *Orowan* πρότεινε το συσχετισμό της ενέργειας που αναπτύσσει νέα επίπεδα διάδοσης της ρωγμής με την ενέργεια της πλαστικής παραμόρφωσης στην περιοχή της ακμής της εγκοπής. Ο *Orowan*, ο *Irwin* καθώς και ο *Cottrell* χρησιμοποίησαν τη θεωρία του Griffith, για να δημιουργήσουν τη θεωρία της μηχανικής ψαθυρής θραύσης των κατασκευαστικών υλικών. Ο *Cottrell* και ο *Wells* καθόρισαν τη σχέση ανάμεσα στην τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης στην περιοχή της ακμής της εγκοπής, μέχρι τη στιγμή εμφάνισης της ρωγμής, και στο μέγεθος της μοναδιαίας δύναμης  $G$  ανάπτυξης της

ρωγμής:  $G = \frac{\pi}{4} R_e \cdot \delta$  όπου:  $R_e$  όριο πλαστικότητας,  $\delta$  μέγεθος πλαστικής

διάνοιξης στη ρίζα της εγκοπής. Βάσει αυτής της έκφρασης αναπτύχθηκε η νέα μέθοδος δοκιμασίας της ανθεκτικότητας των χάλυβων στην ψαθυρή θραύση, ονομαζόμενη *CO* (*Crack opening displacement*). Για το θέμα των δυνατοτήτων ανάπτυξης ψαθυρής θραύσης στα κατασκευαστικά υλικά, υπάρχει μια σειρά αναλυτικών εργασιών. Ο *Szimilewicz* διερευνά τις συνθήκες διάδοσης της ρωγμής στους χάλυβες με την επίδραση των εσωτερικών τάσεων. Σύμφωνα μ' αυτόν, το κρίσιμο μήκος της ρωγμής  $a_{kp}$ , δηλαδή το ελάχιστο μήκος με το οποίο υπάρχει δυνατότητα διάδοσης της ρωγμής, με κόστος την αποθηκευμένη ελαστική ενέργεια, η οποία προκύπτει από τις εσωτερικές τάσεις, υπολογίζεται από τον

τύπο:  $a_{kp} = \frac{A_y E}{k \sigma_o^2} [mm]$  όπου:  $A_y$  ειδικό έργο που απαιτείται για τη διάδοση της

ρωγμής [ $Kgr \cdot mm$ ],  $E$  ελαστικό μέτρο Young [ $Kgr/mm^2$ ],  $K$  συντελεστής που εξαρτάται από τη θέση της ρωγμής στο φύλλο,  $\sigma_o$  εσωτερική τάση [ $Kgr/mm^2$ ]. Με βάση αυτόν τον τύπο, υπολογίστηκε ότι για χάλυβα με όριο πλαστικότητας  $35[Kgr/mm^2]$ - $45[Kgr/mm^2]$  και τάσεις, μετά τη συγκόλληση, της τάξης των

$40[\text{Kg}/\text{mm}^2]$  το κρίσιμο μήκος της ρωγμής είναι  $8[\text{mm}]-15[\text{mm}]$  Δηλαδή, ότι γι' αυτού του τύπου χάλυβα η ψαθυρή ρωγή μπορεί να αναπτύσσεται συνεπεία της δράσης των ιδίων εσωτερικών τάσεων, εάν το μήκος της ρωγμής δεν υπερβεί τα  $8[\text{mm}]-15[\text{mm}]$ . Σε αντίθετη περίπτωση η ρωγή δε θα προωθείται. Ενώ η ρωγή με χαρακτήρα ολισθητικού θραύσματος θα προωθείται με την επίδραση των ιδίων εσωτερικών τάσεων, εάν το μήκος της ρωγμής υπερβεί την τιμή των  $200[\text{mm}]-300[\text{mm}]$ .

## 2.4 Παράγοντες που προξενούν την ψαθυρότητα των χαλύβων

Οι ψαθυρές θραύσεις χαρακτηρίζονται από το ό,τι αναπτύσσονται στο υλικό χωρίς πλαστικές παραμορφώσεις ή με πάρα πολύ μικρές μη αντιληπτές πλαστικές παραμορφώσεις. Στην περίπτωση που το υλικό έχει ικανοποιητική πλαστικότητα, για καθορισμένες συνθήκες εργασίας της κατασκευής, η ψαθυρή θραύση είναι εντελώς αδύνατον να συμβεί. Η μετάβαση του πλαστικού υλικού σε ψαθυρή κατάσταση μπορεί να προξηνηθεί από πολλούς παράγοντες. Μεταξύ αυτών, από τους βασικότερους που πρέπει να υπολογίσουμε είναι:

οι συνθήκες εργασίας του υλικού στην κατασκευή, δηλαδή:

- η τριαξονική κατάσταση τάσεων
- η αυξημένη ταχύτητα παραμόρφωσης (δυναμική φόρτιση)
- η θερμοκρασία εργασίας του υλικού στην κατασκευή.

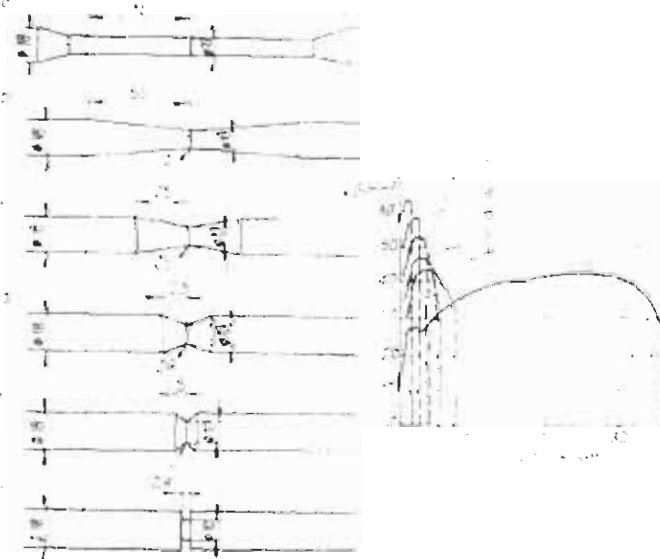
η μεταλλουργική κατάσταση του υλικού, δηλαδή:

- η χημική σύσταση
- ο βαθμός και ο τρόπος αποξείδωσης και απαέρωσης
- η κατάσταση μετά από θερμική κατεργασία.

η διαδικασία δημιουργίας της κατασκευής.

οι συνθήκες εκμετάλλευσης της κατασκευής.

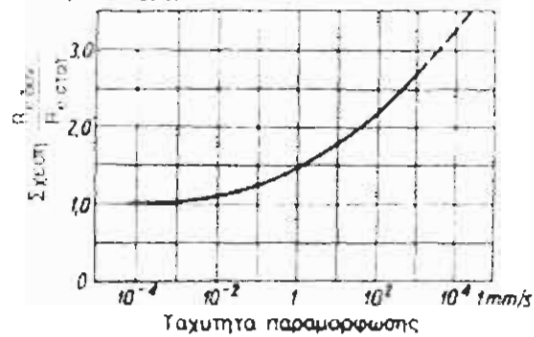
### 2.4.1 Επίδραση των συνθηκών εργασίας του υλικού στην κατασκευή



Σχήμα 3 Επίδραση της εγκοπής του δοκιμίου στο όριο πλαστικότητας, στην αντοχή εφέλκυσμού και στην επιμήκυνση

### 2.4.2 Κατάσταση τάσεων και ταχύτητα παραμόρφωσης

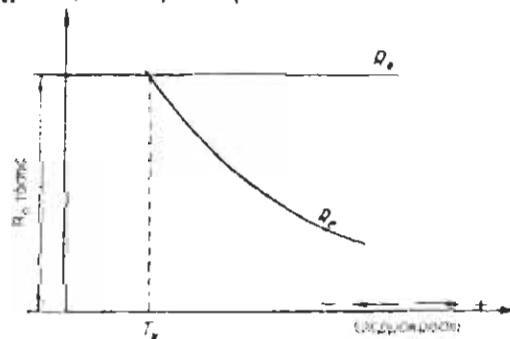
Η τριαξονική κατάσταση τάσεων αναπτύσσεται, μεταξύ άλλων, με το αποτέλεσμα επίδρασης των εγχοπών. Εξαιτίας της συγκέντρωσης των τάσεων στη ακμή της εγχοπής, ελαττώνεται απότομα η επιμήκυνση του δοκιμίου κατά τον εφελκυσμό του, ενώ αυξάνεται το όριο πλαστικότητας *σχήμα 3*. Το απαιτούμενο έργο για την καταστροφή του λείου δοκιμίου *σχήμα 3a* είναι μεγάλο, ενώ για τα δοκίμια με εγχοπή *σχήμα 3e* και *σχήμα 3f* ελάχιστο. Άρα με την επίδραση της εγχοπής συμβαίνει ισχυρή μείωση της ικανότητας του υλικού για πλαστικές παραμορφώσεις. Παρόμοια με την περίπτωση της εγχοπής, η αύξηση της ταχύτητας παραμόρφωσης προξενεί την αύξηση του ορίου πλαστικότητας και την ελάττωση της πλαστικότητας *σχήμα 4*.



*Σχήμα 4* Επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης στην αύξηση του ορίου πλαστικότητας, εκφραζόμενη με τη σχέση σύμφωνα με Siebel

### 2.4.3 Θερμοκρασία μετάβασης ή μεταλλαγής από πλαστική κατάσταση σε ψαθυρή. Έννοια της θερμοκρασίας ψαθυρότητας

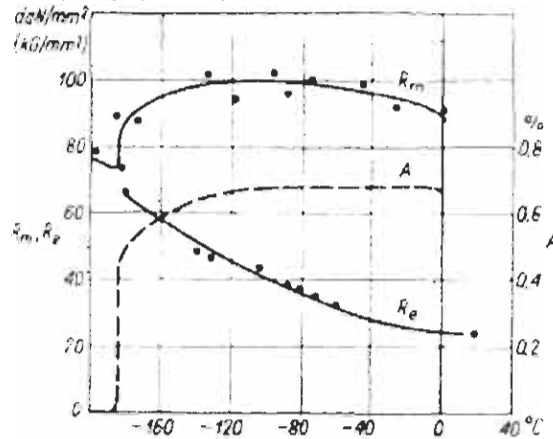
Εξαιρετικά μεγάλη επίδραση στη μετάβαση του υλικού στην ψαθυρή κατάσταση ασκεί η χαμηλή θερμοκρασία, ιδιαίτερα όταν εμφανίζεται συγχρόνως και τριαξονική κατάσταση τάσεων, όπως και η δυναμική φόρτιση. Η θερμοκρασία, στην οποία ο λόγος  $R_e/R_m=1$  ονομάζεται **θερμοκρασία ψαθυρότητας  $T_k$**  *σχήμα 5*, ενώ η τάση



*Σχήμα 5* Έννοια της θερμοκρασίας ψαθυρότητας  $T_k$  και της αντοχής σχιστότητας  $R_o$

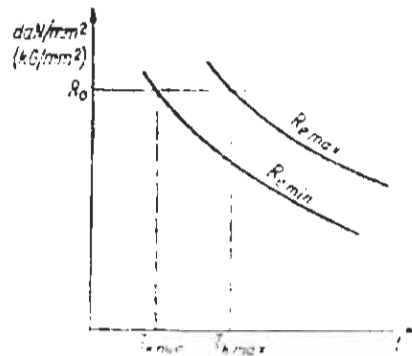
θραύσης σ' αυτήν τη θερμοκρασία ονομάζεται αντοχή σχιστότητας  $R_o$ . Η θερμοκρασία ψαθυρότητας των χαλύβων είναι ένα από τα βασικότερα κριτήρια εκτίμησης της ποιότητας των χαλύβων συγκόλλησης, όπως και των χαλύβων προοριζομένων για εργασία σε χαμηλές θερμοκρασίες. Κατά τον εφελκυσμό

λείου δοκιμίου από ανθρακοχάλυβα με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα σε διάφορες θερμοκρασίες, συμπεραίνεται ότι ταυτόχρονα με τη μείωση της θερμοκρασίας δοκιμασίας, αυξάνεται το όριο πλαστικότητας, ενώ η επιμήκυνση ελαττώνεται. Για καθορισμένη θερμοκρασία, το όριο πλαστικότητας  $R_e$  ανακτά τιμή ίση με την αντοχή στον εφελκυσμό  $R_m$  οι καμπύλες  $R_e$  και  $R_m$  διασταυρώνονται, ενώ η επιμήκυνση  $A$  του υλικού πέφτει στο μηδέν **σχήμα 6**.



**Σχήμα 6** Επίδραση της θερμοκρασίας στις μηχανικές ιδιότητες των χάλυβων - στη θερμοκρασία  $T_k$  επιμήκυνση πέφτει στο μηδέν.

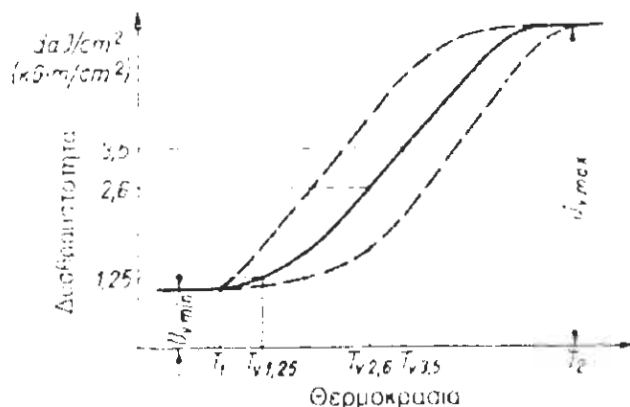
Η θερμοκρασία ψαθυρότητας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Η μέτρηση της θερμοκρασίας ψαθυρότητας σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι πολύ απλή, αλλά η πρακτική χρησιμότητα της μέτρησης μπορεί να μην είναι μεγάλη. Η χαρακτηριστική ιδιότητα της θερμοκρασίας ψαθυρότητας είναι ο στατιστικός χαρακτήρας της. Δηλαδή, αναφερόμενοι στη θερμοκρασία ψαθυρότητας, εννοούμε κάποια περιοχή θερμοκρασιών της μέγιστης πιθανότητας εμφάνισης της. Η αιτία του στατιστικού χαρακτήρα της θερμοκρασίας ψαθυρότητας είναι ο στατιστικός χαρακτήρας άλλων ιδιοτήτων, του ορίου πλαστικότητας  $R_e$  και της αντοχής στον εφελκυσμό  $R_m$  **σχήμα 7**.



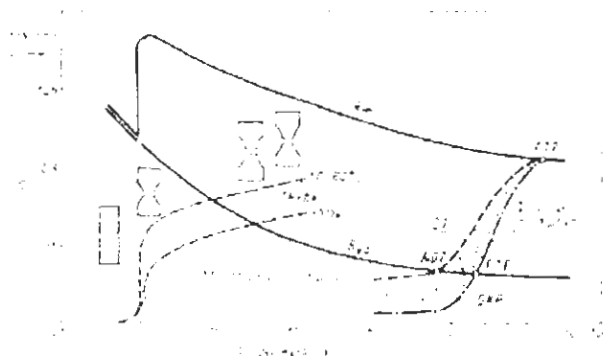
**Σχήμα 7** Στατιστικός χαρακτήρας της θερμοκρασίας μετάβασης  $T_k$  στην ψαθυρή κατάσταση. Αυτή βρίσκεται μεταξύ  $T_{kmax}$  και  $T_{kmin}$

Η θερμοκρασία ψαθυρότητας εξαρτάται από τις συνθήκες παραμόρφωσης, δηλαδή από την κατάσταση των τάσεων και την ταχύτητα παραμόρφωσης. Στη βιομηχανική πρακτική, για τον καθορισμό της θερμοκρασίας ψαθυρότητας, συνήθως εφαρμόζεται η δοκιμασία δυσθραυστότητας (κρουστική). Η δοκιμασία

δυσθραυστότητας επιβεβαιώνει ότι η μετάβαση του υλικού σε ψαθυρή κατάσταση, σε χαμηλές θερμοκρασίες, επιτυγχάνεται βαθμιαία σε κάποια περιοχή των θερμοκρασιών, η οποία ονομάζεται **περιοχή μετάβασης σε ψαθυρή κατάσταση σχήμα 8**. Η περιοχή των θερμοκρασιών μετάβασης σε ψαθυρή κατάσταση εξαρτάται από τον τύπο της εγκοπής. Επειδή ο καθορισμός όλης της περιοχής της μετάβασης σε ψαθυρή κατάσταση είναι επίπονη διαδικασία, για αυτό στην περιοχή αυτών των θερμοκρασιών γίνεται αποδοχή κάποιας δυσθραυστότητας, η οποία χαρακτηρίζει την φαινομενική θερμοκρασία ψαθυρότητας και χρησιμεύει ως συγκριτικό κριτήριο για τον καθορισμό της ανθεκτικότητας στη ρηγμάτωση διάφορων χαλύβων.



**Σχήμα 8** Μετάβαση ή μεταλλαγή του χάλυβα από πλαστική σε ψαθυρή κατάσταση στις χαμηλές θερμοκρασίες, καθορισμένες με δοκίμιο δυσθραυστότητας με οξεία εγκοπή τύπου Charpy: TV125, TV2.6, TV3.6 ονομαστικές θερμοκρασίες μετάβασης στην ψαθυρή κατάσταση που αντιστοιχούν στη δυσθραυστότητα: 125 [Kgr m/cm], 2.6 [Kgr m/cm], 3.6 [Kgr m/cm]



**Σχήμα 9** θερμοκρασίες μετάβασης στην ψαθυρή κατάσταση δοκιμίων από ανθρακοχάλυβα χαμηλού άνθρακα κατά τη στατική και δυναμική φόρτιση R'm πραγματική τάση κατά τη θραύση, Red κάτω όριο πλαστικότητας, A επιμήκυνση, NDT θερμοκρασία μηδενικής πλαστικότητας FTE οριακό επίπεδο τάσεων για ρωγμές αναπτυσσόμενες στην ελαστική περιοχή, FTP ρωγμές στην περιοχή ολικής πλαστικής παραμόρφωσης, DT καμπύλη μετάβασης στην ψαθυρή κατάσταση με δυναμική φόρτιση δοκιμίου μικρού σφάλματος, GKP όριο ψαθυρής θραύσης, TPPbk θερμοκρασία μετάβασης στην ψαθυρή κατάσταση δοκιμίων χωρίς ρωγή.

## 2.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την ψαθυρότητα των χαλύβων

### 2.5.1 Η στρωματική δομή και τα μη μεταλλικά εγκλείσματα



Με το αποτέλεσμα της διαδικασίας έλασης εξαιτίας υπαρχόντων μη μεταλλικών εγκλεισμάτων όπως και με το δένδριτικό μικροδιαφορισμό μερικών στοιχείων, των οποίων η διαδικασία διάχυσης έχει πολύ αργή πορεία, σε πολλές περιπτώσεις δημιουργείται στρωματική δομή με διαμήκεις χημικές ενώσεις του θείου και αλυσιδωτά εγκλείσματα οξειδίων. Μερικές φορές φαίνονται και ξεχωριστά στρώματα περλίτη και φερρίτη. Τα μη μεταλλικά εγκλείσματα που εμφανίζονται σε στρωματική δομή με την επίδραση των τάσεων μπορούν να είναι πυρήνες ανάπτυξης ρωγμών, ιδιαίτερα στους χάλυβες υψηλής αντοχής.

### 2.5.2 Συνθήκες λειτουργίας της κατασκευής

Για τις συγκολλητές κατασκευές, που λειτουργούν σε συνθήκες εναλλασσόμενων φορτίων, η ψαθυρή θραύση πρέπει να διερευνάται συγχρόνως με το πρόβλημα της αντοχής κόπωσης. Με την επίδραση των εναλλασσόμενων τάσεων στο υλικό, εμφανίζονται μεταβολές στη δομή, και, σε ορισμένες συνθήκες τάσεων, ρηγματώσεις κόπωσης. Εάν η κατασκευή λειτουργεί πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης στην ψαθυρή κατάσταση, τότε η ρηγμάτωση κόπωσης δεν είναι τόσο επικίνδυνη. Στην προκειμένη περίπτωση η μηχανική των θραύσεων επιτρέπει τον υπολογισμό του χρόνου εργασίας του εξαρτήματος με ρωγή μέχρι την εμφάνιση αβαρίας. Εάν όμως η ρωγή κόπωσης εμφανιστεί κάτω από τη θερμοκρασία μετάβασης σε ψαθυρή κατάσταση, αποτελεί πυρήνα ψαθυρής θραύσης.

### 2.5.3 Η διάβρωση.

Η σύγχρονη αλληλεπίδραση του διαβρωτικού μέσου και των τάσεων μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία διάβρωσης ή να προξενήσει διαβρωτική ρηγμάτωση. Η ρηγμάτωση αυτή μπορεί να είναι το αίτιο έναρξης της ψαθυρής θραύσης. Αυτό εξαρτάται από τη μεταλλουργική κατάσταση του υλικού και από τη θερμοκρασία εργασίας. Η διαβρωτική ρηγμάτωση είναι σύνθετη καταστροφική διαδικασία του υλικού, σε συνθήκες σύγχρονης επίδρασης των εφελκυστικών τάσεων και της ηλεκτροχημικής διάβρωσης. Η ταυτόχρονη επίδραση των τάσεων και του διαβρωτικού μέσου είναι περισσότερο επικίνδυνη απ' ό,τι η τάση και η διάβρωση που εμφανίζονται ξεχωριστά η μία από την άλλη. Με την επίδραση των τάσεων στο υλικό που εργάζεται σε διαβρωτικό μέσο αναπτύσσονται ρηγματώσεις, προωθούμενες κάθετα προς τη διεύθυνση δράσης των τάσεων. Αυτές οι ρηγματώσεις μπορούν να έχουν χαρακτήρα περικρυσταλλικό ή μεσοκρυσταλλικό ή και μικτό, ορισμένες φορές. Στην εμφάνιση της διαβρωτικής ρηγμάτωσης, ως αποτέλεσμα των τάσεων, αποκλειστική επίδραση ασκούν οι εφελκυστικές τάσεις. Ο χρόνος εμφάνισης των διαβρωτικών θραύσεων εξαρτάται από το μέγεθος των τάσεων.

## 2.6 Μέθοδοι δοκιμασιών της ψαθυρότητας των χάλυβων

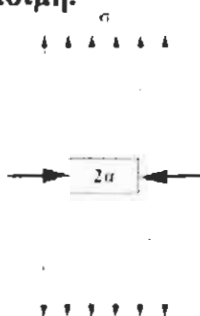
Οι ερευνητικές εργασίες διενεργήθηκαν είναι η θεωρητική έρευνα του φαινομένου της ψαθυρής θραύσης, και οι πειραματικές δοκιμασίες, με

προσπάθεια εξεύρεσης της βέλτιστης, εργαστηριακής μεθόδου δοκιμασιών των χαλύβων, από την άποψη της ανθεκτικότητας στη θραύση. Μεταξύ των θεωρητικών ερευνών τη μεγαλύτερη πρακτική σημασία βρήκε η μηχανική των θραύσεων, ενώ μεταξύ των πειραματικών ερευνών αυτές οι δοκιμασίες οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αποδοχή των χαλύβων και των συγκολλητών συνδέσεων, με τις οποίες καθορίζεται η θερμοκρασία μετάβασης στην ψαθυρή κατάσταση. Σήμερα κάθε μέθοδος δοκιμασιών διευκολύνει την εκτίμηση της ανθεκτικότητας του υλικού στην ψαθυρή θραύση της κατασκευής.

### 2.6.1 Γενική σκιαγράφηση της μηχανικής των θραύσεων

Επικρατεί η κοινή άποψη ότι η ανάπτυξη ρωγμών στο υλικό προξενείται με πλαστικές παραμορφώσεις. Η θεωρία των γραμμοαταξιών δημιουργεί δυνατότητες ποσοτικής διαμόρφωσης των συνθηκών έναρξης σχηματισμού μικρορηγματώσεων σε προγενέστερο στάδιο των πλαστικών παραμορφώσεων ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των γραμμοαταξιών. Στην ενότητα *A* γίνεται αναφορά για το μηχανισμό ανάπτυξης των ρωγμών σε ψαθυρά υλικά **σχήμα 10**.

Η ανάπτυξη της ρωγμής που άρχισε η διάδοση της από δύο περιόδους: από την **υποκρίσιμη** και την **υπερκρίσιμη**.



**Σχήμα 10** Πλάκα με εσωτερική εγκοπή διακένου με περίοδο, με μήκος  $2a$ , για τη διερεύνηση των συνθηκών διάδοσης της ρωγμής

Η **υποκρίσιμη** ανάπτυξη της ρωγμής είναι αυτή η περίοδος, η οποία με δεδομένη γενική κατάσταση είναι επικίνδυνη για την κατασκευή. Η ανάπτυξη της ρωγμής σ' αυτήν την περίοδο εξαρτάται από τις πλαστικές παραμορφώσεις. Η **υπερκρίσιμη** ανάπτυξη της ρωγμής συνήθως είναι καταστροφική για τις κατασκευές. Η θραύση έχει πορεία μεγάλης ταχύτητας και μπορεί να αποκτήσει μεγάλες διαστάσεις, όπως η θραύση σκελετού πλοίου σε δύο κομμάτια. Κατά τη διάρκεια αυτής της θραύσης το υλικό συμπεριφέρεται με ψαθυρό τρόπο και δημιουργεί ψαθυρό θραύσμα.

### 2.6.2 Ελαστική-γραμμική μηχανική των θραύσεων

Η ελαστική - γραμμική μηχανική των θραύσεων διερευνά τις συνθήκες διάδοσης της ρωγμής με το κριτήριο των γραμμικών - ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού, μόνο που το πρόβλημα αυτό διερευνάται ή από την άποψη της ενεργειακής διαδικασίας θραύσης, που βασίζεται στη θεωρία του *Griffith* και του *Irwin*, ή από την ανάλυση της κατανομής των τάσεων στην περιοχή της αιχμής

της εγκοπής που επεξεργάστηκε από τους *Wiegardt, Sneddon, Irwin, Westergaard* και άλλους.

### 2.6.3 Διάδοση της ρωγμής σύμφωνα με τη θεωρία του Griffith και του Irwin

Σύμφωνα με τον *Griffith*, η ρωγμή σε ψαθυρό υλικό αρχίζει να διαδίδεται όταν η αναγκαία ενέργεια  $U_o$  για το σχηματισμό νέων επιφανειών στη ρωγμή είναι μικρότερη από την ελαστική ενέργεια  $U_e$  που ελευθερώθηκε.

για επίπεδη κατάσταση τάσεων

$$\Delta U_e = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot \alpha^2}{E} \quad 1$$

για επίπεδη κατάσταση παραμορφώσεων

$$\Delta U_e = (1 - \nu^2) \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot \alpha^2}{E} \quad 2$$

Η επιφανειακή ενέργεια που δεσμεύεται από την ανάπτυξη της ρωγμής είναι

$$U_o = 4\alpha\gamma \quad 3$$

όπου:  $\gamma$  ειδική επιφανειακή ενέργεια.

Η ρωγμή αρχίζει να αναπτύσσεται, όταν

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{d(\Delta U_e)}{d\alpha} \geq \frac{1}{2} \cdot \frac{dU_o}{d\alpha} \quad 4$$

για επίπεδη κατάσταση τάσεων

$$\frac{\alpha \cdot \pi \cdot \sigma^2}{E} \geq 2\gamma$$

για επίπεδη κατάσταση παραμορφώσεων

$$(1 - \nu^2) \frac{\alpha^2 \cdot \pi \cdot \sigma^2}{E} \geq 2\gamma$$

Απο αυτό προκύπτει το κρίσιμο μήκος  $\alpha_c$  της ρωγμής για δεδομένη τάση

$$2\alpha_c = \frac{4 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot \sigma^2} = (1 - \nu^2) \frac{4 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot \sigma^2} \quad 5$$

Ο *Irwin* τη μεταβολή της ελαστικής ενέργειας κατά το χρόνο ανάπτυξης της

ρωγμής, παρουσιάζόμενη με τη μορφή  $\frac{d(\Delta U_e)}{2d\alpha}$  την εκφράζει ως δύναμη

ανάπτυξης της ρωγμής (crack extension force) και τη συμβολίζει με  $G'$

$$\frac{d(\Delta U_e)}{2d\alpha} = G' \quad 6$$

Εάν η δύναμη  $G'$  ανάπτυξης της ρωγμής υπερβεί την κρίσιμη τιμή  $G'_c$ , τότε η ρωγμή προωθείται. Για τη συνθήκη θραύσης,  $G' > G'_c$

για επίπεδη κατάσταση τάσεων η δύναμη ανάπτυξης της ρωγμής είναι

$$G' = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot \sigma^2}{E} \quad 7$$

για επίπεδη κατάσταση παραμορφώσεων

$$G' = (1 - \nu^2) \frac{\alpha^2 \cdot \pi \cdot \sigma^2}{E} \quad 8$$

Η συνθήκη της θραύσης ορίζεται από το γινόμενο  $\sigma^2 a$ . Εάν σ' αυτή την έκφραση τοποθετήσουμε το  $\pi$ , το οποίο προκύπτει από τη γεωμετρία της εσωτερικής ρωγμής, έχουμε το συντελεστή

$$K = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad 9$$

Ο συντελεστής  $K$  στη μηχανική των θραύσεων έχει εξαιρετικά μεγάλη σημασία. Αυτός καθορίζει το επίπεδο των ελαστικών τάσεων παραμόρφωσης στην περιοχή της ακμής της εγκοπής. Για κρίσιμες συνθήκες της  $\sigma$  και  $a$ , που αναπτύσσουν τη ρωγμή, ο  $K$  ονομάζεται **η ανθεκτικότητα του υλικού στη θραύση** και ορίζεται με το σύμβολο  $K_c$ . Ο συντελεστής  $K$  συνήθως ονομάζεται **συντελεστής εντάσεως των τάσεων**. Το σύμβολο  $K_c$  χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του κρίσιμου συντελεστή εντάσεως των τάσεων, της ασταθούς ανάπτυξης της ρωγμής για επίπεδη κατάσταση τάσεων, ενώ ο  $K_{Ic}$  για τον κρίσιμο συντελεστή εντάσεως των τάσεων της ασταθούς ανάπτυξης της ρωγμής για επίπεδη κατάσταση παραμορφώσεων.

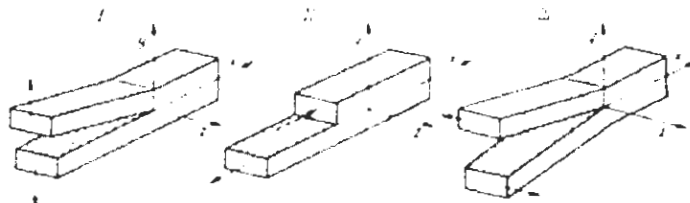
#### 2.6.4 Η θεωρία της θραύσης κατά τον Irwin

Οι ρωγμές μπορούν να παρατηρούνται ως επιφάνειες με ασυνέχειες μετατοπισμένες με διάνυσμα  $v$ . Γενικά, οι επιφάνειες αυτές μπορούν να μετατοπίζονται προς τη διεύθυνση των τριών συνιστώσεων  $u_x, u_y, u_z$ . Ο Irwin παρατήρησε ότι υπάρχουν τρεις ανεξάρτητες κινηματικές κινήσεις της άνω και κάτω επιφάνειας **σχήμα 11**. Είναι τρεις βασικοί τρόποι παραμόρφωσης των επιφανειών της ρωγμής.

Ο **πρώτος τρόπος παραμόρφωσης σχήμα 11 I** χαρακτηρίζει το άνοιγμα των επιπέδων σχιστότητας στην κατεύθυνση του άξονα  $y$ , συμμετρικά προς το επίπεδο που βρίσκεται η ρωγμή.

Ο **δεύτερος τρόπος παραμόρφωσης σχήμα 11 II** δείχνει την ολίσθηση προς την κατεύθυνση του άξονα  $x$  στο επίπεδο σχιστότητας της ρωγμής.

Ο **τρίτος τρόπος παραμόρφωσης σχήμα 11 III** δείχνει τη μετατόπιση των επιπέδων σχιστότητας της ρωγμής προς την κατεύθυνση του άξονα  $z$ .



**Σχήμα 11** Τρεις βασικές περιπτώσεις ανάπτυξης ρωγμών Irwin.

Κάθε κίνηση του επιπέδου σχιστότητας της ρωγμής διαμορφώνει το επίπεδο των τάσεων στην περιοχή της ρίζας ή ακμής της ρωγμής. Το επίπεδο αυτό των τάσεων περιγράφεται με εξισώσεις. Στο διαξονικό σύστημα **σχήμα 12**, η τάση κοντά στο σημείο της θραύσης περιγράφεται με τις εξισώσεις του Irwin, ενώ  $K_I$  είναι συντελεστής εντάσεως των τάσεων για επίπεδη κατάσταση παραμορφώσεων

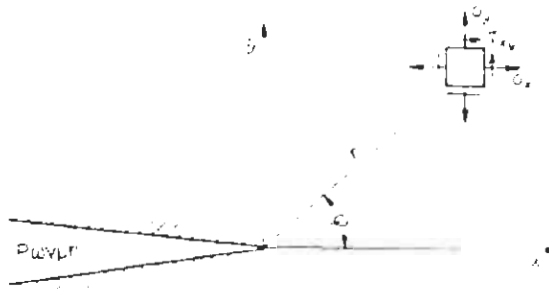
$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{\sigma_{xx}}} \cos \frac{\varphi}{2} \left( 1 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2} \right) + \dots \quad 10$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{\sigma_{yy}}} \cos \frac{\varphi}{2} \left( 1 + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2} \right) + \dots \quad 11$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{\tau_{xy}}} \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{\varphi}{2} \cos \frac{3\varphi}{2} + \dots \quad 12$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2\tau_{max} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \varphi + \dots \quad 13$$

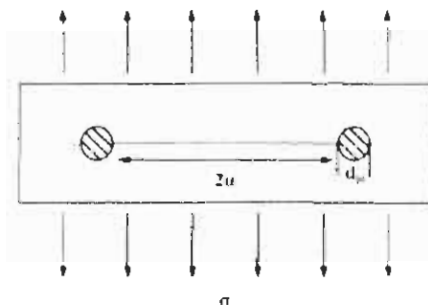
Σύμφωνα με την υπόθεση, ότι η ελαστική-γραμμική μηχανική των θραύσεων ισχύει μόνο για τη διερεύνηση των γραμμικών-ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού. Στην πραγματικότητα, στα κατασκευαστικά υλικά, από τη στιγμή που αρχίζει η διάδοση ρωγμής στη ρίζα της εγκοπής πάντοτε εμφανίζονται πλαστικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 12 Κατανομή των τάσεων στη ρίζα της εγκοπής σε απόσταση  $r$  από τη ακμή της εγκοπής σύμφωνα με τον Irwin.

Ο Irwin, απέδειξε ότι η ελαστική ενέργεια του διακένου με μήκος  $2a$  και με το συσχετισμό της πλαστικής παραμόρφωσης στη ρίζα της εγκοπής  $2a_{pl}$  σχήμα 13 είναι, κατά προσέγγιση, ίση με την ελαστική ενέργεια της ρωγμής  $2(a+a_{pl})$  χωρίς πλαστική παραμόρφωση στη ακμή της εγκοπής, με την υπόθεση ότι οι διαστάσεις της είναι ικανοποιητικά μικρές, συγκρινόμενες με το μήκος του σφάλματος και τις γενικές διαστάσεις του δοκιμασμένου εξαρτήματος. Η περιοχή της πλαστικής παραμόρφωσης, επομένως, μπορεί να συνοπλογοιστεί στο μήκος του σφάλματος, χωρίς ενεργειακές διαταράξεις των υποθέσεων του Griffith για την ανάπτυξη ρωγμής. Σύμφωνα με τον McClintok και Irwin το μέγεθος της πλαστικά παραμορφωμένης περιοχής:

για επίπεδη κατάσταση τάσεων ως προς τον άξονα  $x$ , για  $\varphi=0$  σχήμα 13 είναι



Σχήμα 13 Πλάκα με εσωτερική ρωγμή και μικρή πλαστική παραμόρφωση στη ρίζα της εγκοπής με διάμετρο  $a_{pl}$

$$\alpha_{pl} = \frac{K_I}{2\pi\sigma_{pl}^2} \quad 14$$

για επίπεδη κατάσταση παραμορφώσεων

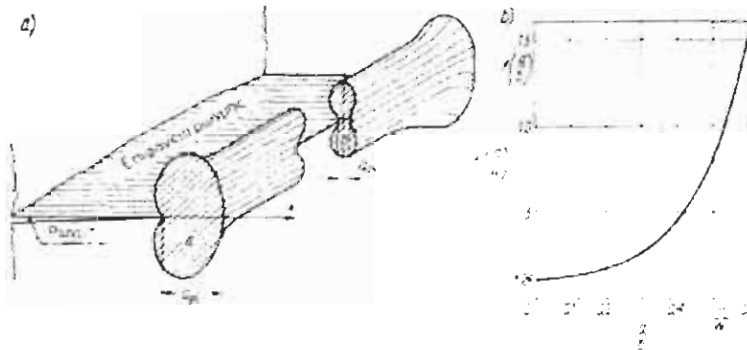
$$\alpha_{pl} = \frac{1}{16} \frac{K_I^2}{\pi\sigma_{pl}^2} \quad 15$$

όπου  $\sigma_{pl}$  τάση ίση με το όριο πλαστικότητας. Στην επιφάνεια της πλάκας, το μέγεθος της πλαστικής παραμόρφωσης  $\alpha_{pl}$  είναι, προσεγγιστικά, δύο φορές μεγαλύτερο από το  $\alpha_{pl}$  στο εσωτερικό της πλάκας **σχήμα 14**. Άρα εφαρμόζοντας το κριτήριο της ελαστικής - γραμμικής μηχανικής των θραύσεων, με συσχέτισμό της δυνατότητας των πολύ μικρών παραμορφώσεων στη ακμή της εγκοπής, μπορεί να γραφεί η σχέση ανάμεσα στο συντελεστή εντάσεων των τάσεων  $K_{Ic}$ , το μέγεθος του σφάλματος  $a_z$  (σφάλμα αντικατάστασης) και την τάση  $\sigma$  με την ακόλουθη μορφή:

$$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a_z} = \sigma_c \sqrt{\pi \alpha_{zc}} \quad 16$$

όπου:  $\sigma_c$  και  $\alpha_{zc}$  είναι κρίσιμα μεγέθη που προξενούν την ανάπτυξη ή προώθηση της ρωγμής. Στην πραγματικότητα, περισσότερο ακριβής είναι η έκφραση

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad 17$$



**Σχήμα 14** Ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης στην περιοχή της ακμής του ελαστικό-πλαστικού υλικού: α) το μέγεθος της παραμόρφωσης στην επιφάνεια είναι δύο φορές μεγαλύτερο απ' ό,τι από εσωτερικό της πλάκας, β) διορθωτικός συντελεστής, ανάλογα με τις διαστάσεις του δοκιμίου κατά τη δοκιμασία εφελκυσμού.

όπου:  $f\left(\frac{a}{w}\right)$  είναι συντελεστής συσχέτισης των διαστάσεων και της μορφής του δοκιμίου: καθορίζεται πειραματικά για εφελκυσόμενα δοκίμια, η τιμή της συνάρτησης  $f\left(\frac{a}{w}\right)$  βρίσκεται με την βοήθεια του **σχήματος 24**. Η τιμή του  $K_{Ic}$  στη

συγκεκριμένη περίπτωση, θεωρείται ότι εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την ιδιότητα του υλικού και ονομάζεται **ανθεκτικότητα σε θραύση**. Η τιμή αυτή καθορίζεται πειραματικά και εκφράζεται με τις μονάδες  $da \cdot N[mm^{-3/2}][Kgr \cdot mm^{-3/2}]$ , ο  $K_I$  αφορά στον πρώτο τρόπο μετατόπισης των επιφανειών του διακένου (ρωγμής) για επίπεδη κατάσταση παραμορφώσεων **σχήμα 14** επιτυγχάνει τη μικρότερη τιμή του  $K$  μεταξύ των υπόλοιπων τρόπων μετατόπισης των επιφανειών της ρωγμής. Έτσι, λοιπόν, γνωρίζοντας την τιμή του  $K_c$  είναι δυνατόν

να καθορισθεί ή η κρίσιμη τάση  $\sigma_c$  η οποία αναπτύσσει τη ρωγμή με δεδομένο μήκος, ή επίσης, για δεδομένο  $\sigma$  να καθορισθεί το επικίνδυνο κρίσιμο μήκος της ρωγμής. Η βασική δυσκολία που προκύπτει από τη χρησιμοποίηση της ελαστικής γραμμικής μηχανικής των θραύσεων είναι ο καθορισμός του μεγέθους της περιοχής πλαστικής παραμόρφωσης στη ακμή της εγκοπής, η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως από τη θερμοκρασία, την ταχύτητα παραμόρφωσης και τα φαινόμενα που συμβαίνουν στο υλικό. Επειδή το μέγεθος της πλαστικά παραμορφωμένης περιοχής στη ακμή της εγκοπής είναι καθοριστικό για τη χρησιμότητα της ελαστικής-γραμμικής μηχανικής των θραύσεων, με σκοπό τον καθορισμό του μεγέθους  $K_{Ic}$  το οποίο εκφράζει την ανθεκτικότητα στην ψαθυρή θραύση, επιβάλλεται η χρησιμοποίηση ικανοποιητικά μεγάλων διαστάσεων των δοκιμίων, σε σύγκριση με τις διαστάσεις της περιοχής πλαστικής παραμόρφωσης. Αυτό αφορά, ιδιαίτερα, σε υλικό με σχετικά χαμηλό όριο πλαστικότητας, όπως οι ανθρακοχάλυβες με μικρή περιεκτικότητα σε άνθρακα, χάλυβες αυξημένης αντοχής, στη ρίζα της εγκοπής των οποίων εμφανίζονται σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις, πριν δημιουργηθεί ψαθυρό θραύσμα. Από τα παραπάνω ο  $K_{Ic}$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο εκτίμησης του υλικού, στην περίπτωση που το πάχος του υλικού θα έχει τιμή

$$B \geq 2.5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_{pl}} \right)^2 \quad 18$$

Αυτός ο περιορισμός σημαίνει ότι, για κάθε υλικό, ανάλογα με το πάχος, υπάρχει μέγιστη, σημαντική από την άποψη της ελαστικής - γραμμικής μηχανικής των θραύσεων, τιμή του  $K_{Ic}$ . Η τιμή αυτή εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$K_{Ic} \leq \sigma_{pl} \sqrt{0.4B} \quad 19$$

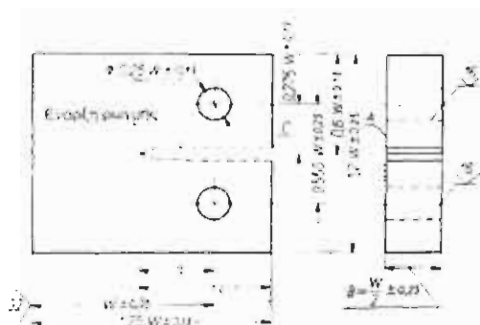
Μεγαλύτερες τιμές του  $K_{Ic}$  από αυτές που αναφέρθηκαν δεν πληρούν τις απαιτήσεις της ελαστικής - γραμμικής μηχανικής των θραύσεων.

### 2.6.5 Γενικά δεδομένα για τον καθορισμό του $K_{Ic}$ , με βάση τις εργαστηριακές δοκιμασίες

Ο καθορισμός του  $K_{Ic}$  μπορεί να διενεργηθεί με τη βοήθεια δοκιμίων εφελκυσμού ή κάμψης, που παρουσιάζουν ασυνέχεια με πολύ μικρή ακτίνα στρογγύλευσης της ρίζας της εγκοπής, καλύτερα με μορφή ρωγμής κόπωσης. Τα δοκιμαζόμενα δοκίμια μπορούν να έχουν διάφορα πάχη, με την υπόθεση ότι πρέπει να πληρούνται οι σχέσεις 18 και 19. Τυπική μορφή δοκιμίου για κάμψη, το οποίο προτείνεται από τις προδιαγραφές *ASTM-E-399-70T*, φαίνεται στο *σχήμα 15*, ενώ για τον εφελκυσμό στο *σχήμα 16*. Κατά τις δοκιμασίες σε κάμψη και εφελκυσμό χαράσσεται η καμπύλη φόρτισης και μετατόπισης (μεγέθη ανοίγματος της ρωγμής) *σχήμα 17*. Το σημείο  $P_Q$  σ' αυτή την καμπύλη χρησιμεύει για τον καθορισμό της τιμής του  $K_{Ic}$ . Για τον καθορισμό του  $K_{Ic}$  σε κάμψη ή σε εφελκυσμό με δοκίμια με ρωγμή κόπωσης, μπορούν να εκτελεστούν σε ελεύθερη μηχανή, η οποία να παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης της με συσκευή για την αυτόματη καταγραφή της καμπύλης φόρτισης - μετατοπίσεων.

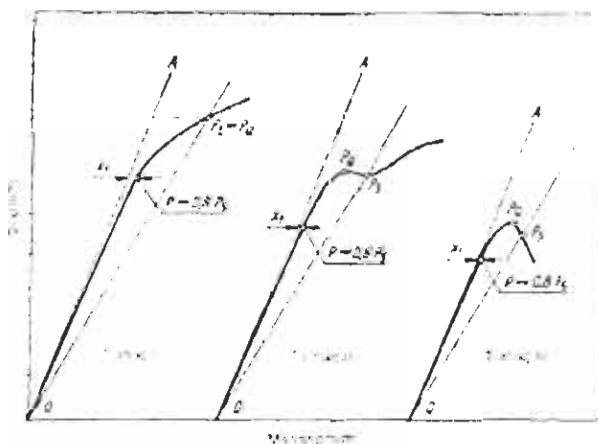


Σχήμα 15 Δοκίμιο για τον καθορισμό του  $K_{Ic}$  σε κάμψη σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM-E399-70T οι επιφάνειες A πρέπει να είναι κάθετες προς το επίπεδο της εγκοπής στα όρια ανοχής 0.13[mm].



Σχήμα 16 Δοκίμιο για τον καθορισμό του  $K_{Ic}$  στον εφελκυσμό σύμφωνα με τους ASTM-E399-70T

Η κάμψη των δοκιμίων πετυχαίνεται σε ειδικά υποστηρίγματα με ράουλα, τα οποία μειώνουν την τριβή κατά την κάμψη *σχήμα 28*, από την άποψη της δυνατότητας περιστροφής των ράουλων. Οι διαστάσεις του οργάνου κάμψης δίνονται στο σχέδιο που αντιστοιχεί στα δοκίμια με πλάτος 25[mm] ή 51[mm]. Για άλλες διαστάσεις των δοκιμίων, η απόσταση ανάμεσα στα υποστηρίγματα κάμψης πρέπει να πληρεί τις απαιτήσεις που απορρέουν από το πλάτος του δοκιμίου  $W$ . Η απόσταση αυτή είναι ίση με  $4[W]$ . Γενικά, το μήκος του δοκιμίου ισούται με  $4.2[W]$ . Η διάμετρος του ράουλου πρέπει να είναι περίπου  $1[W]$  μέχρι  $[W]/2$ .

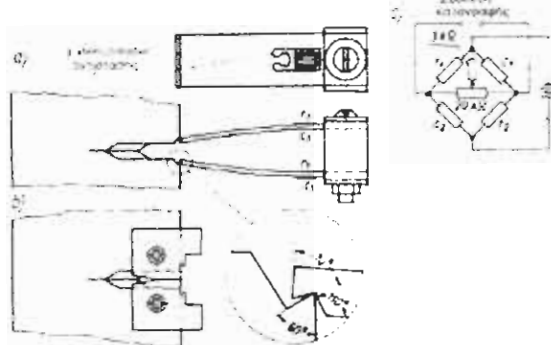


Σχήμα 17 Είδη (τύποι) καμπυλών φόρτισης - μετατόπισης κατά τον καθορισμό του

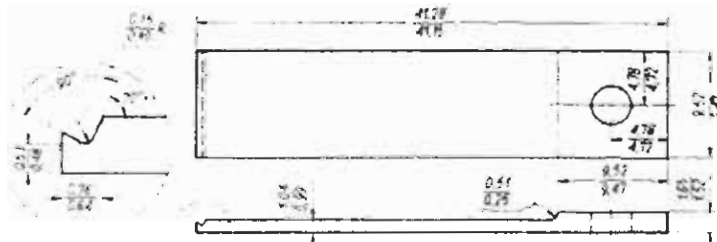
Η μορφή και οι διαστάσεις των σφικκτήρων για τα δοκίμια εφελκυσμού, με διαστάσεις  $W/B=2$ , δίνονται στο *σχήμα 29*. Για άλλους τύπους δοκιμίων, με διαφορετικές διαστάσεις, οι σφικκτήρες πρέπει να ανακατασκευαστούν



κατάλληλως. Ο μετρητής των μετατοπίσεων (του ανοίγματος) των επιφανειών της ρωγμής ανήκει στα όργανα μεγάλης ακριβείας. Ο μετρητής αυτός αποτελείται από δύο ελαστικά πλακίδια, των οποίων το ζεύγος των άκρων είναι δεμένο με τη βοήθεια βίδας στο σφιγκτήρα ενώ τα ελεύθερα άκρα των πλακιδίων είναι τοποθετημένα σε κατάλληλη εγκοπή γύρω από τη ρωγή **σχήμα 18**.

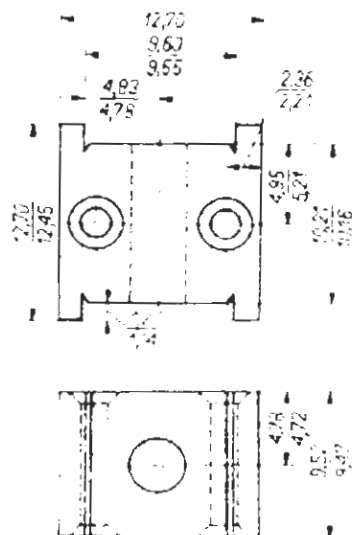


**Σχήμα 18** Μετρητής για τον έλεγχο του μεγέθους μετατόπισης (ανοίγματος) της εγκοπής συναρτήσει της φόρτισης: α), β) τρόποι συγκράτησης της συσκευής στο δοκίμιο, γ) σχήμα σύνδεσης των μετρητών με τη συσκευή καταγραφής.

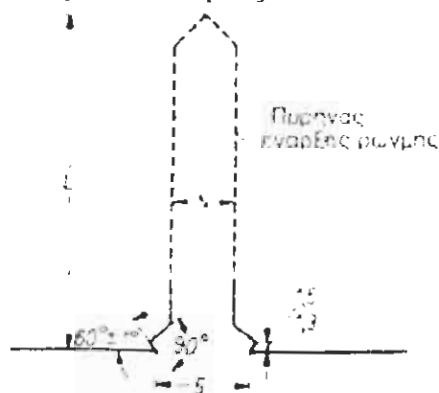


**Σχήμα 19** Κατασκευαστικές λεπτομέρειες του ενός πόδα - ελατηρίου της συσκευής μέτρησης σύμφωνα με τις υποδείξεις των ASTM-οι διαστάσεις είναι σε [mm]

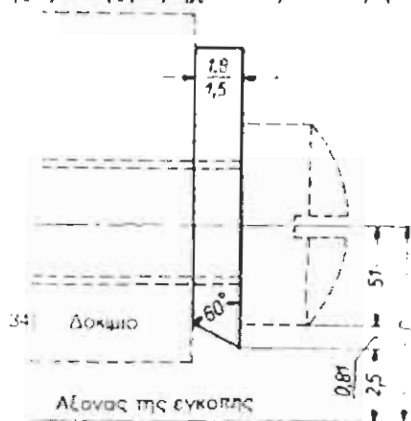
Οι διαστάσεις και η μορφή των πλακιδίων φαίνονται στα **σχήμα 19** και **σχήμα 20**. Στα ελαστικά πλακίδια είναι προσκολλημένοι οι συρμάτινοι μετρητές αντίστασης. Για τη συγκράτηση του μετρητή μετατοπίσεων στο δοκίμιο, εκτελείται κατάλληλη σχισμή στην επιφάνεια της εγκοπής **σχήμα 21**. Επίσης, στο δοκίμιο μπορούν να συγκρατηθούν, με τη βοήθεια κοχλιών, τα πλακίδια, ύστερα από κατάλληλη λοξοτόμηση του άκρου **σχήμα 22**.



Σχήμα 20 Κατασκευαστικές λεπτομέρειες του μπλοκ συγκράτησης των ελαστικών σύμφωνα με τις υποδείξεις των ASTM-οι διαστάσεις δίνονται σε [mm].



Σχήμα 21 Μορφή σχισμάτος της εγκοπής με μηχανικό τρόπο πυρήνας έναρξης ρωγμής



Σχήμα 22 Παράδειγμα συγκράτησης των σφαιρικών στην επιφάνεια για τη συγκράτηση της συσκευής μέτρησης σύμφωνα με τις υποδείξεις ASTM).

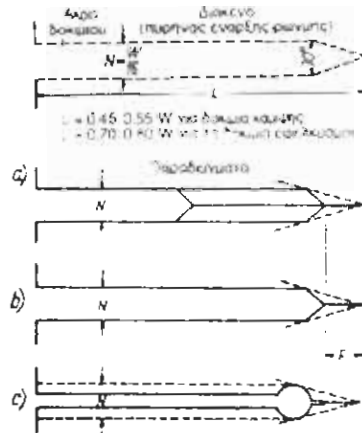
## 2.6.6 Επιλογή μεγεθών δοκιμών για τις δοκιμασίες

Τα αποτελέσματα των δοκιμασιών, για να είναι σύμφωνα με το κριτήριο της ελαστικής-γραμμικής μηχανικής των θραύσεων, το πάχος του δοκιμίου  $B$  και

το μήκος της εγκοπής α πρέπει να υπερβαίνουν την τιμή που προκύπτει από την έκφραση:  $2.5 \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_{pl}} \right)^2$ , όπου η  $\sigma_{pl}$  αντιστοιχεί στο ονομαστικό όριο πλαστικότητας  $R_{0.2}$  για δεδομένη θερμοκρασία δοκιμασίας

$\sigma_{pl}/E$	Ελάχιστο προτεινόμενο πάχος υλικού mm
0.0050-0.0057	75
0.0057-0.0062	63
0.0062-0.0065	70
0.0065-0.0068	44
0.0068-0.0071	38
0.0071-0.0075	32
0.0075-0.0080	25
0.0080-0.0085	20
0.0085-0.0100	12.5
0.01 και άνω	6.5

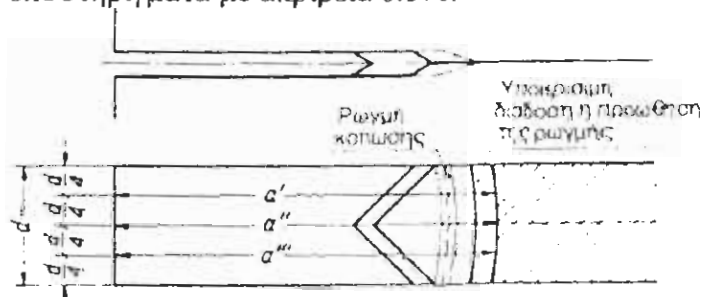
**Πίνακας 1** Προτεινόμενο ελάχιστο πάχος υλικού για τον καθορισμό του  $K_{Ic}$  ανάλογα με το λόγο  $\sigma_{pl}/E$



**Σχήμα 23** Μήκος απαιτούμενης ρωγμής κόπωσης στη ρίζα της εγκοπής και τρόπος σχίσμου της ρίζας της εγκοπής: α) λοξοτομημένο το σχίσμα της ρίζας της εγκοπής, β) απλή ρίζα της εγκοπής, γ) διάτρητη ρίζα της εγκοπής.

Τα προτεινόμενα ελάχιστα πάχη των δοκιμίων, για καθορισμένη σχέση  $\sigma_{pl}/E$ , εμπεριέχει ο **πίνακας 1**. Υποδεικνύεται, για τις αρχικές δοκιμασίες του  $K_{Ic}$ , να χρησιμοποιούνται δοκίμια με μεγαλύτερο πάχος. Οι πραγματικές διαστάσεις των δοκιμίων ταξινομούνται μετά από τον καθορισμό του  $K_{Ic}$  στα αναδιαστολογημένα πάχη. Το συνολικό βάθος β σχίσμο και η ρωγμή της εγκοπής κόπωσης, κατά κανόνα, αντιστοιχεί στο πάχος  $B$  και ισούται με  $0.45[W]-0.53[W]$  για δοκίμια κάμψης και  $0.7[W]-0.8[W]$  για δοκίμια εφελκυσμού. Η λοξοτόμηση της ακμής της εγκοπής πρέπει να είναι τέτοια, που το άκρο της ρωγμής κόπωσης να βρίσκεται στην κορυφή της γωνίας λοξοτόμησης **σχήμα 23**. Το μήκος της ρωγμής κόπωσης δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το 5% του γενικού μήκους  $L$  και όχι μικρότερο από  $1.3[mm]$ . Για τη διευκόλυνση του σχηματισμού της ρωγμής κόπωσης, η ακτίνα  $\rho$  της καμπύλης της ακμής της εγκοπής δημιουργημένης με σχίσμο πρέπει να ισούται με  $\rho < 0.08[mm]$ . Η συσκευή για την επίτευξη της ρωγμής κόπωσης πρέπει να κατασκευαστεί έτσι, ώστε η φόρτιση

να είναι συμμετρική προς την εγκοπή. Κατά το τελευταίο στάδιο ανάπτυξης της ρωγμής κόπωσης για τη συνθήκη, που η ρωγμή κόπωσης αποκτήσει περίπου το μισό απαιτούμενο μήκος 2.5% του γενικού μήκους  $L$  της ρωγμής, ο λόγος της μέγιστης τιμής του συντελεστή εντατικότητας του κύκλου κόπωσης προς τον ελαστικό συντελεστή  $K_{fmax}/E$  δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή  $0.000192[m^2]$ , ενώ, επιπλέον, ο  $K_{fmax}$  δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 60%  $K_Q$  βάσει του οποίου καθορίζεται η τιμή του  $K_{Ic}$ . Εάν οι δοκιμασίες κόπωσης εκτελούνται στη θερμοκρασία  $T_1$  ενώ οι δοκιμασίες καθορισμού του  $K_{Ic}$  στη θερμοκρασία  $T_2$ , ο  $K_{fmax}$  δεν μπορεί να ξεπεράσει την τιμή  $\sigma_{Ip1}/2\sigma_{Ip2} \cdot K_Q$  όπου  $\sigma_{Ip1}$  και  $\sigma_{Ip2}$  όρια πλαστικότητας υλικού για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες  $T_1$  και  $T_2$ . Μετά τη θραύση του δοκιμίου, το μήκος της εγκοπής μετρείται με ακρίβεια 0.5% σε τρεις θέσεις **σχήμα 24**. Για τον υπολογισμό του  $K_Q$  χρησιμοποιείται η μέση τιμή των τριών αυτών μετρήσεων. Το αποτέλεσμα των δοκιμασιών δε θεωρείται θετικό, εάν η μέγιστη απόκλιση του μήκους της ρωγμής ή του ελάχιστου μήκους της εγκοπής, σε σύγκριση με τη μέση τιμή, είναι μεγαλύτερη από 5% αυτής της τιμής. Κατά την κάμψη δοκιμίου, ο εμβολέας και τα υποστηρίγματα πρέπει να τοποθετούνται έτσι, ώστε η δύναμη κάμψης να βρίσκεται στον άξονα που διαχωρίζει τα υποστηρίγματα με ακρίβεια 0.5%.



**Σχήμα 24** Θέσεις μέτρησης των μεγεθών της εγκοπής με συσχέτισμό της εγκοπής κόπωσης μετά το σπάσιμο του δοκιμίου

Η καταγραφή του διαγράμματος φόρτιση μετατόπιση διενεργείται αυτόματα. Η συσκευή καταγραφής της φόρτισης πρέπει να καταγράφει τα αποτελέσματα με ακρίβεια  $\pm 1\%$ .

### 2.6.7 Ανάλυση των αποτελεσμάτων και υπολογισμός τον $K_{Ic}$

Πριν καθορισθεί η ορθή τιμή του  $K_{Ic}$  με βάση το διάγραμμα φόρτισης μετατόπισης, καθορίζεται πρώτα η υποκατάστατη τιμή του  $K_Q$ . Ο καθορισμός του  $K_Q$  επιτυγχάνεται ως ακολούθως **σχήμα 17** από το σημείο Ο χαράσσεται η ευθεία  $OP_5$ , της οποίας η εφαπτομένη της κλίσης ως προς την εφαπτομένη της κλίσης της ευθείας  $OA$  είναι μικρότερη κατά 5% για τα εφελκούμενα δοκίμια κατά 4%. Η διασταύρωση αυτής της ευθείας με την καμπύλη φόρτισης-μετατόπισης καθορίζει την τιμή φόρτισης  $P_5$  **σχήμα 17**. Η πορεία της καμπύλης μπορεί να έχει διάφορο χαρακτήρα. Για τον πρώτο τύπο της καμπύλης **σχήμα 17**  $P_5 = P_Q$  για το δεύτερο και τρίτο τύπο, η  $P_Q$  γίνεται αποδεκτή ως μέγιστη τιμή στην καμπύλη ανάμεσα στις ευθείες  $OA$  και  $OP_5$ . Στη συνέχεια, καθορίζεται στην καμπύλη το σημείο που αντιστοιχεί στην τιμή  $0.8P_5$ . Εάν η σχέση της απόστασης  $0.8P_5$  από την ευθεία  $OA$  προς την απόσταση  $P_5$  της αυτής ευθείας  $OA$  έχει μεγαλύτερη τιμή

από 0.25 τότε τα δεδομένα της δοκιμασίας δεν προσφέρονται για τον καθορισμό του  $K_{Ic}$ . Καθορίζεται το υποκατάστατο του  $K_Q$

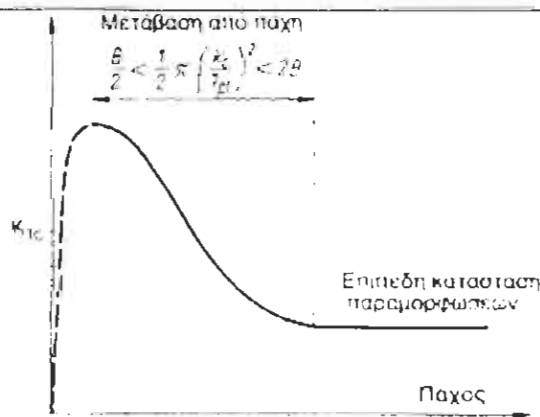
Για τα δοκίμια κάμψης με άνοιγμα των υποστηριγμάτων  $S=4W$ , η τιμή του  $K_Q$  υπολογίζεται από την έκφραση:

$$K_Q = \frac{P_Q \sqrt{a}}{BW} \left\{ 11.6 - 18.4 \left( \frac{a}{W} \right) + 87.2 \left( \frac{a}{W} \right)^2 - 151 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + 155 \left( \frac{a}{W} \right)^4 \right\}$$

όπου:  $P_Q$  φόρτιση σε  $daN$  [ $Kgr$ ],  $B$  πάχος του δοκιμίου σε [ $mm$ ], [ $W$ ] πλάτος του δοκιμίου σε [ $mm$ ],  $a$  μήκος της ρωγμής σε [ $mm$ ].

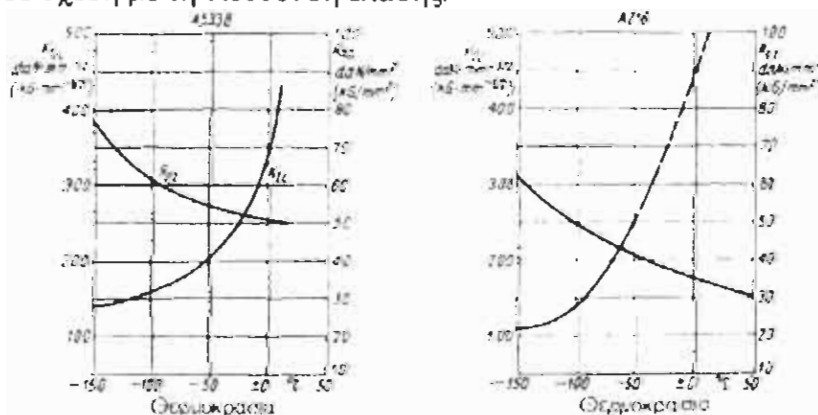
Για τα εφελκύμενα δοκίμια σύμφωνα με την πηγή 20, σχήμα 16 το  $K_Q$ , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$K_Q = \frac{P_Q \sqrt{a}}{BW} \left\{ 29.6 - 185.5 \left( \frac{a}{W} \right) + 655.7 \left( \frac{a}{W} \right)^2 - 1017 \left( \frac{a}{W} \right)^3 + 838.9 \left( \frac{a}{W} \right)^4 \right\}$$

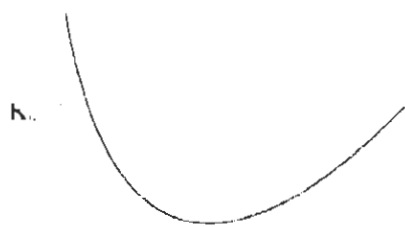


Σχήμα 25 Επίδραση του πάχους στον  $K_{Ic}$

Μετά τον υπολογισμό της τιμής του  $K_Q$  γίνεται διερεύνηση εάν η έκφραση  $2.5 (K_Q/\sigma_{pl})^2$  είναι μικρότερη από το πάχος  $B$  και το μήκος  $a$  πίνακας 1. Εάν είναι μικρότερη, αυτό σημαίνει ότι ο  $K_Q=K_{Ic}$ . Η τιμή του  $K_{Ic}$  εξαρτάται από το πάχος σχήμα 25, τη θερμοκρασία δοκιμασίας σχήμα 26 και την ταχύτητα φόρτισης σχήμα 27. Στην τιμή του  $K_{Ic}$  επίδραση ασκεί και η διεύθυνση επιλογής του δοκιμίου σε σχέση με τη διεύθυνση έλασης.



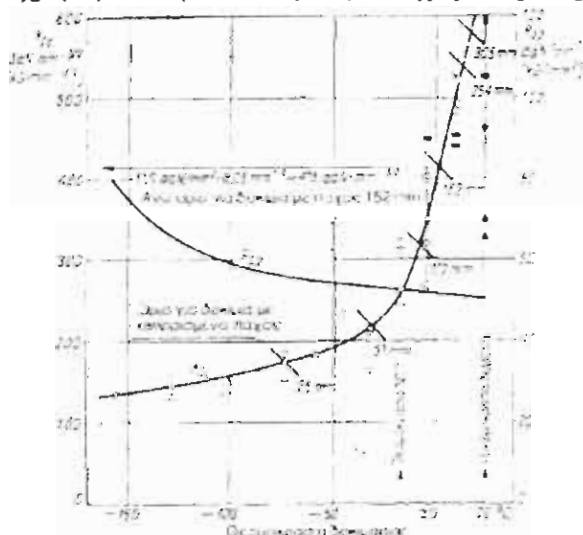
Σχήμα 26 Σχέση ανάμεσα στο  $R_e$  και στον  $K_{Ic}$  προς τη θερμοκρασία, στην οποία διενεργείται η δοκιμασία



Ταχύτητα παραμόρφωσης

Σχήμα 27 Επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης στον  $K_{Ic}$

Όταν καθορίζεται ο  $K_{Ic}$  για χαμηλές θερμοκρασίες, τότε το πάχος του δοκιμίου που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της ελαστικής-γραμμικής μηχανικής των θραύσεων είναι σημαντικά μικρότερο και, αντίστροφα, εάν στη θερμοκρασία  $70[^\circ\text{C}]$  για χάλυβα *ASTMA 533* της κατηγορίας *B* με επιτρεπόμενο ελάχιστο πάχος δοκιμίου ανταποκρινόμενο στις απαιτήσεις του  $K_{Ic}$  έχει τιμή  $25 [mm]$ , τότε για τον έλεγχο του  $K_{Ic}$  αυτού του ίδιου χάλυβα στη θερμοκρασία δωματίου πρέπει να χρησιμοποιηθεί δοκίμιο με πάχος  $305 [mm]$  **σχήμα 28**.



Σχήμα 28 Επίδραση της θερμοκρασίας για το επιτρεπόμενο πάχος στον καθορισμό του  $K_{Ic}$

### 2.6.8 Αναλυτικός τρόπος καθορισμού του συντελεστή εντάσεως των τάσεων $K_{Ic}$

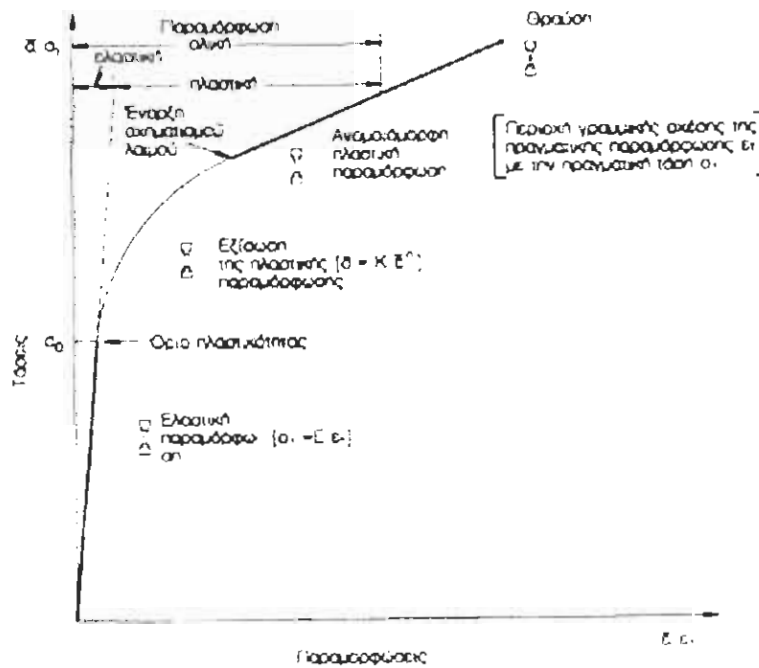
Για τους συγκολλούμενους χάλυβες με σχετικά χαμηλό όριο ροής και μικρό πάχος κάτω των  $70 [mm]$ , υπάρχει σημαντική δυσκολία, εξαιτίας του γνωστού περιορισμού των κανονισμών *ASTM* σχετικά με τη δυσδιάστατη επίπεδη κατάσταση παραμόρφωσης, δηλαδή υπάρχει ένα μέγιστο πάχος δοκιμίου. Αλλά και σ' αυτές τις περιπτώσεις, που υπάρχει δυνατότητα καθορισμού του  $K_{Ic}$  με άμεσο τρόπο δοκιμασίας σε κάμψη ή με έκκεντρο εφελκυσμό των δοκιμίων, είναι αναγκαίος ο ανάλογος εξοπλισμός και ο υψηλός βαθμός εξειδίκευσης του εργαστηριακού προσωπικού. Αυτό, αναμφίβολα, δυσχεραίνει τη χρήση του  $K_{Ic}$  ως κριτηρίου ανθεκτικότητας σε ψαθυρή θραύση, στις πρακτικές εφαρμογές. Οι

δυσκολίες αυτές, δημιούργησαν την ανάγκη καθορισμού της τιμής του συντελεστή  $K_{Ic}$  με έμμεσο τρόπο, που βασίζεται στο συσχετισμό αποτελεσμάτων δοκιμασιών δυσθραυστότητας και εφελκυσμού. Ένας από τους τύπους

συσχετισμού για τον καθορισμό του  $K_{Ic}$  είναι ο εξής:  $K_{Ic} = 5 \sqrt{\frac{2}{3} E \cdot \sigma_g \cdot n^2 \cdot \varepsilon}$

όπου:  $\varepsilon$  πραγματική παραμόρφωση, κατά τη διάρκεια εφελκυσμού κυλινδρικού δοκιμίου,  $n$  δείκτης εργοσκλήρυνσης (ισχυροποίησης),  $E$  μέτρο ελαστικότητας.  $\varepsilon = \ln\left(\frac{F_o}{F}\right)$  Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την έρευνα του

συσχετισμού είναι ενθαρρυντικά αλλά το λάθος καθορισμού του συντελεστή  $K_{Ic}$  με τέτοιες μεθόδους φτάνει το 30%. Οι τύποι συσχετισμού και, ιδιαίτερα, αυτοί οι οποίοι καθορίζουν το συντελεστή  $K_{Ic}$  με βάση τη δοκιμασία εφελκυσμού έχουν προέλθει από την ανάλυση του μηχανισμού θραύσης στην περιοχή της εγκοπής. Στο μηχανισμό θραύσης ασκούν σημαντική επίδραση οι παράμετροι που προκύπτουν από την παραμόρφωση του υλικού, άρα από την εργοσκλήρυνση, κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης τους. Για τη βελτίωση της τιμής του  $K_{Ic}$ , έπρεπε να βρεθούν οι τιμές του δείκτη εργοσκλήρυνσης  $n$ . Η εργοσκλήρυνση του υλικού, κατά τη διάρκεια παραμόρφωσης, φαίνεται στο διάγραμμα εφελκυσμού **σχήμα 29**.



**Σήμα. 41** Απεικονίζει τις χαρακτηριστικές ιδιότητες συμπεριφοράς του μετάλλου κατά την πλαστική παραμόρφωση

## Κεφάλαιο 3

### 3. Αντοχή των συγκολλητών συνδέσεων

Οι βασικές δοκιμές αντοχής είναι:

**Δοκιμές σε εφελκυσμό** των μετωπικών συνδέσεων, σταυρωτών καθώς και επικαλυμμένων. Οι δοκιμές αυτές δίνουν συγκεκριμένα αριθμητικά δεδομένα που καθορίζουν τις ιδιότητες αντοχής των συγκολλητών συνδέσεων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό και υπολογισμό της κατασκευής.

**Δοκιμές κάμψης και σπασίματος.** Είναι απλές τεχνολογικές δοκιμές, δίνοντας γενική εικόνα κάποιων ιδιοτήτων της σύνδεσης. Η δοκιμή κάμψης χρησιμεύει για τον έλεγχο των πλαστικών ιδιοτήτων. Το μέτρο αυτών των ιδιοτήτων είναι η γωνία που μπορεί να καμφθεί η σύνδεση χωρίς να δημιουργηθούν χαραγές ή αποκόμματα. Η δοκιμή σπασίματος παρέχει τη δυνατότητα εξακρίβωσης σφαλμάτων στο εσωτερικό της κόλλησης, δίνοντας συγχρόνως προσανατολιστικές πληροφορίες για τις πλαστικές ιδιότητες των αυχενικών κολλήσεων.

#### 3.1 Αντοχή σε θραύση

Στη στατική δοκιμή εφελκυσμού, η μετωπική σύνδεση παθαίνει ανομοιόμορφη επιμήκυνση σε όλο το μήκος. Η μικρότερη επιμήκυνση εμφανίζεται στην κόλληση και στη ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά, ενώ η μεγαλύτερη στο βασικό υλικό. Το φαινόμενο αυτό προξενεί τη χημική ανομοιογένεια στην κόλληση στο βασικό υλικό καθώς και στις δομικές μεταβολές στη ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά. Από την άποψη των ανομοιόμορφων επιμηκύνσεων στα διάφορα τμήματα της σύνδεσης δεν εκτελούνται μετρήσεις της επιμήκυνσης, ενώ στην πρακτική περιοριζόμαστε μόνο στον καθορισμό της

αντοχής θραύσης.  $R_m = \frac{F_m}{S}$  όπου:  $F_m$  δύναμη θραύσης,  $S$  διατομή της σύνδεσης. Η

ορθολογικά εκτελούμενη μετωπική κόλληση κατά κανόνα κόβεται στο βασικό υλικό πέρα από την κόλληση. Η αντοχή θραύσης των αυχενικών κολλήσεων αποτελεί πολύπλοκο πρόβλημα. Από αυτήν την άποψη η κατανομή των τάσεων στις αυχενικές κολλήσεις γίνονται αποδεκτές για τις συνδέσεις που καταπονούνται σε εφελκυσμό σε κάμψη και σε διάτμηση, ότι λειτουργούν σε διάτμηση. Η θεωρητική διατομή των κολλήσεων είναι η διατομή του μετώπου, δηλαδή το γινόμενο του πάχους και του μήκους. Για τις δοκιμές αντοχής θραύσης των αυχενικών κολλήσεων χρησιμοποιούνται σταυρωτές και επικαλυμμένες συνδέσεις με διαμήκεις και εγκάρσιες κολλήσεις. Για αυχενικές κολλήσεις

σταυρωτής σύνδεσης η αντοχή  $R_m = \frac{2F_m}{\Sigma a l}$  όπου  $F_m$  δύναμη θραύσης,  $\Sigma a l$  το

άθροισμα των επιφανειών των τομών των τεσσάρων κολλήσεων,  $a$  πάχος της κόλλησης,  $l$  μήκος της κόλλησης.

#### 3.2 Συγκέντρωση τάσεων στις συγκολλητές συνδέσεις

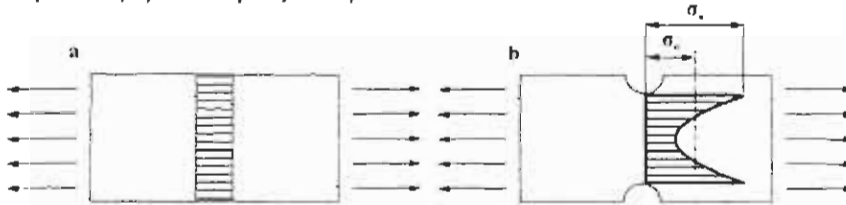
Το μέγεθος των τάσεων σε εφελκυσμένο έλασμα με σταθερή διατομή είναι



σταθερό.  $\sigma = \frac{F}{A} = const$  όπου:  $F$  δύναμη εφελκυσμού,  $A$  διατομή του ελάσματος.

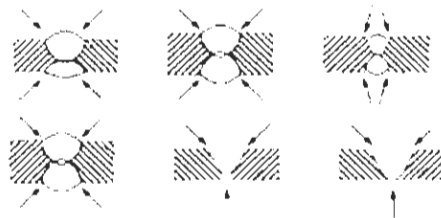
Στην περίπτωση ελάσματος με εγκοπή καθορισμένης ακτίνας, στην παρατηρούμενη διατομή η κατανομή των τάσεων δεν είναι ομοιόμορφη, αλλά έχει κατάσταση σύμφωνα με το **σχήμα 1b**. Το μέγεθος των τάσεων στο σημείο της εγκοπής χαρακτηρίζεται από το συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων  $a_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}$

όπου:  $\sigma_{max}$  η μέγιστη τάση στη ρίζα της εγκοπής,  $\sigma_n$  ονομαστική τάση στην ελαττωμένη διατομή από την εγκοπή.



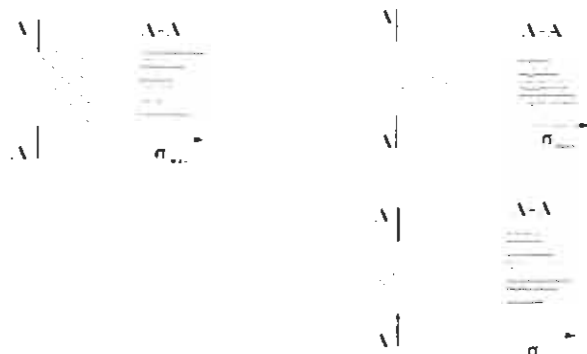
**Σχήμα 1** Κατανομή τάσεων: α με σταθερή διατομή, β με εγκοπή

Ο συντελεστής  $a_k$  καθορίζει πόσες φορές οι τάσεις στη θέση της εγκοπής είναι μεγαλύτερες από τις ονομαστικές τάσεις εμφανιζόμενες στην διατομή του στοιχείου. Στις περισσότερες περιπτώσεις το μέγεθος του συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων καθορίζεται πειραματικά με μεθόδους ελαστοπλαστικών μετρήσεων καταπόνησης. Η κατανομή των τάσεων στις συγκολλητές συνδέσεις εξαρτάται πρωταρχικά από τη μορφή και την ποιότητα εκτέλεσης της σύνδεσης. Εξίσου η μεταβολή της μορφής καθώς και τα σφάλματα τα οποία προκύπτουν από την εκτέλεση της κόλλησης προξενούν τη συμπίκνωση των τάσεων στο εξάρτημα που αποτελεί την εστία κόπωσης, στην περίπτωση λειτουργίας της κατασκευής, σε εναλλασσόμενες φορτίσεις. Στις μετωπικές κολλήσεις η συμπίκνωση των τάσεων εμφανίζεται στη μετάβαση του μετώπου της κόλλησης προς το βασικό υλικό, ως επίσης, στη θέση που υπάρχουν υποκοπές, έλλειψη υλικού στον αύλακα της κόλλησης, κοιλότητες στη ρίζα και μονόπλευρη διείδυση **σχήμα 2**. Τα σφάλματα εκτέλεσης προκαλούν μεγάλη συγκέντρωση τάσεων. Στο **σχήμα 3** φαίνεται η κατανομή των τάσεων στις μετωπικές κολλήσεις με τις υποκοπές στη μετάβαση της κόλλησης προς το βασικό υλικό καθώς και την ελλιπή διείδυση.



**Σχήμα 2** Υποκοπές στις συγκολλητές συνδέσεις.

Η κατανομή των τάσεων στις μετωπικές συνδέσεις με διαφορετικό πάχος των συνδεόμενων ελασμάτων φαίνεται στο **σχήμα 4**. Η εκλέπτυνση του ελάσματος με μεγαλύτερο πάχος δημιουργεί ευνοϊκότερη πορεία των δυνάμεων, με αποτέλεσμα να υπάρχει ωφελιμότερη κατανομή των τάσεων.

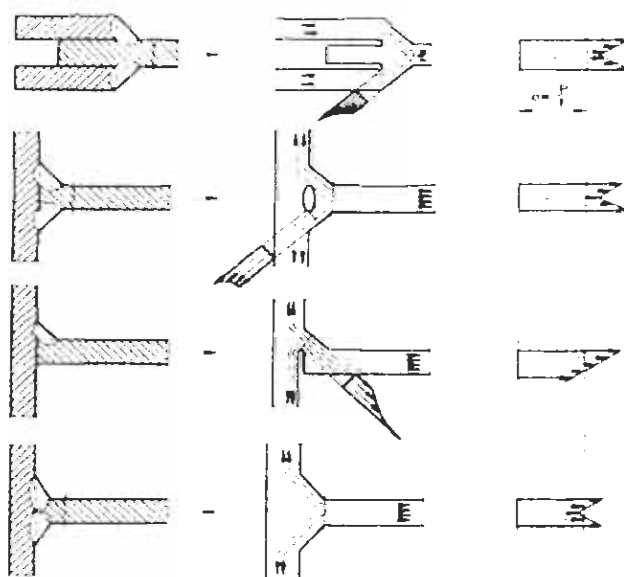


Σχήμα 3 Κατανομή των τάσεων στις συνδέσεις με σφάλματα.

Στις συγκολλητές συνδέσεις εκτελούμενες με αυχενικές κολλήσεις, η πορεία των διανυσμάτων των δυνάμεων είναι πάντα ανομοιόμορφη *σχήμα 5*.



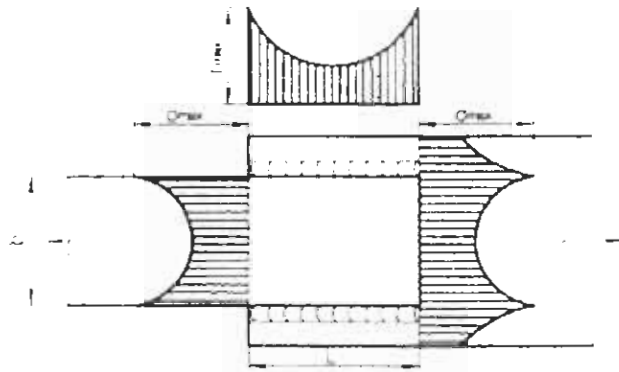
Σχήμα 4 Κατανομή των τάσεων στις μετωπικές συνδέσεις



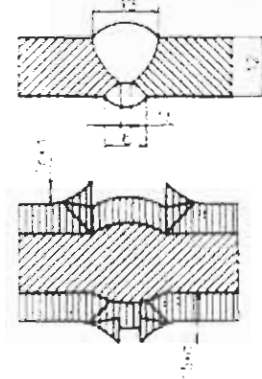
Σχήμα 5 Κατανομή των τάσεων στις συνδέσεις με αυχενικές κολλήσεις

Ωφελιμότερη πορεία των διανυσμάτων δυνάμεων και της κατανομής των τάσεων έχουν οι συνδέσεις με μετωπική κόλληση *K*. Μεγάλη συμπύκνωση των τάσεων παρατηρείται στη ρίζα της σταυρωτής σύνδεσης. Οι ελαστοπλαστικές δοκιμές απέδειξαν ότι ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων για αυτήν την σύνδεση αποκτά τιμή  $\alpha_k=5$ . Σημαντική ελάττωση αυτού του συντελεστή μπορεί να επιτευχθεί με τη χρησιμοποίηση αυτόματης συγκόλλησης με βυθιζόμενο τόξο, επειδή συμβαίνει υπέρηξη στη ρίζα και ευκολότερη πορεία των διανυσμάτων δυνάμεων. Στις επικαλυπτόμενες συνδέσεις η μεγαλύτερη συμπύκνωση των τάσεων εμφανίζεται στα άκρα των κολλήσεων *σχήμα 6*. Ο συντελεστής συγκέντρωσης των τάσεων  $\alpha_k$  εξαρτάται από το λόγο του μήκους της αυχενικής κόλλησης προς το πάχος της και, επίσης, από το λόγο του μήκους προς την

απόσταση μεταξύ των κολλήσεων,



Σχήμα 6 Κατανομή των τάσεων στις συνδέσεις επικάλυψης.



Σχήμα 7 Κατανομή των τάσεων στις μετωπικές συνδέσεις.

Παρά τις πολλές δυσκολίες εκτέλεσης ελαστοπλαστικών μοντέλων για συγκολλητές συνδέσεις, διενεργήθηκαν έρευνες με σκοπό καθορισμού των συντελεστών συγκέντρωσης τάσεων. Στο *σχήμα 7* φαίνεται μετωπική σύνδεση με πάχος  $12[mm]$  λοξοτομημένη σε V καθώς και η πραγματική κατανομή των τάσεων. Στη μετάβαση της κόλλησης στο βασικό υλικό, οι τάσεις αυξήθηκαν μέχρι  $1.6\sigma$  ενώ, από την άλλη πλευρά, με την υποσυγκόλληση μέχρι  $1.5\sigma$ . Το μέγεθος του συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων στις μετωπικές συνδέσεις εξαρτάται από το ύψος της ενίσχυσης. Ακόμη και για τις πλέον μη ωφέλιμες συνθήκες, ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων μπορεί να φτάσει μέχρι  $\alpha_k = 3$ .

### 3.3 Αντοχή των συγκολλητών συνδέσεων σε εναλλασσόμενα φορτία

Οι συγκολλητές κατασκευές χρησιμοποιούνται και για τη μεταφορά εναλλασσόμενων φορτίων. Τέτοιου είδους κατασκευές είναι: Οι σιδηροδρομικές γέφυρες, οι γερανογέφυρες, τα πλαίσια κινητήρων υψηλής πίεσης, τα πλαίσια φορτηγών αυτοκινήτων. Με την επίδραση των εναλλασσόμενων φορτίων στα συνδεδεμένα εξαρτήματα εμφανίζονται εναλλασσόμενες τάσεις εξίσου ως προς το μέγεθος και τη διεύθυνση. Επαναλαμβανόμενες περιοδικά οι τάσεις, προξενούν μετά από κάποια περίοδο εκμετάλλευσης, ρηγματώσεις κόπωσης, άρα επέρχεται βαθμιαία απώλεια της ικανότητας μεταφοράς φορτίου. Οι ρηγματώσεις κόπωσης, χωρίς την αλλαγή της μορφής του εξαρτήματος, εμφανίζονται απρόβλεπτα, συνήθως με σχετικά χαμηλό επίπεδο των τάσεων. Οι ρηγματώσεις κόπωσης

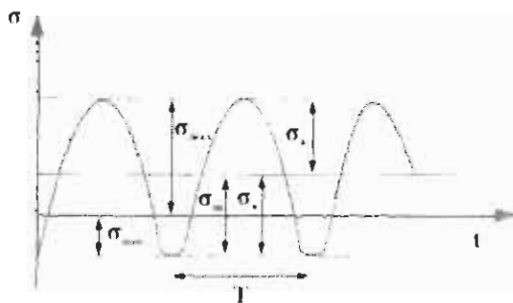
αναπτύσσονται όταν το μη μετακινούμενο εξάρτημα ή η σύνδεση μπορεί να μεταφέρει φορτίο κατά στατικό τρόπο. Η υπέρβαση της αντοχής θραύσης στο τέλος της ρηγμάτωσης κόπωσης προξενεί την ολική καταστροφή της διατομής. Στα συγκολλητά εξαρτήματα η ρηγμάτωση κόπωσης δημιουργείται συνήθως με απότομες μεταβολές των διατομών, στα εξωτερικά και εσωτερικά σφάλματα των συνδέσεων και στους κρατήρες της κόλλησης. Το θραύσμα κόπωσης έχει ειδικό χαρακτήρα. Στο θραύσμα κόπωσης εμφανίζονται δύο ζώνες-η ζώνη ρηγμάτωσης με ομαλή επιφάνεια και η ζώνη ρηγμάτωσης με τραχεία επιφάνεια.

### 3.3.1 Είδη φορτίσεων

Οι φορτίσεις που μεταφέρονται από τις κατασκευές διαφούνται σε: στατικές, δυναμικές και εναλλασσόμενες.

**Στατικές φορτίσεις** είναι οι φορτίσεις που δε μεταβάλλονται στο χρόνο ή δεν προξενούν σημαντικές επιταχύνσεις. Οι στατικές φορτίσεις είναι: η μάζα της κατασκευής, τα φορτία δεξαμενών, η φόρτιση με χιόνια, με ανέμους.

**Δυναμικές φορτίσεις** είναι οι φορτίσεις που επιδρούν σε πολύ μικρή χρονική διάρκεια, προξενώντας σημαντικές επιταχύνσεις και αύξηση των δυνάμεων κατά τη διαδικασία κρούσης. Η κρούση προξενεί την εμφάνιση ελαστικών ή πλαστικών παραμορφώσεων της κατασκευής. Οι φορτίσεις που μεταβάλλονται στο χρόνο ονομάζονται εναλλασσόμενες φορτίσεις. Η πορεία των εναλλασσόμενων φορτίων στο χρόνο ορίζεται ως φάσμα φόρτισης. Το φάσμα αυτό μπορεί να είναι μη ρυθμικό ή επίσης να παρουσιάζει ορισμένη ορθότητα. Η επανάληψη του ορθού φάσματος στα επιλεγμένα σταθερά τμήματα του χρόνου, που ονομάζονται περίοδοι, είναι χαρακτηριστικό για την περιοδική εναλλασσόμενη φόρτιση. Ιδιαίτερο παράδειγμα περιοδικής εναλλασσόμενης φόρτισης είναι η ημιτονοειδής εναλλασσόμενη φόρτιση. Ο κύκλος των ημιτονοειδών εναλλασσόμενων τάσεων καταγράφεται δια των μέγιστων τάσεων  $\sigma_{max}$  των ελάχιστων τάσεων  $\sigma_{min}$  της περιόδου εναλλαγών  $T$  ή της συχνότητας  $f$  **σχήμα 8**.



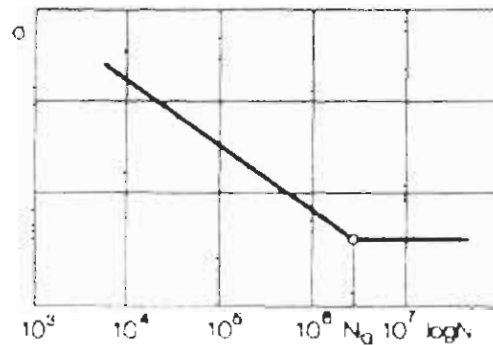
**Σχήμα 8** Παράδειγμα φάσματος τάσεων εναλλασσόμενων ημιτονοειδώς.

Η μέση τάση του κύκλου είναι:  $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$  ενώ το εύρος των τάσεων

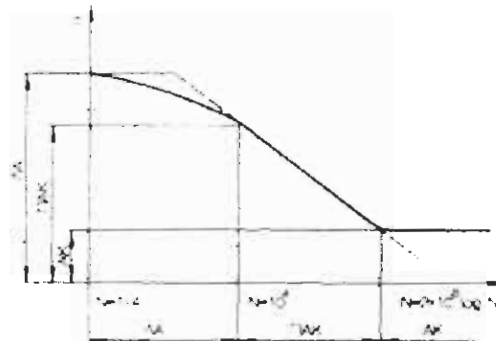
$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$  Ο λόγος της ελάχιστης τάσης προς τη μέγιστη ονομάζεται

συντελεστής ασυμμετρίας του κύκλου.  $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$  Περισσότερο τυπικοί κύκλοι

είναι ο μονόπλευρος και ο δίπλευρος κύκλος. Στο μονόπλευρο κύκλο η τάση εναλλάσσει την τιμή της, αλλά δεν εναλλάσσει το πρόσημο της. Οι κύκλοι αυτοί δημιουργούν τέμνουσα κατάσταση. Ειδική περίπτωση μονόπλευρου κύκλου είναι ο κύκλος που περνάει από το μηδέν, του οποίου η  $\sigma_{min}=0$  ή επίσης η  $\sigma_{max}=0$ . Στο δίπλευρο κύκλο, οι τάσεις εναλλάσσουν το πρόσημο και την τιμή τους. Ειδική περίπτωση του δίπλευρου κύκλου είναι ο εκκρεμής κύκλος,



Σχήμα 9 Λιάγραμμα κόπωσης Wöhler



Σχήμα 10 Πλήρες διάγραμμα κόπωσης LA στο σύστημα,  $\sigma$  περιοχή της λιγοκυκλικής αντοχής, PAK περιοχή περιορισμένης αντοχής κόπωσης, AK αντοχή κόπωσης.

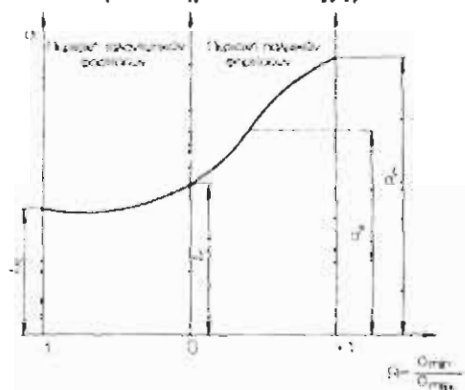
του οποίου  $\sigma_{max}=\sigma_{min}$ . Αυτός ο κύκλος είναι συμμετρικός. Οι κύκλοι, στους οποίους οι  $\sigma_{max}$  και  $\sigma_{min}$  διαφέρουν ως προς την τιμή, είναι ασύμμετροι κύκλοι. Κύκλοι με τον ίδιο συντελεστή ασυμμετρίας  $K$  είναι όμοιοι κύκλοι.

### 3.3.2 Διαγράμματα κόπωσης

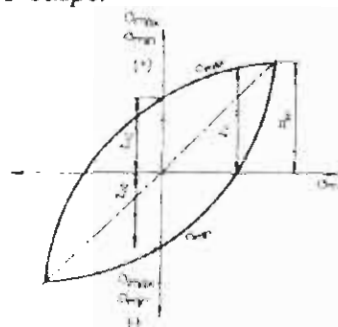
Η τιμή της καταστρεπτικής τάσης  $\sigma$  εξαρτάται από τον αριθμό των κύκλων  $N$ . Με την αύξηση του αριθμού κύκλων  $N$ , η τιμή της καταστρεπτικής τάσης  $\sigma$  ελαττώνεται. Η σχέση μεταξύ των τάσεων και των μεταφερόμενων καταστρεπτικών κύκλων ορίζεται από την καμπύλη Wöhler σχήμα 9. Στο σύστημα  $\sigma$ - $\log N$ , το διάγραμμα κόπωσης για τους χάλυβες είναι ευθεία τεθλασμένη γραμμή. Η μέγιστη τάση, εξαιτίας της οποίας καταστρέφεται το δοκίμιο, με αριθμό κύκλων που γίνεται αποδεκτός ως βάση, ονομάζεται αντοχή κόπωσης ή όριο κόπωσης και ορίζεται με το σύμβολο  $N_G$ . Η αντοχή κόπωσης χαρακτηρίζει τις ιδιότητες κόπωσης με την οριζόντια ή με το ελαφρά κεκλιμένο τμήμα της καμπύλης Wöhler. Στις χαλυβδικοκατασκευές και, πρώτα απ' όλα, στις συγκολλητές συνδέσεις εξαρτημάτων από ανθρακοχάλυβες και χάλυβες αυξημένης αντοχής, ορίζεται η αντοχή κόπωσης με βάση  $N_G=2 \cdot 10^6$  κύκλων. Από

την καμπύλη *Wöhler*, εκτός από την αντοχή κόπωσης *AK*, είναι δυνατό να διαβαστούν και οι διάφορες τιμές της περιορισμένης αντοχής κόπωσης *ΠAK*, όπως και της λιγοκυκλικής αντοχής, *ΛA* κόπωση με μικρό αριθμό κύκλων *σχήμα 10*. Η αρχή του συστήματος αντιστοιχεί στο 1/4 του κύκλου φόρτισης. Αυτή η τιμή της καταστροφικής τάσης είναι συγκρινόμενη με κατάλληλη αντοχή κόπωσης κατά τη στατική φόρτιση. Η περιοχή της λιγοκυκλικής αντοχής είναι συνήθως κάτω από  $10^4$ .

Η συσχέτιση της αντοχής του υλικού και των συγκολλητών συνδέσεων με το είδος της φόρτισης φαίνεται στα διαγράμματα κόπωσης. Υπάρχουν πολλά και διάφορα διαγράμματα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμασιών κόπωσης, με σκοπό την αξιοποίηση τους στο σχεδιασμό κατασκευών. Στις χαλυβδινοκατασκευές χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο το διάγραμμα *Kommers-Jasper* *σχήμα 11*, συσχέτισης της αντοχής θραύσης και της αντοχής κόπωσης με μονόπλευρο και δίπλευρο εφελκυσμό, ανάλογα με το συντελεστή ασυμμετρίας του κύκλου, που βρίσκεται στο τμήμα  $-1 < R < +1$ . Για κάθε υλικό, όπως επίσης και για συγκολλητή σύνδεση, είναι δυνατό να καθοριστεί πειραματικά το διάγραμμα κόπωσης του *Smith*, της σχέσης μεταξύ  $\sigma_{max}$  και  $\sigma_{min}$  με την μέση τάση  $\sigma_m$  *σχήμα 12*. Για πρακτικούς λόγους, το διάγραμμα μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά *σχήμα 13*.

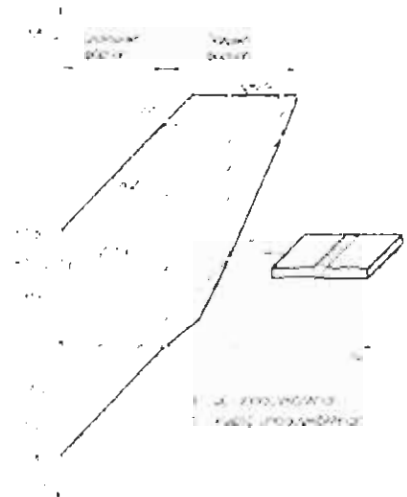


*Σχήμα 11* Διάγραμμα *Kommers-Jasper*

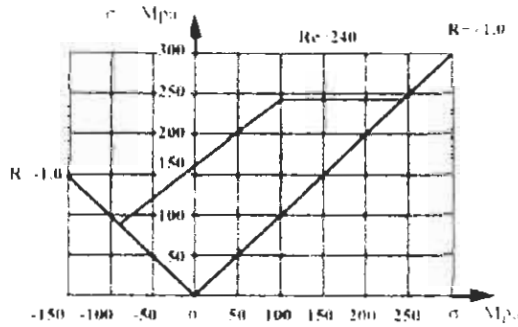


*Σχήμα 12* Διάγραμμα κόπωσης *Smith*.

Τα αποτελέσματα των δοκιμασιών κόπωσης μπορούν να παρουσιαστούν περισσότερο ξεκάθαρα στο διάγραμμα *Goodman*, που δίνει τη σχέση  $\sigma_{min} = f(\sigma_{max})$  κάθε τιμή του συντελεστή ασυμμετρίας κύκλου που βρίσκεται στο τμήμα  $-1 < R < +1$  *σχήμα 14*.



Σχήμα 13 Απλοποιημένο διάγραμμα κόπωσης Smith για μετωπική σύνδεση από χάλυβα St35SX



Σχήμα 14 Διάγραμμα Goodman για μετωπικές συνδέσεις από χάλυβα St35 με πάχος 15[mm]

Οι χάλυβες με αυξημένη αντοχή είναι πολύ ευαίσθητοι στην επίδραση των ρωγμών συγκρινόμενοι με τους κατασκευαστικούς ανθρακοχάλυβες. Η ευαισθησία των χάλυβων στην επίδραση των ρωγμών στις συγκολλητές συνδέσεις αυξάνεται ιδιαίτερα κατά τη λειτουργία της κατασκευής σε εναλλασσόμενη φόρτιση. Στην περίπτωση αυτών των φορτίσεων, η αντοχή κόπωσης συγκολλητών συνδέσεων με χάλυβα αυξημένης αντοχής είναι περίπου η ίδια με αυτή των κατασκευαστικών ανθρακοχάλυβων.

### 3.4 Η επίδραση της μεθόδου συγκόλλησης και του εναποτιθέμενου υλικού

Οι συγκολλητές συνδέσεις εκτελούμενες με χειρωνακτική συγκόλληση τόξου, αυτόματα με βυθισμένο τόξο, στην ατμόσφαιρα  $CO_2$  έχουν περίπου την ίδια αντοχή

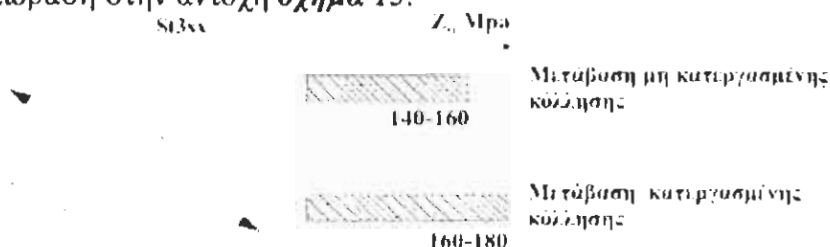
Σύνδεση	Αντοχή κόπωσης $Z_r$ [MPa]		
	Τύποι ηλεκτροδίων		Αυτόματη συγκόλληση με βυθισμένο τόξο
	EA 1.46	EB 1.46	
Μετωπικές με την ενίσχυση	170	190	180
Μετωπικές με κατεργασμένη την ενίσχυση	210	230	260
Σταυρωτές	-	80	100

Πίνακας 1 Η επίδραση των εναποτιθέμενων υλικών στην αντοχή κόπωσης συνδέσεων με χάλυβα St35SX και βάση  $N=2 \cdot 10^6$  κύκλων,  $\sigma_{min}=20$  [MPa]

κόπωσης. Η αντοχή κόπωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατηγορία των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση *πίνακας 1*.

### 3.5 Η επίδραση των σφαλμάτων στις συγκολλητές συνδέσεις

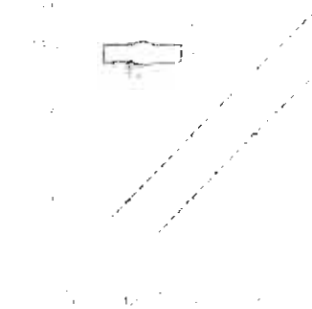
Βασική επίδραση για τη διάρκεια εκμετάλλευσης των συγκολλητών κατασκευών, εργαζομένων με εναλλασσόμενα φορτία, ασκεί η ποιότητα εκτέλεσης των συνδέσεων. Στις περισσότερες μη ωφέλιμες περιπτώσεις πρέπει να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη πτώσης της αντοχής κόπωσης των συνδέσεων με σφάλματα κατά 50%-60% σε σύγκριση με τις συνδέσεις που εκτελέστηκαν σωστά. Στα κύρια σφάλματα ανήκουν: οι υποκοπές στη μετάβαση της κόλλησης προς το μητρικό υλικό, το τραχύ και διογκωμένο μέτωπο της κόλλησης, οι κρατήρες στα άκρα της κόλλησης, οι ρηγματώσεις, η ελλιπής διείσδυση, η σκωρίαση και οι πόροι. Οι υποκοπές υπάρχουν στη μετάβαση της κόλλησης προς το μητρικό υλικό. Στις κατασκευές που εργάζονται με σταθερές φορτίσεις, δεν ασκούν μεγάλη επιρροή στη διάρκεια εκμετάλλευσης της κατασκευής. Το βάθος της υποκοπής μειώνει τη διατομή των συνδεόμενων εξαρτημάτων και βάσει των προδιαγραφών που εμπεριέχονται στους κανονισμούς εκτέλεσης των κολλήσεων, πρέπει να ξανακολληθούν. Οι υποκοπές ασκούν μεγάλη επίδραση στην αντοχή κόπωσης των μετωπικών συνδέσεων. Οι υποκοπές με βάθος 3%-5% ελαττώνουν την αντοχή κόπωσης της μετωπικής σύνδεσης μέχρι  $Zrj=90[MPa]-100[MPa]$ . Η αφαίρεση των υποκοπών με λείανση προς τη διεύθυνση, σύμφωνα με τη δράση των δυνάμεων, επιτρέπει την επίτευξη αντοχής κόπωσης της μετωπικής σύνδεσης  $Zrj=160[MPa]-180[MPa]$ . Στις αυχενικές συνδέσεις, οι υποκοπές δεν ασκούν μεγάλη επίδραση στην αντοχή *σχήμα 15*.



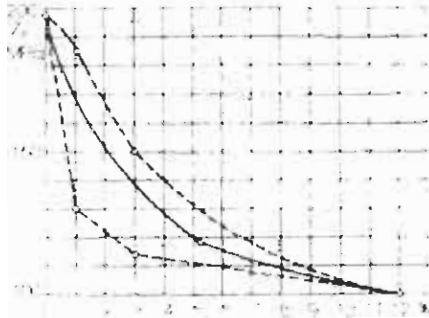
*Σχήμα 15* Αντοχή κόπωσης σύνδεσης με εγκάρσιο νεύρο

Μεγάλη επίδραση στην αντοχή κόπωσης των μετωπικών συνδέσεων ασκεί το ύψος της ενίσχυσης. Η ποσοτική επίδραση της μορφής της σύνδεσης με ενίσχυση, που καθορίζεται με τη γωνία μεταξύ του ελάσματος και της εφαπτομένης της ενίσχυσης, φαίνεται στο *σχήμα 16*. Η αντοχή κόπωσης των συνδέσεων με ενίσχυση ορίζεται με τη σταθερά  $N=2 \cdot 10^6$  κύκλων. Τα εσωτερικά σφάλματα με μορφή πόρων, σκουριών και ελλιπείς διείσδυσης ασκούν μεγάλη επιρροή στην αντοχή κόπωσης. Από τις έρευνες που έγιναν για τον καθορισμό του ορίου των επιτρεπόμενων σφαλμάτων στις μετωπικές κολλήσεις παρουσιάστηκαν δυσκολίες για την ασφαλή εκμετάλλευση της κατασκευής. Μερικοί ερευνητές νομίζουν ότι ως επιτρεπόμενα σφάλματα μπορούν να θεωρηθούν οι πόροι που προξενούν ελάττωση της διατομής της κόλλησης αλλά όχι μεγαλύτερη από 1.7%.



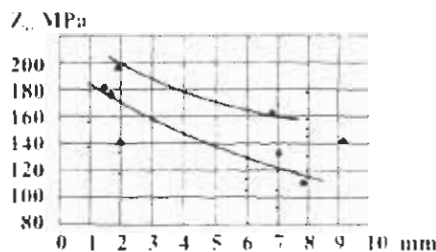


**Σχήμα 16** Επίδραση της ενίσχυσης κολλήσεως στην αντοχή κόπωσης μετωπικής σύνδεσης 1 μητρικό υλικό κατεργασμένο μηχανικά, 2 μητρικό υλικό στην αρχική του κατάσταση.



**Σχήμα 17** Επίδραση των πόρων στην αντοχή κόπωσης μετωπικών συνδέσεων.

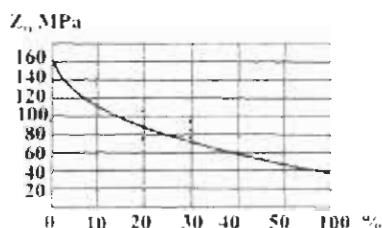
Περισσότερο επικίνδυνοι είναι οι αλυσιδωτοί πόροι καθώς και οι πόροι που επιπλέουν στην επιφάνεια της κόλλησης. Σε πολλές περιπτώσεις η συγκέντρωση των τάσεων στο σημείο μετάβασης της κόλλησης προς το μητρικό υλικό μπορεί να προξενήσει μεγαλύτερη επίδραση στην αντοχή κόπωσης της σύνδεσης απ' ό,τι οι πόροι που υπάρχουν στην κόλληση. Στο **σχήμα 17** φαίνεται η επίδραση των πόρων στην αντοχή κόπωσης της μετωπικής σύνδεσης με αφαιρούμενη ενίσχυση, ανάλογα με την ελάττωση της διατομής. Η ελάττωση της διατομής καθορίζεται από τη φωτομετρική μέθοδο, που συνίσταται στη μέτρηση της αμαύρωσης του ραδιογραφήματος της σύνδεσης με τα σφάλματα. Η σκωρίαση, συμπαγής και κατά ζώνες, ανήκει στα σφάλματα που συνήθως ανιχνεύονται κατά το ραδιογραφικό έλεγχο της σύνδεσης συγκολλητών κατασκευών. Οι συμπαγείς σκουριές έχουν μορφή πλησιέστερη στους πόρους αερίων. Για αυτό έχουν παρόμοια με τους πόρους επίδραση στην αντοχή κόπωσης. Οι σκουριές κατά ζώνες δημιουργούν γραμμικά σφάλματα. Ορίζεται ότι μεταξύ της αντοχής κόπωσης και της διάστασης του σφάλματος υπάρχει συσχετισμός του καθορισμένου μήκους της σκουριάς που φαίνεται στο ραδιογράφημα. Ο συσχετισμός αυτός για τις μετωπικές συνδέσεις που εκτελούνται με ηλεκτρόδια χαμηλής ποσότητας υδρογόνου και ρουτίλιου φαίνεται στο **σχήμα 18**. Από το συσχετισμό αυτό συμπεραίνεται ότι τα μικρά σφάλματα προξενούν σημαντική ελάττωση της αντοχής κόπωσης. Στον **πίνακα 13** φαίνονται οι τιμές της αντοχής κόπωσης μετωπικών συνδέσεων με *χάλυβα St3S* πάχους  $15[mm]$  με σκουριές κατά ζώνες. Στις συνδέσεις χωρίς σφάλματα η ενίσχυση παρέμεινε, ενώ στις υπόλοιπες συνδέσεις αφαιρέθηκε.



Σχήμα 18 Επίδραση των μήκους σκουριών-κατά ζώνες στην αντοχή κόπωσης μετωπικών συνδέσεων εκτελεσθέντων: 1 με ηλεκτρόδια χαμηλού υδρογόνου, 2 με ηλεκτρόδια ρουτιλίου.

Περιγραφή σφάλματος Χωρίς σφάλματα με την ενίσχυση	Κλάση ελαττωματικότητας	Αντοχή κόπωσης $Z_{\eta}$ 0.2 MPa
Bp11	1	180
Bp12	2	174
Bp13	3	148
Bp14	4	117
Bp23	4	108
Bp24	5	100
Bp34	5	

Πίνακας 2 Αντοχή κόπωσης μετωπικής σύνδεσης με χάλυβα St 3S με σκουριές κατά ζώνες, με βάση  $N=2 \cdot 10^6$  κύκλων.



Σχήμα 19 Επίδραση στην ελάττωση εγκάρσιας επιφάνειας από έλλειψη διείσδυσης στην αντοχή κόπωσης

Μεγάλη επίδραση στην αντοχή κόπωσης ασκεί η ελλυπής ή ατελής διείσδυση στις μετωπικές συνδέσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ελλυπής διείσδυση χαρακτηρίζεται από αιχμηρά τοιχώματα και μικρές ακτίνες των καμπυλών. Αυτό οδηγεί στις μεγάλες συγκεντρώσεις των τάσεων και την ελάττωση της αντοχής κόπωσης. Στο **σχήμα 19** φαίνεται ο συσχετισμός μεταξύ της αντοχής κόπωσης μετωπικής σύνδεσης από κατασκευαστικό ανθρακοχάλυβα και με ποσοστιαία ελάττωση της επιφάνειας διατομής με μονόπλευρο εφελκυσμό και με  $N=2 \cdot 10^6$  κύκλων. Τα αποτελέσματα των δοκιμασιών, που φαίνονται στο **σχήμα 19**, αποδεικνύουν μονοσήμαντα ότι το μήκος και το πλάτος του σφάλματος, έχουν σημαντική επιρροή στην αντοχή κόπωσης της σύνδεσης. Μερικοί ερευνητές συνδέουν την αντοχή κόπωσης των μετωπικών συνδέσεων με την ελλυπή διείσδυση από το βάθος αυτού του σφάλματος. Στον **πίνακα 14** φαίνονται οι τιμές της αντοχής κόπωσης μετωπικής σύνδεσης με πάχος 18[mm] από χάλυβα St3. Η αντοχή κόπωσης ορίζεται με  $N=2 \cdot 10^6$  κύκλων και με συντελεστή ασυμμετρίας κύκλου  $R=+0.2$ . Και σ' αυτήν την περίπτωση με ασήμαντη έλλειψη διείσδυσης ελαττώνεται ξεκάθαρα η αντοχή κόπωσης της σύνδεσης. Η παραπέρα αύξηση του σφάλματος ελαττώνει την αντοχή κόπωσης αναλογικά με τη διατομή.

Περιγραφή σφάλματος	$Z_{II}$ , MPa
Χωρίς σφάλματα η ενίσχυση κατεργασμένη	265
Έλλειψη διείσδυσης βάθους (0.05-0.6)g	190
Έλλειψη διείσδυσης βάθους (0.11-0.16)g	135
Έλλειψη διείσδυσης βάθους (0.24-0.28)g	83
Έλλειψη διείσδυσης βάθους (0.43-0.46)g	65

**Πίνακας 3** Αντοχή κόπωσης μετωπικών συνδέσεων με ελλιπή διείσδυση, με βάση  $N=2 \cdot 10^6$  κύκλων

## Κεφάλαιο 4

### 4. Τάσεις και παραμορφώσεις

#### 4.1 Ανάπτυξη των τάσεων συγκόλλησης, συνέπειες και η αντιμετώπιση τους

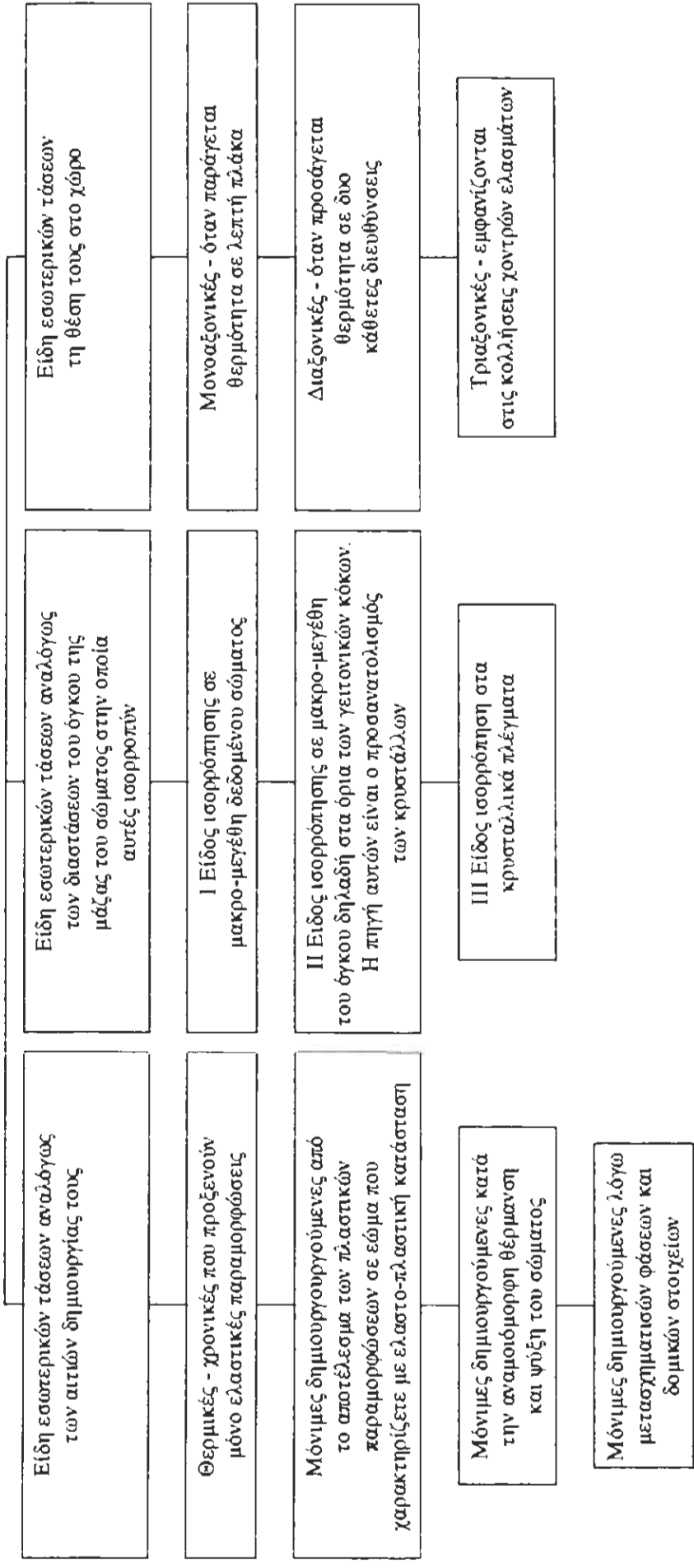
#### 4.2 Εσωτερικές τάσεις

Κατά τη διαδικασία συγκόλλησης των μετάλλων, λόγω ανομοιόμορφης θέρμανσης προξενείται πάντα η εμφάνιση τάσεων και παραμορφώσεων στις συγκολλητές συνδέσεις. Οι τάσεις αυτές ονομάζονται εσωτερικές τάσεις. Μπορούν να χαρακτηριστούν ως τάσεις, οι οποίες ισορροπούν μεταξύ τους στο εσωτερικό κάποιας περιοχής του σώματος και εμφανίζονται χωρίς εξωτερικές φορτίσεις. Τότε πληρούνται οι ακόλουθες συνθήκες:

- Το άθροισμα όλων των εσωτερικών δυνάμεων σε τυχαία περιοχή του σώματος είναι ίσο με μηδέν,  $\Sigma F=0$
- Το άθροισμα των προξενούμενων ροπών από τη δράση των εσωτερικών δυνάμεων σε τυχαία περιοχή του σώματος, είναι ίσο με μηδέν,  $\Sigma M=0$
- Οι εσωτερικές τάσεις διαιρούνται, ανάλογα με τον τρόπο εμφάνισης τους, όπως δείχνει το **σχήμα 1**

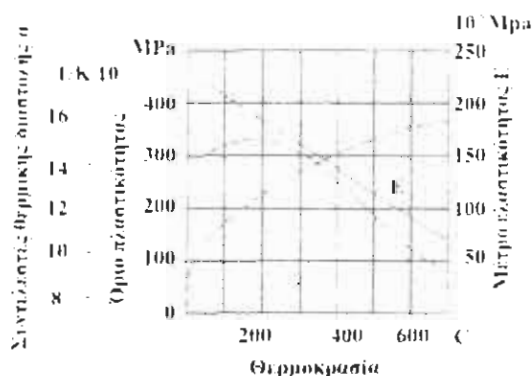
Κατά τη διαδικασία συγκόλλησης προκύπτει τοπική θέρμανση και ψύξη του μετάλλου, λόγω της θερμικής διαστολής, το θερμαινόμενο μέταλλο διαστέλλεται, το ψυχόμενο συστέλλεται. Το μέρος του μετάλλου που συγκολλήθηκε δημιουργεί δυσκαμψία, που περιορίζει την ελεύθερη μεταβολή των διαστάσεων της θερμαινόμενης ζώνης. Ο περιορισμός ελευθερίας των παραμορφώσεων προξενεί την εμφάνιση τάσεων  $\sigma=E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t$  όπου:  $E$  μέτρο ελαστικότητας,  $\alpha_t$  γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής,  $\Delta t$  διαφορά θερμοκρασίας της θερμαινόμενης και της μη θερμαινόμενης ζώνης του μετάλλου. Οι τιμές  $E$  και  $\alpha_t$  μεταβάλλονται σε μεγάλο βαθμό στην περιοχή της εμφανιζόμενης θερμοκρασίας, κατά τη διαδικασία συγκόλλησης **σχήμα 2**. Επίσης, μεταβάλλεται, σε μεγάλο βαθμό, και το όριο πλαστικότητας του μετάλλου, η  $\Delta t$  λίγο μεγαλύτερη από τους  $100[^\circ C]$ , προξενεί την εμφάνιση τάσεων ίσων με το όριο πλαστικότητας. Η μεγάλη διαφορά των θερμοκρασιών κατά τη συγκόλληση είναι και η αιτία της δημιουργίας των πλαστικών παραμορφώσεων. Επίσης, από την άποψη των χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων στις υψηλές θερμοκρασίες καθώς και του μικρού όγκου του θερμαινόμενου μετάλλου, σε σύγκριση με το μέγεθος ολόκληρου του συγκολλούμενου στοιχείου, εμφανίζονται μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις στη ζώνη της σύνδεσης.

Εσωτερικές τάσεις



Σχήμα 1 Ταξινόμηση εσωτερικών τάσεων

Οι πρόσθετες παραμορφώσεις δημιουργούνται από τις μεταβολές του όγκου, συνοδευόμενες από τους μετασχηματισμούς των φάσεων του μετάλλου. Το πρόβλημα των ιδίων τάσεων από το μετασχηματισμό των φάσεων δεν είναι ουσιώδες κατά τη συγκόλληση μαλακών ανθρακοχαλύβων, επειδή οι μετασχηματισμοί των φάσεων γίνονται στην περιοχή θερμοκρασιών, στην οποία το όριο ελαστικότητας είναι χαμηλό και οι μεταβολές στον όγκο εύκολα ισορροπούνται από τις πλαστικές παραμορφώσεις. Ενώ στην περίπτωση των κραματωμένων χαλύβων, οι μετασχηματισμοί φάσεων γίνονται σε χαμηλότερη θερμοκρασία.



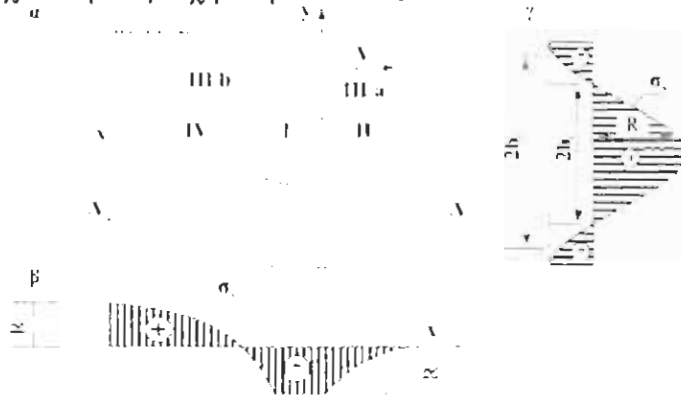
Σχήμα 2 Ιδιότητες των χαλύβων σε υψηλές θερμοκρασίες

Για το λόγο αυτό, στους χάλυβες αυτούς η επίδραση των μετασχηματισμών των φάσεων στην κατάσταση των ιδίων τάσεων είναι μεγάλη. Στις συγκολλητές συνδέσεις, κατά την ψύξη, αναπτύσσονται εφελκυστικές και θλιπτικές εσωτερικές τάσεις, προξενούμενες από τη μεταβολή της θερμοκρασίας και από την ύπαρξη σ' αυτές τυχόν μετασχηματισμών φάσεων. Οι καταστάσεις των τάσεων και παραμορφώσεων, κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης μεταβάλλονται ως προς το μέγεθος και το πρόσημο. Είναι οι λεγόμενες **μεταβατικές**. Οι μεταβατικές καταστάσεις των τάσεων και παραμορφώσεων ασκούν επίδραση στη δημιουργία ρωγμών, κυρίως θερμών. Μετά την ψύξη στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, στο μέταλλο εμφανίζονται εσωτερικές **παραμένουσες τάσεις** συγκόλλησης. Στα μεταλλικά στοιχεία, επίσης, εμφανίζονται εσωτερικές τάσεις, που δημιουργούνται με τις διαδικασίες έλασης, πλαστικής κατεργασίας, χύτευσης, θερμικής κατεργασίας, μηχανικής κατεργασίας. Η τελική κατάσταση των τάσεων δημιουργείται από τη συνάθροιση των διαδοχικών καταστάσεων των εσωτερικών τάσεων, δημιουργημένων κατά τις διαδικασίες παρασκευής του μετάλλου. Το τελευταίο στάδιο στις συγκολλητές κατασκευές είναι συνήθως η συγκόλληση, η οποία ασκεί τη μεγαλύτερη επίδραση για την τελική κατάσταση των εσωτερικών παραμενουσών τάσεων.

#### 4.3 Κατανομή των ιδίων τάσεων

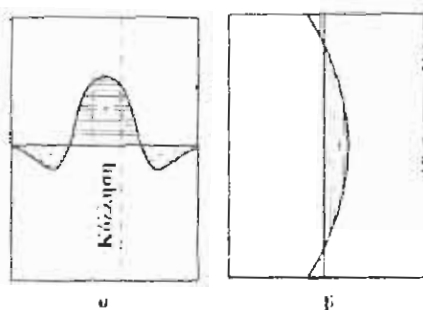
Οι εσωτερικές τάσεις και παραμορφώσεις διακρίνονται από την άποψη της αιτίας εμφάνισής τους, από το χρόνο και την περιοχή της αλληλεπίδρασης τους, καθώς και από τον όγκο, στον οποίο ισορροπούνται με τις δυνάμεις αντίδρασης. Η γενική διάκριση των τάσεων και παραμορφώσεων φαίνεται στο **σχήμα 3**.

Στη διαδικασία συγκόλλησης, μπορούν να εμφανισθούν στο μέταλλο *ελαστικές παραμορφώσεις ή πλαστικές παραμορφώσεις*. Οι ελαστικές παραμορφώσεις είναι ανάλογες των εμφανιζομένων τάσεων. Οι τάσεις των οποίων η διεύθυνση είναι σύμφωνη με τον άξονα της συγκόλλησης ονομάζονται *διαμήκειες τάσεις  $\sigma_x$*  οι κάθετες ως προς τον άξονα της συγκόλλησης ονομάζονται *εγκάρσιες τάσεις  $\sigma_y$* , ενώ οι τάσεις που δρουν κάθετα ως προς το επίπεδο, στο οποίο εκτελείται η συγκόλληση συμβολίζονται με  $\sigma_z$ . Η κατανομή των θερμικών τάσεων που εμφανίζονται κατά την εναπόθεση επίστρωσης με συγκόλληση σε μεγάλη πλάκα φαίνεται στο **σχήμα 3**. Η ζώνη I σχηματίζεται με ισόθερμη τροχιά I, που αντιστοιχεί στην περιοχή στην οποία  $\sigma_e=0$



**Σχήμα 3** Μηχανισμός εμφάνισης διαμηκών τάσεων  $\sigma_x$  στη μονόστρωτη κόλληση πλάκας: α) ζώνη στο μετατοπιζόμενο πεδίο των θερμοκρασιών, β) στιγμιαία τάση  $\sigma_x$  στην τομή AA, γ) παραμένουσες τάσεις  $\sigma_x$  στην εγκάρσια τομή της κόλλησης.

Στην περιοχή αυτή, το υλικό βρίσκεται σε πλαστική κατάσταση. Στη ζώνη II εμφανίζεται θλιπτική εγκάρσια τάση  $\sigma_y$ . Στη ζώνη IIIa, στην οποία το μέταλλο είναι θερμαινόμενο, εμφανίζονται θλιπτικές-διαμήκειες τάσεις  $\sigma_x$  και αυξάνονται μέχρις ότου αποκτήσουν την τιμή  $\sigma_x = Re \cdot T$  ( $Re \cdot T$  τάση που αντιστοιχεί στο όριο πλαστικότητας δεδομένης θερμοκρασίας) και σε αυτό το επίπεδο των τάσεων εμφανίζεται μόνιμη πλαστική παραμόρφωση του υλικού. Στο σημείο C, από την πτώση της θερμοκρασίας, λόγω της ψύξης του υλικού, η τάση θλίψης  $\sigma_x$  έχει πτωτική πορεία μέχρι το μηδέν για ορισμένη θερμοκρασία. Με την παραπέρα ψύξη μέχρι την αρχική θερμοκρασία, η τάση στην τομή AA αλλάζει πρόσημο. Επομένως στη ζώνη IIIb εμφανίζονται *εφελκυστικές τάσεις παραμένουσες  $\sigma_x$*  που μπορούν μετά το πέρας του θερμικού κύκλου, να αποκτήσουν την τιμή  $\sigma_x = K_e$  και προξενούν *μόνιμες παραμένουσες παραμορφώσεις*. Ως αποτέλεσμα, μετά τη στερεοποίηση στην περιοχή με πλάτος  $2b$ , έχουμε την παραμένουσα τάση εφελκυστική, ισορροπημένη με τις θλιπτικές τάσεις αντίδρασης  $\sigma_x$ . Η διάσταση  $2b$ , καθορίζει το πλάτος της ζώνης, στην οποία, λόγω συγκόλλησης, εμφανίζονται μόνιμες πλαστικές παραμορφώσεις. Στις συγκολλητές συνδέσεις οι εσωτερικές τάσεις δημιουργούν πάντοτε πολυαξονική κατάσταση τάσεων, αλλά για στοιχεία με πάχη τοιχωμάτων  $g < 26 [mm]$  η συνιστώσα προς τη διεύθυνση του πάχους του ελάσματος δεν είναι πολύ μεγάλη και είναι δυνατόν να παραληφθεί στους υπολογισμούς. Παράδειγμα διαξονικής κατάστασης θερμικών τάσεων είναι οι συνθήκες που διαμορφώνονται κατά τη μετωπική συγκόλληση δύο ελασμάτων **σχήμα 4**.

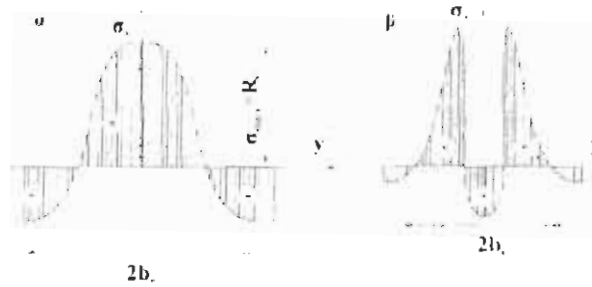


**Σχήμα 4** Παραμένουσες τάσεις στις πλάκες με μετωπική συγκόλληση: α) διαμήκειες  $\sigma_x$  β) εγκάρσιες  $\sigma_y$ .

Η τάση επιμήκυνσης  $\sigma_x$  χαρακτηρίζεται εξίσου με μεταβαλλόμενη τιμή και με μεταβαλλόμενα πρόσημα. Η εφελκυστική τάση εμφανίζεται στην κόλληση καθώς και σε μικρές περιοχές και από τις δύο πλευρές. Οι τάσεις που εμφανίζονται στη ζώνη των πλαστικών παραμορφώσεων πρέπει να ισορροπηθούν με την αντίδραση των υπόλοιπων μη θερμαινόμενων περιοχών του υλικού. Στις περιοχές αυτές, επομένως, εμφανίζονται θλιπτικές τάσεις αντίδρασης. Παρόμοια με τις εφελκυστικές τάσεις επίσης και οι εγκάρσιες τάσεις  $\sigma_y$ , έχουν διάφορα μεγέθη και πρόσημα, ανάλογα από την παρατηρούμενη περιοχή. Οι θλιπτικές τάσεις αποκτούν τη μεγαλύτερη τιμή στα άκρα της κόλλησης, ενώ στο μέσο μέρος της κόλλησης εμφανίζονται οι εφελκυστικές τάσεις **σχήμα 4**. Το μέσο μέρος της κόλλησης στερεοποιείται πιο αργά από τα άκρα του μητρικού υλικού. Η διαδικασία συγκόλλησης μπορεί και να εμφανίσει στην κατασκευή, εκτός των ιδίων τάσεων, και των **τάσεων συγκόλλησης  $\sigma_{av}$  από τις δυνάμεις αντίδρασης** προξενούμενες από τη στερέωση του συγκολλούμενου αντικειμένου. Η τιμή αυτών των τάσεων μπορεί να είναι σημαντική και εξαρτάται από την εγκάρσια διατομή της κατασκευής. Όσο η διατομή της κατασκευής είναι μικρότερη τόσο οι τάσεις είναι μεγαλύτερες. Όταν το εύρος ανάμεσα στην τάση θραύσεως και ορίου πλαστικότητας είναι πολύ μεγάλο, τότε δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για την εμφάνιση ρηγματώσεων. Σημαντική ιδιότητα των προξενούμενων τάσεων με δυνάμεις αντίδρασης είναι η αλληλεπίδραση τους σε όλη την κατασκευή, γεγονός που δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για τη μη επέκταση των ρωγμών. Απο τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι οι συγκολλητές κατασκευές πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να αποφεύγονται οι στερεωμένες συνδέσεις.

**Οι δομικές τάσεις** στα συγκολλούμενα εξαρτήματα μπορούν να έχουν επίσης σημαντική επίδραση στην κατανομή και στην τιμή των παραμενουσών τάσεων. Στους χάλυβες που σχηματίζουν μαρτενσιτική δομή στη ζώνη της κόλλησης μπορούν να δημιουργηθούν θλιπτικές τάσεις, οι οποίες εξισορροπούνται με τις εφελκυστικές τάσεις από τα μη θερμαινόμενα μέρη του υλικού. Στο **σχήμα 5** φαίνεται η κατανομή των τάσεων  $\sigma_x$  για τους μαλακούς ανθρακοχάλυβες και τους ωστενιτικούς χάλυβες.





**Σχήμα 5** Διαμήκειες παραμένουσες τάσεις: α) κατά τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων ή ωστενιτικών χαλύβων, β) κατά τη συγκόλληση ανθρακοχάλυβα που βάφεται.

Η χημική σύνθεση και οι θερμικές διαδικασίες επιδρούν στην τιμή του ορίου πλαστικότητας, μετά τη στερεοποίηση της κόλλησης, άρα και στην τιμή των παραμενουσών τάσεων.

#### 4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος των τάσεων συγκόλλησης

Για να αναλυθεί το πρόβλημα των τάσεων συγκόλλησης, πρέπει να διαχωριστή σε δύο υποθέσεις: το πρόβλημα των τάσεων συγκόλλησης και το πρόβλημα των εσωτερικών δυνάμεων συστολής, που επιδρούν στη συγκολλητή κατασκευή. Το μέγεθος των τάσεων συγκόλλησης εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

1. την τιμή του συντελεστή θερμικής διαστολής του συγκολλούμενου υλικού
2. τη γραμμική συστολή, προξενούμενη από τη στερεοποίηση του μετάλλου (χυτοσίδηρος 1%, χάλυβας 2%)
3. το ύψος του ορίου πλαστικότητας
4. τη δυσκαμψία της κατασκευής.

Οι παράγοντες αυτοί, γενικά, συνδέονται με τις φυσικές ιδιότητες του συγκολλούμενου υλικού, γι' αυτό δεν μπορούν να έχουν αποφασιστική επίδραση. Μόνο η δυσκαμψία της κατασκευής μπορεί να βελτιωθεί σε μεγαλύτερη περιοχή. Όλοι οι προαναφερθέντες παράγοντες αποτελούν το αίτιο αύξησης των τάσεων. Η πλαστικότητα του υλικού ασκεί επίδραση όχι στην τιμή των τάσεων, αλλά στο είδος των πυραμορφώσεων-στα υλικά με υψηλή πλαστικότητα οι τάσεις δημιουργούν πλαστικές παραμορφώσεις, ενώ στα ψαθυρά υλικά προξενούν θραύσεις.

**Οι δυνάμεις συστολής**, δημιουργούμενες στη συγκολλητή σύνδεση, εξαρτώνται από:

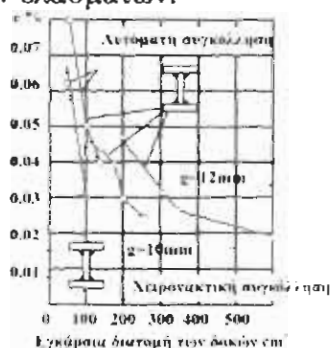
- a. το πλάτος της ζώνης επηρεαζόμενης θερμικά (ZEΘ)
- b. τον τρόπο εναπόθεσης των κολλήσεων

Αυτοί οι δύο παράγοντες εξαρτώνται από την αποδειχθείσα τεχνολογία. Η αύξηση του πλάτους της ZEΘ ευνοεί την αύξηση των δυνάμεων που προξενούν την παραμόρφωση του συγκολλούμενου υλικού. Το μέγεθος αυτής της ζώνης εξαρτάται από τη θερμική αγωγιμότητα του συγκολλούμενου υλικού και την εντατικότητα της πηγής θερμότητας. Μικρή ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά πετυχαίνεται με τη χρησιμοποίηση πηγής ενέργειας με αυξημένη εντατικότητα.

#### 4.5 Συνέπειες των τάσεων συγκόλλησης στις συγκολλητές κατασκευές

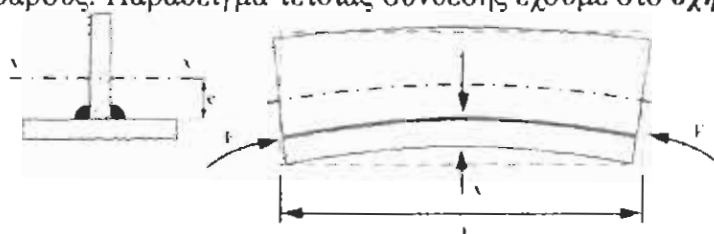
Όπως προκύπτει από την επίδραση των τάσεων συγκόλλησης, τα συνδεόμενα εξαρτήματα παραμορφώνουν όλη την κατασκευή ή προξενούν τοπική παραμόρφωση στην περιοχή της κόλλησης. Η μία, όπως και η δεύτερη μορφή παραμορφώσεων, οδηγεί στη μερική ελευθέρωση των τάσεων στη συγκολλούμενη σύνδεση. Η παραμορφωμένη κατασκευή παρατηρείται στην περίπτωση συγκόλλησης εξαρτημάτων λεπτού πάχους, εκτελεσμένων από υλικά με σημαντική πλαστικότητα. Όμως, στην περίπτωση συγκολλητής κατασκευής με μεγάλη δυσκαμψία δημιουργείται τοπική παραμόρφωση στην περιοχή της κόλλησης των συνδεόμενων εξαρτημάτων, με μορφή πλαστικής παραμόρφωσης ή θραύσης. Ο βαθμός της παραμορφωμένης κατασκευής καθώς και η τοπική της παραμόρφωση εξαρτάται από την εμφανιζόμενη συστολή, μετά το πέρας της συγκόλλησης. Διακρίνονται τρία είδη συστολών στα συγκολλούμενα εξαρτήματα: *διαμήκης, εγκάρσια συστολή και συστολή στο πάχος των υλικών.*

**Διαμήκης συστολή.** Η τιμή της διαμήκου συστολής εξαρτάται από το λόγο της διατομής της κόλλησης ως προς την εγκάρσια διατομή της σύνδεσης. Όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο λόγος τόσο μεγαλύτερη είναι και η συστολή. Από τα πειράματα προκύπτει ότι αυτή η συστολή κυμαίνεται στα όρια  $0.1[mm/m]$ - $0.3[mm/m]$  της κόλλησης. Στο *σχήμα 6* φαίνεται η σχέση των κατά μήκος παραμορφώσεων βαρέων συνδέσεων με μορφή διπλού ταυ συναρτήσεως των εγκάρσιων διατομών και του πάχους. Όπως προκύπτει από το *σχήμα 6*, οι κατά μήκος παραμορφώσεις των δοκών μειώνονται με την αύξηση της εγκάρσιας διατομής και του πάχους των ελασμάτων.



*Σχήμα 6* Η τιμή της συστολής κατά μήκος των συγκολλητών δοκών, ανάλογα με την εγκάρσια τομή τους

Η επιμήκης συστολή, εκτός από τη σμίκρυνση της σύνδεσης, μπορεί να προκαλέσει και το λυγισμό της, εφόσον η κόλληση έχει εκτελεστεί στον άξονα του κέντρου βάρους. Παράδειγμα τέτοιας σύνδεσης έχουμε στο *σχήμα 7*.



*Σχήμα 7* Λυγισμός της δοκού σχήματος ταυ, προξενούμενος από την επίδραση των δυνάμεων συστολής P, εφαρμοσμένης έκκεντρα ως προς το κέντρο βάρους.

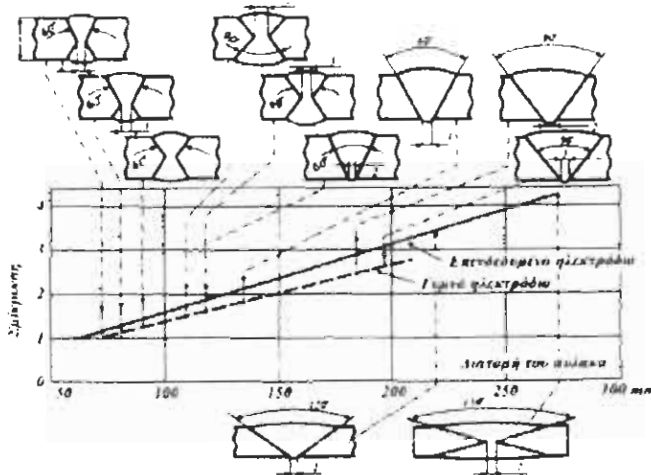
Η εμφανιζόμενη εδώ δύναμη συστολής  $F$ , κατά μήκος της απόστασης προξενεί ροπή κάμψης:  $M=P \cdot e$  Ως επακόλουθο της δράσης αυτής της ροπής η

δοκός θα υποστεί λυγισμό με τιμή  $f$ .  $f = \frac{M \cdot l^2}{8 \cdot E \cdot I} = \frac{F \cdot e \cdot l^2}{8 \cdot E \cdot I}$  όπου:  $M$  ροπή

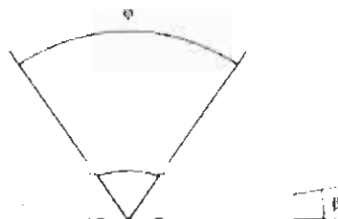
συστολής,  $P$  δύναμη συστολής,  $\beta$  απόσταση από τον άξονα του κέντρου βάρους,  $l$  μήκος της κόλλησης,  $E$  μέτρο ελαστικότητας,  $I$  ροπή αδρανείας.

**Η εγκάρσια συστολή**, αναπτυσσόμενη στη σύνδεση, προξενεί την εγκάρσια σμίκρυνση της, στην περίπτωση εναπόθεσης της κόλλησης συμμετρικά, καθώς και σμίκρυνση και λυγισμό γωνιακό, κατά την εναπόθεση της κόλλησης ασύμμετρα. Η τιμή της εγκάρσιας συστολής είναι ευθέως ανάλογη προς τον όγκο του εναποτιθέμενου υλικού στο αυλάκι της κόλλησης **σχήμα 8**. Όπως φαίνεται από το **σχήμα 8**, η εγκάρσια συστολή λαμβάνει σημαντικές τιμές. Ως εκ τούτου στην περίπτωση στερέωσης της σύνδεσης ως προς την εγκάρσια διεύθυνση, θα πρέπει να αναμένουμε την εμφάνιση μεγάλων τάσεων συστολής. Στη συνέχεια, η τιμή της γωνιακής παραμόρφωσης  $\beta$  σε κόλληση μονής στρώσης εξαρτάται, όπως φαίνεται από τη γωνία της αυλάκωσης της κόλλησης  $\varphi$  **σχήμα**

$$9. \beta = 2 \cdot \alpha_i \cdot T_{\mu\sigma} \cdot l_g \cdot \frac{\varphi}{2} [^\circ], \quad \beta = 2 \cdot \frac{2\pi}{360} \cdot \alpha_i \cdot T_{\mu\sigma} \cdot l_g \cdot \frac{\varphi}{2} [\text{rad}]$$



**Σχήμα 8** Η σχέση της εγκάρσιας συστολής με τη διατομή της κόλλησης

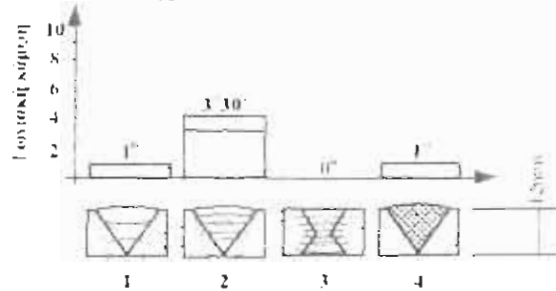


**Σχήμα 9** Γωνιακή παραμορφωμένη μετωπική σύνδεση

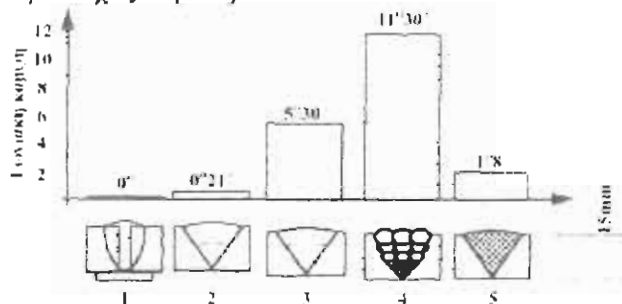
όπου:  $\alpha_i$  γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής,  $T_{\mu\sigma}$  μέση θερμοκρασία μετάβασης του τηκόμενου μετάλλου από πλαστική κατάσταση σε ψαθυρή για τους περισσότερους κατασκευαστικούς χάλυβες είναι  $600[^\circ\text{C}]$ . Για τους κατασκευαστικούς χάλυβες, ο παραπάνω τύπος παίρνει τη μορφή:

$\beta = 0.0144 \cdot t_x \cdot \frac{\varphi}{2} [^\circ]$ ,  $\beta = \frac{2\pi}{360} \cdot 0.0144 \cdot t_x \cdot \frac{\varphi}{2} [\text{rad}]$  Στην περίπτωση των κολλήσεων με πολλές στρώσεις, η τιμή της γωνιακής παραμόρφωσης μεταβάλλεται και εξαρτάται από τον αριθμό των στρώσεων της κόλλησης, τη μορφή της αυλάκωσης της κόλλησης και το πάχος της σύνδεσης *σχήμα 10* και *σχήμα 11*.

**Συστολή στο πάχος.** Αυτού του είδους η συστολή, από την άποψη των χαμηλών τιμών και της διεύθυνσης δράσεως, δεν ασκεί πρακτική επίδραση στις παραμορφώσεις της κατασκευής



*Σχήμα 10* Η επίδραση του πλήθους των στρώσεων των κολλήσεων στην τιμή τον γωνιακού λυγισμού ελασμάτων με πάχος 12[mm].



*Σχήμα 11* Η επίδραση τον πλήθους των στρώσεων των κολλήσεων στην τιμή τον γωνιακού λυγισμού ελασμάτων με πάχος 15[mm].

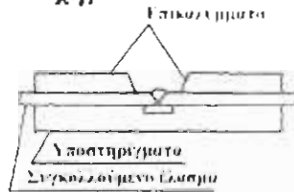
#### 4.6 Τρόποι μείωσης των παραμορφώσεων και των τάσεων συγκόλλησης

Οι εμφανιζόμενες τάσεις για να μη στρεβλώνουν αρκετά τις συγκολλητές κατασκευές, κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, επιβάλλεται να χρησιμοποιούνται ιδιοσυσκευές συγκολλήσεως. Η διαδικασία συγκόλλησης των εξαρτημάτων λεπτού πάχους πρέπει να εκτελείται με τη χρησιμοποίηση ιδιοσυσκευών συγκόλλησης. Οι ιδιοσυσκευές αυτές επιτρέπουν την ισχυρή συγκράτηση-δέσιμο των συνδεδόμενων εξαρτημάτων, και ως αποτέλεσμα αυτού οι στρεβλώσεις μειώνονται σημαντικά. Άλλοι τρόποι για την μείωση των εμφανιζόμενων παραμορφώσεων κατά τη συγκόλληση λεπτών ελασμάτων επιτυγχάνονται

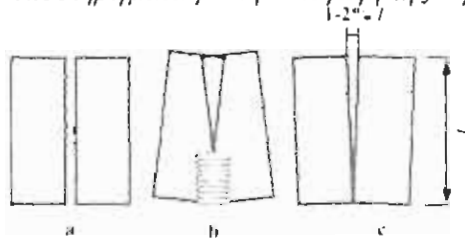
- α) με την τοποθέτηση υποστηριγμάτων επαγωγής θερμότητας *σχήμα 12*,
- β) με κατάλληλη τοποθέτηση ελασμάτων για τη συγκόλληση *σχήμα 13*
- γ) εκτέλεση μετωπικής κόλλησης αντί γωνιακής *σχήμα 14*

Με σκοπό την αποφυγή ανεπιθύμητων παραμορφώσεων κατά τη συγκόλληση παχέων ελασμάτων, λοξοτομημένων σε σχήμα V, ή στις επιφανειακές κολλήσεις, πρέπει να τοποθετηθούν καταλλήλως τα εξαρτήματα

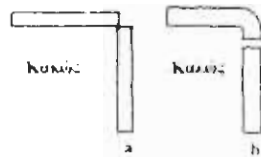
**σχήμα 15.** Παράδειγμα που παρουσιάζει την επίδραση της διαδοχικής σειράς εκτέλεσης των κολλήσεων, για να μην παραμορφωθεί η κατασκευή, είναι η συγκόλληση της δοκού διπλού ταυ **σχήμα 16.**



**Σχήμα 12** Συγκόλληση με υποστηρίγματα για την επαγωγή της θερμότητας.

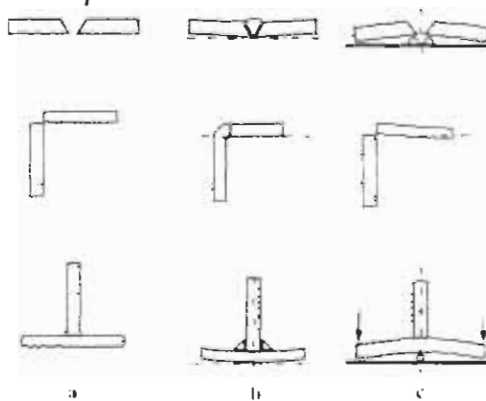


**Σχήμα 13** Τοποθέτηση των ελασμάτων για τη συγκόλληση, και την αποφυγή παραμόρφωσης της σύνδεσης: a) τα ελάσματα προ της συγκόλλησης, b) η συμπεριφορά των ελασμάτων κατά τη συγκόλληση, c) ορθή τοποθέτηση των ελασμάτων, λαμβάνοντας υπόψη την εγκάρσια διαστολή.



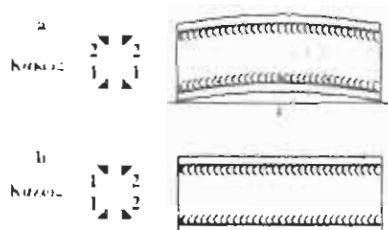
**Σχήμα 14** Τρόπος τοποθέτησης των ελασμάτων για την αποφυγή των παραμορφώσεων.

Για τη μείωση του λυγισμού, σε μεγάλα μήκη των κολλήσεων, πρέπει το όλο μήκος της κόλλησης να διαφευθεί σε τμήματα με ποντάρισμα και, στη συνέχεια, να γίνει η συγκόλληση με κορδόνι «βηματικό», «αναπήδησης» ή «βηματικό -αναπήδησης». Γενική αρχή σ' αυτούς τους τρόπους συγκόλλησης είναι να εκτελούνται διαδοχικά τα τμήματα, μετά από το κρύωμα των γειτονικών. Η αρχή των διάφορων τρόπων εναπόθεσης των κολλήσεων φαίνεται στο **σχήμα 17**. Οι τρόποι που αναφέρθηκαν μέχρι τώρα αποφεύγουν μόνο σε κάποιο βαθμό την παραμορφωμένη κατάσταση της κατασκευής, ενώ δε μειώνουν αποφασιστικά τις τάσεις και τις δυνάμεις συστολής. Η τιμή των εσωτερικών δυνάμεων που επικρατούν στη σύνδεση μπορεί να μειωθεί με ειδική εναπόθεση των κορδονιών και κατάλληλη σειρά των στρώσεων.

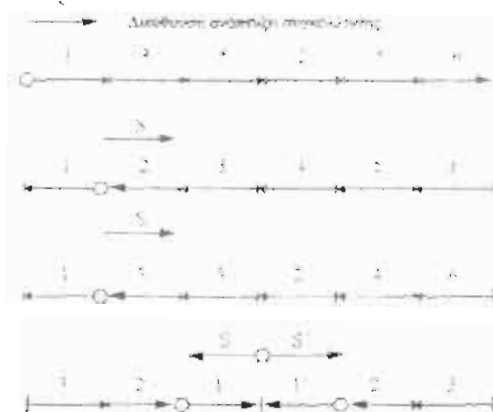


**Σχήμα 15** Τρόπος αποφυγής της παραμόρφωσης της συγκολλητής κατασκευής με κολλήσεις V και αυχενικές: a) κακή τοποθέτηση, b) η συνέπεια της κακής τοποθέτησης, c) σωστή

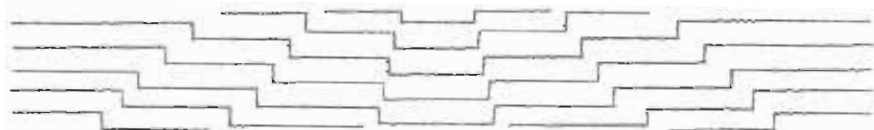
Κατά την εκτέλεση κολλήσεων πολλών στρώσεων, η εναπόθεση κάθε επόμενης στρώσης προξενεί αποτατική ανόπτηση στην προηγούμενη στρώση. Σε τέτοιες περιπτώσεις προτείνεται η εναπόθεση των διαδοχικών στρώσεων κλιμακωτά **σχήμα 18**.



**Σχήμα 16** Η επίδραση του τρόπου εναπόθεσης των κολλήσεων για την αποφυγή της παραμόρφωσης της δοκού τύπου ταυ: a) κακώς, b) καλώς σειρά των στρώσεων κόλλησης.



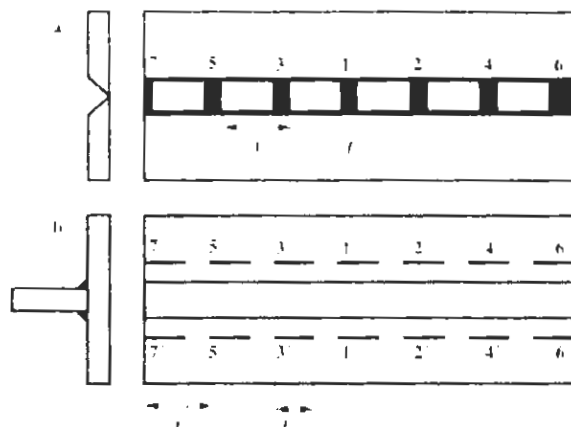
**Σχήμα 17** Τύποι κορδονιών που μειώνουν την παραμόρφωση της συγκολλητής κατασκευής: a) κορδόνι αναπήδησης b) βηματικό κορδόνι c) κορδόνι βηματικό αναπήδησης, d) αναπήδησης βηματικό κορδόνι e) αρχή της συγκόλλησης.



**Σχήμα 18** Κλιμακωτό κορδόνι.

#### 4.7 Εκτέλεση κολλήσεων συγκράτησης για τη συγκόλληση εξαρτημάτων μεγάλου μήκους

Τα συνδεόμενα εξαρτήματα με προετοιμασμένα τα άκρα πρέπει να συγκρατηθούν με κατάλληλα εργαλεία, έτσι που κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης να μην προκύψει αλλαγή της θέσης των εξαρτημάτων από την επίδραση της θερμότητας. Εάν τα προετοιμασμένα εξαρτήματα για συγκόλληση δεν έχουν συγκρατηθεί με εργαλεία που να καθορίζουν τη θέση τους, τότε πρέπει αυτά να συνδεθούν με ειδικές κολλήσεις συγκράτησης.



**Σχήμα 19** Η σειρά εναπόθεσης των κολλήσεων συγκράτησης: a) για μετωπική σύνδεση, b) για αυχενική κόλληση.

Στην περίπτωση ελασμάτων και μορφοσιδήρων, το βήμα των κολλήσεων συγκράτησης  $l$  μετωπικών και αυχενικών πρέπει να είναι:  $l=(20-30)S$  [mm] όπου:  $\delta$  το πάχος των συγκολλούμενων εξαρτημάτων, [mm]. Για την αποφυγή παραμόρφωσης σε εξαρτήματα μεγάλου μήκους, οι κολλήσεις συγκράτησης εκτελούνται από το κέντρο προς τα άκρα **σχήμα 19**.

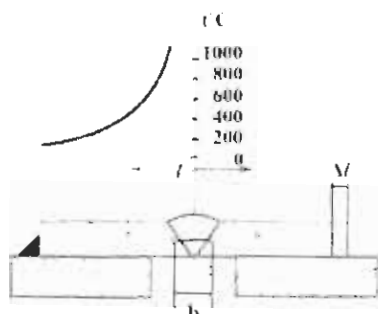
#### 4.8 Εφαρμοζόμενες θερμικές κατεργασίες στις συγκολλητές συνδέσεις

Για τη μείωση ή την αποφυγή των τάσεων και παραμορφώσεων στις συγκολλητές συνδέσεις γίνεται εφαρμογή από μία σειρά θερμικών διαδικασιών, όπως: η αρχική ή η ενδιάμεση προθέρμανση, η αποτακτική ανόπτηση και η εξομάλυνση.

#### 4.9 Εγκάρσια και διαμήκη συστολή

Στην μετωπική σύνδεση είναι μερικά μεταβαλλόμενα στοιχεία: α) η μορφή του αύλακα της κόλλησης, από τον οποίο εξαρτάται η ποσότητα του τηκόμενου μετάλλου, β) το πλήθος των στρώσεων, το πάχος τους και ο τρόπος εναπόθεσης, γ) το πλάτος της θερμαινόμενης ζώνης, η οποία εξαρτάται από τη μέθοδο συγκόλλησης.

Η εγκάρσια συστολή της σύνδεσης μπορεί να προκύψει μόνο τότε, όταν τα συνδεόμενα εξαρτήματα δεν είναι συγκρατημένα. Από τη μορφή του αύλακα των κολλήσεων εξαρτάται η ποσότητα του εναποτιθέμενου υλικού, το πλάτος της ζώνης τήξης του μετάλλου και η ποσότητα προσαγόμενης θερμότητας. Με όμοιο πάχος των συνδεόμενων εξαρτημάτων, η μεγαλύτερη συστολή θα προκύψει στην κόλληση V με μεγάλη γωνία του αύλακα, ενώ μικρότερη στην κόλληση V με μικρή γωνία του αύλακα, η μικρότερη στην κόλληση X. Η ποσότητα του εναποτιθέμενου υλικού και το πλάτος της ζώνης τήξης του μετάλλου  $b$ , με την ίδια μορφή του αύλακα, εξαρτάται επίσης από το διάκενο του αυχένα στη ρίζα της κόλλησης **σχήμα 20**.

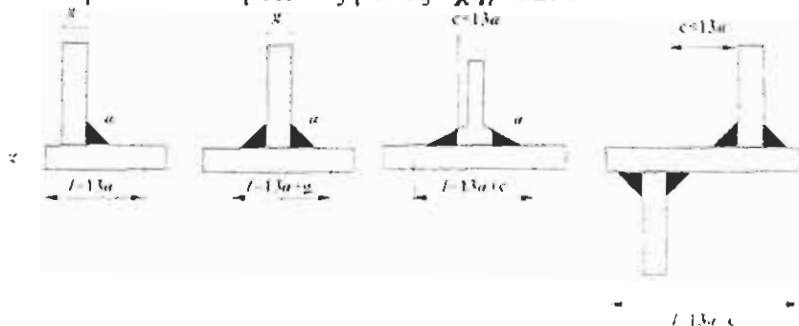


Σχήμα 20 Πλάτος της θερμαινόμενης ζώνης στη μετωπική κόλληση

Η ποσότητα των στρώσεων και ο τρόπος εναπόθεσης δεν έχει μεγάλη επίδραση στην εγκάρσια συστολή. Μεγάλη όμως επίδραση ασκεί η μέθοδος συγκόλλησης, από την οποία εξαρτάται το πλάτος της ζώνης τήξης άνω της θερμοκρασίας των  $600[^\circ\text{C}]$ . Στο πλάτος της κόλλησης  $b$ , στο οποίο το υλικό τήκεται, η εγκάρσια συστολή είναι 2%, επειδή σ' αυτό το πλάτος στερεοποιείται το μέταλλο. Σε συνθήκες δύσκαμπτης σύνδεσης, δημιουργούνται μόνιμες παραμορφώσεις, οι οποίες, μετά τη στερεοποίηση, εκφράζονται στη ζώνη συστολής με το πλάτος  $l$ . Η συνολική εγκάρσια συστολή μετωπικής σύνδεσης υπολογίζεται από τον κατά προσέγγιση τύπο:  $\Delta l = \alpha_r \cdot l \cdot n + 0.02b$  [mm]. Ο γραμμικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, για τους ανθρακοχάλυβες χαμηλού άνθρακα, γίνεται αποδεκτός  $\alpha_r = 13 \cdot 10^{-6}$ . Αποδεχόμαστε επίσης ότι η μέση τιμή της θερμοκρασίας στο πλάτος  $l$ , με συσχέτιση της καμπύλης πτώσης της θερμοκρασίας, είναι  $t = 400[^\circ\text{C}]$ . Το πλάτος της ζώνης θέρμανσης  $l$  εξαρτάται από τις μεθόδους συγκόλλησης και υπολογίζεται από τον τύπο 17. Τοποθετώντας τις αποδειχθείσες τιμές στον τύπο 17 έχουμε:  $\Delta l = 52 \cdot 10^{-4} \cdot l \cdot n + 0.02b$  [mm]. Ο συντελεστής  $\eta$  για διάφορες μεθόδους παίρνει τις ακόλουθες τιμές:

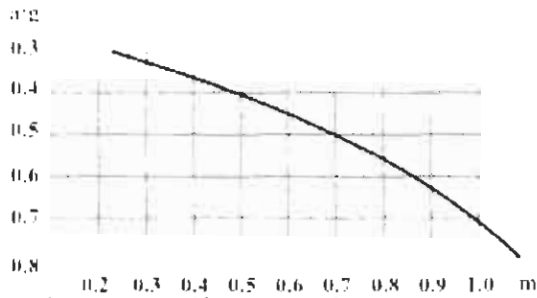
- για τη χειρωνακτική συγκόλληση τόξου  $n = 1.0$
- για την αυτόματη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο  $n = 0.4$
- για την οξυγονοκόλληση  $n = 1.3$

Το μέγεθος της εγκάρσιας συστολής αυχενικών κολλήσεων υπολογίζεται, όπως και στις μετωπικές κολλήσεις, σύμφωνα με τον τύπο:  $\Delta l = \alpha_r \cdot l \cdot t \cdot m = 52 \cdot 10^{-4} \cdot l \cdot m$ . Το πλάτος της ζώνης θέρμανσης  $l$  γίνεται αποδεκτό, ανάλογα με την ποσότητα των αυχενικών κολλήσεων και τη διάταξη τους σχήμα 21.



Σχήμα 21 Πλάτος της θερμαινόμενης ζώνης στην αυχενική σύνδεση



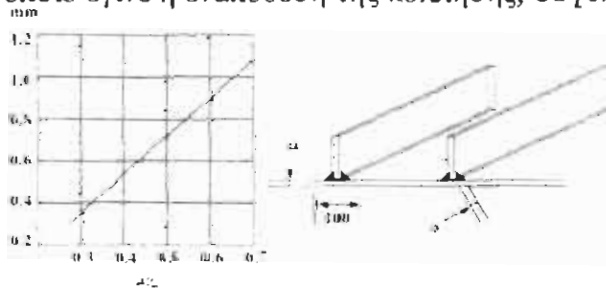


Σχήμα 22 Τιμές τον συντελεστή  $m$ , ανάλογα με το λόγο  $a : g$

Ο συντελεστής  $m$  εξαρτάται από τη σχέση του πάχους των κολλήσεων  $a$  προς το πάχος του ελάσματος  $g$ . Προσεγγιστικά μεγέθη του συντελεστή  $m$  δίνονται στο **σχήμα 22**. Για συνδέσεις με κολλήσεις εναποτιθέμενες στο έλασμα από τις δύο πλευρές, το βάθος θέρμανσης θα είναι μεγαλύτερο και ως εκ τούτου πρέπει να λαμβάνεται η τιμή του συντελεστή στο διπλάσιο. Στις περιπτώσεις που δεν γίνεται ακριβής υπολογισμός του μεγέθους της εγκάρσιας συστολής για τις μετωπικές κολλήσεις, προσεγγιστικά λαμβάνονται: για τη χειρωνακτική συγκόλληση τόξου σε X ή  $\Delta l = 0.13 \cdot g$ , ενώ για τις κολλήσεις σε X ή  $\Delta l = 0.08 \cdot g$ , όπου το  $g$  είναι το πάχος συνδεόμενου εξαρτήματος. Για τις αυχενικές κολλήσεις, η εγκάρσια συστολή προσεγγιστικά υπολογίζεται από το διάγραμμα **σχήμα 24**, ανάλογα με το λόγο  $a:g$ . Η εγκάρσια συστολή για τις αυχενικές κολλήσεις προξενεί τη μεταβολή της γωνίας των συνδεόμενων εξαρτημάτων κατά γωνία  $\alpha$ . Το μέγεθος αυτής της γωνίας εξαρτάται από το πάχος της κόλλησης και το πάχος των συνδεόμενων εξαρτημάτων και μπορεί να γίνεται αποδεκτό με βάση το διάγραμμα του **σχήμα 25**. Οι διαμήκεις παραμορφώσεις των κατασκευών, ως συνέπεια της εγκάρσιας συστολής των αυχενικών κολλήσεων, υπολογίζονται από

τους ακόλουθους τύπους:  $\Delta l = \frac{A}{F} = \frac{\eta \cdot q_n \cdot l_{συγ}}{F}$  όπου:  $\Delta l$  συστολή εγκάρσια ή

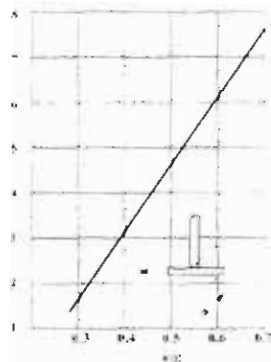
διαμήκης συστολή της κατασκευής,  $A$  εγκάρσια συστολή κατά όγκο από τη θλίψη της ζώνης συγκόλλησης σε  $[cm^3]$ ,  $q_n$  θερμική ενέργεια σε  $[cal/cm]$ ,  $\eta$  συντελεστής αναλογίας μεταξύ συστολής όγκου και θερμικής ενέργειας, σε  $[cm^3/cal]$ ,  $l_{συγ}$  μήκος αυχενικής κόλλησης σε  $[cm]$ ,  $F$  επιφάνεια διατομής του εξαρτήματος στο οποίο έγινε η εναπόθεση της κόλλησης, σε  $[cm^2]$ .



Σχήμα 23 Εγκάρσια συστολή στο ένα νεύρο, συνδεδεμένο με δύο αυχενικές κολλήσεις, ανάλογα με το λόγο  $a:g$

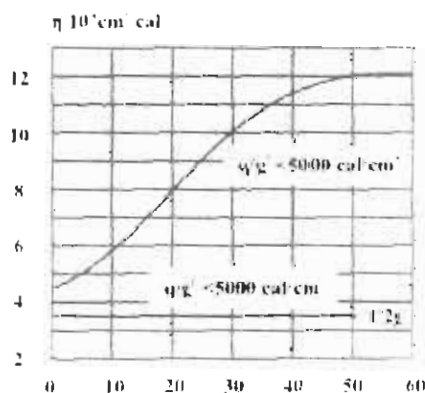
Ο συντελεστής  $\eta$  εξαρτάται από το βαθμό της άμεσης θέρμανσης του συγκολλούμενου εξαρτήματος, ο οποίος καθορίζεται από το λόγο  $l:2g$  καθώς και από το λόγο  $q_n:g^2$   $[cal/cm^3]$ , όπου:  $l$  μήκος εγκάρσιας κόλλησης,  $g$  πάχος εξαρτήματος, στο οποίο έγινε η εναπόθεση της κόλλησης,  $q_n$  θερμική γραμμική

ενέργεια, σε  $[cal/cm]$ . Το μέγεθος του συντελεστή  $\eta$  βρέθηκε βάσει των πειραμάτων πλήρους θέρμανσης του υλικού, για  $q_n \cdot g^2 > 5000 [cal/cm^3]$  και με μερική επιφανειακή θέρμανση, για  $q_n \cdot g^2 > 500 [cal/cm^3]$  ανάλογα με το λόγο  $l:2g$  στο **σχήμα 25**. Στο **σχήμα 26** δίνονται τα μεγέθη του συντελεστή  $\eta$ , ανάλογα με το λόγο  $q:g^2$  και τους διάφορους λόγους  $l:2g$ . Κατά τη συγκόλληση νεύρων ή παρόμοιων εξαρτημάτων με πάχος  $g_1$  στο εξάρτημα με πάχος  $g_2$  μειώνεται η χρησιμοποιούμενη θερμική ενέργεια στην  $q_n'$  και υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο  $q_n' = q_n \frac{2g_2}{2g_2 + g_1} cal/cm$



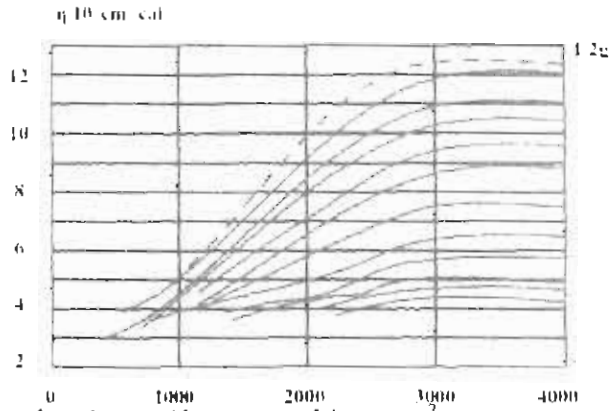
**Σχήμα 24** Μεταβολή της γωνίας  $\alpha$ , λόγω της εγκάρσιας συστολής των κολλήσεων ανάλογα με το λόγο  $l:g$

Η εγκάρσια συστολή των κολλήσεων σε απόσταση  $Z_c$  από το κέντρο βάρους της διατομής της κατασκευής προξενεί την κάμψη της, η οποία καθορίζεται από τη γωνία κάμψης  $\varphi$  και το βέλος κάμψης  $f$  με διαφορές στους υπολογισμούς των παραμορφώσεων προκύπτουν από την αποδοχή του ονομαστικού μεγέθους της θερμοκρασίας των πλαστικών παραμορφώσεων  $T=600[^\circ C]$ .



**Σχήμα 25** Τιμές συντελεστή  $\eta$ , ανάλογα με το λόγο  $l:2g$

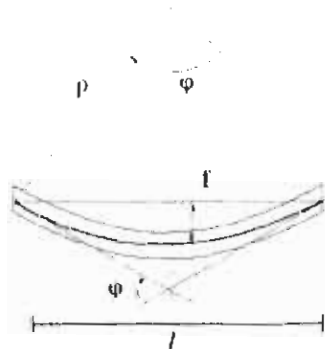
Στην πραγματικότητα, οι πλαστικές παραμορφώσεις συμβαίνουν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, με συνέπεια να αυξάνεται η επιφάνεια  $F_{pl}$  των πλαστικών παραμορφώσεων.



Σχήμα 26 Τιμές συντελεστή  $\eta$ , ανάλογα με το λόγο  $q : g^2$

#### 4.10 Επίδραση της συστολής στο μέγεθος της κάμψης

Κατά τη μη συμμετρική διάταξη των κολλήσεων ως προς το κέντρο βάρους της συγκολλητής κατασκευής, εκτός της σμίκρυνσης του αντικειμένου, συμβαίνει και η κάμψη του. Το μέγεθος της κάμψης εξαρτάται από την προσαγόμενη ποσότητα θερμότητας, τη δυσκαμψία του εξαρτήματος και την απόσταση της θερμαινόμενης ζώνης από το κέντρο βάρους. Η κάμψη συμβαίνει, εξίσου, ως συνέπεια της συστολής των διαμηκών κολλήσεων, παράλληλων προς τον επιμήκη άξονα της συγκόλλησης, αλλά και ως συνέπεια της συστολής των εγκάρσιων κολλήσεων.



Σχήμα 27 Μεγέθη που καθορίζουν την κάμψη συγκολλητού εξαρτήματος

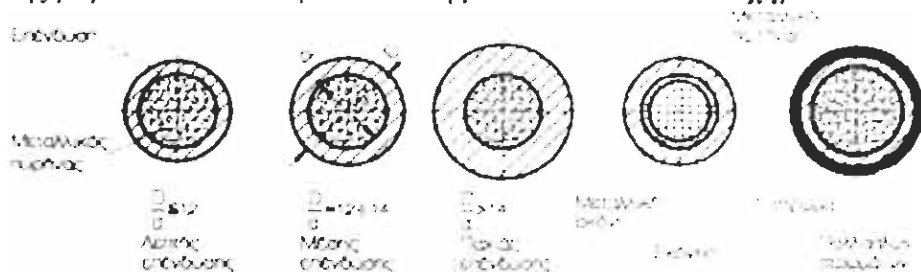
Το μέγεθος της κάμψης καθορίζεται από το βέλος κάμψης  $f$  την ακτίνα της καμπυλότητας  $\rho$  ή της γωνίας στρέψης  $\varphi$  των άκρων του εξαρτήματος *σχήμα 27*. Το μέγεθος κάμψης υπολογίζεται, με βάση την ποσότητα θερμικής ενέργειας. Κατά τους υπολογισμούς της κάμψης, σύμφωνα με την επιφάνεια των πλαστικών παραμορφώσεων  $F_{pl}$ , υπολογίζεται η εσωτερική δύναμη  $P$  και η ροπή κάμψης  $M$ , από την οποία, στη συνέχεια, καθορίζεται η ακτίνα της καμπυλότητας και το βέλος κάμψης.

## Κεφάλαιο 5

### 5.1 Ηλεκτρόδια με επένδυση, σύρματα, συλλιπάσματα, προστατευτικά αέρια

#### 5.1.1 Ηλεκτρόδια με επένδυση

Τα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για την χειρωνακτική συγκόλληση τόξου αποτελούνται από δύο στοιχεία: τον πυρήνα και το μεταλλικό μέρος του ηλεκτροδίου με μορφή σύρματος, σιδηρόσκονης, κραματικών σκονών, χυτής ράβδου και από την επένδυση με ειδικά συστατικά *σχήμα 1*.



*Σχήμα 1 Βασικοί τύποι επενδεδυμένων ηλεκτροδίων.*

Η δημιουργούμενη ποσότητα αερίου και η σκουριά, που καλύπτουν το τόξο, καθώς και η χημική τους σύνθεση, εξαρτώνται από το είδος της επένδυσης και το πάχος της *σχήμα 1*. Χρησιμοποιούνται επενδύσεις με διάφορα πάχη, ανάλογα με τη διάμετρο του πυρήνα. Χρησιμοποιούνται επενδύσεις: ρουτιλίου, όξινης, βασικής, οξειδωτικής, κυτταρίνης, ρουτιλίου - βασικής και εξαρτώνται από τις χημικές ιδιότητες των συστατικών τους.

Οι βασικές λειτουργίες των επενδύσεων είναι:

- η προστασία του τόξου από την εισχώρηση του ατμοσφαιρικού αέρα.
- η εισροή στην περιοχή της κόλλησης στοιχείων αποξειδοτικών και εξευγενισμού του ρευστού μετάλλου της κόλλησης.
- η δημιουργία σκουριάς πάνω από το ρευστό λουτρό και από το στερεοποιημένο μέταλλο της κόλλησης.
- η ρύθμιση της χημικής σύνθεσης της κόλλησης.

Τα πολλά στρώματα των επενδύσεων έχουν σαν σκοπό να πληρούν δύο ή τρεις από τις αναφερόμενες λειτουργίες. Το πρώτο στρώμα που εφάπτεται στο μεταλλικό πυρήνα πληροί μόνο τη μεταλλουργική λειτουργία, ενώ το δεύτερο εξωτερικό στρώμα μπορεί να δημιουργεί μεγάλες ποσότητες προστατευτικού αερίου. Το περισσότερα ηλεκτρόδια έχουν μεταλλικό πυρήνα κατασκευασμένο από ράβδο. Πολύ καλά αποτελέσματα πετυχαίνονται με τη χρησιμοποίηση πυρήνα από μεταλλική σκόνη, συγχωνευμένη σε σωλήνα από ψιλή ταινία, αποτελούμενη από μαλακό ανθρακοχάλυβα *σχήμα 1*. Με την προσαγωγή στην επένδυση σιδηρόσκονης ή σιδηροκραμάτων, συνήθως μέχρι 30-50% της μάζας της επένδυσης, αυξάνεται η απόδοση της συγκόλλησης.

#### 5.1.2 Στοιχεία της επένδυσης των ηλεκτροδίων

Η σύνθεση της επένδυσης αποτελείται συνήθως από τα ακόλουθα στοιχεία:

1. Στοιχεία που διευκολύνουν τον ιονισμό, μεταξύ των οποίων είναι οι ενώσεις νατρίου Na, καλίου K, ασβεστίου Ca.
2. Ενώσεις που δημιουργούν αέρια, όπως η κιμωλία, το μάρμαρο και άλλες οργανικές ουσίες. Αυτά τα αέρια, δημιουργούν προστατευτικό νέφος.
3. Ορυκτά που σχηματίζουν σκουριά, άστρια  $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$ , φθορίτη  $CaF_2$  ασβεστίτη, πυριτικά, μαγγανιούχα μεταλλεύματα, τιτανιούχα ρουτίλιο, περιεκτικότητα περίπου 95%  $TiO_2$  ή ηλβενίτη 50%  $TiO_2$ , 50%  $Fe_2O_3$  και σιδηρούχα μεταλλεύματα.
4. Κράματα μετάλλων και μεταλλεύματα που περιέχουν μαγγάνιο, πυρίτιο, χρώμιο, τιτάνιο τα οποία μεταφέρονται μερικώς στο τήγμα σαν στοιχεία εξευγένισης και μερικώς στη σκουριά (αποξειδώνουν το σίδηρο και μεταφέρονται στη σκουριά). Ανάλογα με την περιεκτικότητα στην επένδυση οξειδίων  $SiO_2$ ,  $MgO$  ή οξειδίων  $CaO$ ,  $MgO$  η επένδυση χαρακτηρίζεται ως όξινη ή βασική.

### 5.1.3 Είδη επενδεδυμένων ηλεκτροδίων

Τα ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση κατασκευαστικών χαλύβων χωρίζονται ανάλογα, με το πάχος της επένδυσης και τη σύσταση τους.

#### Κατηγορία των ηλεκτροδίων ανάλογα με το πάχος της επένδυσης

**Ηλεκτρόδια λεπτής επένδυσης.** Χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση λεπτών ελασμάτων. Το διπλό πάχος της επένδυσης είναι 20% της διαμέτρου του πυρήνα. Τα ηλεκτρόδια λεπτής επένδυσης μπορούν να έχουν επένδυση βασική ή όξινη, που χρησιμοποιείται μόνο για τη βελτίωση των ιδιοτήτων συγκόλλησης, με την αύξηση του βαθμού ιονισμού του τόξου και τη διατήρηση του. Τα ηλεκτρόδια αυτού του τύπου έχουν μικρή επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων.

**Ηλεκτρόδια μέσης επένδυσης.** Τα ηλεκτρόδια αυτά με το διπλό πάχος της επένδυσης, από 20%-40% της διαμέτρου του πυρήνα, χρησιμοποιούνται τακτικά για τις εργασίες συναρμολόγησης, ενώ σπάνια για την εκτέλεση κύριων συγκολλήσεων.

**Ηλεκτρόδια παχιάς επένδυσης.** Το διπλό πάχος της επένδυσης υπερβαίνει το 40% της διαμέτρου του πυρήνα, ενώ, συνήθως, είναι περίπου 60% του πάχους του πυρήνα. Χρησιμοποιούνται επίσης και ηλεκτρόδια μεγάλου πάχους επένδυσης (περίπου 100% της διαμέτρου του πυρήνα), τα οποία είναι μεγάλης ωφελιμότητας και υψηλής απόδοσης, και έχουν στην επένδυση μεγάλη ποσότητα σιδηρόσκονης, η οποία, μετά την τήξη, δημιουργεί, μαζί με τον πυρήνα, την κόλληση.

**Κατηγορία των ηλεκτροδίων ανάλογα με την σύνθεση τους.** Ανάλογα με τη σύνθεση της επένδυσης του ηλεκτροδίου για τη συγκόλληση τόξου τα ηλεκτρόδια έχουμε:

Όξινα
βασικά
ρουτίλιου
κυτταρίνης
οξειδωτικά.

**Όξινα ηλεκτρόδια.** Τα ηλεκτρόδια έχουν επένδυση υψηλής περιεκτικότητας σε οξείδια σιδήρου, μαγγανίου, πυριτίου και σιδηρομαγγανίου. Επίσης μπορούν να

περιέχουν και σιδηρόσκονη σε μικρό ή και μεγάλο βαθμό. Η σκουριά από τα όξινα ηλεκτρόδια μπορεί να είναι λιγότερο ή περισσότερο όξινη. Τα όξινα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται με μέση ή παχιά επένδυση, η τήξη τους είναι σχετικά ταχεία και μπορούν να φορτιστούν με μεγάλη πυκνότητα ρεύματος. Χρησιμοποιούνται για όλες τις θέσεις συγκόλλησης, για συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα. Οι μηχανικές ιδιότητες των εκτελούμενων κολλήσεων με όξινα ηλεκτρόδια είναι αρκετά καλές, μπορούν να ελεγχθούν και ραδιογραφικά (απαιτείται θετικό αποτέλεσμα). Χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων, χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, με καλή συγκολλητότητα, επειδή, σε αντίθετη περίπτωση, στις κολλήσεις μπορούν να εμφανισθούν ρωγμές εν θερμώ. Η σκουριά από τα όξινα ηλεκτρόδια είναι ισχυρά πορώδης.

**Βασικά ηλεκτρόδια.** Τα ηλεκτρόδια έχουν επένδυση μεγάλων ποσοτήτων ενώσεων ασβεστίου του άνθρακα και μαγνησίου. Τα βασικά ηλεκτρόδια είναι με παχιά επένδυση, η τήξη τους γίνεται με αργότερο ρυθμό απ' την αντίστοιχη των όξινων ηλεκτροδίων, δεν πρέπει να φορτίζονται με μεγάλη ένταση και προσφέρονται για όλες τις θέσεις συγκόλλησης. Με αυτά τα ηλεκτρόδια η συγκόλληση συνήθως γίνεται με συνεχές ρεύμα. Τα βασικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται πρωταρχικά για τη συγκόλληση μεγάλων διατομών και στιβαρών κατασκευών, καθώς επίσης και για τη συγκόλληση χαλύβων που συγκολλούνται δύσκολα. Οι εκτελούμενες κολλήσεις με βασικά ηλεκτρόδια έχουν πάρα πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες-ιδιαίτερα πλαστικές ιδιότητες. Η δυσθραυστότητα αυτών των κολλήσεων είναι πολύ υψηλή ακόμη και σε θερμοκρασίες κάτω του μηδενός. Για την αποφυγή πόρων στις κολλήσεις πρέπει η συγκόλληση να γίνεται με ηλεκτρόδια στεγνωμένα, άμεσα πριν την συγκόλληση, σε θερμοκρασία  $250[^\circ\text{C}]-350[^\circ\text{C}]$ , σε χρόνο από 1.5 έως 2 ώρες. Τα ηλεκτρόδια πρέπει να διατηρούνται σε χώρο, του οποίου η σχετική υγρασία δεν ξεπερνά το 40% και η θερμοκρασία δεν είναι χαμηλότερη από  $15[^\circ\text{C}]$ . Η σκουριά από τα βασικά ηλεκτρόδια είναι χωρίς πόρους.

**Ηλεκτρόδια ρουτιλίου.** Η επένδυση των ηλεκτροδίων είναι μέσης ή παχιάς Περιέχουν μεγάλες ποσότητες ρουτιλίου  $\text{TiO}_2$ . Επίσης έχουν πάρα πολύ καλές ιδιότητες συγκόλλησης, τήκονται γρήγορα, χωρίς πιτσιλίσματα προσφέρονται για όλες τις θέσεις συγκόλλησης με συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα. Η περιοχή χρησιμοποίησής τους είναι παρόμοια με αυτή των όξινων ηλεκτροδίων. Πρέπει να χρησιμοποιούνται χάλυβες που συγκολλούνται εύκολα, επειδή, σε αντίθετη περίπτωση, είναι δυνατόν να εμφανισθούν ρωγμές εν θερμώ. Η σκουριά με αυτά τα ηλεκτρόδια είναι ισχυρά πορώδης.

**Οξειδωτικά ηλεκτρόδια.** Η επένδυση των ηλεκτροδίων είναι παχιά, αποτελείται κυρίως από οξειδία του σιδήρου ή του μαγγανίου. Η οξειδωτική σκουριά μειώνει την περιεκτικότητα του άνθρακα και του μαγγανίου στην κόλληση. Τα ηλεκτρόδια αυτά χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα, ιδιαίτερα όταν απαιτείται καλή εμφάνιση των κολλήσεων και λιγότερο οι μηχανικές ιδιότητες. Τα ηλεκτρόδια αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται συνήθως στις αυχενικές συγκολλήσεις. Οι μηχανικές ιδιότητες είναι πολύ χαμηλές, η σκουριά ισχυρά πορώδης.

**Ηλεκτρόδια κυτταρίνης.** Τα ηλεκτρόδια έχουν επένδυση σημαντικής ποσότητας καυστικών οργανικών ουσιών. Κατά τη συγκόλληση δημιουργείται μεγάλη

ποσότητα αερίων και οι σκουριές αφαιρούνται εύκολα. Τα ηλεκτρόδια κυτταρίνης δημιουργούν βαθιά τήξη, προσφέρονται για συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα. Η επιφάνεια των κολλήσεων δεν είναι ωραία, αλλά οι μηχανικές τους ιδιότητες είναι ικανοποιητικές.

#### 5.1.4 Χημική σύσταση και μηχανικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου υλικού

Το είδος της επένδυσης των ηλεκτροδίων έχει μεγάλη επίδραση στις ιδιότητες συγκόλλησης, για δεδομένη κατηγορία ηλεκτροδίων, καθώς και στη χημική σύσταση, την περιεκτικότητα αερίων, την ποσότητα εγκλεισμάτων μη μεταλλικών και τις μηχανικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου υλικού των ηλεκτροδίων. Οι εκτελούμενες κολλήσεις με βασικά ηλεκτρόδια έχουν τη λιγότερη περιεκτικότητα υδρογόνου, οξυγόνου και αζώτου καθώς και φωσφόρου, θείου και εγκλεισμάτων μη μεταλλικών. Αυτά χαρακτηρίζονται με τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, ιδιαίτερα με τις πλαστικές. Οι εκτελούμενες κολλήσεις με ηλεκτρόδια όξινα και ρουτιλίου περιέχουν μεγαλύτερες ποσότητες αερίων, μη μεταλλικών εγκλεισμάτων φωσφόρου και θείου από ό,τι τα βασικά ηλεκτρόδια. Οι ιδιότητες αντοχής των όξινων, των βασικών και των ηλεκτροδίων ρουτιλίου είναι όμοιες. Ενώ οι πλαστικές ιδιότητες και ιδιαίτερα η δυσθραυστότητα του εναποτιθέμενου υλικού των ηλεκτροδίων όξινων και ρουτιλίου είναι σημαντικά χειρότερες απ' ό,τι των βασικών ηλεκτροδίων. Τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου έχουν λίγο καλύτερες πλαστικές ιδιότητες απ' ό,τι τα όξινα. Η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου υλικού των ηλεκτροδίων για τη συγκόλληση κατασκευαστικών ανθρακοχαλύβων με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και ελαφρά κραματωμένων χαλύβων για εργασία σε κανονικές θερμοκρασίες φαίνονται στον Πίνακα 1 και Πίνακα 2.

Τύπος ηλεκτροδίου	Χημική σύσταση των εναποτιθέμενου υλικού, %							Περιεκτικότητα του διαχυμένου [H] σε [cm <sup>3</sup> ] ανά 100[gr] εναποτιθέμενου υλικού
	C	Mn	Si	P	S	N	O	
Όξινα	0,08	0,5-0,8	0,05-0,15	0,04	0,03	0,015-0,025	0,08-0,12	10-40
Ρουτιλίου	0,08	0,5-0,8	0,15-0,25	0,04	0,03	0,020-0,025	0,08-0,10	10-40
Βασικά	0,08	0,4-0,8	0,30-0,50	0,03	0,02	0,007-0,070	0,05-0,07	1-10

Πίνακας 1 Χημική σύσταση και περιεκτικότητα αερίων στο εναποτιθέμενο υλικό ηλεκτροδίων όξινων, ρουτιλίου και βασικών

Τύπος ηλεκτροδίου	Μηχανικές ιδιότητες των εναποτιθέμενου υλικού					
	R <sub>e</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>5</sub>	Δυσθραυστότητα θερμοκρασία δοκιμής		
				+20	-20	-40
Όξινα Ρουτιλίου	380-450	460-540	24-30	100-120	80	50
Βασικά	380-450	460-540	24-30	100-120	80	55
	400-460	460-540	28-34	180-240	165	105

Πίνακας 2 Μηχανικές ιδιότητες των εναποτιθέμενου υλικού των ηλεκτροδίων όξινων, ρουτιλίου και βασικών.

Σχετική επιμήκυνση επί τοις % για μήκος μέτρησης  $l_0=5 \cdot d$  όπου  $d$  η διάμετρος του

εφελκόμενου δοκιμίου. Γενικά, η σχετική επιμήκυνση  $A = 100 \cdot \frac{\Delta l}{l_0}$  (%)

### 5.1.5 Κωδικοποίηση των ηλεκτροδίων

Οι επικρατέστεροι κανονισμοί τυποποίησης που χρησιμοποιούνται διεθνώς είναι: *AWS (H.P.A.)-DIN* (Γερμανία)-*NFA* (Γαλλία)-*I.S.O. (INTERNATIONAL SYSTEM ORGANIZATION)-ΔΙΣ* (Διεθνές Ινστιτούτο Συγκολλήσεων). Σύμφωνα με τους κανονισμούς *ISO 2560-73*, τα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια για τη χειρωνακτική συγκόλληση ανθρακοχαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και ελαφρά κραματωμένων χαλύβων, ταξινομούνται βάσει:

- των μηχανικών ιδιοτήτων του εναποτιθέμενου υλικού
- του είδους της επένδυσης
- της θέσης συγκόλλησης
- του είδους του ρεύματος της ωφελιμότητας του εναποτιθέμενου υλικού
- της περιεκτικότητας υδρογόνου στο εναποτιθέμενο υλικό

Τα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια για τη χειρωνακτική συγκόλληση τόξου συμβολίζονται με το γράμμα *E*. Διαίρονται σε δύο κλάσεις, ανάλογα με τις ιδιότητες αντοχής του εναποτιθέμενου υλικού. Τα ηλεκτρόδια των οποίων το εναποτιθέμενο υλικό έχει αντοχή στον εφελκυσμό από *430[MPa]-510[MPa]* συμβολίζονται με τον κώδικα *43*, ενώ τα ηλεκτρόδια με αντοχή του εναποτιθέμενου υλικού στον εφελκυσμό από *510[MPa]-610[MPa]* συμβολίζονται με τον κώδικα *51*. Η κάθε αναφερθείσα κλάση διαιρείται σε πέντε κατηγορίες, ανάλογα με την αντοχή του εναποτιθέμενου υλικού στη δυσθραυστότητα και την επιμήκυνση, σύμφωνα με τον **Πίνακα 3**.

Κωδικοποίηση του ηλεκτροδίου	Αντοχή σε εφελκυσμό $R_m$ DaN/mm <sup>2</sup>	Σχετική επιμήκυνση $A_s$ %	Θερμοκρασία στην οποία η δυσθραυστότητα KV είναι το ελάχιστο 28J/cm <sup>2</sup> °C
<i>E 430</i>	<i>430-510</i>	-	-
<i>E 431</i>	<i>430-510</i>	20	+20
<i>E 432</i>	<i>430-510</i>	22	0
<i>E 433</i>	<i>430-510</i>	24	-20
<i>E 434</i>	<i>430-510</i>	24	-30
<i>E 435</i>	<i>430-510</i>	24	-40
<i>E 510</i>	<i>510-610</i>	-	-
<i>E 511</i>	<i>510-610</i>	18	+20
<i>E 512</i>	<i>510-610</i>	18	0
<i>E 513</i>	<i>510-610</i>	20	-20
<i>E 514</i>	<i>510-610</i>	20	-30
<i>E 515</i>	<i>510-610</i>	20	-40

**Πίνακας 3** Κωδικοποίηση των ηλεκτροδίων, ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου υλικού (σύμφωνα με το *ISO 2560-1973*)

Το είδος της επένδυσης συμβολίζεται με τα γραμματικά στοιχεία:

<i>A</i>	όξινη
<i>AR</i>	όξινη – ρουτιλίου
<i>B</i>	Βασική
<i>C</i>	Κυτταρίνης
<i>O</i>	Οξειδωτική
<i>R</i>	ρουτιλίου (ηλεκτρόδιο μέσης επένδυσης)



RR ρουτιλίου (ηλεκτρόδιο παχιάς επένδυσης)  
S άλλο είδος επένδυσης.

Ανάλογα με την ικανότητα συγκόλλησης σε διάφορες θέσεις, τα ηλεκτρόδια κωδικοποιούνται ως ακολούθως: α) όλες οι θέσεις, β) όλες οι θέσεις με εξαίρεση την κατακόρυφη από πάνω προς τα κάτω γ) επίπεδη και πλευρική, δ) επίπεδη, ε) επίπεδη, πλευρική, τοίχου, κατακόρυφη από πάνω προς τα κάτω. Ανάλογα με την ωφελιμότητα του εναποτιθέμενου υλικού, τα ηλεκτρόδια κωδικοποιούνται ως εξής: ηλεκτρόδια με όφελος του εναποτιθέμενου υλικού 105% δεν κωδικοποιείται, ηλεκτρόδια με όφελος του εναποτιθέμενου υλικού 105%-115%, κώδικας 110, ηλεκτρόδια με όφελος του εναποτιθέμενου υλικού 115%-125% κώδικας 120, ηλεκτρόδια με όφελος του εναποτιθέμενου υλικού 125%-135% κώδικας 130. Παρόμοια, χρησιμοποιώντας τη στρογγύλευση των τιμών του οφέλους του εναποτιθέμενου υλικού, κωδικοποιείται η τιμή του οφέλους επίσης για το ηλεκτρόδιο με όφελος του εναποτιθέμενου υλικού πάνω από 135%. Παραδείγματα κωδικοποίησης ηλεκτροδίων, σύμφωνα με το ISO2560-73: Ηλεκτρόδιο ρουτιλίου μέσης επένδυσης με μηχανικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου υλικού ελάχιστο:  $R_m=500[MPa]$ , σχετική επιμήκυνση 23%, δυσθραυστότητα  $71[J/m^2]$  σε θερμοκρασία  $+20^{\circ}C$ ,  $31[J/cm^2]$  σε θερμοκρασία  $0^{\circ}C$ ,  $20[J/m^2]$  θερμοκρασία  $-20^{\circ}C$ . Προσφέρεται για όλες τις θέσεις συγκόλλησης, με εναλλασσόμενο ρεύμα με ελάχιστη τάση στην εν κενό λειτουργία μετασχηματιστή  $50[V]$  και με συνεχές ρεύμα - θετικός πόλος στο ηλεκτρόδιο-το όφελος είναι μικρότερο απ' ό,τι 105%. Η κωδικοποίηση του είναι E432R13, ενώ η σύντηξη του E432R. Επενδεδυμένα ηλεκτρόδια με βασική επένδυση υψηλό όφελος και υψηλές μηχανικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου υλικού, ελάχιστο:  $R_m=560[MPa]$ , σχετική επιμήκυνση 22%, δυσθραυστότητα  $47[J/cm^2]$  σε  $20^{\circ}C$ , όφελος εναποτιθέμενου υλικού 158% προσφέρεται για όλες τις θέσεις συγκόλλησης, με εξαίρεση την κατακόρυφη κατεβατού. Μόνο με συνεχές ρεύμα, η περιεκτικότητα του διαχυόμενου υδρογόνου είναι κάτω από  $15[cm^3]$  στα  $100[gr]$  του εναποτιθέμενου υλικού. Η κωδικοποίηση του είναι E513D 16020 H, ενώ η σύντηξη του E513B. Η κωδικοποίηση των ηλεκτροδίων για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και ελαφρά κραματωμένων χαλύβων, με τους πολωνικούς κανονισμούς που βασίζονται στο ISO, υποτελείται από δύο γραμματικά στοιχεία και τρεις αριθμούς. Το πρώτο γράμμα E συμβολίζει το ηλεκτρόδιο, το δεύτερο γράμμα (A, B, C, O, R, S) συμβολίζει το είδος της επένδυσης:

A όξινη  
B βασική  
C καθαρίνης  
O οξειδωτική  
AR όξινη-ρουτιλίου  
R ρουτιλίου (μέσης επένδυσης)  
RH ρουτιλίου (παχιάς επένδυσης)  
S άλλο είδος επένδυσης.

Ο πρώτος αριθμός συμβολίζει το διαδοχικό νούμερο του ηλεκτροδίου για δεδομένο είδος επένδυσης, οι δύο επόμενοι την ελάχιστη αντοχή θραύσεως, για παράδειγμα EK 146 συμβολίζει ηλεκτρόδιο ρουτιλίου R1, με ελάχιστη αντοχή στον εφελκυσμό  $46^{daN}/[mm^2]$ , EK246-συμβολίζει ηλεκτρόδιο με επένδυση ρουτιλίου R2, που εκφράζει στο εναποτιθέμενο μέταλλο την ελάχιστη αντοχή στον εφελκυσμό  $R_m=46^{daN}/[mm^2]$ . Τα ηλεκτρόδια διαίρονται σε κλάσεις ανάλογα με την τιμή της αντοχής στον εφελκυσμό του εναποτιθέμενου μετάλλου

**Πίνακας 4** και της θερμοκρασίας δοκιμασίας της δυσθραυστότητας **Πίνακας 5**. Η κωδικοποίηση της κλάσης πρέπει να περιέχει τα ακόλουθα στη σειρά δεδομένα: τον κώδικα του ηλεκτροδίου *E*, το χαρακτηριστικό αριθμό της αντοχής στον εφέλκυσμό και τον αριθμό που αφορά τη θερμοκρασία δοκιμασίας της δυσθραυστότητας του εναποτιθέμενου μετάλλου **Πίνακας 6** και **Πίνακας 7**

Αντοχή στον εφέλκυσμό του εναποτιθέμενου υλικού $R_m$ - [daN/mm <sup>2</sup> ]	430-550	510-610	600-700	650-850	700-1000
Αριθμός που χαρακτηρίζει την αντοχή	43	51	60	65	70

**Πίνακας 4** Υποδιαίρεση των ηλεκτροδίων σε κλάσεις ανάλογα με την αντοχή σε εφέλκυσμό

Θερμοκρασία °C	Δεν καθορίζεται	+20	0	-20	-30	-40	-50	-60
Αριθμός που χαρακτηρίζει τη δυσθραυστότητα	0	1	2	3	4	5	6	7

**Πίνακας 5** Υποδιαίρεση των ηλεκτροδίων σε κλάσεις ανάλογα με τη θερμοκρασία δοκιμασίας στη δυσθραυστότητα

Ελάχιστη αντοχή στον εφέλκυσμό $R_m$			Επιμήκυνση ελάχιστη $A_5$		Ελάχιστη δυσθραυστότητα $U$		
Αριθμός	[Kgr/mm <sup>2</sup> ]	[DaN/mm <sup>2</sup> ]	Αριθμός	%	Αριθμός	[Kgr/cm <sup>2</sup> ]	[J/cm <sup>2</sup> ]
0	-	-	0	-	0	-	-
1	41	403	1	14	1	5	49
2	44	432	2	18	2	7	68,7
3	48	471	3	22	3	9	88,2
4	52	510	4	26	4	11	108
5	56	550	5	30	5	13	138
6	60	590	-	-	-	-	-

**Πίνακας 6** Αριθμητική κωδικοποίηση που αντιστοιχεί στις μηχανικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου μετάλλου  $R_m$ ,  $A_5$  και  $U$

E 43 2 R 3 2

Σύμβολο του ηλεκτροδίου
Αντοχή στον εφέλκυσμό του
Εναποτιθέμενου μετάλλου
Θερμοκρασία δοκιμασίας της
Δυσθραυστότητας
Είδος επίθεσης
Θέση συναρμολόγησης
Είδος ρεύματος

Πολικότητα ηλεκτροδίου	Εναλλασσόμενο και συνεχές ρεύμα Ελάχιστη τάση της εν κενό λειτουργίας μετασχηματιστή, [V]			Μόνο συνεχές ρεύμα
	50	70	90	
Ελεύθερη	1	4	7	-
Αρνητικός πόλος	2	5	8	-
Θετικός πόλος	3	6	9	0

**Πίνακας 7** Αριθμητική κωδικοποίηση της πολικότητας και τον είδους ρεύματος

### 5.1.6 Ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση κραματωμένων χαλύβων

Τα **κραματωμένα ηλεκτρόδια** έχουν συνήθως βασική επένδυση, που επιδρά στη μείωση του καψίματος των κραματικών στοιχείων κατά τη συγκόλληση. Μερικά ηλεκτρόδια ισχυρά κραματωμένα, τα οξύμαχα, έχουν επένδυση ρουτιλίου, μεταξύ άλλων για την επίτευξη καλύτερων ιδιοτήτων συγκόλλησης, κατά τη συγκόλληση σε εξαναγκασμένες θέσεις. Οι επενδύσεις ρουτιλίου στα οξύμαχα ηλεκτρόδια ευνοούν, επίσης, την επίτευξη τήγματος χαμηλότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα. Μερικά ηλεκτρόδια ελαφρά κραματωμένα, προορισμένα για τη συγκόλληση σε εξαναγκασμένες θέσεις ή για την εκτέλεση στρώσεων διείσδυσης. Τα ισχυρά κραματωμένα ηλεκτρόδια (ανοξειδωτά, οξύμαχα, πυρίμαχα) έχουν πυρήνες από κραματωμένους χάλυβες. Ενώ τα σύρματα πυρήνων των ελαφρά κραματωμένων ηλεκτροδίων εκτελούνται συνήθως από ανθρακοχάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα. Οι προσθήκες κραμάτωσης εισάγονται στο τήγμα δια των επενδύσεων. Τα ισχυρά κραματωμένα ηλεκτρόδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- για τη συγκόλληση ελαφρά κραματωμένων χαλύβων προοριζόμενων για εργασίες σε κανονικές θερμοκρασίες,
- για τη συγκόλληση ελαφρά κραματωμένων χαλύβων για εργασίες σε ανυψωμένες θερμοκρασίες,
- για τη συγκόλληση ανοξειδωτων χαλύβων,
- για τη συγκόλληση οξύμαχων χαλύβων,
- για τη συγκόλληση πυρίμαχων χαλύβων.

Κλίση ηλεκτροδίου	Χημική σύσταση εναποθέμενου υλικού ηλεκτροδίου %										
	C	Mn	Si <sub>max</sub>	Cr	Mo	[V]	Ni	Cu	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	
Mo		0.4-0.8		-	0.35-0.70	-	-	-			
0.5 Cr Mo		0.4-0.9		0.3-0.7	0.4-0.7	-	-	-			
1 Cr Mo		0.5-0.9		0.7-1.2	0.4-0.7	-	-	-			
2 Cr Mo		0.4-0.9		2.0-2.5	0.8-1.1	-	-	-			
1 Cr Mo			0.6	0.8-1.2	0.7-1.0	0.10-0.35	-	-	0.04	0.04	
0.5 MoV	0.12	0.5-0.7		0.35-0.75	0.4-0.7	0.35-0.65	-	-			
1.5 Cr MoV		0.4-0.9		1.0-1.4	0.7-0.1	0.15-0.35	-	-			
5 Cr Mo				4.0-6.0	0.4-0.7	-	-	-			
1 Ni Cr Mo				-	0.15-0.3	-	0.7-1.0	0.6-1.0			
1.5 Ni Cr Mo		0.5-1.0		-	0.2-0.4	-	1.0-1.3	0.9-1.3			
90 Cr Ni Mo				9.5-11.5	0.6-0.9	0.2-0.4	0.6-0.9	-			
ESK 32 Nb I	0.10	0.6-0.9	0.25	-	0.3-0.5	-	1.0-1.3	0.4-0.7	0.03	0.03	
ESK 32 Nb II	0.10	0.8-1.2	0.55	-	0.45-0.7	-	1.2-1.5	0.5-0.8	0.03	0.03	

**Πίνακας 8** Χημική σύσταση εναποθέμενου υλικού ηλεκτροδίου για τη συγκόλληση ελαφρά κραματωμένων χαλύβων, προοριζόμενων για εργασία σε ανηγόμενες θερμοκρασίες.

Κλάση ηλεκτροδίου	Μηχανικές ιδιότητες εναποτιθέμενου υλικού μετά από τη θερμική κατεργασία						Θερμική κατεργασία μετά τη συγκόλληση										
	R <sub>e</sub>	R <sub>m</sub>	A <sub>1</sub>	K <sub>IC</sub> [cm <sup>3/2</sup> ]/mi n	R <sub>π</sub> σε MiPa			Θερμοκρασία προθέρμανσης πριν την συγκόλληση [°C]	Ανόπτηση		Ψύξη		Επαναφορά		Εξομάλυνση		
					Θερμοκρασία δοκιμιασίου [°C]				Χρόνος [min]	Ταχύτητα Max [°C/h]	Μέχρι τη θερμοκρασία [°C]	θερμοκρασία [°C]	Χρόνος [min]	Χρόνος [min]			
Mo					200	300	350	400	450	500							
0.5 Cr Mo	300	450	18	80	240	210	190	170	160	-	100-200	2-3 ανά 1 [cm] του πάχους	150				
1 Cr Mo	350	500			270	250	240	220		190	200-230		100	400			
2 Cr Mo				60	250	230	220	210	200	184	250-350						
1 Cr Mo V			16	80	240	230	214			190	250-380						
0.5 Cr Mo V		480		60	270	250	240	220		190	250-300	120					
1.5 Cr Mo V	400	550			-	-	-	-	-	-	300-350						
5 Cr Mo	-	600	14	80	-	-	-	-	-	-	250-300	60	150	350			
1 Ni Cu Mo	400	550	18		-	-	-	-	-	-	250-300		50				
1.5 Ni Cu Mo					-	-	-	-	-	-	300-350						
9 Cr Ni Mo	650		14		-	-	-	-	-	-	300-350	60	50				
ESK 32 Nb 1	420	73-58	18		-	-	-	-	-	-	200						
ESK 32 Nb 2					-	-	-	-	-	-	200						

**Πίνακας 9** Μηχανικές ιδιότητες εναποτιθέμενου υλικού ηλεκτροδίου για τη συγκόλληση χαλύβων, προοριζομένων για εργασία σε ανυψωμένες θερμοκρασίες.

	Τύπος ηλεκτροδίου	Κύρια χρησιμοποίηση
1	2	3
Mo	ES Mo RES Mo R	Συγκόλληση μολυβδαινιούχων χαλύβων προοριζομένων για εργασία στη θερμοκρασία 450[°C]
0.5 0-Cr Mo	ES Cr-MoB	Συγκόλληση χρωμιούχο-μολυβδαινιούχων χαλύβων στη θερμοκρασία μέχρι 550[°C], και ιδιαίτερα για την επισκευή χυτοχαλύβων με-Mo στη θερμοκρασία εργαζομένων στη θερμ. 450[°C]
1 Cr Mo	ES2 Cr-MoB ES Cr-MoB	Συγκόλληση χρωμιούχο-μολυβδαινιούχων χαλύβων για την εργασία στη θερμοκρασία των 550[°C]
2 Cr Mo	ES2 Cr-MoR ES2 Cr-MoB	Συγκόλληση χρωμιούχο-μολυβδαινιούχων χαλύβων προοριζομένων για την εργασία στη θερμοκρασία των 580[°C]
1 Cr Mo V	ES Cr MoB VR ES Cr MoB VB	Συγκόλληση χρωμιούχο-μολυβδαινιούχο-βαναδιούχων χαλύβων προοριζομένων για εργασία στη θερμοκρασία των 580[°C], χρησιμοποιούμενων στην κατασκευή των στροβίλων.
0.5 Cr Mo V	ESV Cr MoB	Συγκόλληση χαλύβων χρωμιούχο-μολυβδαινιούχο-βαναδιούχων προοριζομένων για την εργασία στους 550[°C]
1.5 Cr Mo V	ESV Cr MoB	Συγκόλληση χρωμιούχο-μολυβδαινιούχο-βαναδιούχων χαλύβων χρησιμοποιούμενων στην κατασκευή στροβίλων για την επισκευή ελαττωματικών χαλύβδινων χυτών με την ίδια περίπου χημική σύνθεση.
5 Cr Mo	ES5 Cr MoB	Επισκευή χυτοχαλύβδινων ελαττωμάτων με την ίδια περίπου χημική σύνθεση.
1 Ni Cr Mo	ES 5 Cr MoB	Συγκόλληση χαλύβων για λέβητες 18 Cu NMT και 15 N MNb.
13 Ni Cr Mo	ES 9 Cr Ni 11B	
9 Cr Ni Mo	ES 9 Cr NiB	Συγκόλληση πορίμαχων χαλύβων χρησιμοποιούμενων στην κατασκευή στροβίλων 150
	ESK 32 Nb I	Συγκόλληση χαλύβων για λέβητες 15 N Cu MNb
	ESK 32 Nb II	

**Πίνακας 10** Κύρια χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων για τη συγκόλληση χαλύβων, εργαζομένων σε ανυψωμένες θερμοκρασίες

**Ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση ελαφρά κραματωμένων χαλύβων προοριζόμενων για εργασία σε υψηλές θερμοκρασίες.** Για τη συγκόλληση ελαφρά κραματωμένων χαλύβων προοριζόμενων για εργασία σε υψηλές θερμοκρασίες (λέβητες, προθερμαντήρες, αγωγοί ατμών), χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια με χημική σύσταση που πλησιάζει το μητρικό υλικό, για την επίτευξη σε υψηλές θερμοκρασίες ενιαίων ιδιοτήτων των συγκολλούμενων συνδέσεων με το μητρικό υλικό. Για τη συγκόλληση αγωγών με ελαφρά κραματωμένους χάλυβες χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια με επένδυση ρουτίλιου και βασική. Τα ηλεκτρόδια ρουτίλιου χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία στρώσεων διείδυσης και την αποφυγή πόρων, ενώ οι επόμενες στρώσεις εκτελούνται με βασικά ηλεκτρόδια. Η χημική σύνθεση, οι μηχανικές ιδιότητες και η χρησιμοποίηση των ηλεκτροδίων για τη συγκόλληση χαλύβων προοριζόμενων για εργασία σε ανυψωμένες θερμοκρασίες δίνονται στον **Πίνακα 8**, **Πίνακα 9**, **Πίνακα 10**.

**Ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση ανοξειδωτων χρωμιούχων χαλύβων** Για τη συγκόλληση ανοξειδωτων χρωμιούχων χαλύβων 13%-18%Cr μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ακόλουθα ηλεκτρόδια: ανοξειδωτα χρωμιούχα με 12%-14% Cr ή 16%-18%Cr, ωστενιτικά χρωμιούχα - νικελιούχα - μαγγανιούχα με 18%Ni και 6% Mn. Τα ανοξειδωτα ηλεκτρόδια με 12%-14%Cr και μέχρι 0.1%C είναι

ημιφερριτικά και έχουν τις ακόλουθες μηχανικές ιδιότητες:  $R_e=590[MPa]-880[MPa]$ ,  $A_5=690-1080 MPa$ ,  $A_5=0\%-12\%$ , δυσθραυστότητα  $KM=0-39[J/m^2]$ , σκληρότητα  $HB=350-450$ . Μετά την ανόπτηση στη θερμοκρασία  $800[^\circ C]-850[^\circ C]$ , οι μηχανικές ιδιότητες αυτών των ηλεκτροδίων μεταβάλλονται ως ακολούθως:  $R_m=590[MPa]-790[MPa]$ ,  $A_5=8\%-16\%$ , δυσθραυστότητα  $KM=18-59[J/m^2]$ , σκληρότητα  $HB=350-450$ . Οι εκτελούμενες κολλήσεις με φερριτικά ηλεκτρόδια  $16\%-18\%Cr$  και μέχρι  $0.1\% C$  έχουν ελαττωμένη αντοχή στον εφελκυσμό σε σχέση με τις κολλήσεις που επιτυγχάνονται με ημιφερριτικά ηλεκτρόδια  $R_m=380[MPa]-490[MPa]$ , αλλά οι πλαστικές ιδιότητες αυτών των κολλήσεων (δυσθραυστότητα και σχετική επιμήκυνση) είναι επίσης πολύ μικρές. Οι πλαστικές ιδιότητες των κολλήσεων που εκτελέστηκαν με ανοξειδωτα ημιφερριτικά και φερριτικά ηλεκτρόδια βελτιώνονται σημαντικά με τη διενέργεια ανόπτησης των κολλήσεων σε θερμοκρασία  $800[^\circ C]-850[^\circ C]$ . Από την άποψη των χαμηλών πλαστικών ιδιοτήτων των κολλήσεων, τα ανοξειδωτα χρωμιούχα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που, για λόγους διάβρωσης, δεν είναι δυνατόν, για τη συγκόλληση ανοξειδωτων χρωμιούχων χαλύβων, να χρησιμοποιηθούν ωστενιτικά ηλεκτρόδια.

**Ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση οξύμαχων χρωμιούχο-νικελιούχων χαλύβων.** Τα ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση οξύμαχων χαλύβων, εκτός από τις καλές μηχανικές ιδιότητες, πρέπει να έχουν και κατάλληλη ανθεκτικότητα στη γενική και την περικρυσταλλική διάβρωση. Η ανθεκτικότητα στην περικρυσταλλική διάβρωση εξαρτάται καταρχάς από την περιεκτικότητα του άνθρακα στο εναποτιθέμενο υλικό. Όσο χαμηλότερη είναι η περιεκτικότητα του άνθρακα στο εναποτιθέμενο υλικό των ηλεκτροδίων τόσο μεγαλύτερη είναι η ανθεκτικότητα στη διάβρωση. Η αύξηση της ανθεκτικότητας στην περικρυσταλλική διάβρωση των ηλεκτροδίων με αυξημένη περιεκτικότητα σε άνθρακα, μπορεί να επιτευχθεί με την προσαγωγή στο εναποτιθέμενο υλικό προσθηκών ισχυρά καρβιδιογόνων, των λεγόμενων σταθεροποιητών. Αυτοί είναι, συνήθως, το τιτάνιο, το νιόβιο και το ταντάλιο. Επειδή το τιτάνιο καίγεται πολύ ευκολότερα κατά τη συγκόλληση, χρησιμοποιείται κυρίως ως σταθεροποιητής το νιόβιο, το οποίο δημιουργεί σημαντικό δεσμό με το οξυγόνο απ' ό,τι το τιτάνιο. Γενικά, γίνεται αποδεκτό ότι η περιεκτικότητα του τιτανίου πρέπει να είναι  $\%Ti=5\%C$  (στην κόλληση) ενώ του νιοβίου  $\%Ti=8\%C$  (στην κόλληση). Τα χρωμιούχα νικελιούχα οξύμαχα ηλεκτρόδια, με καθαρή ωστενιτική δομή, έχουν τάση για τη δημιουργία ρηγματώσεων εν θερμώ. Για την αύξηση της ανθεκτικότητας του εναποτιθέμενου υλικού των ωστενιτικών ηλεκτροδίων στη δημιουργία ρηγματώσεων εν θερμώ, το εναποτιθέμενο υλικό πρέπει να περιέχει κάποια ποσότητα φερρίτη. Η περιεκτικότητα του φερρίτη στα ωστενιτικά οξύμαχα ηλεκτρόδια κυμαίνονται, γενικά, στα όρια  $3\%-15\%$  ανάλογα με το είδος των ηλεκτροδίων. Η δημιουργία των ρηγματώσεων εν θερμώ, κατά τη συγκόλληση με ωστενιτικά ηλεκτρόδια, εξαρτάται, επίσης, από τις συνθήκες συγκόλλησης, δηλαδή πρέπει να αποφεύγεται η χρησιμοποίηση μεγάλων εντάσεων ρεύματος και η υπερθέρμανση της κόλλησης.

**Ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση πυρίμαχων χαλύβων.** Για τη συγκόλληση πυρίμαχων συσκευών που δεν εργάζονται στην ατμόσφαιρα που περιέχει ενώσεις θείου, χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια ωστενιτικά  $Cr-Ni$ ,  $Cr-Ni-Mo$  ή  $Cr-Ni-Mn$ . Η περιεκτικότητα του χρωμίου σ' αυτά τα ηλεκτρόδια φτάνει μέχρι  $25\%$ , του

νικελίου μέχρι 35%, του μολυβδαίνιου μέχρι 5% και του μαγγανίου μέχρι 8%. Για τη συγκόλληση πυρίμαχων συσκευών που εργάζονται στην ατμόσφαιρα που περιέχει ενώσεις θείου, χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια χρωμιούχα με περιεκτικότητα μέχρι 25%Cr (Ni+Mn μέχρι 5%). Οι κολλήσεις που εκτελούνται με πυρίμαχα χρωμιούχα ηλεκτρόδια είναι πολύ εύθραυστες, γι' αυτό πρέπει να ανοπτηθούν στη θερμοκρασία 800[°C]. Για τη συγκόλληση πυρίμαχων χαλύβων, χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια ισχυρά κραματωμένα που χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή στις υψηλές θερμοκρασίες. Είναι συνήθως χρωμιούχα ηλεκτρόδια 12% - 15%Cr, με κάποια ποσότητα προσθηκών κραμάτωσης όπως Ni, V, Mo, W ή χρωμιούχα - νικελιούχα, με προσθήκες κραμάτωσης όπως V, Mo και W.

### 5.1.7 Δείκτες που χαρακτηρίζουν την απόδοση συγκόλλησης με ηλεκτρόδια επενδεδυμένα

Τα ηλεκτρόδια από την άποψη απόδοσης συγκολλησεως χαρακτηρίζονται με τους ακόλουθους δείκτες **Πίνακας II**: όφελος ηλεκτροδίου  $U_e\%$ , όφελος εναποτιθέμενου υλικού  $U_c\%$ , σταθερά τήξης ηλεκτροδίου,  $a[g/Ah]$ , απόδοση ηλεκτροδίου  $Q[Kg/h]$ .

Τύπος και κατηγορία ηλεκτροδίων	Όφελος ηλεκτροδίου $U_e\%$	Όφελος εναποτιθέμενου υλικού	Σταθερά τήξης ηλεκτροδίου $a$ $g/[Ah]$	Απόδοση ηλεκτροδίου $[Kg/h]$	Κατανάλωση ηλεκτροδίων $τεμ./[Kg]$ εναποτιθέμενου υλικού
Οξίνη EA 1.46	57-65	85-90	9.0	1.5	27.5
Ρουτίλιου ER 2.46	58-60	100-104	9.0	1.4 1.7	24.5
Βασική EB 1.46	70-71	108-111	10.2		22.5
Ρουτίλιου υψηλής απόδοσης EK 2.42 Fe 150	64-66	105-155	12	1.8	15

**Πίνακας II** Δείκτες που χαρακτηρίζουν την απόδοση συγκόλλησης μερικών ηλεκτροδίων με διάμετρο μέχρι 4[mm].

Το όφελος του ηλεκτροδίου  $U_e[\%]$  είναι ο λόγος της μάζας του επιτευχθέντος εναποτιθέμενου υλικού επενδεδυμένου ηλεκτροδίου προς τη συνολική μάζα του ηλεκτροδίου (με την επένδυση).  $U_e = \frac{m_e}{m_e} 100\%$ , όπου:  $m_e$  η μάζα εναποτιθέμενου

υλικού επενδεδυμένου ηλεκτροδίου,  $m_e$ , η συνολική μάζα επενδεδυμένου ηλεκτροδίου, g. Το όφελος του εναποτιθέμενου υλικού  $U_c[\%]$  είναι ο λόγος της μάζας του επιτευχθέντος εναποτιθέμενου υλικού επενδεδυμένου ηλεκτροδίου προς τη λιωμένη μάζα του πυρήνα επενδεδυμένου ηλεκτροδίου:  $U_c = \frac{m_e}{m_p} 100\%$ ,

όπου:  $m_e$  η μάζα εναποτιθέμενου υλικού επενδεδυμένου ηλεκτροδίου,  $m_p$  η λιωμένη μάζα του πυρήνα επενδεδυμένου ηλεκτροδίου g. Η σταθερά τήξης του ηλεκτροδίου  $a$  είναι η ποσότητα του επιτευχθέντος εναποτιθέμενου υλικού από το ηλεκτρόδιο στη μονάδα του χρόνου και υπολογισμένη συνήθως, σε  $g/(A \cdot h)$  ή  $g/(A \cdot [min])$ :  $a = \frac{m_e}{I \cdot t} (g/A \cdot h)$ , όπου:  $m_e$  η μάζα εναποτιθέμενου υλικού επενδεδυμένου ηλεκτροδίου,  $I$  η ένταση του ρεύματος συγκόλλησης,  $[A]$ ,  $t$  ο



χρόνος τήξης του ηλεκτροδίου,  $[h]$  Η απόδοση του ηλεκτροδίου  $O$  είναι η επιτευχθείσα ποσότητα εναποτιθέμενου υλικού στη μονάδα του χρόνου. Η απόδοση αυτή υπολογίζεται συνήθως σε  $[Kgr/h]$  Κατά τον καθαρισμό της απόδοσης των ηλεκτροδίων, χρησιμοποιούνται συνήθως, μέσες τιμές έντασης του ρεύματος συγκόλλησης, που προβλέπονται για δεδομένη κατηγορία ηλεκτροδίων.

### 5.1.8 Ηλεκτρόδια συγκόλλησης μη τηκόμενα

Τα μη τηκόμενα ηλεκτρόδια παράγονται ως ανθρακούχα και βολφραμιούχα. Τα ανθρακούχα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση τόξου λεπτών χαλύβδινων ελασμάτων, για τη συγκόλληση και προθέρμανση του χαλκού και των κραμάτων του, για την κοπή και την αυλάκωση, όπως, επίσης, και για τη συγκόλληση στην ατμόσφαιρα αδρανών αερίων (αργό, ήλιο). Τα βολφραμιούχα χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση στην ατμόσφαιρα αργού, ήλιου και υδρογόνου.

**Ανθρακούχα ηλεκτρόδια** Τα ανθρακούχα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση, την κοπή και την αυλάκωση. Η τιμή της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης επηρεάζει την επιτρεπόμενη φόρτιση

Διαστάσεις ηλεκτροδίων (διάμετρος ή διατομή)	Τύποι ηλεκτροδίων		
	Ανθρακούχα και ανθρακούχα -γραφίτη	Γραφίτισης	Ανθρακούχα-γραφίτη επιχαλκωμένα
	Ένταση ρεύματος, $[A]$		
4	3-40	40-50	50-70
6	40-50	50-70	75-100
8	50-75	75-100	100-150
10	75-100	100-150	150-200
12	100-125	150-200	200-250
14	125-150	200-250	250-300
16	150-200	250-300	300-350
18	200-250	300-350	350-400
20	250-300	350-400	400-450
22	300-350	400-450	450-500
25	375-425	475-525	525-575
3x10	40-50	50-75	75-100
4x10	50-75	75-100	100-150
3x25	75-100	100-150	150-200
4x40	125-150	200-250	250-300

**Πίνακας 12** Προτεινόμενες εντάσεις ρεύματος για ανθρακούχα ηλεκτρόδια συγκόλλησης με στρογγυλή και ορθογωνική διατομή.

ρεύματος, η οποία ανέρχεται από  $30[\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}]$ - $40[\Omega \cdot mm^2 \cdot m^{-1}]$ . Για την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των ανθρακούχων ηλεκτροδίων και της φόρτισης ρεύματος, επικαλύπτονται με στρώμα γαλβανισμένου χαλκού ή αλουμινίου. Τα παραγόμενα ηλεκτρόδια συγκόλλησης σε σειρά έχουν τις ακόλουθες διαστάσεις: *διάμετροι στρογγυλών ηλεκτροδίων: 4[mm], 6[mm], 8[mm], 10[mm], 12[mm], 14[mm], 16[mm], 18[mm], 20[mm], 22[mm] και 25[mm], διατομές ορθογώνιων ηλεκτροδίων: 3x10, 40x20, 3x25 και 4[mm] x 40[mm]. Τα τυποποιημένα μήκη των ορθογώνιων ηλεκτροδίων είναι 200[mm], 300[mm] και 400[mm], ενώ των στρογγυλών ηλεκτροδίων είναι και 500[mm]. Το πάχος του στρώματος χαλκού των επιχαλκωμένων ηλεκτροδίων είναι 0.04[mm]-*

0.08[mm]. Οι προτεινόμενες τιμές της έντασης ρεύματος για τα ανθρακούχα ηλεκτρόδια συγκόλλησης δίνονται στον **Πίνακα 12**. Τα ανθρακούχα ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται για την αυτόματη σημειακή συγκόλληση ανθρακοχάλυβα. Συνδέονται στον αρνητικό πόλο, επειδή, σε αντίθετη περίπτωση, μπορεί να εμφανισθεί σημαντική απανθράκωση των κολλήσεων.

**Ηλεκτρόδια βολφραμίου.** Τα ηλεκτρόδια βολφραμίου χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση τόξου με τη μέθοδο *GTA (TIG)* στην προστατευτική ατμόσφαιρα (συνήθως αργού και ήλιου ή και μιγμάτων αυτών). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση κραματωμένων χαλύβων, μη σιδηρούχων μετάλλων καθώς και για λεπτά ελάσματα από μαλακό χάλυβα. Τα ηλεκτρόδια αυτά κατασκευάζονται με διαμέτρους 1[mm], 1.5[mm], 2[mm], 3[mm], 4[mm], 5[mm], 6[mm] και 8[mm], με μήκος 125[mm] και 175[mm]. Επίσης παράγονται με προσθήκες *Tor*, *Ta* και *Zr* ή επικαλύπτονται με οξειδία αυτών των μετάλλων. Το βολφράμιο, ως μέταλλο, δύσκολα τήκεται (η θερμοκρασία τήξης του είναι 380[°C]). Κατά τη συγκόλληση στην ατμόσφαιρα αδρανών αερίων με μικρή καθαρότητα, που περιέχουν κάποια ποσότητα οξυγόνου, αυξάνεται η φθορά των ηλεκτροδίων βολφραμίου. Η φθορά αυτή αυξάνεται επίσης, και με μεγάλη πυκνότητα ρεύματος, επειδή τα ηλεκτρόδια υπερθεμαίνονται. Ακόμη με σημαντικά χαμηλή ένταση δε διατηρείται το τόξο και αιωρείται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Τα ηλεκτρόδια βολφραμίου συνδεόμενα με τον αρνητικό πόλο, μπορούν να φορτιστούν με μεγαλύτερο ρεύμα από ό,τι αν συνδεθούν με το θετικό πόλο.

### 5.1.9 Ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση χυτοσιδήρου

Τα ηλεκτρόδια συγκόλλησης χυτοσιδήρου διαίρονται ανάλογα με, τη μέθοδο συγκόλλησης του χυτοσιδήρου σε εν ψυχρώ ή εν θερμώ. Για τη συγκόλληση τόξου του χυτοσιδήρου εν ψυχρώ χρησιμοποιούνται:

- ηλεκτρόδια επενδεδυμένα σύνδεσης, προοριζόμενα για τη συγκόλληση κατασκευαστικών χαλύβων,
- ηλεκτρόδια νικελίου και κράματα του
- ηλεκτρόδια μπρούντζου
- ηλεκτρόδια εναλλακτικά χαλύβδινα-χαλκού.

Για τη συγκόλληση τόξου του χυτοσιδήρου εν θερμώ χρησιμοποιούνται επενδεδυμένα ηλεκτρόδια, που δημιουργούν τήγμα με δομή χημικής σύστασης και σκληρότητα φαιού χυτοσιδήρου φερριτικού-περλιτικού. Ενώ για την οξυγονοκόλληση χυτοσιδήρου εν θερμώ χρησιμοποιούνται ράβδοι μαζί με κατάλληλα συλλιπάσματα.

**Ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση χυτοσιδήρου εν ψυχρώ, χαλύβδινα ηλεκτρόδια.** Για τη συγκόλληση τόξου του χυτοσιδήρου εν ψυχρώ, χρησιμοποιούνται βασικά επενδεδυμένα ηλεκτρόδια σύνδεσης, προοριζόμενα για τη συγκόλληση χαλύβδινων κατασκευών. Τα βασικά ηλεκτρόδια έχουν τις καλύτερες πλαστικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου υλικού. Οι συνδέσεις από χυτοσίδηρο, εκτελούμενες με αυτά τα ηλεκτρόδια, δεν είναι στεγανές και παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα. Σκληραίνεται η ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά και η κόλληση. Ο άνθρακας από το χυτοσίδηρο μεταφέρεται στην κόλληση. Για τη μείωση της τηκόμενης ποσότητας του χυτοσιδήρου, που είναι αποφασιστικός

για τη σκλήρυνση της κόλλησης, καθώς και της ζώνης επηρεαζόμενης θερμικά, η συγκόλληση πρέπει να εκτελείται με τη μέθοδο εν ψυχρώ, με όσο το δυνατό λιγότερη θερμότητα. Απ' αυτό το γεγονός, για τη συγκόλληση του χυτοσιδήρου η εν ψυχρώ, προτείνεται η χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων με όσο το δυνατόν μικρότερες διαμέτρους καθώς και με ρεύμα συγκόλλησης χαμηλότερης έντασης, κατά τη συγκόλληση χάλυβα. Για τη συγκόλληση χυτοσιδήρου χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια βασικά *EB1.46*, *EB2.46*, *EB1.50* και *EB2.55*. Με τα αναφερθέντα βασικά ηλεκτρόδια χαμηλού άνθρακα καθώς και με τα ισχυρά κραματωμένα, οι εκτελούμενες κολλήσεις δε σφυρηλατούνται.

**Ηλεκτρόδια νικελίου και κραμάτων τους.** Τα ηλεκτρόδια νικελίου και των κραμάτων τους χρησιμοποιούνται για την εν ψυχρώ συγκόλληση χυτευτικών ελαττωμάτων, που, στη συνέχεια, κατεργάζονται μηχανικά με εργαλεία κοπής, για την απόδοση της τελικής μορφής τους. Οι εκτελούμενες συνδέσεις με αυτά τα ηλεκτρόδια είναι, γενικά, στεγανές. Τυπικές κατηγορίες αυτών των ηλεκτροδίων είναι:

- ηλεκτρόδια νικελίου με εναποτιθέμενο υλικό που περιέχει πάνω από 95% Ni
- ηλεκτρόδια νικελίου-χαλκού με εναποτιθέμενο υλικό που περιέχει περίπου 65% Ni και περίπου 25% Cu (κράμα *Monel*)
- ηλεκτρόδια νικελίου-σιδήρου με εναποτιθέμενο υλικό που περιέχει περίπου 55% Ni και περίπου 45% Fe.

Κατά τη συγκόλληση με αυτά τα ηλεκτρόδια πρέπει να:

- τηρείται η τεχνολογία συγκόλλησης εν ψυχρώ,
- τήκονται με ρεύμα χαμηλής έντασης
- εκτελείται η κόλληση με μικρά τμήματα και με διακοπές
- σφυρηλατείται η κόλληση σε όλο το μήκος.

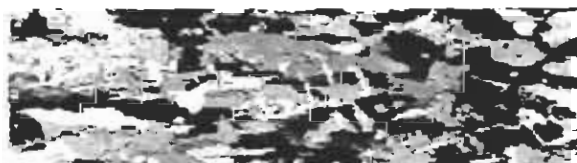
Η σκληρότητα των εκτελούμενων κολλήσεων, με ηλεκτρόδια νικελίου και με κράματα αυτού, κυμαίνεται στην περιοχή *150HB-220HB*. Τα ηλεκτρόδια νικελίου έχουν καλύτερες ιδιότητες απ' αυτά των κραμάτων του. Η ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά των εκτελούμενων συνδέσεων με ηλεκτρόδια νικελίου έχει το μικρότερο πλάτος. Επίσης, η σκληρότητα του εναποτιθέμενου υλικού των ηλεκτροδίων νικελίου είναι η μικρότερη και ισούται περίπου με *160HB*. Τα ηλεκτρόδια νικελίου-σιδήρου ο πυρήνας του ηλεκτροδίου από κράμα *Ni-Fe* έχουν τάση για υπερθέρμανση, κατά τη χρησιμοποίηση αρκετά υψηλής έντασης ρεύματος. Το εναποτιθέμενο υλικό των ηλεκτροδίων με κράμα *Monel* έχει μεγάλη τάση για ρηγμάτωση σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα ηλεκτρόδια νικελίου συμβολίζονται με το σύμβολο *EGGNi*, τα νικελίου-σιδήρου με *EGGFe-Ni* ενώ τα *Monel* με το σύμβολο *EGGM*. Στον Πίνακα 13 δίνεται η ένταση ρεύματος συγκόλλησης ανάλογα με την κατηγορία και τη διάμετρο των ηλεκτροδίων.

Κατηγορία ηλεκτροδίου	Ένταση ρεύματος, [A]				
	διάμετρος ηλεκτροδίου [mm]				
	2	2.5	3.25	4	5
EGG Ni	-	40-70	70-100	100-140	-
EGGFe-Ni	30-60	50-80	80-120	110-170	150-200
EGGM	30-60	50-80	80-120	110-170	150-200

Πίνακας 13 Εντάσεις ρεύματος που προτείνονται για τη συγκόλληση χυτοσιδήρου με ηλεκτρόδια EGGNi, EGGFe-Ni και EGGM

Τα αναφερθέντα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται με βασική-ιονίζουσα επένδυση. Η συγκόλληση με αυτά τα ηλεκτρόδια γίνεται με συνεχές ρεύμα και σε επίπεδη θέση. Τα ηλεκτρόδια νικελίου προσφέρονται και για τη συγκόλληση σε θέση τοίχου.

**Ηλεκτρόδια μπρούντζου** Για τη συγκόλληση του χυτοσιδήρου εν ψυχρώ με ηλεκτρόδια μπρούντζου με κράματα  $Cu-Sn$  ή χαλκού, τα ηλεκτρόδια περιέχουν μικρές ποσότητες στοιχείων, όπως  $Mn$ ,  $Al$ ,  $Si$  και  $Cr$ . Οι εκτελούμενες συνδέσεις με ηλεκτρόδια μπρούντζου είναι γενικά στεγανές. Οι κολλήσεις που διενεργούνται με ηλεκτρόδια μπρούντζου, και ιδιαίτερα; με κράματα  $Cu-Sn$ , είναι μαλακές και μπορούν να κατεργασθούν με εργαλεία κοπής. Επίσης, έχουν καλές πλαστικές ιδιότητες και η σφυρηλάτησή τους είναι ικανοποιητική. Η ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά είναι σκληρή και μπορεί να κατεργασθεί μόνο με λείανση. Το πλάτος της ζώνης επηρεαζόμενη θερμικά είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με αυτό που προκύπτει στις συγκολλητές συνδέσεις με ηλεκτρόδια νικελίου ή κραμάτων του.



Σχήμα 2 Μεταβατική ζώνη κατά τη συγκόλληση χυτοσιδήρου εν ψυχρώ με ηλεκτρόδια EGGCu

Η διαλυτότητα του χυτοσιδήρου στο χαλκό είναι περιορισμένη και για το λόγο αυτό ο λιωμένος χυτοσίδηρος ως λευκός λεδεμβουρικός, εμφανίζεται, συνήθως, στις κολλήσεις με μορφή σφαιρικών εγκλεισμάτων **Σχήμα 2**. Τα εγκλείσματα αυτά δυσχεραίνουν τη μηχανική κατεργασία με εργαλεία κοπής, καθώς αυξάνουν και την ευθραυστότητα και τη σκληρότητα των κολλήσεων. Για την επίτευξη μαλακών και πλαστικών κολλήσεων, αν είναι δυνατόν χωρίς χυτοσίδηρο εγκλείσματα, πρέπει να τηρηθούν με ακρίβεια οι αρχές της τεχνολογίας συγκόλλησης εν ψυχρώ. Για τη συγκόλληση του χυτοσιδήρου εν ψυχρώ κατασκευάζονται ηλεκτρόδια μπρούντζου  $ECuSn7$ ,  $ECuMnAl$ , και  $EGGCu$ . Τα ηλεκτρόδια  $ECuSn7$  έχουν ιονίζουσα επένδυση και εκτελούνται με λεπτή επένδυση. Το εναποτιθέμενο υλικό ηλεκτροδίων  $ECuSn7$  περιέχει περίπου 7%  $Sn$ , 0.2%  $P$ , 0.3%  $Mn$ , 0.3%  $Si$ , 0.3%  $Fe$  και το υπόλοιπο  $Cu$ . Ο πυρήνας του ηλεκτροδίου είναι σύρμα από μπρούντζο κασιτέρου, με περιεκτικότητα περίπου 7%  $Sn$  και 0.2%  $P$ . Η σκληρότητα του εναποτιθέμενου υλικού είναι περίπου 80 HB. Τα ηλεκτρόδια, προ της συγκόλλησης, πρέπει να στεγνώνονται στη θερμοκρασία των  $120[^\circ C]$  σε χρόνο 1 ώρας. Τα ηλεκτρόδια  $ECuMnAl$  έχουν,

επίσης, ιονίζουσα επένδυση και εκτελούνται με λεπτή επένδυση. Το εναποτιθέμενο υλικό ηλεκτροδίων  $ECuMnAl$  περιέχει περίπου 13%  $Al$ , 1%  $Mn$ , 0.3%  $Si$  και το υπόλοιπο  $Cu$ . Ο πυρήνας του ηλεκτροδίου είναι σύρμα χαλκού. Τα αναφερθέντα στοιχεία εισάγονται στο τήγμα δια της επένδυσης των ηλεκτροδίων. Η σκληρότητα του εναποτιθέμενου υλικού ηλεκτροδίων  $ECuMnAl$  είναι περίπου 100HB. Τα αναφερθέντα ηλεκτρόδια, προ της συγκόλλησης, πρέπει να στεγνώνονται στη θερμοκρασία των 250[°C] σε χρόνο 2 ωρών. Τα ηλεκτρόδια  $EGGCu$  έχουν επένδυση βασική - ιονίζουσα και εκτελούνται με μέση επένδυση. Το εναποτιθέμενο υλικό ηλεκτροδίων  $EGGCu$ , εκτός του χαλκού, περιέχει περίπου 1%  $Cr$ , 2%  $Fe$ , 0.3  $Si$ . Ο πυρήνας του ηλεκτροδίου είναι σύρμα χαλκού. Τα στοιχεία που αναφέρονται περιέχονται στην επένδυση των ηλεκτροδίων. Η σκληρότητα του εναποτιθέμενου υλικού ηλεκτροδίων  $EGGCu$  είναι περίπου 120HB.

Κατηγορία ηλεκτροδίου	Ένταση ρεύματος, [A]			
	Διάμετρος ηλεκτροδίου, [mm]			
	2,5	3	3,25	4
$ECuSn7$	60-90	90-120	100-130	120 - 150
$ECuMnAl$	60-90	90-120	100-130	120 - 150
$EGGCu$	70-100	100-130	110-130	130-160

**Πίνακας 14** Χρησιμοποιούμενη ένταση ρεύματος για τη συγκόλληση χυτοσιδήρου εν ψυχρώ με ηλεκτρόδια  $ECuSn7$ ,  $ECuMnAl$ , και  $EGGCu$ .

Τα ηλεκτρόδια  $EGGCu$  χρησιμοποιούνται για συγκόλληση, εφόσον στεγνωθούν σε θερμοκρασία 200[°C], επί 2 ώρες. Η τεχνολογία συγκόλλησης του χυτοσιδήρου με τη μέθοδο εν ψυχρώ επιβάλλει μεταξύ άλλων, τη χρησιμοποίηση έντασης ρεύματος με περιορισμένη τιμή **Πίνακας 14**. Τα ηλεκτρόδια  $ECuSn7$ ,  $ECuMnAl$ , και  $EGGCu$  προορίζονται για τη συγκόλληση με συνεχές ρεύμα και θετικό πόλο στο ηλεκτρόδιο.

**Ηλεκτρόδια εναλλακτικά χαλύβδινα-χαλκού.** Σε μερικές περιπτώσεις για τη συγκόλληση χυτοσιδήρου εν ψυχρώ, συνήθως για την επισκευή χυτών, που δεν καταπονούνται με μεγάλες στατικές δυνάμεις, και ιδιαίτερα με δυναμικές, χρησιμοποιούνται εναλλακτικά ηλεκτρόδια χαλύβδινα - χαλκού, με διάφορες εναλλαγές, ή χαλύβδινα-ορείχαλκου. Για την εκτέλεση των εναλλακτικών ηλεκτροδίων, χρησιμοποιούνται τυποποιημένα ηλεκτρόδια χαλύβδινα χαμηλού άνθρακα, με επένδυση αποκλειστικά βασική, καθώς και λεπτά σύρματα 1-2 mm. Για την εκτέλεση ηλεκτροδίων εναλλακτικών αντί σύρματος, χρησιμοποιείται, επίσης, ταινία χαλκού ή ορείχαλκου, συνήθως με διαστάσεις 3[mm]-5[mm] και πάχος 0.1[mm]-0.5[mm]. Αυτές οι ταινίες, όπως και τα σύρματα, περιτυλίγονται σε μορφή σπείρας στα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια. Οι δέσμες των εναλλακτικών ηλεκτροδίων εκτελούνται από ένα ή μερικά χαλύβδινα ηλεκτρόδια χαμηλού άνθρακα, με βασικές επενδύσεις και με μία ή μερικές ράβδους χαλκού ή ορείχαλκου με διαφορετικές διατομές, δεμένες σε μερικά σημεία με λεπτό σύρμα χαλκού. Οι δέσμες επενδεδυμένων ηλεκτροδίων και ράβδων χρησιμοποιούνται, συνήθως, για την επισκευή ελαττωμάτων με σημαντικές διαστάσεις. Οι εκτελούμενες κολλήσεις με αυτά τα ηλεκτρόδια έχουν πολύ διαφοροποιημένη σκληρότητα, δομή και χημική σύσταση. Η κόλληση αποτελείται από μίγμα χαλκού και σιδήρου με διάφορη αναλογία ανάμιξης που εξαρτάται από τη

σύσταση των εναλλακτικών ηλεκτροδίων ή από τη δέσμη των ηλεκτροδίων και ράβδων με πολλά εγκλείσματα λευκού χυτοσιδήρου. Οι κολλήσεις αυτές δύσκολα κατεργάζονται με εργαλεία κοπής. Για την εκτέλεση των εναλλακτικών ηλεκτροδίων καθώς και της δέσμης ηλεκτροδίων και ράβδων χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια με βασική επένδυση *EB 1.46*, *EB 1.50*, *EB 1.55*, *EB 2.46*. Προ της συγκόλλησης, τα ηλεκτρόδια αυτά πρέπει να στεγνώνονται σε θερμοκρασία περίπου  $300[^\circ\text{C}]$  και χρόνο περίπου 2-4 ώρες, ανάλογα με τη διάμετρο.

**Ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση χυτοσιδήρου εν θερμώ** Για τη συγκόλληση τόξου του χυτοσιδήρου εν θερμώ χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια επενδεδυμένα, που δημιουργούν τήγμα με χημική σύσταση, σκληρότητα και δομή (με κατάλληλη αργή ψύξη) φαιού χυτοσιδήρου φερριτικού - περιλιτικού. Το εναποτιθέμενο υλικό αυτών των ηλεκτροδίων, εκτός του σιδήρου, περιέχει συνήθως 3%-4% C και 2.5%-4% Si. Τα ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση του χυτοσιδήρου εν ψυχρώ εκτελούνται με παχιά βασική επένδυση. Ο πυρήνας των ηλεκτροδίων είναι σύρμα με χαμηλό άνθρακα. Μεγάλες ποσότητες άνθρακα και πυριτίου εισάγονται στο τήγμα δια της επένδυσης. Τα ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση του χυτοσιδήρου εν θερμώ εκτελούνται με διαμέτρους  $4[mm]$ - $12[mm]$ , με κανονικά μήκη  $440[mm]$  και μεγαλύτερα. Τα ηλεκτρόδια είναι προορισμένα για τη συγκόλληση με συνεχές ρεύμα (συνδεδεμένα με θετικό πόλο) και, μερικές φορές, με εναλλασσόμενο ρεύμα. Για τη συγκόλληση του χυτοσιδήρου εν θερμώ, χρησιμοποιούνται, επίσης, επενδεδυμένα ηλεκτρόδια, εκτελούμενα για ίδιες ανάγκες. Ο πυρήνας είναι από χυτοσίδηρο ράβδο με χημική σύσταση φαιού χυτοσιδήρου ή χυτοσίδηρο ράβδο που χρησιμοποιείται για την οξυγονοκόλληση χυτοσιδήρου. Στο χυτοσίδηρο πυρήνα μεταφέρεται με εμβάπτιση η επένδυση, η οποία περιορίζει το κάψιμο του άνθρακα και του πυριτίου όπως και διευκολύνει το άναμμα του τόξου για την τήξη του ηλεκτροδίου. Οι επενδεδυμένες χυτοσίδηρες ράβδοι στεγνώνονται, αρχικά, σε θερμοκρασία δωματίου, το ελάχιστο δύο 24ωρα, και, στη συνέχεια, στη θερμοκρασία των  $300[^\circ\text{C}]$ , σε χρόνο  $3[h]$ - $5[h]$ , ανάλογα με τη διάμετρο του ηλεκτροδίου. Για τη συγκόλληση του χυτοσιδήρου με τη μέθοδο εν θερμώ, παράγονται ηλεκτρόδια *EGGO*. Τα ηλεκτρόδια αυτά έχουν επένδυση βασική - ιονίζουσα και εκτελούνται με παχιά επένδυση. Το εναποτιθέμενο υλικό των ηλεκτροδίων *EGGO* περιέχει, εκτός του σιδήρου, περίπου 3% C, 4% Si. Ο πυρήνας του ηλεκτροδίου αποτελείται από σύρμα με χαμηλό άνθρακα. Ο άνθρακας και το πυρίτιο βρίσκονται στην επένδυση του ηλεκτροδίου. Η σκληρότητα του εναποτιθέμενου υλικού των ηλεκτροδίων, με σχετικά αργή ψύξη, είναι 200-250HB. Το ολικό όφελος  $U_{\text{συν}}$  του εναποτιθέμενου υλικού για τα ηλεκτρόδια *EGGO* είναι περίπου 75% (για τα ηλεκτρόδια *EB 1.46* το όφελος  $U_{\text{συν}}$ , είναι περίπου 70%). Στον Πίνακα 15 δίνονται τα μεγέθη των εντάσεων ρεύματος συγκόλλησης. Τα ηλεκτρόδια *EGGO* προσφέρονται για τη συγκόλληση σε θέση πλευρική και επίπεδη. Προ της συγκόλλησης επιβάλλεται το στέγνωμα αυτών των ηλεκτροδίων σε θερμοκρασία  $250[^\circ\text{C}]$  και χρόνο περίπου 2[h].

Διάμετρος ηλεκτροδίου [mm]	Ένταση ρεύματος [A]	
2	30	-60
2,5	50	-80
3,25	80	-120
4	110	-170
5	150	-200

**Πίνακας 15** Ένταση ρεύματος, χρησιμοποιούμενη για τη συγκόλληση χυτοσιδήρου με τη μέθοδο εν θερμώ, με ηλεκτρόδια EGGO.

**Ράβδοι και συλλιπάσματα για την οξυγονοκόλληση χυτοσιδήρου εν θερμώ.** Για την οξυγονοκόλληση του χυτοσιδήρου χρησιμοποιούνται ράβδοι μαζί με κατάλληλο συλλίπασμα. Οι χυτοσιδηρές ράβδοι εκτελούνται με διάφορες διατομές, συνήθως στρογγυλές, με διαμέτρους 4[mm]-6[mm]. Οι χυτοσιδηρές ράβδοι έχουν αυξημένη περιεκτικότητα σε πυρίτιο και φώσφορο σε σχέση με το φαιό χυτοσίδηρο. Κατά τη συγκόλληση με χυτοσιδηρές ράβδοι με αρκετά χαμηλή περιεκτικότητα πυριτίου και συγχρόνως υψηλή περιεκτικότητα μαγγανίου, μπορούν να εμφανιστούν στις κολλήσεις σκληρά σημεία λευκού χυτοσιδήρου. Η προσθήκη φωσφόρου μέχρι 0.5% επιδρά θετικά στη ρευστότητα του τήγματος συγκόλλησης, χωρίς να προκαλεί ρηγματώσεις. Το θείο δεν πρέπει να υπερβαίνει την ποσότητα του 0.1%. Είναι στοιχείο επιβλαβές, αυξάνει την πυκνότητα του ρευστού τήγματος συγκόλλησης καθώς και το πορώδες της κόλλησης. Η χημική σύσταση των χυτοσιδηρών ράβδων για την οξυγονοκόλληση είναι η ακόλουθη:

C	3-4%
Si	3-3.8%
Mn	0.5-0.8%
P	max 0.5%
S	max 0.08%
Ni	max 0.3%

Τα συλλιπάσματα είναι δυσθερμαγωγά. Χρησιμοποιούμενα για την οξυγονοκόλληση του χυτοσιδήρου, χαμηλώνουν τη θερμοκρασία τήξης και δύσκολα επιπλέουν τα τηκόμενα οξειδία στην επιφάνεια του τήγματος. Οι προσθήκες των στερεών συλλιπασμάτων είναι: Βόρακας ή βορικό νάτριο  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$  και άλλες ενώσεις βορίου, γλωρίου, ποτάσας  $NaCl$ , ανθρακικής σόδας  $Na_2CO_3$ , φθορίτη  $CaF_2$  όπως και σιδηροπυρίτης. Ωφέλιμα αποτελέσματα πετυχαίνονται με τη χρησιμοποίηση συλλιπάσματος με την ακόλουθη σύσταση: Βόρακας 40%, ανθρακική ποτάσα 30%, φθορίτης 25% και σιδηροπυρίτης 45% Si 5%. Τα συλλιπάσματα στο λουτρό συγκόλλησης εισάγονται κατά διάφορο τρόπο. Γενικά η πυρωμένη χυτοσίδηρο ράβδος εμβαπτίζεται στο ξηρό συλλίπασμα.

#### 5.1.10 Ηλεκτρόδια για την αναδόμωση των χαλύβων

Για την αναδόμωση των μετάλλων, παρόμοια με τη συγκόλληση των μετάλλων, εκτελούνται διάφορες μορφές κολλήσεων, με τη χρησιμοποίηση καθορισμένων μεθόδων. Οι εκτελούμενες κολλήσεις με την εναπόθεση υλικού πρέπει να αποδώσουν διάφορες ιδιότητες, όπως:

- υψηλή σκληρότητα σε κανονικές και υψηλές θερμοκρασίες,
- σημαντική ανθεκτικότητα στη φθορά, σε συνθήκες εκτριβής υλικών ψαθυρών ή μέταλλο με μέταλλο,
- υψηλή αντοχή στη διάβρωση ή την οξείδωση σε κανονική ή υψηλή θερμοκρασία.

Οι κύριοι αποφασιστικοί παράγοντες για τις ιδιότητες των εναποτιθέμενων κολλήσεων είναι: η σκληρότητα, η χημική σύσταση και η δομή του μετάλλου στο οποίο εκτελείται η αναγόμευση. Η διαίρεση των εναποτιθέμενων υλικών με βάση το είδος, τη μορφή και τον προορισμό τους έχει ως ακολούθως:

1. επενδεδυμένα ηλεκτρόδια για τη χειρωνακτική αναγόμευση τόξου,
2. ράβδοι για την αναγόμευση με οξυγονοκόλληση και με τη μέθοδο GTA (TIG),
3. ράβδοι σωληνωτοί για την αναγόμευση με οξυγονοκόλληση,
4. σύρματα για την αναγόμευση με τις μεθόδους GMA (MIG),
5. σύρματα σκόνης για αναγόμευση
6. σύρματα και συλλιπάσματα για αναγόμευση με βυθιζόμενο τόξο,
7. ταινίες και συλλιπάσματα για την αναγόμευση με βυθιζόμενο τόξο,
8. μεταλλικές σκόνες για την αναγόμευση με οξυγονοκόλληση και με καυστήρα πλάσματος.

**Επενδεδυμένα ηλεκτρόδια για τη χειρωνακτική αναγόμευση τόξου** Ως τέτοια ηλεκτρόδια, ανάλογα με τη χρησιμότητα τους, παράγονται τα εξής:

- ηλεκτρόδια ελαφρά κραματωμένα γενικής χρήσης,
- ηλεκτρόδια ανοξειδωτά για την αναγόμευση επιφανειών στεγανότητας,
- ηλεκτρόδια κραματωμένα μαγγανίου,
- ηλεκτρόδια κραματωμένα για την αναγόμευση κοπτικών εργαλείων αφαίρεσης υλικού,
- ηλεκτρόδια κραματωμένα για την αναγόμευση εργαλείων εργαζομένων εν θερμώ,
- ηλεκτρόδια κραματωμένα για την αναγόμευση εργαλείων εργαζομένων εν ψυχρώ,
- ηλεκτρόδια αναγόμευσης κραματωμένων χυτοσιδήρων,
- ηλεκτρόδια ισχυρά κραματωμένα.

Η παραγωγή των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων, σε μεγάλη κλίμακα, επιτρέπει ελεύθερα την επιλογή εναποτιθέμενων υλικών με τις απαιτούμενες ιδιότητες, ιδιαίτερα από την άποψη της χημικής σύστασης, της δομής και της σκληρότητας των εναποτιθέμενων υλικών στην περιοχή από 200-900HV. Οι απαιτούμενες ιδιότητες του εναποτιθέμενου υλικού πετυχαίνονται με την τήξη κατάλληλων κραματωμένων ηλεκτροδίων. Μπορούν να είναι ηλεκτρόδια στα οποία οι προσθήκες κραμάτωσης να περιέχονται στον πυρήνα και την επένδυση του ηλεκτροδίου. Τα ηλεκτρόδια αναγόμευσης εκτελούνται με βασική και ρουτιλίου επένδυση. Τα βασικά ηλεκτρόδια χαρακτηρίζονται με το μικρότερο συντελεστή καψίματος των προσθηκών κραμάτωσης. Τα βασικά και ρουτιλίου ηλεκτρόδια προσφέρονται κυρίως για τη χρησιμοποίηση συνεχούς ρεύματος, μόνο που τα βασικά ηλεκτρόδια συνδέονται συνήθως με το θετικό πόλο, ενώ τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου με τον αρνητικό πόλο. Τα ηλεκτρόδια ρουτιλίου και μερικά βασικά προσφέρονται, επίσης, για την αναγόμευση με εναλλασσόμενο ρεύμα. Γενικά, το μέγεθος των εντάσεων ρεύματος για το μεγαλύτερο ποσοστό των ηλεκτροδίων, χρησιμοποιούμενων για την αναγόμευση, δεν υπερβαίνει τα 50[A] ανά 1[mm] της διαμέτρου του πυρήνα του ηλεκτροδίου. Με τη χρησιμοποίηση έντασης ρεύματος περιορισμένου μεγέθους, για την αναγόμευση με μικρότερα ηλεκτρόδια και με πυρήνα από χάλυβα ισχυρά κραματωμένο, αποφεύγεται η υπερβολική υπερθέρμανση του πυρήνα και της επένδυσης του ηλεκτροδίου. Η



υπερθερμαινόμενη επένδυση του ηλεκτροδίου δεν παρουσιάζει ικανοποιητικές ιδιότητες συγκόλλησης καθώς και μεταλλουργικές και, έτσι, δεν προσφέρεται για την αναγόμευση. Για την αναγόμευση, τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι στεγνώμενα. Προ της αναγόμευσης, τα βασικά ηλεκτρόδια πρέπει να στεγνώνονται στη θερμοκρασία των  $300[^\circ\text{C}]-350[^\circ\text{C}]$  επί δύο ώρες, ενώ τα ηλεκτρόδια ρουτυλίου στη θερμοκρασία περίπου των  $120[^\circ\text{C}]$  μέχρι  $2[h]$ . Τα ηλεκτρόδια παχιάς επένδυσης και ιδιαίτερα τα πολύ παχιά με σημαντικό όφελος  $U$  του εναποτιθέμενου υλικού, προσφέρονται για την αναγόμευση μόνο σε επίπεδη θέση ή το πολύ με ελαφρά κλίση. Τα παραγόμενα ελαφρά κραματωμένα ηλεκτρόδια γενικής χρήσης έχουν σκληρότητα  $HB$  του εναποτιθέμενου υλικού στην περιοχή  $200-700$ . Οι προσθήκες σκλήρυνσης του εναποτιθέμενου υλικού των ηλεκτροδίων είναι ο άνθρακας, το μαγγάνιο και το χρώμιο, μερικές φορές το μολυβδαίνιο, το βολφράμιο ή το βανάδιο. Γενικά, η περιεκτικότητα αυτών των προσθηκών, στο εναποτιθέμενο υλικό των ηλεκτροδίων, δεν ξεπερνά το 5%. Η μεταλλογραφική δομή του εναποτιθέμενου υλικού των ελαφρά κραματωμένων ηλεκτροδίων εξαρτάται από την περιεκτικότητα των προσθηκών κραμάτωσης, ιδιαίτερα του άνθρακα, αποτελείται από το φερρίτη και τον περλίτη ή από τον μπαινίτη και το μαρτενσίτη.

### 5.1.11 Ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση μη σιδηρούχων μετάλλων

Τα ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση μη σιδηρούχων μετάλλων είναι επενδεδυμένα και διακρίνονται σε:

- ηλεκτρόδια χαλκού
- ηλεκτρόδια μπρούντζου
- ηλεκτρόδια νικελίου
- ηλεκτρόδια αλουμινίου.

Σκοπός της επένδυσης των ηλεκτροδίων είναι:

- η διατήρηση του τόξου
- η προφύλαξη του ρενστού μετάλλου από την εισροή του ατμοσφαιρικού αέρα
- η αποξείδωση του μετάλλου της κόλλησης
- η ένωση με το υδρογόνο
- ο σχηματισμός υψηλών εξωθερμικών αντιδράσεων.

**Ηλεκτρόδια χαλκού.** Τα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια χαλκού επιτρέπουν τη σύνδεση του δύσκολο συγκολλούμενου χαλκού εν ψυχρώ (χωρίς αρχική προθέρμανση) κατά τρόπο επίσης απλό και τεχνικά τέλειο, όπως στην περίπτωση χαλύβων, πράγμα που προ δεκαετιών θεωρούνταν ακατόρθωτο στη βιομηχανική πρακτική. Τα χρησιμοποιούμενα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια χαλκού πρέπει να ανταποκρίνονται στις βασικές συνθήκες συγκόλλησης των κατασκευών χαλκού όπως:

- στη θερμική απόδοση
- στη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα
- στη θερμική διαστολή
- στη διαβρωτική ανθεκτικότητα
- στις ιδιότητες αντοχής.

Τα ηλεκτρόδια τύπου *ECuGT* έχουν παχιά επένδυση και ικανότητα διείσδυσης, προοριζόμενα για τη χειρωνακτική συγκόλληση χαλκού εν ψυχρώ με τη δημιουργία μιας ή πολλαπλών στρώσεων. Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν και για τη συγκόλληση κραμάτων χαλκού, ορειχάλκου καθώς και για τη σύνδεση χαλύβων ανθρακωμένων και ωστενιτικών με χαλκό, για διάφορες συνδέσεις επικάλυψης, μετωπικές, ταυ (αυχενικές κολλήσεις). Σε αυτές τις περιπτώσεις, το τόξο πρέπει να οδηγείται στο χαλκό, επειδή από αυτό εξαρτάται η ποιότητα των συνδέσεων. Τα ηλεκτρόδια παράγονται με τέσσερις διαμέτρους:  $3[mm]$ ,  $4[mm]$ ,  $5[mm]$ , και  $6[mm]$  και σε δύο μήκη:  $350[mm]$  και  $450[mm]$ . Τα στεγνώμενα με επιμέλεια ηλεκτρόδια προμηθεύονται συσκευασμένα σε αεροστεγείς σακούλες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δύο ημέρες μετά το άνοιγμα του πακέτου, χωρίς προθέρμανση, εάν η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας δεν υπερβαίνει το 45%. Για μεγαλύτερη σχετική υγρασία, πρέπει να στεγνώνονται στη θερμοκρασία  $400[^\circ C]$ - $450[^\circ C]$  επί  $2[h]$ - $4[h]$ . Ωφελιμότερο είναι να διατηρούνται τα ηλεκτρόδια θερμαινόμενα σε φουρνάκι, στη θερμοκρασία των  $200[^\circ C]$ . Επιτρέπεται μόνο μία φορά να γίνεται η επαναστέγνωση των ηλεκτροδίων. Με περισσότερες φορές στεγνώματος, η επένδυση γίνεται εύθραυστη, και κατά τη διαδικασία συγκόλλησης, θραύεται και αποχωρίζεται από τον πυρήνα του ηλεκτροδίου. Η συγκόλληση γίνεται με συνεχές ρεύμα (θετική πολικότητα), με τάση έναυσης πάνω από  $60[V]$ . Ανάλογα με τη διάμετρο του ηλεκτροδίου και την ένταση του ρεύματος, η τάση του τόξου κυμαίνεται στα όρια  $30[V]$ - $40[V]$ . Η ένταση του ρεύματος ρυθμίζεται στα όρια  $50[A]$ - $100[A]$  ανά  $1[mm]$  της διαμέτρου του πυρήνα του ηλεκτροδίου, ανάλογα με:

- το είδος του συγκολλούμενου μετάλλου (χαλκός, κράματα χαλκού, μέταλλα διάφορα) και το πάχος του
- την τεχνική συγκόλλησης (μιας στρώσης, βαθιάς διείσδυσης, πολλαπλών στρώσεων, θέση συγκόλλησης)
- το είδος των κολλήσεων (μετωπική, αυχενική).

Οι ιδιότητες της βαθιάς διείσδυσης των ηλεκτροδίων *ECuGT* επιτρέπουν τη σύνδεση, σε θέση επίπεδη, ελασμάτων μη λοξοτομημένων, με πάχη:

- μέχρι  $8[mm]$  για κόλληση *I* μιας στρώσης (ωφελιμότερα σε στεγνώμενο υποστήριγμα από γραφίτη)
- $4[mm]$ - $14[mm]$  για δίπλευρη κόλληση *I*.

Επίσης, καλά αποτελέσματα δίνει η συγκόλληση πολλαπλών στρώσεων (σύμφωνα με τις αρχές για χάλυβα) σε επίπεδη, θέση λοξοτομημένων ελασμάτων, με πάχη μέχρι  $50[mm]$ . Η σκουριά εύκολα αφαιρείται, οι κολλήσεις είναι ομαλές, ομοιόμορφες και δεν απαιτούν σφυρηλάτηση ούτε θερμικές κατεργασίες. Οι κολλήσεις περιέχουν  $99.5[Cu]$ , με όριο αντοχής  $R_m=200[MPa]$ , με σχετική επιμήκυνση  $A_5=25\%$ , ενώ η δυσθραυστότητα, σύμφωνα με τη δοκιμασία *Charpy V*, υπερβαίνει τα  $10[MJ/m^2]$ . Η συγκόλληση με τα ηλεκτρόδια *ECuGT* ελασμάτων από χαλκό με πάχος  $20[mm]$  μπορεί να είναι δέκα φορές γρηγορότερη και φθηνότερη απ' ό,τι η συγκόλληση με άλλες μεθόδους. Τα οικονομικά οφέλη συγκόλλησης με ηλεκτρόδια *ECuGT* γίνονται μεγαλύτερα με την αύξηση του πάχους των ελασμάτων.

**Ηλεκτρόδια μπρούντζου.** Τα ηλεκτρόδια μπρούντζου χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση:

- μπρούντζου και ορείχαλκων χυτών, και πλαστικά κατεργασμένων

- χαλκού με πάχος μέχρι 10[mm]
- χυτοσιδήρου εν ψυχρώ και για αναγόμευση χαλύβων και χυτοχαλύβων.

Αυτά είναι ηλεκτρόδια από μπρούντζους κασσιτέρου, αλουμινίου, αλουμινίου - μαγγανίου, πυριτίου - μαγγανίου **Πίνακας 16, Πίνακας 17**

Συμβολισμός ηλεκτροδίων	Χημική σύσταση, %							
	Sn	Al	Si	Fe	Cr	Mn	P	Cu
ECuSn7	7.0	-	0.6	0.5		0.5	0.15	υπόλοιπο
ECuMnAl	-	1-2	0.3	-	-	1.0	-	υπόλοιπο
EBACr	-	0.8	1.0	1.0	0.3	0.5	-	υπόλοιπο

**Πίνακας 16** Χημική σύσταση εναποτιθέμενων υλικών ηλεκτροδίων μπρούντζου

Συμβολισμός ηλεκτροδίων	Μηχανικές ιδιότητες εναποτιθέμενου υλικού				Χρησιμοποίηση
	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	[KJ/cm <sup>2</sup> ]	HB	
ECuSn7	200-300	20-35	-	120	Συγκόλληση χαλκού με πάχος μέχρι 5[mm] με ηλεκτρόδια ECuMnAl και μέχρι 10[mm] με ηλεκτρόδια ECuSn, με αρχική προθέρμανση (200[°C]-500[°C]), με σφυρηλάτηση των κολλήσεων, συγκόλληση ορείχαλκων, συγκόλληση χυτοσιδήρων, αναγόμευση χαλύβων.
ECuMnAl	180-230	20-40	60-120	60	
EBACr	400-440	20-25	-	110	Συγκόλληση και αναγόμευση εν ψυχρώ και εν θερμώ (200[°C]-500[°C]) πολυσυστατικών μπρούντζων αλουμινίου. Σε κάθε περίπτωση προτείνεται σφυρηλάτηση των κολλήσεων, αναγόμευση χάλυβα και χυτοχάλυβα.

**Πίνακας 17** Χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων μπρούντζου και μηχανικές ιδιότητες τον εναποτιθέμενου υλικού.

Άμεσα απαραίτητο, προ της συγκόλλησης, είναι το στέγνωμα των ηλεκτροδίων, ανάλογα με τις συνθήκες: ECuSn7-120[°C]-1[h], ECuMnAl-250[°C]-2[h], EBACr-300[°C]-3[h]. Με τα ηλεκτρόδια μπρούντζου η συγκόλληση πρέπει να εκτελείται σε επίπεδη θέση ή, το πολύ, ελαφρά κεκλιμένη, με ρεύμα συνεχές και θετικής πολικότητας. Η ποιότητα των κολλήσεων σύνδεσης ή αναγόμευσης εξαρτάται από την ουσιαστική επιλογή της θερμοκρασίας αρχικής προθέρμανσης του υλικού, απ' την επιλογή της διαμέτρου του ηλεκτροδίου όπως και απ' την ένταση του ρεύματος. Οι συνθήκες αυτές καθορίζονται, κάθε φορά, βάσει των αρχικών δοκιμών, σύμφωνα με την υπόθεση ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος και η θερμική χωρητικότητα των συγκολλούμενων εξαρτημάτων τόσο υψηλότερη πρέπει να είναι η θερμοκρασία προθέρμανσης, μεγαλύτερη η διάμετρος του ηλεκτροδίου και υψηλότερη η ένταση ρεύματος.

**Ηλεκτρόδια νικελίου.** Η καλύτερη μέθοδος συγκόλλησης του νικελίου είναι η συγκόλληση στην ατμόσφαιρα του αργού (μέθοδος TIG), αλλά η συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια χρησιμοποιείται ακόμη. Τα ηλεκτρόδια νικελίου χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση και αναγόμευση του νικελίου και των κραμάτων αυτού. Αυτά τα ηλεκτρόδια είναι παχιά και οξειδωτικής-φθοριτικής επένδυσης. Μ' αυτά η συγκόλληση εκτελείται αποκλειστικά σε

επίπεδη θέση, με συνεχές ρεύμα και θετική πολικότητα. Τα ηλεκτρόδια νικελίου έχουν εναποτιθέμενο υλικό με περιεκτικότητα 99% Ni και διαβρωτική ανθεκτικότητα που πλησιάζει αυτήν του καθαρού νικελίου,  $R_m$ , περίπου  $300[MPa]A_5$ =περίπου 15% όπως και σκληρότητα  $HB=130-150$ . Η ένταση ρεύματος συγκόλλησης για τα ηλεκτρόδια με διαμέτρους  $2.50[mm]$ ,  $3.25[mm]$  και  $4[mm]$  ρυθμίζεται αναλόγως στην περιοχή  $90[A]-100[A]$ ,  $100[A]-140[A]$  και  $140[A]-200[A]$ . Με αυτές τις εντάσεις, ο συντελεστής τήξης των ηλεκτροδίων ισούται με  $9.0[g/A h]-9.6[g/A h]$ . Τα ηλεκτρόδια νικελίου επιβάλλεται, άμεσα, προ της συγκόλλησης, να στεγνώνονται στη θερμοκρασία των  $150[^\circ C]$  σε χρόνο  $2[h]-4[h]$ .

**Ηλεκτρόδια αλουμινίου.** Τα ηλεκτρόδια αλουμινίου είναι ηλεκτρόδια παχιάς επένδυσης, με πυρήνα τριών κατηγοριών ( $Al\ 99.5\%$ ,  $Al\ 99.8\%$  και  $Al\ 99.9\%$ ) και διαμέτρων:  $3[mm]$ ,  $4[mm]$ ,  $5[mm]$ ,  $6[mm]$ ,  $8[mm]$ ,  $10[mm]$  και  $12[mm]$ . Οι κατηγορίες αυτές διαφέρουν αποκλειστικά, ανάλογα με την καθαρότητα του αλουμινίου που χρησιμοποιείται για τους πυρήνες των ηλεκτροδίων. Επιλέγονται ανάλογα με την καθαρότητα του συγκολλούμενου αλουμινίου. Για την αύξηση της ανθεκτικότητας των κολλήσεων στην διάβρωση, σκόπιμο είναι να χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια με καθαρότητα το ελάχιστο κατά ένα βαθμό υψηλότερο από το συγκολλούμενο αλουμίνιο. Κατά τη συγκόλληση τόξου του αλουμινίου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο ισχύει η αρχή ότι η εναπόθεση μιας στρώσης της κόλλησης πρέπει να εκτελείται με διάμετρο ηλεκτροδίου κατά  $1[mm]$  μεγαλύτερη από το πάχος του συγκολλούμενου ελάσματος (η συγκόλληση πολλαπλών στρώσεων προξενεί ρηγματώση). Κατά τη συγκόλληση: σε I και V η διάμετρος του ηλεκτροδίου ισούται με το πάχος του ελάσματος συν 1 mm, ενώ σε X η διάμετρος του ηλεκτροδίου ισούται με  $1/2$  του πάχους του ελάσματος συν  $1[mm]$ . Το κάτω όριο συγκολλούμενου ελάσματος ισούται με  $2[mm]$ , ενώ το πάνω δεν περιορίζεται. Τα ηλεκτρόδια που έχουν αποκτήσει υγρασία από την ακατάλληλη διατήρησή τους, επιβάλλεται να στεγνωθούν εκ νέου στη θερμοκρασία των  $250[^\circ C]$ , σε χρόνο  $2[h]-3[h]$ . Η συγκόλληση πρέπει να γίνεται αποκλειστικά με συνεχές ρεύμα, σε επίπεδη θέση, με θετική πολικότητα στο ηλεκτρόδιο. Οι μηχανές συγκόλλησης πρέπει να έχουν φθίνουσα στατική χαρακτηριστική. Η χημική σύσταση και οι μηχανικές ιδιότητες του εναποτιθέμενου υλικού των ηλεκτροδίων καθώς και η κύρια χρησιμοποίησή τους δίνεται στον **Πίνακα 18**. Η αντοχή στον εφελκυσμό για τις ορθολογικά εκτελούμενες συνδέσεις αλουμινίου φτάνει το 90%-100%  $R_m$ , του μητρικού υλικού στην κατάσταση ανακρυστάλωσης, ενώ η γωνία κάμψης  $180^\circ$ .

Συμβολισμός	Χημική σύσταση			Χημικές ιδιότητες εναποτιθέμενου υλικού			Χρησιμοποίηση
	Al	Si	Ti	$R_m$ [MPa]	A <sub>5</sub> %	HB	
Ηλεκτροδίων							
Al 99.9	99.9	-	max 0.002	45	35	15	Συγκόλληση χημικού εξοπλισμού, δοχείων δεξαμενών ηλεκτραγωγών, τροχές γραμμών
Al 99.8	99.8	-	max 0.002	55	30	18	
Al 99.5	99.5	-	0.1-0.2	70	20	20	
AlSi5	υπόλοιπο	4.5-6	0.05-0.2	160	50	50	Συγκόλληση μέτρια υπευθύνων κατασκευών καθώς και ανομοιογενών κραμάτων Al, τύπου AlSiMg με AlMgSi
AlSi11	υπόλοιπο	10-3	0.05-0.15	180	60	60	Συγκόλληση φθαρμένων και ελαττωματικών χυτών κραμάτων τύπου AlSi

Πίνακας 18 Χημική σύσταση και μηχανικές ιδιότητες εναποτιθέμενου υλικού ηλεκτροδίων αλουμινίου καθώς και η χρησιμοποίησή τους.

## 5.2 Σύρματα-ράβδοι

### 5.2.1 Σύρματα για τη συγκόλληση χαλύβων

Σύρματα συμπαγή για τη συγκόλληση με αέρια, με βυθιζόμενο τόξο και στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων. Η επιλογή καταλλήλου σύρματος για τη συγκόλληση εξαρτάται κυρίως από τη χημική σύσταση του συγκολλούμενου χάλυβα και από τη μέθοδο συγκόλλησης. Η χημική σύσταση των συρμάτων για τη συγκόλληση διαφόρων χαλύβων έχει ως ακολούθως:

**Μαλακοί ανθρακοχάλυβες μαγγανίου:**

C	max 0.1%
Mn	0.3-2.0
Si	0.03-0.3%
Cr	max 0.2%
Ni	max 0.3%
S	max 0.03%
P	max 0.03%

**Μαλακοί ανθρακοχάλυβες Mn-Si**

C	max 0.12 %
Mn	1.3-2.20%
Si	0.70-1.00%
Cr	max 0.25%
Ni	max 0.30%
S	max 0.03%
P	max 0.03%

**Ελαφρά κραματούμενοι χάλυβες Mn-Si-Cr**

C	0.32-0.45 %
Mn	0.80-2.20
Si	1.00-1.40%
Cr	1.10-1.5 %
Ni	max 0.3 %
S	max 0.03%
P	max 0.03%

### Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες χρωμίου

C	0.08-0.15 %
Mn	0.30-0.80%
Si	0.30-1.00%
Cr	13.00-27.00 %
Ni	max 0.60%
S	max 0.03%
P	max 0.03%

### Ισχυρά κραματωμένοι χάλυβες Cr-Ni

C	0.04-0.15 %
Mn	1.00-8.00%
Si	0.30-1.5%
Cr	15.00-25.00 %
Ni	8.00-37.00 %
S	0.018-0.03 %
P	max 0.03%

Τα σύρματα για τη συγκόλληση παράγονται κυρίως με διαμέτρους  $0.6[mm]$ - $7[mm]$ , με τη μορφή ράβδων, κολούρων ή περιτυλιγμένα σε καρούλια. Για την οξυγονοκόλληση, χρησιμοποιούνται ράβδοι με μήκος  $1000[mm] \pm 5[mm]$  ή τμήματα με ελεύθερο μήκος που κόβεται από κουλούρες. Για τη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο, χρησιμοποιούνται σύρματα με διαμέτρους  $2[mm]$ - $7[mm]$ , με τη μορφή κουλούρων, με επικάλυψη της επιφάνειας από χαλκό ή άλλο μέταλλο ή ακόμη, από κράματα (νικελίου, χρωμίου ή μπρούντζου). Μπορούν επίσης, να χρησιμοποιηθούν σύρματα με στρώμα άλλου μετάλλου. Ωφελιμότερα, όμως, είναι τα σύρματα με επικάλυψη από χαλκό, επειδή είναι ανθεκτικότερα στην οξείδωση και σιγουρεύουν την καλύτερη ηλεκτρική επαφή με τους ακροδέκτες τροφοδοσίας ρεύματος στο σύρμα, κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Για την ημιαυτόματη συγκόλληση τόξου στην ατμόσφαιρα του διοξειδίου του άνθρακα  $CO_2$ , με μίγματα αυτού του αερίου ή με άλλα αέρια, χρησιμοποιούνται σύρματα με διαμέτρους  $0.6[mm]$ - $2.4[mm]$ , κυρίως με επιχαλκωμένη επιφάνεια. Τα σύρματα αυτά προμηθεύονται περιτυλιγμένα σε καρούλια. Η επιφάνεια των συρμάτων πρέπει να είναι καθαρή και ομαλή, χωρίς σκουριές και λίπη. Οι ακαθαρσίες που αναφέρθηκαν μπορούν να αποτελέσουν την αιτία εμφάνισης πόρων κατά τη συγκόλληση. Τα σύρματα, ανάλογα με τη διάμετρο τους και τη μέθοδο συγκόλλησης εμφανίζονται στην ακόλουθη μορφή:

- σε κουλούρες, σύρματα με διαμέτρους  $0.8[mm]$ - $6[mm]$
- περιτυλιγμένα σε καρούλια, σύρματα με διαμέτρους  $0.6[mm]$ - $1.6[mm]$
- σε ράβδους, σύρματα με διαμέτρους  $1[mm]$ - $7[mm]$

**Σύρματα συμπαγή για πυρήνες επενδεδυμένων ηλεκτροδίων χειρωνακτικής συγκόλλησης τόξου.** Το χρησιμοποιούμενο σύρμα για την παραγωγή ηλεκτροδίων για τη συγκόλληση κατασκευαστικών ανθρακοχαλύβων είναι σύρμα από ανθρακοχάλυβα μη καθησυχασμένο, με περιεκτικότητα σε άνθρακα *max* μέχρι  $0.10\%$ . Η προσεγγιστική χημική σύσταση του εναποτιθέμενου υλικού των ηλεκτροδίων, ανάλογα με την επένδυση, δίνεται στον **Πίνακα 19**.

Τύποι ηλεκτροδίων	Σύσταση των αναποτιθέμενου υλικού, %				
	C	Mn	Si	P	S
Όξινα	0.10 max	0.4-0.8	0.20 max	0.045max	0.045max
Ρουτιλίου	0.10 max	0.4-0.8	0.35 max	0.045max	0.045max
Βασικά	0.10 max	0.4-0.8	0.3-0.6	0.035max	0.035max

Πίνακας 19 Χημική σύνθεση των ηλεκτροδίων για τη συγκόλληση ανθρακοχάλυβων

Τα μήκη των ηλεκτροδίων, ανάλογα με τη διάμετρο του πυρήνα, παράγονται ως ακολούθως:

$d=1.0[mm]$  μήκος 200 ή 250[mm] από ανθρακοχάλυβες

$d=2.0[mm]$  μήκος 250 ή 300[mm] από ανθρακοχάλυβες

$d=2.0[mm]$  μήκος 200 ή 300[mm] από ισχυρά κραματωμένους χάλυβες

$d=2.5[mm]$  μήκος 300 ή 350[mm] από ανθρακοχάλυβες

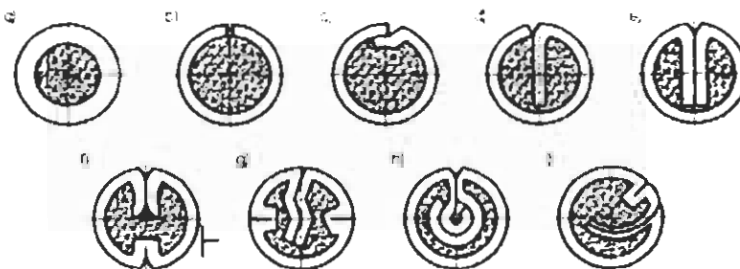
$d=2.5[mm]$  μήκος 250[mm] από ισχυρά κραματωμένους χάλυβες

$d=3.25[mm]$  και 4 mm μήκος 350[mm] ή 450[mm] από ανθρακοχάλυβες

$d=3.25[mm]$  μήκος 350[mm] από ισχυρά κραματωμένους χάλυβες

Για διαμέτρους 5[mm], 6[mm], 7[mm] και 8[mm] το μήκος 450[mm] από ανθρακοχάλυβα και από ισχυρά κραματωμένους χάλυβες.

**Σύρματα σκόνης για τη συγκόλληση, στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων, τόξου καλυπτόμενου και αυτοκαλυπτόμενου** Τα σύρματα σκόνης ονομάζονται, επίσης, και σύρματα ή ηλεκτρόδια πυρήνα. Αποτελούν το συνεχόμενο σωληνωτό ηλεκτρόδιο με στρογγυλή διατομή, η οποία είναι γεμάτη με μίγμα πυρήνα **σχήμα 3**.



Σχήμα 3 Τύποι εγκαρσίων διατομών ηλεκτροδίων άπονης.

Τα σύρματα σκόνης προορίζονται για τη συγκόλληση και αναγόμευση με αυτοκαλυπτόμενο τόξο, σε ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων και καλυπτόμενο τόξο ή, σε ειδικές περιπτώσεις, για την ηλεκτροσκληρωτική συγκόλληση. Ο πυρήνας των συρμάτων σκόνης παίζει παρόμοιο ρόλο με εκείνον της επένδυσης των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων και, ιδιαίτερα, στην περίπτωση συρμάτων σκόνης αυτοκαλυπτόμενων. Ανάλογα με το μεταλλουργικό χαρακτήρα του πυρήνα και τη σύσταση του, τα σύρματα σκόνης, όπως και τα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια, είναι βασικά, όξινα, ρουτιλίου, ρουτιλίου - οργανικά. Τα σύρματα σκόνης, συγκρινόμενα με τα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια και τα, συμπαγή σύρματα, παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Επιτρέπουν την εύκολη εισχώρηση στο τήγμα μεγάλων ποσοτήτων κραματικών στοιχείων, ακόμη και 40% περίπου, επειδή η εισχώρηση τους γίνεται δια του μίγματος του πυρήνα. Αυτό έχει ουσιαστική σημασία στην περίπτωση συρμάτων αναγόμευσης με περιεκτικότητα προσθηκών σκλήρυνσης, οι οποίες δεν μπορούν πρακτικά να

παραχθούν με μορφή συμπαγών συρμάτων, ενώ η παραγωγή τους με μορφή συρμάτων σκόνης δε δημιουργεί δυσκολίες. Η μάζα του πυρήνα του σύρματος σκόνης προς τη συνολική μάζα του σύρματος καθορίζεται με το συντελεστή πλήρωσης  $K$ .  $K = \frac{\text{μάζα του πυρήνα}}{\text{μάζα του σύρματος}} \cdot 100\%$ . Ανάλογα με τον προορισμό του

σύρματος και την κατασκευή του, ο συντελεστής αυτός φτάνει μέχρι και 40%. Η σταθερότητα της τιμής του συντελεστή πλήρωσης αποδεικνύει την ομοιόμορφη ανάμιξη του πυρήνα στο σύρμα και την ορθή εκτέλεση της κόλλησης. Τα σύρματα σκόνης χαρακτηρίζονται από καλύτερες ιδιότητες συγκόλλησης και με σημαντική μείωση του διασκορπισμού (πιτσιλίσματα) του μετάλλου απ' ό,τι τα συμπαγή σύρματα. Κατά τη συγκόλληση με βασικά σύρματα σκόνης, επιτυγχάνονται υψηλές πλαστικές ιδιότητες των κολλήσεων και ιδιαίτερα, η δυσθραυστότητα. Τα αυτοκαλυπτόμενα σύρματα σκόνης βρίσκουν χρησιμοποίηση ιδιαίτερα κατά τη συγκόλληση συναρμολόγησης, επειδή, σε σύγκριση με την ατμόσφαιρα  $CO_2$ , εγγυώνται καλύτερη προστασία του τόξου καθώς και μεγαλύτερη εκτελεστικότητα της διαδικασίας συγκόλλησης. Ενώ, συγκρινόμενα με τη συγκόλληση επενδεδυμένων ηλεκτροδίων, έχουν μεγαλύτερη απόδοση. Η απόδοση συγκόλλησης με σύρματα σκόνης είναι, γενικά κατά 50% μεγαλύτερη απ' ό,τι με τα συνήθη σύρματα και περίπου δυο φορές μεγαλύτερη από ό,τι με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια. Κατά τη συγκόλληση με σύρματα σκόνης, ιδιαίτερα με τα αυτοκαλυπτόμενα, εκλύονται πολύ μεγάλες ποσότητες αερίων, που δυσχεραίνουν τη διαδικασία συγκόλλησης. Οι ποσότητες αυτές είναι γενικά, 2-5 φορές μεγαλύτερες απ' ό,τι κατά τη συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια. Για το λόγο αυτό, κατά τη συγκόλληση με σύρματα σκόνης πρέπει να χρησιμοποιούνται ειδικές λαβίδες συγκόλλησης με απορροφητήρα αερίων. Βγαίνει λοιπόν το συμπέρασμα ό,τι η συγκόλληση με σύρματα σκόνης δεν πρέπει να εκτελείται σε κλειστούς χώρους με έλλειψη αποτελεσματικής εσωτερικής εξαέρωσης και πρέπει να χρησιμοποιούνται κατάλληλες λαβίδες εφοδιασμένες με απορροφητήρες. Τα σύρματα σκόνης για τη συγκόλληση παράγονται συνήθως με τις ακόλουθες διαμέτρους: 1.6[mm], 2.0[mm], 3.0[mm], 3.2[mm]. Συνήθως χρησιμοποιούνται σύρματα σκόνης με διαμέτρους 2[mm] και 2.4[mm]. Η συγκόλληση με σύρματα σκόνης σε εξαναγκασμένες θέσεις εκτελείται με διάμετρο σύρματος κάτω από 2[mm]. Οι περισσότερες παραγωγικές μονάδες παράγουν σύρματα σκόνης αυτοκαλυπτόμενα αποκλειστικά για τη συγκόλληση σε επίπεδη θέση.

### 5.2.2 Σύρματα και ράβδοι για τη συγκόλληση μη σιδηρούχων μετάλλων

Το εναποτιθέμενο υλικό για τη συγκόλληση των μη σιδηρούχων μετάλλων, με μορφή ράβδων με όλκιση ή με χύτευση καθώς και συρμάτων σε κουλούρες και σε καρούλια, παράγεται με διαμέτρους 1[mm]-10[mm].

**Εναποτιθέμενο υλικό χαλκού.** Για τη συγκόλληση του χαλκού με αέρια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναποτιθέμενα υλικά σύρματα από ηλεκτρολυτικό χαλκό, αλλά μόνο για την εκτέλεση λιγότερο υπεύθυνων συνδέσεων σε λεπτά ελάσματα, τα οποία, στις περαιτέρω διεργασίες, δε θα υποστούν πλαστικές παραμορφώσεις. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις, απαραίτητη είναι η χρησιμοποίηση ειδικών εναποτιθέμενων υλικών, που να



περιέχουν μικρή ποσότητα προσθηκών κραμάτωσης, όπως: φωσφόρο, ασήμι, νικέλιο, πυρίτιο, μαγγάνιο, τίτανιο, βανάδιο. Σκοπός των αναφερθέντων προσθηκών κραμάτωσης είναι η αλληλεπίδραση με τα συλλιπάσματα για την αναγωγή οξειδίων, τη μείωση της ικανότητας του χαλκού για τη διάλυση αερίων, για την εκλέπτυνση των κόκκων καθώς και για το χαμήλωμα της θερμοκρασίας τήξης του εναποτιθέμενου υλικού (περίπου κατά  $20[^\circ\text{C}]-40[^\circ\text{C}]$ ), πράγμα που επιτρέπει την ταχύτερη εκτέλεση, χωρίς την υπερβολική και επιβλαβή υπερθέρμανση του χαλκού. Η ικανότητα δεδομένου σύρματος χαλκού, ως εναποτιθέμενου υλικού, μπορεί να καθορισθεί από την υπότηξη του άκρου του σύρματος με καυστήρα. Το ομαλό άκρο του σύρματος χωρίς κρατήρες ή πόρους, αποδεικνύει την ικανότητα του ως εναποτιθέμενο υλικό. Τα εναποτιθέμενα υλικά **Πίνακας 20** παράγονται με μορφή ράβδων και συρμάτων σε κουλούρες ή καρούλια για τη συγκόλληση με τη μέθοδο *MIG*. Οι περιεκτικότητες στο εναποτιθέμενο υλικό μαγγανίου και πυριτίου πληρούν το ρόλο αποξειδωσης, τα οποία μετά τις αντιδράσεις με το οξυγόνο και το υδρογόνο εκτοξεύονται από το τόξο του αργού ή διαλύονται δια του συλλιπάσματος (με τη μέθοδο *TIG*).

**Εναποτιθέμενο υλικό αλουμινίου** Το εναποτιθέμενο υλικό αλουμινίου και των κραμάτων του παράγονται σε σχετικά μεγάλη ποικιλία ποιοτήτων και διαστάσεων. Η χημική σύσταση και η επιλογή αυτών των εναποτιθέμενων υλικών αλουμινίου για τη συγκόλληση διαφόρων κατηγοριών κραμάτων αλουμινίου χυτευτών ή πλαστικά κατεργασθέντων φαίνεται στους **Πίνακες 21** και **Πίνακες 22**. Όπως προκύπτει από αυτούς τους Πίνακες η επιλογή της κατηγορίας του εναποτιθέμενου υλικού είναι διαφορετική για κάθε συγκολλούμενο υλικό, ανάλογα με:

Χημική ανάλυση %														Κυρίες χρησιμοποιήσεις	
Προσθήκες κραμάτωσης						Επιπρόσθετες ακαθαρσίες max						Προσανατολιστική θερμοκρασία τήξης	Συνδέγματα μετάλλια	Παραδείγματα	
Cu	Ag	Si	Mn	Mn+Si	Ni	Mn	P	Si	Pb	Fe	Γενικά				
Min 99	05-1.0				0.1	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	1070	Καλκός. Χάλυβας προσαρμοσμένα μέταλλα	Οξυγονοκάθλιση χημικών ανασκευών δοχείων και ηλεκτρικών αγώνων. ερεθιστικές κολλήσεις προσαρμοσματομενών καρβιδίων με μορφή τλακιδίων	
Min 99.5	-	0.1-0.3	0.1-0.3	-	0.1	-	0.05	-	0.005	0.05	0.1	1060	Καλκός	Συνκόλληση τόξου στην αμιόσφαρα αγρού με μεθόδους TIG και MAG χημικών ανασκευών, δοχείων, ηλεκτρικών αγώνων καλκός και άλλων χάλκινων κατασκευών.	

**Πίνακας 20** Χημική ανάλυση και χρησιμοποιήση των αναποθόμενων δακτών χάλκου

Σύμβολο	Χημική σύσταση [%]						Χρησιμοποίηση
	Επιτρεπόμενη περιεκτικότητα ακαθαρσιών						
	Al max	Fe max	Si max	Fe+Si max	Cu max	Άθροισμα ακαθαρσιών max	
Al 99.90 Al 99.85	99.90 99.85	0.06 0.10	0.06 0.08	0.095 0.142	0.005 0.008	0.10 0.15	Για τη συγκόλληση χημικών συσκευών και συσκευών που εργάζονται σε διαβρωτικό περιβάλλον
Al 99.70 Al 99.60	99.70 99.60	0.16 0.25	0.16 0.20	0.260 0.360	0.020 0.020	0.30 0.40	Για τη συγκόλληση καλωδίων και ηλεκτρικών αγωγών καθώς και βιομηχανικών συσκευών τροφίμων
Al 99.50	99.50	0.30	0.30	0.450	0.030	0.50	Για τη συγκόλληση βιομηχανικών συσκευών μηχανών

**Πίνακας 21** Χημική σύσταση και χρησιμοποίηση τον εναποτιθέμενου υλικού ηλεκτροδίου αλουμινίου.

- τη συγκολλητότητα δεδομένου κράματος
- τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες των συνδέσεων
- την αναγκαία ανθεκτικότητα στη διάβρωση
- τον επιθυμητό βαθμό συμφωνίας του χρώματος της κόλλησης με το μητρικό υλικό, μετά από διαδικασία ηλεκτρόλυσης.

**Εναποτιθέμενο υλικό ορείχαλκου.** Στα εναποτιθέμενα υλικά ορείχαλκου, η περιεκτικότητα των κυρίων προσθηκών κραμάτωσης πρέπει, προσεγγιστικά, να αντιστοιχεί στις περιεκτικότητες των προσθηκών του συγκολλούμενου υλικού (η περιεκτικότητα του Zn πάντα είναι χαμηλότερη). Στα εναποτιθέμενα υλικά δεν εισάγονται προσθήκες που χειροτερεύουν τη συγκολλητότητα του ορείχαλκου, δεν εισάγεται το κάδμιο, που εύκολα ατμοποιείται, ο μόλυβδος, που δε διαλύεται στο χαλκό και που αυξάνει την τάση των κολλήσεων για ρηγματώσεις, καθώς και προσθήκες που δημιουργούν στερεά οξειδία Al, Ti, Zr, Be, Σκόπια, όμως, εισάγονται μικρές ποσότητες πυριτίου, κασιτέρου, νικελίου, ασημιού και, μερικές φορές, μαγγανίου, τα οποία παίζουν το ρόλο του αποξειδωτή και τροποποιητή εκλέπτυνσης των κόκκων, βελτίωσης των πλαστικών ιδιοτήτων του εναποτιθέμενου υλικού. Τα εναποτιθέμενα υλικά ορείχαλκου φαίνονται στον **Πίνακα 23**. Στις περιπτώσεις που απαιτείται διαβρωτική ανθεκτικότητα ή αντοχή και μεγάλη χημική ομοιότητα της κόλλησης με το μητρικό υλικό, χρησιμοποιείται ως εναποτιθέμενο υλικό σύρμα ή αποκόμματα (λιγότερο ωφέλιμα) από τα μητρικά υλικά. Αυτό αφορά ιδιαίτερα τους ειδικούς ορείχαλκους με πολλές προσθήκες και χωρίς μόλυβδο,

T.E.I. ΠΑΤΡΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

Σύμβολο	Χημική σύσταση, %				Επιτρεπόμενες ακαθαρσίες, %					Χρησιμοποίηση
	Al	Mg	Mn	Si	Fe	Si	Fe+Si	Zn	Άθροισμα	
Al Mn 1 Al Mg2 Mn	υπόλοιπο	-	1.0-1.6	-	0.7	0.6	0.6	0.1	1.75	Για τη συγκόλληση κραμάτων με την ίδια ή παρόμοια χημική σύσταση που πλησιάζει αυτήν του εναποτιθέμενου υλικού
Al Mg3 Mn Al Mg5 Mn	υπόλοιπο	2.0-2.6 32-3.8	0.15-0.4 0.3-0.6	-	0.4 0.5	0.4 0.6	0.6	0.2	0.8 1.45	
	υπόλοιπο	4.7-5.7	0.2-0.6	-	0.4	0.4	0.6		0.9	
Al Si 5	υπόλοιπο			45-6.0	0.6	-	-	0.1	0.9	Για τη συγκόλληση διακοκοσμηκώδημένων κραμάτων και χυτών από κράματα Al. Για τη σκλήση επεξεργημένη κόλληση Al, συγκόλληση χυτών από κράματα με ομοιότητα των AlSi.
Al Si 11	υπόλοιπο		0.5	10.0-13.0	0.8	-	-	0.3	2.2	

**Πίνακας 22** Χημική σύσταση και χρησιμοποίηση των εναποτιθέμενων υλικών κραματούμενου αλουμινίου

Cu	Χημική σύσταση %						Θερμοκρασία τήξης °C	Κύρια χρησιμοποίηση	
	Κραματικές προσθήκες			Επιτρεπόμενες ακαθαρσίες max				Συνδιδόμενα μέταλλα	Παραδείγματα
	Sn	Si	Άλλα	Pb	Fe	Άλλα			
62-64	υπόλοιπο	-	-	0.08	0.1	-	0.25	Χάλυβας, χαλκός, ορείχαλκος με περιεκτικότητα πάνω από 68% Cu	Σκληρές κολλήσεις ετερογενείς λεπτών παρασκευασμάτων
59-61	υπόλοιπο	1.0-1.5	-	0.30	0.1	-	0.50	Χαλκός, ορείχαλκος, μπρούντζος	Συγκόλληση εξοπλισμού ορείχαλκου και αεραγωγών, κολλήσεις ετερογενείς εξαρτημάτων για την κατασκευή μηχανών
39-61	υπόλοιπο	-	-	0.10	0.1	-	0.30	Χάλυβας, χιποσίδηρος	Συγκόλληση ορείχαλκων κολλήσεις ετερογενείς αεραγωγών και συσκευών
58-60	υπόλοιπο	0.15-0.4	0.1-0.3	0.05	0.1	0.05	0.30	Χάλυβας, χαλκός, μπρούντζος	Ετερογενείς κολλήσεις λεπτούργικων συσκευών
62-64	υπόλοιπο	-	Ni: 6-9	0.05	-	0.05	0.10	Ορείχαλκος υψηλής περιεκτικότητας σε Ni σπληρομέταλλα	Συγκόλληση ελασμάτων και βρόδων με υψηλή περιεκτικότητα σε νικέλιο, σκληρές ετερογενείς κολλήσεις σκληρομετάλλων.

**Πίνακας 23** Χημική ανάλυση και χρησιμοποίηση του εναποτιθέμενου υλικού κραματωμένου ορείχαλκου

Χημική σύσταση %										Κύρια χρησιμοποίηση		
Κραματικές προσθήκες					Επιτρεπόμενες ακαθαρσίες max					Θερμοκρασία τήξης [°C]	Συνδεόμενα μέταλλα	Παραδείγματα
Cu	Sn	Si	Mn	P	Pb	Fe	P	Tevικά				
υπόλοιπο	6.7	-	-	0.1-0.4	0.1	0.1	-	0.3	1030	Μπρούντζος χαλκός, χροσολήπιος	Συγκόλληση αντικειμένων από χαλκό, επεξεργασία κόλληση αντισκωτών και	
υπόλοιπο	-	2.8-35	1.0-15	-	0.03	0.05	1.1	1.1	1015	Χαλκός, μπρούντζος, κράματα Ni82-	Συγκόλληση εξαγωγικών ηλεκτρολογικών οργάνων	

Πίνακας 24 Χημική σύσταση και χρησιμοποίηση των εναποτιθέμενου υλικού κραματογόνου μπρούντζου

τους ορείχαλκους αλουμινίου. Τέτοιου είδους επιλογή εναποτιθέμενου υλικού είναι ανεπίτρεπτη για τη συγκόλληση ορείχαλκων μολύβδου (το εναποτιθέμενο υλικό χωρίς μολύβδο χαμηλώνει την περιεκτικότητα του *Pb* στην κόλληση και την ευαισθησία για ρηγματώση). Οι ισχυροί ορείχαλκοι χαλκού μπορούν επίσης να συγκολληθούν με τη μέθοδο *GTA (TIG)*.

**Εναποτιθέμενο υλικό μπρούντζου.** Τα εναποτιθέμενα υλικά μπρούντζου επιλέγονται με βάση τις αρχές που πλησιάζουν τα εναποτιθέμενα υλικά ορείχαλκου, ιδιαίτερα για το μέρος που αφορά τη συγκόλληση με τη μέθοδο *GTA (TIG)*. (για τους μπρούντζους, επίσης, με τη μέθοδο *GTA (TIG)*). Τα παραγόμενα εναποτιθέμενα υλικά μπρούντζου δίνονται στον **Πίνακα 24**. Οι ειδικοί μπρούντζοι, αλουμινίου, μαγγανίου και νικελίου (εκτός αυτών του μολύβδου), μπορούν να συγκολληθούν και με τη μέθοδο *TIG*, χρησιμοποιώντας ως εναποτιθέμενο υλικό σύρματα ή, ακόμη, χυτές ράβδους (στην περίπτωση χυτοκραμάτων χαλκού), με υψηλή περιεκτικότητα αυτών των προσθηκών κραμάτωσης, οι οποίες ανάγονται στη διαδικασία συγκόλλησης.

**Εναποτιθέμενο υλικό νικελίου.** Στα εναποτιθέμενα υλικά νικελίου σκόπιμα εισάγονται προσθήκες, που ενώνονται με το θείο και το οξυγόνο που είναι οι κυριότερες επιβλαβείς ακαθαρσίες του νικελίου, προξενώντας την ευθραυστότητα εν θερμώ. Η αρνητική επίδραση αυτών των ακαθαρσιών εξαλείφεται αποτελεσματικά με το: *Mn* (μέχρι 1.5%), *Mg* (μέχρι 0.1%) και *Li* (0.004%–0.06%), ως στοιχεία αποθείωσης (δημιουργούν *MnSi*, *MgS*, *LiS*), καθώς και με το *Si* (μέχρι 0.25%), *Ti* (μέχρι 1.3%) και το *Al* (μέχρι 1%), ως στοιχεία αποξειδωσης. Σύμφωνα με τα δεδομένα του **Πίνακα 25** για το νικέλιο προορίζεται το εναποτιθέμενο υλικό που παράγεται με μορφή συρμάτων, με διαμέτρους 1[mm]–10[mm]. Το εναποτιθέμενο αυτό υλικό περιέχει 1.6%–2.2% *Mn*, το οποίο ενώνει αποτελεσματικά, το θείο με το οξυγόνο στις διαδικασίες συγκόλλησης του νικελίου με τις μεθόδους *TIG* και *MIG*. (η οξυγονοκόλληση, ήδη, στην πράξη, δε χρησιμοποιείται).

Χημική σύσταση %				Θερμοκρασία τήξης [°C]	Κύρια χαρακτηριστικά	
Κραματικές προσθήκες		Επιτρεπόμενες ακαθαρσίες			Συνδεδεμένα μέταλλα	Παραδείγματα
<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Fe</i>	Γενικά			
1.6–2.2	υπόλοιπο	0.1	0.2	1450	Νικέλιο	Συγκόλληση χημικών συσκευών και προϊόντων από νικέλιο

**Πίνακας 25** Χημική σύσταση και κύρια χρησιμοποίηση των εναποτιθέμενου υλικού νικελίου

**Εναποτιθέμενο υλικό μαγνησίου.** Το καθαρό μαγνήσιο έχει αρκετά χαμηλή αντοχή, για να χρησιμοποιηθεί τεχνικά. Τα κράματα του μαγνησίου επεξεργασμένα πλαστικά χρησιμοποιούνται συνήθως στην αεροναυπηγική. Στο εναποτιθέμενο υλικό για τη συγκόλληση των κραμάτων του μαγνησίου, ο ψευδάργυρος *Zn* και το ασβέστιο *Ca* αυξάνουν την ευαισθησία στις κολλήσεις για την εμφάνιση ρηγματώσεων. Ο ψευδάργυρος είναι προσθήκη που εμφανίζεται σε αρκετά μεγάλες ποσότητες στα κράματα του μαγνησίου. Μέχρι 2% δεν είναι επιβλαβής, αλλά με περιεκτικότητα πάνω από 4%–6% χειροτερεύει σημαντικά τη

συγκολλητότητα. Το αλουμίνιο  $Al$  και το ζirkόνιο  $Zr$ , ως προσθήκες κραμάτωσης στα εναποτιθέμενα υλικά, είναι αδιάφορα στις ιδιότητες συγκόλλησης, δηλαδή δεν αυξάνουν και δεν μειώνουν την ευαισθησία των κολλήσεων για ρηγματώσεις. Ενώ το θόριο  $Tor$  και το κέσιο  $Ce$  επιδρούν θετικά, συγκρατώντας, θα λέγαμε, τις ρηγματώσεις εν θερμώ. Οι κατηγορίες των κραμάτων του μαγνησίου που χρησιμοποιούνται είναι:  $Mg$ ,  $Mn_2$ ,  $Mg$ ,  $Al_3$ ,  $Zn$ ,  $Mn$ ,  $MgMn_2Ce$ . Περισσότερο χρησιμοποιούμενο κράμα είναι το  $MgMn_2Ce$  και παράγεται χυτευμένο ραβδωτό, με διαμέτρους  $3[mm]-6[mm]$ .

### 5.3 Συλλιπάσματα

#### 5.3.1 Διάκριση των συλλιπασμάτων

Από την άποψη του τρόπου παρασκευής, τα συλλιπάσματα διαιρούνται σε τηκόμενα και μη τηκόμενα (κεραμικά και μικτά). Τα συλλιπάσματα παρασκευάζονται από ορυκτά υλικά με τήξη σε κλιβάνους ηλεκτρικούς ή φλογοβόλους (συλλιπάσματα τηκόμενα) ή με πυροσυσσωμάτωση (κεραμικά συλλιπάσματα). Τα κεραμικά συλλιπάσματα συνήθως περιέχουν μεταλλικές προσθήκες, κυρίως μαγγανίου και πυριτίου, τα οποία ενισχύονται με πυροσυσσωμάτωση σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, γενικά, κάτω των  $800[^\circ C]$ . Τα κεραμικά συλλιπάσματα, με πυροσυσσωμάτωση, σε θερμοκρασία πάνω από  $1000[^\circ C]$  δεν περιέχουν μεταλλικές προσθήκες και ονομάζονται πυροσυσσωματωμένα συλλιπάσματα. Σύμφωνα με τις υποδείξεις του Διεθνούς Ινστιτούτου Συγκόλλησης ( $\Delta I \Sigma$ ), οι διάφοροι τύποι συλλιπασμάτων συμβολίζονται ως εξής: *F-συλλιπάσμα τηκόμενο*, *B-συλλιπάσμα κεραμικό*, *M-συλλιπάσμα μίγματος*. Το συλλιπάσμα μίγματος μπορεί να είναι ελεύθερο μηχανικά μίγμα των τηκόμενων και των κεραμικών συλλιπασμάτων, όπως, επίσης, και ειδικές προσθήκες, μη μεταλλικές. Εκτός των αναφερθέντων συμβόλων, που συμβολίζουν τον τρόπο παραγωγής του συλλιπασματος, οι υποδείξεις για την κατάταξη του  $\Delta I \Sigma$  προβλέπουν, πρόσθετα, και τους κώδικες που χαρακτηρίζουν τις ιδιότητες του συλλιπασματος: Ανθεκτικότητα στη φόρτιση με ρεύμα συγκόλλησης - το μέγιστο ρεύμα συγκόλλησης σε αμπέρ, που ορίζεται από αριθμό πολλαπλασιαζόμενο με το  $100$ , είναι η επιτρεπόμενη τιμή της έντασης του ρεύματος συγκόλλησης με ένα σύρμα ηλεκτροδίου, με το οποίο πετυχαίνεται η ορθολογική εκτέλεση της κόλλησης το σύμβολο  $PIO$  συμβολίζει συλλιπάσμα τηκόμενο, που προσφέρεται για τη συγκόλληση με ρεύμα έντασης μέχρι  $1000[A]$ . Ικανότητα για συγκόλληση με μεγάλες ταχύτητες-το συλλιπάσμα επιτρέπει τη συγκόλληση με ταχύτητες άνω των  $200[m/h]$  και κωδικοποιείται με το σύμβολο  $5$ . Στην περίπτωση συλλιπασμάτων για τη συγκόλληση με μικρότερες ταχύτητες, στο σύμβολο κατάταξης του συλλιπασματος δεν προβλέπεται ειδικός κώδικας. **Ικανότητα για συγκόλληση με κατάλληλο ρεύμα** ο κώδικας  $a$ , στο σύμβολο κατάταξης, συμβολίζει την ικανότητα συγκόλλησης του συλλιπασματος με ρεύμα εναλλασσόμενο ή συνεχές, ο κώδικας  $b$  συμβολίζει την ικανότητα του συλλιπασματος για συγκόλληση με συνεχές ρεύμα, ο κώδικας  $c$  συμβολίζει την ικανότητα του συλλιπασματος για τη συγκόλληση με άλλα είδη ρεύματος. Απαιτήσεις που αφορούν στην **ελάχιστη τάση  $U$  της εν κενό λειτουργίας ( $OV C$ ) της πηγής ρεύματος**, για την εγγύηση της σταθερότητας του τόξου συγκόλλησης



στη διαδικασία συγκόλλησης, ο κώδικας X χωρίς περιορισμούς, ιδιαίτερα για πηγές ρεύματος με χαμηλές τάσεις της εν κενό λειτουργίας:  $U < 65[V]$ , ο κώδικας y απαιτούμενη  $U > 65[V]$ , ο κώδικας z απαιτούμενη  $U > 80[V]$ . **Η ιδιότητα μεταλλουργικής αντίδρασης στη χημική σύσταση του εναποτιθέμενου υλικού**, στην περιοχή των βασικών προσθηκών, δηλαδή του μαγγανίου και πυριτίου. Τα συλλιπάσματα, ανάλογα με τη δική τους μεταλλουργική δραστηριότητα, μπορούν να προξενήσουν προσαυξήσεις ή ελάττωση του Mn και του Si στις κολλήσεις. Σύμφωνα με τον Πίνακα 26 οι αριθμοί από 1-4 χαρακτηρίζουν το συλλίπασμα που προξενεί στις κολλήσεις ελάττωση του Mn και του Si, που σημαίνει το κάψιμο αυτών των προσθηκών κατά τη συγκόλληση. Ενώ οι αριθμοί από 6-9 χαρακτηρίζουν τις προσαυξήσεις των αναφερθέντων προσθηκών στις κολλήσεις, δηλαδή στη μετάβαση ορισμένης ποσότητας Mn και Si από το συλλίπασμα στην κόλληση. Ο αριθμός 5 πρακτικά σημαίνει τη μεταλλουργική αδράνεια του συλλιπάσματος: το συλλίπασμα εγγυάται στις κολλήσεις τη σταθερότητα της χημικής σύστασης. Ο μεταλλουργικός χαρακτήρας δεδομένου συλλιπάσματος καθορίζεται από τη δοκιμασία της χημικής σύστασης μιας στρώσης της κόλλησης, εκτελούμενης με σύρμα 52, με περιεκτικότητα περίπου 1% Mn, σε έλασμα από καθησυχασμένο ανθρακοχάλυβα χαμηλού άνθρακα. Η δοκιμασία αυτή εκτελείται σύμφωνα με τις υποδείξεις των συνθηκών προτυποποίησης του ΔΙΣ:ΧΙΙ-512-70. **Παράδειγμα συμβολισμού κατατασσόμενου συλλιπάσματος:** Συλλίπασμα Fg ay 96 οι διάφοροι κώδικες, στο σύμβολο κατάταξης του ανώτερου συλλιπάσματος, καθορίζονται: P συλλίπασμα τηκόμενου τύπου, 8 ικανό για τη συγκόλληση με μέγιστη ένταση ρεύματος 800[A], α δυνατότητα συγκόλλησης με συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα, γ τάση της εν κενό λειτουργίας της πηγής ρεύματος, η οποία πρέπει να είναι το ελάχιστο 65[V], 9 το συλλίπασμα προξενεί μεγάλη προσαύξηση του μαγγανίου στην κόλληση, και 6 ασήμαντη μετάβαση του πυριτίου στην κόλληση. Η υγρασία στο συλλίπασμα αποτελεί την αιτία δημιουργίας πόρων αερίου στις κολλήσεις. Η επιτρεπόμενη υγρασία των συλλιπασμάτων δεν μπορεί να υπερβαίνει το 0.1% ενώ σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποίησης το 0,05% στα συλλιπάσματα για τη συγκόλληση με ταχύτητα άνω των 100[m/h] και κατά την αναγωγή με ηλεκτρόδια ταινίας. Η θερμοκρασία στεγνώματος των συλλιπασμάτων είναι περίπου 300[°C]. Για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα χρησιμοποιούνται συνήθως όξινα συλλιπάσματα. Για τη συγκόλληση ελαφρά κραματωμένων χαλύβων χρησιμοποιούνται αδρανή και βασικά συλλιπάσματα. Για τη συγκόλληση ισχυρά κραματωμένων χαλύβων χρησιμοποιούνται κυρίως βασικά συλλιπάσματα. Τα όξινα συλλιπάσματα αντέχουν σε υψηλότερες παραμέτρους ρεύματος [A], [V] και είναι λιγότερο ευπαθή στη δημιουργία πόρων. Η μεγάλη περιεκτικότητα του SiO<sub>2</sub> στις κολλήσεις προξενεί την μείωση των πλαστικών ιδιοτήτων των κολλήσεων. Τα βασικά συλλιπάσματα περιέχουν συνήθως: οξειδία του ασβεστίου CaO, οξειδία του μαγγανίου MnO, οξειδία του αλουμινίου Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, φθορίτη CaF<sub>2</sub> καθώς και περιορισμένη ποσότητα SiO<sub>2</sub>. Τα συλλιπάσματα αυτά είναι λιγότερο ανθεκτικά στις υψηλές παραμέτρους του ρεύματος συγκόλλησης, είναι περισσότερο ευπαθή στη δημιουργία πόρων στις κολλήσεις, αλλά επιτρέπουν την επίτευξη κολλήσεων με καλύτερες πλαστικές ιδιότητες. Τα όξινα συλλιπάσματα, μαζί με το SiO<sub>2</sub>, περιέχουν συνήθως και το οξείδιο του μαγγανίου MnO. Ανάλογα

με την περιεκτικότητα αυτής της προσθήκης στο συλλίπασμα, διακρίνονται συλλιπάσματα ελαφρά, μέτρια και ισχυρά μαγγανιούχα. Κατά τη συγκόλληση κατασκευαστικών ανθρακοχαλύβων με χαμηλό άνθρακα, ανάλογα με την περιεκτικότητα στο συλλίπασμα  $MnO$  επιλέγεται κατάλληλη κατηγορία σύρματος έτσι, που η περιεκτικότητα του μαγγανίου στην κόλληση να είναι σε κάθε περίπτωση ίδια στα όρια 0.8%-1.2%. Η σύνθεση των συρμάτων με τα συλλιπάσματα γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

Περιεκτικότητα $MnO$ στο συλλίπασμα	Περιεκτικότητα $Mn$ στο σύρμα
$MnO$ άνω από 30%	0.3-0.6 $Mn$
$MnO$ 25-15%	0.8-1.2 $Mn$
$MnO$ 12-0%	1.5-2.5 $Mn$

Σημαντική προσθήκη των συλλιπασμάτων για τη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο είναι ο φθορίτης ασβεστίου  $CaF_2$ . Παρά το ότι ο φθορίτης είναι αντισταθεροποιητής του τόξου, εισάγεται στη σύσταση των συλλιπασμάτων, για την αύξηση της αραιοποιημένης ρευστότητας και της ανθεκτικότητας τους στην υγρασία και τη σκουριά. Ο φθορίτης ασβεστίου ευνοεί την ένωση των υδρατμών με το υδρογόνο στο τόξο σε στερεές ενώσεις  $HF$ , μη διαλυτοποιημένες στην κόλληση. Η περιεκτικότητα του φθορίτη ασβεστίου στα οξινομαγγανιούχα συλλιπάσματα από 2%-10%. Με περιεκτικότητα  $CaF_2$  άνω των 4%, για την αύξηση της σταθερότητας του τόξου, κατά τη συγκόλληση με πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, πρέπει να χρησιμοποιείται τάση στην εν κενό λειτουργία  $min 80[V]$ .

Μεταλλουργική αλληλεπίδραση του συλλιπάσματος στο $Mn$ και $Si$ στην κόλληση	Ονομαστικοί αριθμητικοί δείκτες αλληλεπίδρασης των συλλιπασμάτων	Μεταβολές στη χημική σύσταση, κατά τη δοκιμασία επιφανειακής κόλλησης	
		$Mn$ %	$Si$ %
Ελάττωση $Mn$ και $Si$	1	>35	>0.35
	2	25-35	0.20-0.35
	3	15-25	0.10-0.20
	4	5-15	0.03-0.10
Αδρανής	5	6-5	0-0.03
Προσαύξηση $Mn$ και $Si$	6	5-15	0.03-0.10
	7	15-25	0.10-0.20
	8	25-35	0.20-0.35
	9	>35	>0.35

Μεταβολή της περιεκτικότητας του  $Mn$  επί τοις εκατό % σε σχέση με την αρχική ποσότητα. Περιεκτικότητα του  $Si$  στη δοκιμασία επιφανειακής κόλλησης (αναγόμενης).

**Πίνακας 26** Χαρακτηριστικοί δείχτες της μεταλλουργικής δραστηριότητας των συλλιπασμάτων για τη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο.

Το δεδομένο συλλίπασμα, λόγω της μεγάλης προσαύξησης του μαγγανίου στην κόλληση, δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί για τη συγκόλληση χοντρών ελασμάτων, με την τεχνική πολλαπλών κορδονιών, ιδιαίτερα για ελάσματα πάχους άνω των 40[mm], (κλιμακωτή προσαύξηση του μαγγανίου με την αύξηση του αριθμού στρώσεων στην κόλληση). Η κατάταξη των συλλιπασμάτων, σύμφωνα με τις υποδείξεις του ΔΙΣ, έχει προσανατολιστικό χαρακτήρα. Παρόμοια κατάταξη των συλλιπασμάτων για τη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο εισήχθη προγενέστερα

στους κανονισμούς *DIN 8557*. Ο τρόπος που περιγράφηκε παραπάνω για το συμβολισμό και κωδικοποίηση των συλλιπασμάτων, σύμφωνα με τις υποδείξεις του *ΔΙΣ* ή τους κανονισμούς *DIN*, χρησιμοποιείται στη βιομηχανία των περισσότερων χωρών.

### 5.3.2 Τηκόμενα συλλιπάσματα

Για τη συγκόλληση και αναγόμεση με βυθιζόμενο τόξο καθώς και με την ηλεκτροσκωριακή μέθοδο, χρησιμοποιούνται τηκόμενα συλλιπάσματα. Η τεχνική χρησιμοποίησης των συλλιπασμάτων εκτιμάται βάσει της χημικής σύστασης **Πίνακας 27** των φυσικών ιδιοτήτων και των ιδιοτήτων τεχνικής συγκόλλησης δεδομένου συλλιπάσματος. Οι χαρακτηριστικές φυσικές ιδιότητες των συλλιπασμάτων ορίζονται από τις ακόλουθες ιδιότητες: την ομοιομορφία, την κοκκομετρία και την υγρασία. Τα τηκόμενα συλλιπάσματα παράγονται σε δύο κατηγορίες βάσει της κοκκομετρίας:  $0.32[mm]-15[mm]$  και  $0.32[mm]-1.6[mm]$ . Τα συλλιπάσματα με ψιλή κοκκομετρία (μέχρι  $1.6[mm]$ ) χρησιμοποιούνται κυρίως για τη συγκόλληση με μεγάλες ταχύτητες, για την εκτέλεση κολλήσεων με χαμηλή ένταση αλλά και κατά τη συγκόλληση με ηλεκτρόδια ταινίας. Η υγρασία στο συλλίπασμα αποτελεί την αιτία δημιουργίας πόρων αερίου στις κολλήσεις. Η επιτρεπόμενη υγρασία των συλλιπασμάτων δεν μπορεί να υπερβαίνει το  $0.1\%$  ενώ σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποίησης το  $0.05\%$  στα συλλιπάσματα για τη συγκόλληση με ταχύτητα άνω των  $100[m/h]$  και κατά την αναγόμεση με ηλεκτρόδια ταινίας). Η θερμοκρασία στεγνώματος των συλλιπασμάτων είναι περίπου  $300[^\circ C]$ . Για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα χρησιμοποιούνται συνήθως όξινα συλλιπάσματα. Για τη συγκόλληση ελαφρά κραματωμένων χαλύβων χρησιμοποιούνται αδρανή και βασικά συλλιπάσματα. Για τη συγκόλληση ισχυρά κραματωμένων χαλύβων χρησιμοποιούνται κυρίως βασικά συλλιπάσματα. Τα όξινα συλλιπάσματα αντέχουν σε υψηλότερες παραμέτρους ρεύματος  $[A]$ ,  $[V]$  και είναι λιγότερο ευπαθή στη δημιουργία πόρων. Η μεγάλη περιεκτικότητα του  $SiO_2$  στις κολλήσεις προξενεί την μείωση των πλαστικών ιδιοτήτων των κολλήσεων. Τα βασικά συλλιπάσματα περιέχουν συνήθως: οξειδία του ασβεστίου  $CaO$ , οξειδία του μαγγανίου  $MnO$ , οξειδία του αλουμινίου  $Al_2O_3$ , φθορίτη  $CaF_2$  καθώς και περιορισμένη ποσότητα  $SiO_2$ . Τα συλλιπάσματα αυτά είναι λιγότερο ανθεκτικά στις υψηλές παραμέτρους του ρεύματος συγκόλλησης, είναι περισσότερο ευπαθή στη δημιουργία πόρων στις κολλήσεις, αλλά επιτρέπουν την επίτευξη κολλήσεων με καλύτερες πλαστικές ιδιότητες. Τα όξινα συλλιπάσματα, μαζί με το  $SiO_2$ , περιέχουν συνήθως και το οξείδιο του μαγγανίου  $MnO$ . Ανάλογα με την περιεκτικότητα αυτής της προσθήκης στο συλλίπασμα, διακρίνονται συλλιπάσματα ελαφρά, μέτρια και ισχυρά μαγγανιώχα. Κατά τη συγκόλληση κατασκευαστικών ανθρακοχαλύβων με χαμηλό άνθρακα, ανάλογα με την περιεκτικότητα στο συλλίπασμα  $MnO$ , επιλέγεται κατάλληλη κατηγορία σύρματος έτσι, που η περιεκτικότητά του μαγγανίου στην κόλληση να είναι σε κάθε περίπτωση ίδια στα όρια  $0.8\%-1.2\%$ . Η σύνθεση των συρμάτων με τα συλλιπάσματα γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

Περιεκτικότητα MnO στο συλλίπασμα	Περιεκτικότητα Mn στο σύρμα
MnO άνω από 30%	0.3%-0.6% Mn
MnO 25-15 Mn	0.8%-1.2% Mn
MnO 12-0 Mn	1.5%-2.5% Mn

Σημαντική προσθήκη των συλλιπασμάτων για τη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο είναι ο φθορίτης ασβεστίου  $CaF_2$ . Παρά το ότι ο φθορίτης είναι αντισταθεροποιητής του τόξου, εισάγεται στη σύσταση των συλλιπασμάτων, για την αύξηση της αραιοποιημένης ρευστότητας και της ανθεκτικότητας τους στην υγρασία και τη σκουριά. Ο φθορίτης ασβεστίου ευνοεί την ένωση των υδρατιμών με το υδρογόνο στο τόξο σε στερεές ενώσεις  $HF$ , μη διαλυτοποιημένες στην κόλληση. Η περιεκτικότητα του φθορίτη ασβεστίου στα οξεινομαγγανιούχα συλλιπάσματα από 2%-10%. Με περιεκτικότητα  $CaF_2$  άνω των 4%, για την αύξηση της σταθερότητας του τόξου, κατά τη συγκόλληση με πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, πρέπει να χρησιμοποιείται τάση στην εν κενό λειτουργία  $min\ 80[V]$ . Τα συλλιπάσματα με περιεκτικότητα του φθορίτη ασβεστίου άνω των 4% προορίζονται πρωταρχικά για τη συγκόλληση οξειδωμένων χαλύβδινων ελασμάτων. Τα όξινα και τα βασικά συλλιπάσματα, ιδιαίτερα αυτά που περιέχουν λίγη ποσότητα  $CaF_2$ , πρέπει, προ της συγκόλλησης, να στεγνώνονται με μεγάλη ακρίβεια, στη θερμοκρασία περίπου των  $300[^\circ C]$ . Στον Πίνακα 27 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των διάφορων συλλιπασμάτων.

### 5.3.3 Κεραμικά συλλιπάσματα

Τα κεραμικά συλλιπάσματα, παρόμοια με τις επενδύσεις ηλεκτροδίων, αποτελούν μίγμα λεπτών αλεσμένων ορυκτών προϊόντων, συνθετικών, καθώς και μεταλλικών συστατικών. Σε αντίθεση με τα τηκόμενα συλλιπάσματα, τήκονται μόνο κατά τη διαδικασία συγκόλλησης. Στα κεραμικά συλλιπάσματα εμφανίζονται παρόμοια οξειδία σκωριογόνα όπως και στα τηκόμενα συλλιπάσματα ( $SiO_2$ ,  $AlO_3$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ) καθώς και ανθρακικά, κυρίως  $CaCO_3$  και  $MgCO_3$ , όπως επίσης και φθορίτες, κυρίως  $CaF_2$ : Στα κεραμικά συλλιπάσματα εισάγονται πρόσθετα συστατικά μεταλλικά, που, συγχρόνως, παίζουν το ρόλο των κραματικών προσθηκών και των αποξειδωτικών. Συνήθως χρησιμοποιούνται: μαγγάνιο, πυρίτιο, τιτάνιο, αλουμίνιο, όπως επίσης και μολυβδαίνιο, χρώμιο και νικέλιο. Τα κεραμικά συλλιπάσματα εκλύουν, κατά τη διαδικασία συγκόλλησης, σχετικά μεγάλες πτητικές ουσίες, περισσότερες απ' ό,τι κατά τη συγκόλληση με τα τηκόμενα συλλιπάσματα. Απ' αυτά τα αέρια περισσότερο υπερτερεί το  $O_2$  ου προκύπτει από τη διάσπαση των ανθρακικών. Με την έκλυση αυτών των πτητικών ουσιών συνδέεται η θερμική ανθεκτικότητα του συλλιπασματος με τη φόρτιση του με το ρεύμα συγκόλλησης. Όσο το συλλίπασμα εκλύει λιγότερες πτητικές ουσίες, τόσο υψηλότερες παράμετροι ρεύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τη συγκόλληση.

Συμβολισμός των	Συμβολισμός των συλλιπασμάτων	Το βασικό των συλλιπασμάτων	Ο χαρακτήρας του συλλιπασματος	Χρησιμοποίηση
S2 S3 Si S3	Fg ay 56	B 1.1	αδρανές, ελαφρά μαγνησιούχο	Για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων με χαμηλό άνθρακα και ελαφρά κραματωμένων χαλύβων.
S2 S2 Si S3	F10 ay 56	B -1.1	αδρανές, ελαφρά μαγνησιούχο	Για τη συγκόλληση χαλύβων ελαφρά κραματωμένων, ιδιαίτερα χρησιμοποιούμενων στις ενεργές συσκευές.
S1 S2	F12 ay 97	B-0.73	όξινο, σκληρά μαγνησιούχο	Για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων με χαμηλό άνθρακα.
S2 Si	F13 ay 87	B 0.66	όξινο, μέτρια μαγνησιούχο	Για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων και χαλύβων ελαφρά κραματωμένων με μεγάλες ταχύτητες, ιδιαίτερα για σωλήνες.
S3	F10 ay 97	B 0.77	όξινο, μέτρια μαγνησιούχο	Για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων με χαμηλό άνθρακα με μεγάλες ταχύτητες.
S1 S2	F12 ay 97	B 0.63	όξινο, ισχυρά μαγνησιούχο	Για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων με χαμηλό
S2	F10 ay 38	B -0.83	όξινο, μέτρια μαγνησιούχο	Για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων με χαμηλό
S3	F13 ay 38	B 0.81	Όξινο	Για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων με χαμηλό
	F10 ay 55	B 12	βασικό, μη μαγνησιούχο	Για τη συγκόλληση κραματωμένων χαλύβων και για αναγόμευση
	F10 ay 56	B=12	βασικό, ελαφρά μαγνησιούχο	Για την αναγόμευση ανθρακοχαλύβων με χάλυβες
S2 S3		B 1.1	αδρανές, ελαφρά μαγνησιούχο	Για την ηλεκτροσκαριακή συγκόλληση ανθρακοχαλύβων και
S2 S3		B 0,97	όξινο, μέτρια μαγνησιούχο	Για την ηλεκτροσκαριακή συγκόλληση ανθρακοχαλύβων με
<p>Το βασικό του συλλιπασματος, υπολογισμένο με τον τύπο του Boniszewski: <math>B = \frac{CaO + MgO + CaF_2 + 0,5(MnO + FeO)}{SiO_2 + 0,5(TiO_2 + ZrO_2)}</math></p>				

Πίνακας 27 Συμβολισμός των συρμάτων, ιδιότητες και χρησιμοποίηση των κυριότερων συλλιπασμάτων για τη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο (σύμφωνα με το SI XII-512-70).

Συνήθως κατά τη συγκόλληση με κεραμικά συλλιπασματα η ένταση του ρεύματος δεν υπερβαίνει τα 800[A]. Η χαμηλή θερμική αντοχή των κεραμικών συλλιπασμάτων τα καθιστά λιγότερο ανθεκτικά στη δημιουργία πόρων στις κολλήσεις. Με τέτοιες ιδιότητες χαρακτηρίζονται ιδιαίτερα τα συλλιπασματα ελαφρά πυροσυσσωματωμένα ή που σκληραίνουν σε αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες (κάτω από 400[°C]). Τα κεραμικά συλλιπασματα προετοιμάζονται για τη συγκόλληση με συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα. Αυτό εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητα των φθοριτικών και αλκαλικών ενώσεων. Συνήθως με περιεκτικότητα άνω του 10% των ενώσεων φθορίτη, κυρίως CaF<sub>2</sub>, τα συλλιπασματα προσφέρονται αποκλειστικά για τη συγκόλληση με συνεχές ρεύμα. Τα όξινα κεραμικά συλλιπασματα με μεγάλες περιεκτικότητες φθορίτη χαρακτηρίζονται με μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην επίδραση της σκουριάς απ' ό,τι τα τηκόμενα συλλιπασματα. Στα ισχυρά βασικά συλλιπασματα (το βασικό B>2) υπάρχει μεγάλη περιεκτικότητα φθορίτη, επειδή στη σύστασή τους εισέρχονται μεγάλες ποσότητες οξειδίων που τήκονται δύσκολα, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2038[°C], CaO-

2500[°C], MgO-2800[°C], ZrO<sub>2</sub>-2900[°C]. Οι ενώσεις φθορίτη μειώνουν, σ' αυτά τα συλλιπάσματα, τη θερμοκρασία τήξης. Το πλεονέκτημα των κεραμικών συλλιπασμάτων είναι η δυνατότητα ρύθμισης της χημικής σύνθεσης της κόλλησης με τη βοήθεια των κραματικών συστατικών που εισάγονται στο συλλίπασμα. Για τη συγκόλληση, μπορούν, επομένως, να χρησιμοποιηθούν σύρματα μαλακού ανθρακοχάλυβα με μικρή περιεκτικότητα μαγγανίου (0.5% Mn). Μεταβάλλοντας ανάλογα στο συλλίπασμα τις μεταλλικές προσθήκες, είναι δυνατόν, με το ίδιο σύρμα μαλακού ανθρακοχάλυβα, να επιτευχθεί διαφορετική χημική σύσταση της κόλλησης. Αυτός ο τρόπος αξιοποιείται σε μεγάλη κλίμακα και ιδιαίτερα κατά την παρασκευή κεραμικών συλλιπασμάτων για την αναγόμευση. Τα βασικά συλλιπάσματα έχουν ωφέλιμες ιδιότητες εξευγενισμού - αποξείδωσης, παρόμοια μετά βασικά επενδεδυμένα ηλεκτρόδια, τα οποία επιτρέπουν την επίτευξη καλών πλαστικών ιδιοτήτων, και παρουσιάζουν μεγάλη δυσθραυστότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επειδή τα βασικά συλλιπάσματα παράγονται ευκολότερα ως κεραμικά απ' ό,τι τα τηκόμενα, γι' αυτό παρατηρείται η μεγαλύτερη διάδοση των κεραμικών συλλιπασμάτων. Τα κεραμικά συλλιπάσματα, ιδιαίτερα τα βασικά, είναι πάρα πολύ ευαίσθητα στην υγρασία. Γι' αυτό απαιτείται το άμεσο στέγνωμα τους, προ της συγκόλλησης, στη θερμοκρασία των 300[°C], σε χρόνο 2[h]. Για τη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο χρησιμοποιούνται μαγγανιούχα συλλιπάσματα με κοκκομετρία μέχρι 3[mm]. Κατωτέρω εκτίθενται μαγγανιούχα συλλιπάσματα παραγόμενα από πολωνική μονάδα με τις χαρακτηριστικές ιδιότητες τους.

1. TMnII. Συλλίπασμα ισχυρά μαγγανιούχο, ανθεκτικό στην επίδραση της σκουριάς και της υγρασίας, χρησιμοποιείται στην ναυπηγική βιομηχανία. Χρησιμεύει για την αυτόματη συγκόλληση κατασκευαστικών ανθρακοχαλύβων με περιεκτικότητα σε άνθρακα μέχρι 0.25%. Περιοχή ρεύματος συγκόλλησης: μέγιστο εναλλασσόμενο ρεύμα 900[A], μέγιστο συνεχές ρεύμα 1000[A]. Η τάση της εν κενό λειτουργίας μετασχηματιστή συγκόλλησης *minimum* 78[V]. Η κοκκομετρία του συλλιπάσματος 0.5[mm]-2.5[mm].

2. TMnIIa. Συλλίπασμα ισχυρά μαγγανιούχο, με επιβελτιωμένες ιδιότητες ιονισμού, για την αυτόματη συγκόλληση κατασκευαστικών ανθρακοχαλύβων με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0.25%. Περιοχή ρεύματος συγκόλλησης: μέγιστο εναλλασσόμενο ρεύμα 900[A], μέγιστο συνεχές ρεύμα 1000[A]. Η τάση της εν κενό λειτουργίας του μετασχηματιστή *minimum* 69[V]. Κοκκομετρία συλλιπάσματος 0.5[mm]-2.5[mm].

3. TMnR. Συλλίπασμα ισχυρά μαγγανιούχο, για την ημιαυτόματη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο κατασκευαστικών ανθρακοχαλύβων με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0.25% C. Η κοκκομετρία του συλλιπάσματος 0.5[mm]-1.5[mm]. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την αυτόματη συγκόλληση. Η περιοχή των ρευμάτων συγκόλλησης όπως για τα συλλιπάσματα TMnII και TMnIIa. Προ της συγκόλλησης επιβάλλεται ο καθαρισμός από οξείδια.

4. TMnTi. Συλλίπασμα ισχυρά μαγγανιούχο με προσθήκη ρουτιλίου με επιβελτιωμένες τις ιδιότητες ιονισμού και συγχρόνως ανθεκτικό στην επίδραση της υγρασίας και των οξειδίων. Χρησιμεύει για τη συγκόλληση κατασκευαστικών ανθρακοχαλύβων με περιεκτικότητα σε άνθρακα 0.25%. Το συλλίπασμα παράγεται σε δύο παραλλαγές: TMnII-Ti/S συλλίπασμα με γυαλιστερή μορφή, κοκκομετρία 0.5[mm]-2.5[mm], TMn-Ti/P συλλίπασμα με μορφή αφρού, κοκκομετρία μέχρι

1.5[mm]. Το συλλίπασμα TMnII προορίζεται για τη συγκόλληση με μεγάλες ταχύτητες 80[m/h]-120[m/h], κυρίως όταν χρησιμοποιούνται δύο κεφαλές και περισσότερες. Το προτεινόμενο ρεύμα συγκόλλησης - συνεχές, με αρνητικό πόλο στο ηλεκτρόδιο.

5. TnTi. Συλλίπασμα μη μαγνητιούχο, κανονικό, με πολλαπλή χρησιμοποίηση, με τη χρησιμοποίηση κατάλληλων συρμάτων και συνθηκών, προσφέρεται για τη συγκόλληση όλων των κατηγοριών των κατασκευαστικών ανθρακοχαλύβων, μαζί με τους υψηλής αντοχής χάλυβες. Οι εκτελούμενες συγκολλήσεις με αυτό το συλλίπασμα έχουν πολύ μεγάλη δυσθραυστότητα. Η περιοχή του ρεύματος συγκόλλησης: μέχρι 1350[A] με τη χρησιμοποίηση ενός σύρματος ηλεκτροδίου με διάμετρο μέχρι 6[mm] και μέχρι 1800[A], με τη χρησιμοποίηση δύο ηλεκτροδίων με διάμετρο 4[mm]. Η κοκκομετρία 0.5[mm]-1.5[mm].

6. TMnI. Συλλίπασμα μέτρια μαγνητιούχο για την αναγεννητική αναγόμευση τροχών γερανογεφυρών και χαλβουργικών ελαστρών με σκληρότητα περίπου 250HB.

7. TMn-350. Συλλίπασμα ελαφρά μαγνητιούχο, βασικό, για την αναγεννητική αναγόμευση χαλβουργικών ελαστρών με σκληρότητα περίπου 350HB.

8. TAsI4. Συλλίπασμα ισχυρά μαγνητιούχο, τροποποιημένο με την προσθήκη  $TiO_2$ , χρησιμεύει καταρχήν για τη συγκόλληση σωληνώσεων με μεγάλες ταχύτητες (μέχρι 150[m/h]). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συγκόλληση με κανονικές ταχύτητες (20[m/h]-60[m/h]) χάλυβων με υψηλή αντοχή.

9. TAsI4-Cr2. Συλλίπασμα μη μαγνητιούχο χρησιμεύει καταρχήν για τη συγκόλληση χρώμιο - μαγνητιούχων χάλυβων.

10. TAsI-Cr2. Συλλίπασμα μη μαγνητιούχο, χρησιμεύει για τη συγκόλληση χρώμιο - νικελιούχων χάλυβων, με σύρματα ηλεκτροδίων 18Cr8Ni.

## 5.4 Προστατευτικά αέρια

**5.4.1 Αργό.** Το αργό Ar είναι αέριο άχρωμο, άοσμο, χημικά ουδέτερο και δεν αντιδρά με άλλα στοιχεία. Αποκτάται από τον ατμοσφαιρικό αέρα ως υποπροϊόν κατά την παραγωγή οξυγόνου. Στις συγκολλήσεις το αργό χρησιμοποιείται για τη δημιουργία προστατευτικής ατμόσφαιρας γύρω από το λουτρό συγκόλλησης με μεθόδους MIG και TIG, καθώς και σαν πλασμογενή αέριο για την τροφοδοσία των καυστήρων πλάσματος. Η ποιότητα του αργού συγκόλλησης πρέπει να έχει καθαρότητα 99.98%. Το υπόλοιπο μέρος σαν ακαθαρσίες είναι, κυρίως το άζωτο, το οξυγόνο, η υγρασία, το διοξείδιο του άνθρακα καθώς και οι υδατάνθρακες. Το συμπιεσμένο αργό τροφοδοτείται από χαλύβδινες φιάλες με πίεση 15[MPa]. Μπορεί επίσης να τροφοδοτείται και σε υγρή κατάσταση, ιδιαίτερα για τους παραλήπτες που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες αυτού του αερίου εφόσον είναι εφοδιασμένοι με σταθμό απαέρωσης του αργού. Οι φιάλες του αργού επιστρέφονται στον προμηθευτή με πίεση όχι μικρότερη από 0.2[MPa]. Οι ιδιότητες του αργού δίνονται στον Πίνακα 28.

**5.4.2 Άζωτο.** Το άζωτο  $N_2$  είναι μη εύφλεκτο, άχρωμο και άοσμο, ουδέτερο στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Παράγεται από τη διύλιση του υγρού αέρα. Στις συγκολλήσεις χρησιμοποιείται για το φύσημα των αεραγωγών και ιδιαίτερα σαν προστατευτικό αέριο κατά τη συγκόλληση του χαλκού, καθώς και σαν συστατικό στο μίγμα με το αργό για την τροφοδότηση των καυστήρων πλάσματος για την κοπή ή συγκόλληση. Το άζωτο στην I ποιότητα περιέχει 99.8%  $N_2$ , ενώ στη II

ποιότητα 98%  $N_2$ . Σαν κύρια ακαθαρσία του αζώτου είναι το οξυγόνο. Το συμπιεσμένο αζώτο προμηθεύεται στις φιάλες με πίεση 15[MPa]. Οι ιδιότητες του αζώτου φαίνονται στον **Πίνακα 28**.

**5.4.3 Ήλιο.** Το ήλιο  $He$  είναι άχρωμο, άοσμο, χημικά ουδέτερο. Παράγεται από το φυσικό αέριο, που περιέχει κατά μέσο όρο  $0.02 \pm 0.5 He$ . Στις συγκολλήσεις το ήλιο χρησιμοποιείται κυρίως σαν προστατευτικό αέριο με περιεκτικότητα 99.99%  $He$ . Το ήλιο συγκρινόμενο με το αργό δημιουργεί καλύτερη τήξη, αυξάνει την ταχύτητα συγκόλλησης και μειώνει τις παραμορφώσεις. Το ήλιο χειροτερεύει το άναμμα και τη διατήρηση του τόξου. Επίσης δεν δημιουργεί επαρκή προστατευτική ατμόσφαιρα, γι' αυτό επιβάλλεται η αύξηση της κατανάλωσης του κατά 200%-300% σε σύγκριση με το αργό. Απαιτεί μεγαλύτερη τάση του τόξου (περίπου δύο φορές) καθώς και χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων με προσθήκη 2%  $tor$ . Το ήλιο προμηθεύεται στις φιάλες με πίεση 15[MPa]. Οι ιδιότητες του δίνονται στον **Πίνακα 28**.

Όνομασία αερίου	Μοριακή μάζα	Θερμοκρασία		Κρίσιμη πίεση [MPa]	Σταθερά $R$ [J/Kgr K]	Ποσότητα από 1g υγρού [ $m^3$ ]	Πυκνότητα [ $Kg/m^3$ ]	Πυκνότητα ως προς την ατμόσφαιρα
		Ζέσεως [ $^{\circ}C$ ]	Κρίσιμη [ $^{\circ}C$ ]					
Αργό $Ar$	39.948	185.9	122.5	4.86	208.1	0.561	1.7839	1.38
Αζώτο $N_2$	28.013	195.8	147.0	3.39	296.8	0.804	1.25	0.968
Διοξείδιο του Άνθρακα $CO_2$	44.010	78.5	31.4	7.40	188.9	0.506	1.9768	1.529
Ήλιο $He$	4.003	268.9	267.9	0.228	2077.1	0.500	0.1785	0.137
Οξυγόνο $O_2$	31.999	183	118.9	5.04	259.8	0.700	1.429	1.105
Υδρογόνο $H_2$	2.016	252.8	239.9	1.29	4124.3	11.130	0.090	0.069

**Πίνακας 28** Ιδιότητες των βασικών αερίων συγκόλλησης

**5.4.4 Διοξείδιο του άνθρακα** Το διοξείδιο του άνθρακα  $CO_2$  είναι αέριο άχρωμο, άοσμο, μη εύφλεκτο. Η περιεκτικότητα άνω από 5% στην ατμόσφαιρα είναι επιβλαβής, με κίνδυνο ασφυξίας. Στις συγκολλήσεις το διοξείδιο του άνθρακα χρησιμοποιείται για τη δημιουργία προστατευτικής ατμόσφαιρας γύρω από το λουτρό συγκόλλησης κατά την ημιαυτόματη και αυτόματη συγκόλληση των χαλύβων. Η ποιότητα του διοξειδίου του άνθρακα καθορίζεται ως *I* ποιότητα με ελάχιστη περιεκτικότητα 99%  $CO_2$  και ως *II* ποιότητα 98%  $CO_2$ . Η ποσότητα του ατμού ύδατος στο αέριο  $CO_2$  που χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση δεν πρέπει να υπερβαίνει  $0.228 [gr/m^3]$ ,

Θερμοκρασία [ $^{\circ}C$ ]	-15	-5	-0	-5	+10	+15	+20	+25	+31
Πίεση, [MPa]	2.3	3.1	3.5	4.1	4.6	5.2	5.9	6.6	7.3

**Πίνακας 29** Η σχέση της πίεσης με τη θερμοκρασία της φιάλης με  $CO_2$

Το διοξείδιο του άνθρακα σε ατμοσφαιρική πίεση βρίσκεται με μορφή αερίου και υγρού. Δεδομένου της υψηλής κρίσιμης θερμοκρασίας και χαμηλής κρίσιμης πίεσης, το διοξείδιο του άνθρακα βρίσκεται στις φιάλες με μορφή δύο φάσεων: αερίου και σταγονιδίων, ενώ άνω των  $34 [^{\circ}C]$  μόνο σε κατάσταση αερίου. Η πίεση του διοξειδίου του άνθρακα στις φιάλες εξαρτάται από τη θερμοκρασία **Πίνακας 29**. Το διοξείδιο του άνθρακα προμηθεύεται στις φιάλες με διαφορετική



χωρητικότητα **Πίνακας 30**. Επειδή η απαέρωση  $1[\text{Kgr}]$  του υδροποιημένου διοξειδίου του άνθρακα απαιτεί την προσαγωγή περίπου  $300[\text{KJ}]$  ενέργειας, άρα κατά τη λήψη αυτού του αερίου από τη φιάλη πρέπει να χρησιμοποιηθούν προθερμαντήρες για την αποφυγή της ψύξης των δικλιδών και μανοεκτονωτών.

Χωρητικότητα υδάτινη, στη φιάλη,	8	10	20	30
Περιεκτικότητα	6	8	15	29,5

**Πίνακας 30** Η περιεκτικότητα τον διοξειδίου τον άνθρακα στις φιάλες με διαφορετική χωρητικότητα

**5.4.5 Οξυγόνο.** Το οξυγόνο  $\text{O}_2$  παράγεται για βιομηχανικούς σκοπούς κυρίως από τον ατμοσφαιρικό αέρα, με την ψύξη και υδροποίηση στη θερμοκρασία περίπου  $-200[^\circ\text{C}]$ , καθώς στη συνέχεια η ατμοποίησή του στους  $-183[^\circ\text{C}]$  Το αέριο αυτό μπορεί να επιτευχθεί και κατά τη διάρκεια ηλεκτρόλυσης του ύδατος. Το οξυγόνο είναι αέριο μη εύφλεκτο, άοσμο, αλλά ισχυρό στη διατήρηση της καύσης. Τα κριτήρια χρησιμοποίησης του οξυγόνου φαίνονται στον **Πίνακα 31**.

Ποιότητα	Περιεκτικότητα $\text{O}_2\%$	Χρησιμοποίηση
I	99.5	Για όλες τις εργασίες συγκόλλησης, κυρίως για την οξυγονοκοπή χαλύβων και για την τροφοδοσία των μηχανών θερμικής κοπής.
II	99.0	Για την κοπή με χειροκίνητους καυστήρες χαλύβων μικρού πάχους, για τη συγκόλληση και προθέρμανση κ.ά.
III	98.0	Αντικαταστάνας την II ποιότητα για συγκόλληση και προθέρμανση.

**Πίνακας 31** Κριτήρια χρησιμοποίησης τον οξυγόνου στις συγκολλήσεις

Το οξυγόνο όταν έρχεται σε άμεση επαφή με λίπη ενώνεται μ' αυτά δι' εκρήξεως. Για το λόγο αυτό απαγορεύεται η λίπανση των εγκαταστάσεων οξυγόνου και του εξοπλισμού για τη συγκόλληση και την κοπή με οξυγόνο. Το οξυγόνο παρέχεται από χαλύβδινες φιάλες με πίεση  $150$  ατμοσφαιρών σε θερμοκρασία  $15[^\circ\text{C}]$ . Οι κανονικές φιάλες έχουν χωρητικότητα συνήθως  $40[\text{lit}]$  ύδατος. Άρα  $40[\text{lit}] \cdot 150[\text{atm}] = 6000[\text{lit}] = 6[\text{m}^3]$ . Για να έχουμε την αυτή ποσότητα αερίου σε διαφορετικές θερμοκρασίες, απαραίτητο είναι να προσαρμοστεί η πίεση προς την υπάρχουσα κατάσταση. Ο **Πίνακας 32** μας δίνει την πίεση πλήρωσεως των φιαλών οξυγόνου σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

**5.4.6 Υδρογόνο.** Το υδρογόνο  $\text{H}_2$  είναι καύσιμο αέριο, άχρωμο και άοσμο. Παράγεται κατά τη διάρκεια ηλεκτρόλυσης υδάτινου διαλύματος χλωρίου, σόδας ή ποτάσας. Κύρια ακαθαρσία του υδρογόνου είναι το οξυγόνο. Η ποιότητα I του υδρογόνου πρέπει να περιέχει το ελάχιστον  $99.5\% \text{H}_2$ . Η δε II ποιότητα  $98\% \text{H}_2$ . Το υδρογόνο και το οξυγόνο δημιουργούν μίγμα αυτανάφλεξης. Το υδρογόνο χαρακτηρίζεται από τη μεγάλη ικανότητα διείσδυσης σε ασυνέχειες του υλικού, δημιουργώντας πόρους, ρωγμές.

θερμοκρασία $[^\circ\text{C}]$	35	30	25	20	25	10	5	0	-5
Πίεση, $[\text{atm}]$	161	158.5	155.5	153	150	147	144.5	141.5	139

**Πίνακας 32** Πίεσεις φιαλών οξυγόνου ανάλογα από τη θερμοκρασία

Μίγμα αερίων	Περιεκτικότητα των στοιχείων % σγκομετρική						Χρησιμοποίηση
	Ar	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	He	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
Αργό-άζωτο	85-92	-	-	-	8-15	-	Κοπή με πλάσμα
Αργό-ήλιο	25-30	-	-	70-75	-	-	Συγκόλληση με μεθόδους TIG, MIG των μη σιδηρούχων μετάλλων.
Αργό-διοξείδιο του άνθρακα	70-75	25-30	-	-	-	-	Συγκόλληση ανθρακοχαλύβων και χαμηλής κραμάτωσης χαλύβων με τη μέθοδο MAG.
Αργό-οξυγόνο	98-99	-	-	-	-	1-2	Συγκόλληση υψηλής κραμάτωσης χαλύβων με τη μέθοδο MAG. Αναγώμιση ωστενιτικών ανθρακοχαλύβων.
Αργό-υδρογόνο	85-95	-	5-15	-	-	-	Κοπή με πλάσμα, συγκόλληση με μεθόδους TIG, MIG ωστενιτικών χαλύβων χρωμιοσυκελιούχων.
Αζωτο-υδρογόνο	-	-	10-20	-	80-90	-	Κοπή και συγκόλληση με πλάσμα.
Αργό-άζωτο-υδρογόνο	43-45	-	25-27	-	30-32	-	Κοπή με πλάσμα.
Αργό-διοξείδιο του άνθρακα	65-85	13-30	-	-	-	2-5	Συγκόλληση ανθρακοχαλύβων και χαμηλής κραμάτωσης χαλύβων με τη μέθοδο MAG.

**Πίνακας 33** Μίγματα προστατευτικών αερίων συγκόλλησης

Το υδρογόνο προμηθεύεται σε χαλύβδινες φιάλες με πίεση 15[MPa]. Στις συγκολλήσεις το υδρογόνο χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των καυστήρων για την κοπή και τη συγκόλληση. Οι βασικές ιδιότητες δίνονται στον **Πίνακας 28**.

**5.4.7 Μίγματα αερίων.** Εκτός από το CO<sub>2</sub>, Ar και He για τη δημιουργία προστατευτικής ατμόσφαιρας του λουτρού συγκόλλησης, χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό κατάλληλα μίγματα αερίων. Η συμμετοχή διαφόρων στοιχείων στο μίγμα υπαγορεύεται από τις βέλτιστες συνθήκες για το άναμμα του τόξου, ακαθαρσιών στην επιφάνεια της κόλλησης, απόδοση της διαδικασίας καθώς και των συνθηκών του περιβάλλοντος. Το πλεονέκτημα χρησιμοποίησης των μιγμάτων είναι η δυνατότητα αξιοποίησης των καλύτερων ιδιοτήτων εκάστου αερίου, την υψηλή ενθαλπία του υδρογόνου, την ευκολία ανάμματος και διατήρησης του τόξου με το αργό, τη μεγάλη κινητική ενέργεια του αζώτου. Αλλά όμως τα οξειδωτικά στοιχεία CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> προξενούν τη μείωση της διάρκειας των ηλεκτροδίων και των ακροφυσίων.

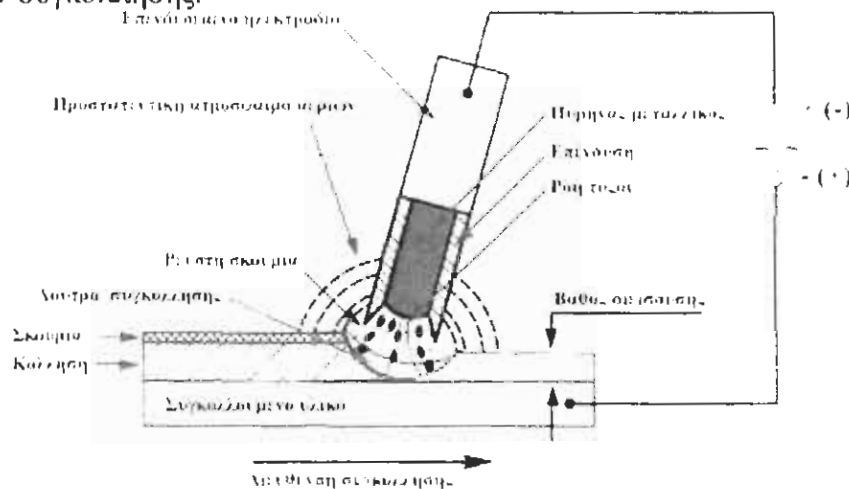
## Κεφάλαιο 6

### 6. Χειρωνακτική συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο (MMA)

#### 6.1 Χαρακτηριστικά της μεθόδου

##### 6.1.1 Γενικά

Η συγκόλληση με ηλεκτρικό τόξο είναι τεχνολογική διαδικασία σύνδεσης μετάλλων με τήξη, στην οποία η απαραίτητη πηγή ενέργειας για την εκτέλεση της κόλλησης είναι το ηλεκτρικό ρεύμα. Υπάρχουν πάρα πολλές μέθοδοι συγκόλλησης με ηλεκτρικό τόξο. Μερικές απ' αυτές χρησιμοποιούνται σποραδικά ή δεν έχουν ακόμη βιομηχανική εφαρμογή εξαιτίας του ότι υπάρχουν ευκολότεροι ή φθηνότεροι τρόποι συγκόλλησης. Η χειρωνακτική συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο, ονομαζόμενη, στη συνέχεια μέθοδος *MMA* (*Manual Metal Arc*), *σχήμα 1*, είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος συγκόλλησης. Ο απαραίτητος εξοπλισμός γι' αυτή τη μέθοδο είναι σχετικά απλός και φθηνός, ενώ ο χειριστής (ηλεκτροσυγκολλητής) έχει σημαντική ευχέρεια ελεύθερων κινήσεων, επειδή μπορεί να συγκολλά σε θέση απομακρυσμένη ακόμη και κατά  $20[m]$  από την πηγή της ενέργειας συγκόλλησης. Με την αλλαγή της κατηγορίας του ηλεκτροδίου, μπορεί να συγκολλά διάφορα μέταλλα με τη χρήση των ίδιων μηχανών συγκόλλησης.

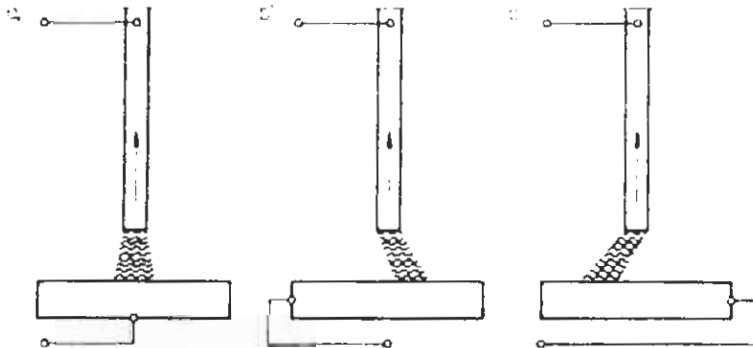


*Σχήμα 1* Χειρωνακτική συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο (MMA)

##### 6.1.2 Ρεύμα συγκόλλησης

Η συγκόλληση μπορεί να επιτυγχάνεται με ρεύμα συνεχές ή εναλλασσόμενο. Κατά την επιλογή του ρεύματος, λαμβάνονται υπόψη συνήθως οι ακόλουθοι παράγοντες: α) Κατά κανόνα, όλα τα ηλεκτρόδια προσφέρονται για τη συγκόλληση με συνεχές ρεύμα, αλλά μόνο μερικοί τύποι επενδύσεων των ηλεκτροδίων διευκολύνουν τη σταθερή εργασία με εναλλασσόμενο ρεύμα. β) Οι μετασηματιστές είναι ευκολότεροι στην εκμετάλλευση απ' ό,τι οι περιστρεφόμενες γεννήτριες ή οι ανορθωτές. γ) Με το συνεχές ρεύμα το τόξο μπορεί να αποκλίνει από τον άξονα του ηλεκτροδίου στα πλάγια ή προς την ίδια ή αντίθετη διεύθυνση με

αυτήν της συγκόλλησης **σχήμα 2**. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται μαγνητικό φύσημα του τόξου, προξενείται με την παρουσία μαγνητικών πεδίων στο χώρο του τόξου και μπορεί να διαταράξει σε σημαντικό βαθμό τη διαδικασία συγκόλλησης. Με το εναλλασσόμενο ρεύμα το μαγνητικό φύσημα του τόξου σπανίως συμβαίνει, συνήθως κατά τη συγκόλληση φερρομαγνητικών μετάλλων, όπως χάλυβα ή νικέλιο. Εμφανίζονται δύο κύριες πηγές μαγνητικών πεδίων. Το συγκολλούμενο αντικείμενο (πλάκα, σωλήνας ή άλλες κατασκευές) μπορεί να μαγνητισθεί κατά την παρασκευή τους ή με το αποτέλεσμα των διάφορων διαδικασιών πριν τη συγκόλληση. Ο τρόπος αποφυγής του μαγνητισμού του μετάλλου είναι η χρησιμοποίηση θερμικών κατεργασιών ή τοποθέτηση του συγκολλούμενου αντικειμένου σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο.



**Σχήμα 2** Μαγνητικό φύσημα τον τόξου, ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των ηλεκτροδίων

Φαίνεται, όμως, ότι η πιο συνήθης αιτία είναι η δημιουργία μαγνητικών πεδίων με τη διέλευση του ρεύματος συγκόλλησης από το μητρικό υλικό. Η διεύθυνση του φυσήματος του τόξου εξαρτάται από τη θέση σύνδεσης του αγωγού επιστροφής. Αλλάζοντας τη θέση αυτού, είναι δυνατόν να επέλθει διόρθωση. Μερικές φορές είναι αποτελεσματικό το περιτύλιγμα του αντικειμένου με τον αγωγό συγκόλλησης. δ) Κατά τη χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος, απαιτείται η χρησιμοποίηση υψηλότερων τιμών της τάσης  $U_0$  της εν κενό λειτουργίας. Το τόξο σβήνει με κάθε πέρασμα του ρεύματος από το μηδέν, όταν συμβαίνει η αλλαγή της πολικότητας, δηλαδή εκατό φορές ανά δευτερόλεπτο **σχήμα 3**. Για τη διατήρηση του λουτρού συγκόλλησης σε ρευστή κατάσταση το τόξο πρέπει αυτοστιγμεί να ξανανάψει. Για το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητο η τάση στο τόξο να υπερβαίνει τα  $80[V]$ . Τόσο μεγάλη τάση μπορεί να είναι επικίνδυνη για τον άνθρωπο και γι' αυτόν, ακόμη, το λόγο χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα με χαμηλότερη τάση της εν κενό λειτουργίας, που ισούται περίπου με  $60[V]$ . Οι βελτιωμένες πηγές ενέργειας και τα καινούργια είδη ηλεκτροδίων διευκολύνουν, επίσης, το χαμήλωμα της τάσης της εν κενό λειτουργίας, κατά τη συγκόλληση με εναλλασσόμενο ρεύμα.



**Σχήμα 3** Η πορεία των εντάσεων και τάσεων τον τόξου, κατά τη συγκόλληση με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Οι στατικές χαρακτηριστικές αποτελούν βασικό παράγοντα για την επιλογή των κατάλληλων πηγών ρεύματος, ιδιαίτερα για τη χειρωνακτική συγκόλληση, που το τόξο δεν έχει πάντοτε σταθερότητα **σχήμα 4**. Οι στατικές χαρακτηριστικές των πηγών ρεύματος για τη χειρωνακτική συγκόλληση πρέπει να είναι φθίνουσες, για να έχουμε μικρότερη μείωση του ρεύματος κατά την πτώση της τάσης. Η κόλληση της σύνδεσης δημιουργείται από τη σύντηξη του μεταλλικού πυρήνα του ηλεκτροδίου, τα μεταλλικά συστατικά της επένδυσης καθώς και από τα άκρα του μητρικού συγκολλούμενου υλικού. Η συμμετοχή του μητρικού υλικού στην κόλληση, ανάλογα με τον τύπο του συγκολλούμενου μετάλλου, και την τεχνική συγκόλλησης ανέρχεται από 10%-40%. Η προστασία του τόξου και του λουτρού συγκόλλησης επιτυγχάνεται από τα αέρια και τη ρευστή σκουριά, που δημιουργούνται από το αποτέλεσμα της διάσπασης της επένδυσης του ηλεκτροδίου, με την επίδραση της θερμότητας του τόξου. Η σύσταση της προστατευτικής ατμόσφαιρας των αερίων, ανάλογα με τη χημική σύσταση της επένδυσης, αποτελείται από  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $H_2O$  όπως και από προϊόντα της διάσπασης της. Κατά τη συγκόλληση με συνεχές ρεύμα, ο αρνητικός πόλος συνδέεται με το ηλεκτρόδιο-αρνητική πολικότητα, ο δε θετικός πόλος συνδέεται με το συγκολλούμενο αντικείμενο - θετική πολικότητα.



*Σχήμα 4* Χαρακτηριστικές στατικές καμπύλες πηγών ρεύματος για διάφορες μεθόδους συγκόλλησης τόξου: απότομη φθίνουσα χαρακτηριστική, για τη συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια, ομαλή φθίνουσα χαρακτηριστική, για τη συγκόλληση με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια, χαρακτηριστική, για τη συγκόλληση με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην προστατευτική ατμόσφαιρα του αργού, σταθερή (επίπεδη) χαρακτηριστική, για τη συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην προστατευτική ατμόσφαιρα του αργού και του CO<sub>2</sub> αύξουσα χαρακτηριστική, για τη συγκόλληση αλουμινίου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην προστατευτική ατμόσφαιρα του αργού: L χαρακτηριστική του τόξου, p σημείο σταθερού ανάμματος του τόξου.

## 6.2 Λειτουργίες της επένδυσης του ηλεκτροδίου

Το κύριο αίτιο χρησιμοποίησης της επένδυσης των ηλεκτροδίων κατά τη συγκόλληση με τη MMA είναι η προστασία του ρευστού μετάλλου από τις ακαθαρσίες του ατμοσφαιρικού αέρα. Συγχρόνως, το συλλίπασμα, εμπεριεχόμενο στην επένδυση, πληρεί και άλλους σκοπούς, επιβοηθώντας την αποτελεσματικότητα της συγκόλλησης.

### 6.2.1 Προστασία του λουτρού συγκόλλησης

Η επένδυση λιώνει στο τόξο μαζί με τον πυρήνα του ηλεκτροδίου. Το συλλίπασμα επικαλύπτει την επιφάνεια του ρευστού μετάλλου, διαχωρίζοντας το από το οξυγόνο και το άζωτο, που περιέχονται στον αέρα. Μετά τη στερεοποίηση, το συλλίπασμα σχηματίζει τη σκουριά (κρούστα) που καλύπτει την κόλληση. Σημαντική είναι η εξασφάλιση καλής προστασίας της κόλλησης με το στρώμα συλλίπασμα - σκουριά, αλλά κατά την επιλογή της σύστασης του συλλιπάσματος πρέπει να δίνεται προσοχή, ώστε αυτό να αφαιρείται εύκολα, διότι πριν την εναπόθεση του επόμενου κορδονίου, το στρώμα της σκουριάς πρέπει στην ολότητα του να αφαιρείται. Στην ιδανική περίπτωση, η σκουριά πρέπει από μόνη της να αποκόπτεται. Αυτό είναι δύσκολο να συμβεί με την απαίτηση της προσκόλλησης της σκουριάς στο μέταλλο της κόλλησης, κατά τη διάρκεια στερεοποίησης, έχοντας και ως σκοπό την αποφυγή της οξειδωσης της επιφάνειας της κόλλησης εξαιτίας της επίδρασης του αέρα. Για τη διευκόλυνση διαχωρισμού της σκουριάς, επιδρούν και άλλες προσμίξεις, προστιθέμενες στην επένδυση από διαφορετικές απόψεις. Το αποτέλεσμα είναι συμβιβαστικό και ως συνέπεια αυτού η ευκολία διαχωρισμού της σκουριάς είναι διάφορη στην περίπτωση διάφορων κατηγοριών ηλεκτροδίων. Πρόσθετη προστασία για τη μη

εισχώρηση του αέρα επιτυγχάνεται με προσθήκες οι οποίες διασπώνται με τη θερμότητα του τόξου, σχηματίζοντας αέρια που ωθούν τον αέρα από το περιβάλλον τους. Τότε μειώνεται η δυνατότητα απορρόφησης του οξυγόνου και του αζώτου. Οι προσθήκες αυτές μπορούν να είναι ανθρακικά που να εκλύουν διοξείδιο του άνθρακα ή κυτταρίνη, δημιουργώντας υδρογονική ατμόσφαιρα και μονοξείδιο του άνθρακα.

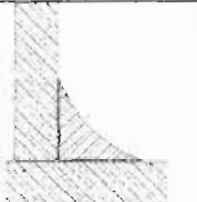
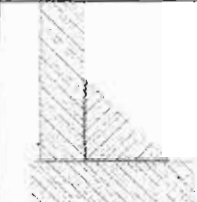
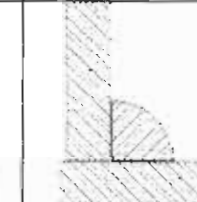
### 6.2.2 Σταθερότητα του τόξου

Παρόλο που συχνά αναφέρεται η ανάγκη της σταθερότητας του τόξου, δεν είναι εύκολο να υποθεί στο τι συνίσταται. Από την άποψη των ενεργειών συγκόλλησης, η πιο απλή εξήγηση είναι η εξής: επιθυμούμε, ώστε οι συνθήκες ανάμματος να είναι αμετάβλητες καθ' όλη τη διάρκεια συγκόλλησης, εκτός εάν ο χειριστής προσάγει αλλαγή, προκειμένου να προσαρμοσθεί στην αλλαγή της γεωμετρίας της σύνδεσης. Αυτό σημαίνει ότι το άνω άκρο του τόξου πρέπει πάντοτε να βρίσκεται στο κέντρο της διατομής του πυρήνα του ηλεκτροδίου, ενώ η στήλη του τόξου πρέπει να επικαλύπτεται με τον άξονα του ηλεκτροδίου. Σε άυλακα τέτοιο, όπως σχηματίζει η λοξοτόμηση τύπου V, το τόξο δεν πρέπει να πηδά από τη μια πλευρά στην άλλη για την εξεύρεση του μικρότερου δρόμου από το ηλεκτρόδιο στο αντικείμενο, πρέπει το τόξο να διατηρεί τη διεύθυνση που του δίνει ο χειριστής. Συγχρόνως, το άκρο του ηλεκτροδίου πρέπει να τήκεται ομοιόμορφα, ενώ το μέταλλο πρέπει να μεταφέρεται στο λουτρό συγκόλλησης, χωρίς να διαταράσσει τη συνεχή εργασία του τόξου. Άλλη παραδοχή της σταθερότητας είναι η ευκολία ανάμματος του τόξου στην αρχή της συγκόλλησης ή το εκ νέου άναμμα του, μετά το πέρασμα του ρεύματος από το μηδέν, κατά τη συγκόλληση με εναλλασσόμενο ρεύμα. Και στις δύο περιπτώσεις επιβάλλεται ο ταχύς ιονισμός του χώρου του τόξου με όσο το δυνατόν χαμηλότερη τάση. Ο ιονισμός διευκολύνεται με την προσθήκη στο συλλίπασμα διοξειδίου του τιτανίου, πυριτικού καλίου και ανθρακικού ασβεστίου. Τα πυριτικά και τα οξειδία, προστιθέμενα για άλλους σκοπούς, μπορούν, επίσης, να χρησιμεύσουν ως σταθεροποιητές του τόξου.

### 6.2.3 Επίδραση του συλλιπάσματος στη διαμόρφωση του μετώπου της κόλλησης

Για την κατανόηση της επίδρασης του συλλιπάσματος στη διαμόρφωση του μετώπου της κόλλησης, πρέπει, καταρχήν, να δούμε ποιο ρόλο πληρεί η επιφανειακή τάση του λουτρού συγκόλλησης. Εάν η επιφανειακή τάση είναι μεγάλη, τότε η επιφάνεια του λιωμένου μετάλλου θα καταστεί κυρτή. Στην επίπεδη πλάκα το υγρό εκφεύγει από τα άκρα, ενώ η γωνία επαφής μεταξύ αυτής και της μη λιωμένης επιφάνειας είναι περίπου  $90^\circ$ . Με άλλα λόγια, το ρευστό μέταλλο δε διαβρέχει το μητρικό υλικό. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν η επιφανειακή τάση είναι μικρή η γωνία επαφής είναι μικρή το ρευστό μέταλλο έχει καλές ιδιότητες διαβροχής, άρα η επιφάνεια του λουτρού συγκόλλησης είναι πλήρης επίπεδη. Κατά τη συγκόλληση, καμιά απ' αυτές τις ακρότητες δεν είναι επιθυμητή. Με πάρα πολύ μεγάλη επιφανειακή τάση, όχι μόνο έχουμε ελαττωματικό μέτωπο της κόλλησης, αλλά και δυσχεραίνεται η ρευστή διείδυση

του μετάλλου του λουτρού στο διάκενο του αυχένα του αύλακα. Από την άλλη πλευρά, η μικρή επιφανειακή τάση δυσχεραίνει το σχηματισμό του κανονικού μετώπου και τη διατήρηση του περιορισμένου μεγέθους του λουτρού. Επιπλέον, δημιουργείται η δυνατότητα εκροής του μετάλλου εκτός των άκρων της σύνδεσης, έως ότου το τόξο προλάβει να το λιώσει αυτό. Έτσι, λοιπόν, και εδώ υπάρχει ανάγκη συμβιβαστικής λύσης, με σκοπό την επίτευξη καλού αποτελέσματος συγκόλλησης. Κατά τη συγκόλληση τόξου, η επιφανειακή τάση του λουτρού συγκόλλησης εξαρτάται από την περιεκτικότητα του οξυγόνου στο εναποτιθέμενο υλικό, η οποία, στη συνέχεια, εξαρτάται από την περιεκτικότητα του οξυγόνου στο συλλίπασμα. Εάν στο εναποτιθέμενο υλικό είναι μικρή η ποσότητα του οξυγόνου, τότε το στοιχείο αυτό θα λαμβάνεται από το συλλίπασμα, μέχρι τη στιγμή που να συμβεί η ισορρόπηση. Όσο περισσότερο οξυγόνο υπάρχει στο συλλίπασμα τόσο μεγαλύτερη θα είναι η περιεκτικότητα του στην κόλληση. Το αποτέλεσμα που το οξυγόνο ασκεί στην επιφανειακή τάση, άρα και στο μέτωπο της κόλλησης, μπορεί να παρατηρηθεί στην αυχενική κόλληση, εκτελεσμένη σε πλευρική θέση *πίνακας 1*. Η κόλληση με χαμηλό οξυγόνο-κυρτό μέτωπο έχει μεγάλη επιφανειακή τάση και αντίστροφα.

Περιεκτικότητα οξυγόνου	Μεγάλη	Μέση	Μικρή
Επιφανειακή τάση	Χαμηλή	Μέση	Υψηλή
Μορφή πλευρικής συγκόλλησης			

*Πίνακας 1* Συνέπειες της περιεκτικότητας τον οξυγόνου στο συλλίπασμα της επένδυσης

Υπάρχουν περιπτώσεις που το μέτωπο της κόλλησης δεν αποτελεί το πρώτο πλάνο κατά τη σύσταση του συλλιπάσματος. Στην περίπτωση αυτή γίνεται συμβιβασμός με λιγότερο ικανοποιητική μορφή της κόλλησης. Έτσι γίνεται στην περίπτωση του συλλιπάσματος που περιέχει σημαντικές ποσότητες φθορίτη του ασβεστίου και ανθρακικού ασβεστίου. Αυτές προστίθενται, με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων, επειδή απαιτείται μείωση της περιεκτικότητας του οξυγόνου. Όπως φαίνεται, η προσθήκη αυτών οδηγεί στη δημιουργία μεγάλων επιφανειακών τάσεων. Άρα, εάν χρησιμοποιηθούν ηλεκτρόδια καλυμμένα με τέτοιου είδους επενδύσεις, τότε, με βεβαιότητα, το μέτωπο θα είναι κυρτό.

#### 6.2.4 Διαμόρφωση των κολλήσεων σε εξαναγκασμένες θέσεις

Στις εξαναγκασμένες θέσεις, η σκουριά μπορεί να χρησιμεύσει για τη στήριξη του ρευστού μετάλλου, κατά τη διαμόρφωση της κόλλησης. Για το σκοπό αυτό, πρέπει να διατηρηθούν τρεις ιδιότητες της ρευστής σκουριάς, σε κανονικές αναλογίες. Η πρώτη απ' αυτές είναι η κατάλληλη ρευστότητα, απαραίτητη για την επίπλευση της σκουριάς από τη ρίζα της κόλλησης, αποτρέποντας τη βύθιση της στην κόλληση κατά τη διάρκεια στερεοποίησης. Η ρευστότητα, όμως, δεν μπορεί να είναι αρκετά μεγάλη, επειδή τότε η σκουριά θα



εκρέει από το μέτωπο της κόλλησης. Καλύτερα, όταν η επιφανειακή τάση είναι σχετικά μεγάλη, επειδή τότε διευκολύνεται η διατήρηση της σκουριάς επί της κόλλησης. Τέλος, η σκουριά πρέπει με ταχύ ρυθμό να στερεοποιείται, σχηματίζοντας φράγμα περιορισμού της ευαισθησίας του μετάλλου της κόλλησης, για την επίπλευση εκτός της σύνδεσης.

### 6.2.5 Επιλογή της χημικής σύστασης του μετάλλου της κόλλησης

Η δυνατότητα προσθήκης στο συλλίπασμα της επένδυσης επιλεγμένων από τον παραγωγό κραματικών προσθηκών αποτελεί μεγάλη διευκόλυνση στη μέθοδο ΜΜΑ. Ήδη αναφέρθηκε ότι η περιεκτικότητα του οξυγόνου στο λουτρό συγκόλλησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα αυτού του στοιχείου στο συλλίπασμα. Παρόμοια και το μαγγάνιο, προστιθέμενο στο συλλίπασμα με τη μορφή σιδηρομαγγανίου, μεταφέρεται στο τήγμα. Η πραγματική ποσότητα του μαγγανίου, η οποία θα παραμείνει στην κόλληση εξαρτάται μερικώς από τη συγκεντρώτητα του στο μέταλλο της κόλλησης αλλά και από τη σύσταση του συλλιπάσματος. Για κάθε σύνθεση του συλλιπάσματος και του εναποτιθέμενου υλικού, οι κραματικές προσθήκες διανέμονται λιγότερο ή περισσότερο, σε σταθερές αναλογίες. Εάν το στρώμα του συλλιπάσματος ή της σκουριάς είναι φτωχό σε μαγγάνιο, τότε το στοιχείο αυτό θα αρχίσει να εισέρχεται σ' αυτά από την κόλληση, μέχρι που να επέλθει ισορρόπηση. Απ' αυτό προκύπτει ότι είναι δυνατή η προσθήκη στοιχείων ή η αφαίρεση τους από την κόλληση, με απλή αλλαγή της σύστασης της επένδυσης.

Αυτόν τον τρόπο αλλαγής των στοιχείων μπορούμε να τον εκμεταλλευθούμε για τις απαιτούμενες ιδιότητες της κόλλησης. Στην παραγωγή των ηλεκτροδίων, το μέγεθος του πάχους της επένδυσης μπορεί να επιτευχθεί σε στενή περιοχή. Ο επαναλαμβανόμενος λόγος του όγκου του συλλιπάσματος προς τον πυρήνα επιτρέπει στον παραγωγό τον υπολογισμό της ποσότητας των αναγκαίων κραματικών προσθηκών, για την επίτευξη της σύστασης του εναποτιθέμενου υλικού. Κατά τον καθορισμό της σύστασης του εναποτιθέμενου υλικού, πρέπει να ληφθούν υπόψη τρεις παραδοχές: η προσθήκη κραματικών στοιχείων, η αποξείδωση και οι ακαθαρσίες.

### 6.2.6 Προσθήκη κραματικών στοιχείων

Εάν χρησιμοποιείται πυρήνας με σύσταση τέτοια που πρέπει να έχει η έτοιμη κόλληση, τότε πρέπει να φροντιστεί μόνο για να μην υπάρξει ελάττωση των στοιχείων κραμάτωσης στο συλλίπασμα. Τότε δε χρειάζεται προσθήκη κραματικών στοιχείων. Έτσι διενεργείται με τα μη σιδηρούχα μέταλλα και με μερικούς ανοξειδωτους χάλυβες. Τα ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων και ελαφρά κραματωμένων χαλύβων με πυρήνες που έχουν μέσα τους κραματικές προσθήκες είναι ακριβά, πρόθυμα, όμως, εισάγονται κραματικές προσθήκες στο λουτρό συγκόλλησης. Αυτό σημαίνει ότι ο πυρήνας του ηλεκτροδίου εκτελείται με ανθρακοχάλυβα χαμηλού άνθρακα, ενώ τα κραματικά στοιχεία – παράδειγμα το μαγγάνιο, το χρώμιο ή το μολυβδαίνιο - προστίθενται στο συλλίπασμα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ο παραγωγός των ηλεκτροδίων έχει μεγάλη ελευθερία - μπορεί να εκτελεί μεγάλη ποικιλία ηλεκτροδίων,

χρησιμοποιώντας το ίδιο σύρμα για πυρήνα. Αυτό είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο στην παραγωγή ηλεκτροδίων για τη συγκόλληση κραματωμένων χαλύβων, οι οποίοι πρέπει να έχουν ειδική σύσταση μόνο που η ζήτηση αυτών των ηλεκτροδίων δεν είναι μεγάλη.

### 6.2.7 Αποξείδωση

Εάν το λουτρό συγκόλλησης περιέχει μεγάλες ποσότητες οξυγόνου, τότε δημιουργούνται μικροί πόροι μονοξειδίου του άνθρακα οι οποίοι, όταν έρθουν σε επαφή με το μέταλλο τη στιγμή που στερεοποιείται, σχηματίζουν πόρους. Το αέριο αυτό προέρχεται από την αντίδραση μεταξύ του διαλυμένου οξυγόνου και του άνθρακα  $FeO+C \rightarrow Fe+CO$ . Το μονοξείδιο του άνθρακα δε διαλύεται στο χάλυβα, αλλά εκλύεται με μορφή πόρων. Εκτός του σχηματισμού του πορώδους, επίσης, επιβλαβής είναι και η απώλεια του άνθρακα, επειδή επιδρά στην αντοχή της κόλλησης. Αυτή η αντίδραση πρέπει να είναι περιορισμένη, πράγμα που στη μέθοδο *MMA* επιτυγχάνεται με την προσθήκη αποξειδωτικών στοιχείων στο συλλίπασμα της επένδυσης. Οι αποξειδωτές μπορούν να είναι στοιχεία με ισχυρό δεσμό με το οξυγόνο. Με την προσθήκη αποξειδωτικών στοιχείων στο λουτρό συγκόλλησης, το οξυγόνο αντιδρά μ' αυτά και όχι με τον άνθρακα. Το σχηματισμένο οξείδιο επιπλέει στην επιφάνεια του λουτρού και ενσωματώνεται με τη σκουριά. Στην περίπτωση των ηλεκτροδίων προοριζομένων για τη χειρωνακτική συγκόλληση χαλύβων, ο συνήθης αποξειδωτής είναι το πυρίτιο, το οποίο εισάγεται στο συλλίπασμα με μορφή σιδηροπυριτίου. Η αντίδραση αποξείδωσης στο λουτρό συγκόλλησης είναι  $2Fe+Si \rightarrow 2Fe+SiO_2$ . Κατά τη συγκόλληση άλλων μετάλλων, χρησιμοποιούνται άλλοι αποξειδωτές, με σκοπό την αφαίρεση του οξυγόνου, κατά τη συγκόλληση χαλκού, συνήθως προστίθεται ο φωσφόρος ή ο ψευδάργυρος. Αυτές οι προσθήκες δεν είναι απαραίτητο να εισάγονται στο συλλίπασμα, μπορούν να εμπεριέχονται στον πυρήνα του ηλεκτροδίου.

### 6.2.8 Ακαθαρσίες

Μέχρι τώρα εξετάσαμε την προσαγωγή των πρόσθετων στοιχείων στο συλλίπασμα, με σκοπό την επίτευξη βελτίωσης της ποιότητας της κόλλησης. Πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι το συλλίπασμα μπορεί, επίσης, να έχει και επιβλαβή στοιχεία. Ένα από τα κυριότερα επιβλαβή στοιχεία που μπορεί να βρίσκεται στο συλλίπασμα της επένδυσης των ηλεκτροδίων είναι το υδρογόνο. Το υδρογόνο προέρχεται από την επένδυση του ηλεκτροδίου, η οποία συνήθως περιέχει υγρασία εξίσου απορροφημένη ή από χημική σύνθεση. Για τη μείωση της υγρασίας, τα ηλεκτρόδια στεγνώνονται σε θερμοκρασίες και χρόνο ανάλογα με την κατηγορία και τον προορισμό των ηλεκτροδίων. Άλλες ακαθαρσίες που προσάγονται στο συλλίπασμα της επένδυσης είναι συνήθως, τυχαίες. Τα λίπη και έλαια μπορούν να μεταφερθούν κατά τη χρονική περίοδο αποθήκευσης. Όλες αυτές οι ουσίες μεταφέρονται από το συλλίπασμα στο τόξο και απ' αυτό στο λουτρό συγκόλλησης, από το οποίο απορροφώνται. Άρα, η επιμελής αποθήκευση και συμπεριφορά με τα ηλεκτρόδια είναι πολύ βασικός παράγοντας για την επίτευξη υψηλής ποιότητας κολλήσεων.

## 6.2.9 Ρόλος των διάφορων συστατικών του συλλιπάσματος

Κατά τη μελέτη της σύστασης του συλλιπάσματος, πρέπει να αναλυθεί μεγάλος αριθμός χημικών συνθέσεων. Στον *πίνακα 2* δίνονται οι χημικές συνθέσεις που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή των επενδεδυμένων ηλεκτροδίων προοριζομένων για τη συγκόλληση χαλύβων με τη μέθοδο *MMA* καθώς και ο ρόλος που αυτές πληρούν.

Συστατικό	Κύριοι λόγοι	Πρόσθετοι λόγοι
Οξείδιο του σιδήρου	σχηματισμός σκουριάς	σταθεροποιητής τόξου
Οξείδιο του τιτανίου	σχηματισμός σκουριάς	σταθεροποιητής τόξου
Οξείδιο του μαγνηίου	Συλλιπάσμα	-
Φθορίτης του ασβεστίου	σχηματισμός σκουριάς	Συλλιπάσμα
Πυριτικό κάλιο	σταθεροποιητής τόξου	Συνθετικό
Άλλα πυριτικά	σχηματισμός σκουριάς και σύνθεση	Συλλιπάσματα
Ανθρακικό ασβέστιο	δημιουργία αερίων	σταθεροποιητής τόξου
Άλλα ανθρακικά	δημιουργία αερίων	-
Κυτταρίνη	δημιουργία αερίων	-
Σιδηρομαγνήσιο	κραματικό συστατικό	Αποξειδωτικό
Σιδηροχρώμιο	κραματικό συστατικό	-
Σιδηροπυρίτιο	Αποξειδωτικό	-

*Προσοχή:* Τα συνδετικά εισάγονται για την απόδοση στην επένδυση κατάλληλης μηχανικής αντοχής και για την αύξηση της προσκόλλησης στον πυρήνα. Τα συλλιπάσματα εισάγονται για την επίτευξη επιφανειακής τάσης και ικανότητας διαβροχής του μετάλλου.

**Πίνακας 2** Συστατικά που περιέχονται στα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια για τη συγκόλληση *MMA* και ο ρόλος τους.

Για τις καθορισμένες τεχνολογικές συνθήκες συγκόλλησης συγκεκριμένης κατασκευής, οι παράμετροι συγκόλλησης αποτελούν για το χειριστή αρχικά δεδομένα, στα οποία προσαρμόζει τις δικές του εμπειρίες συγκόλλησης και τις ικανότητες του. Οι βασικοί παράμετροι συγκόλλησης με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο είναι το είδος και η ένταση συγκόλλησης, η τάση του τόξου, η ταχύτητα συγκόλλησης, η διάμετρος του ηλεκτροδίου, η θέση (η κλίση) του ηλεκτροδίου ως προς τη συγκυλλούμενη σύνδεση.

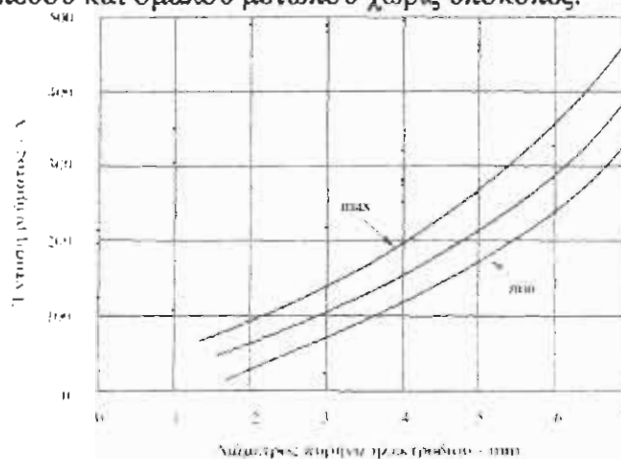
## 6.3 Παράμετροι συγκόλλησης

### 6.3.1 Ένταση ρεύματος συγκόλλησης

Η ένταση του ρεύματος συγκόλλησης συνήθως επιλέγεται βάσει των δεδομένων από καταλόγους των παραγωγών ηλεκτροδίων ή σύμφωνα με εμπειρικούς τύπους. Η παράμετρος αυτή είναι η πλέον αποφασιστική για το μέγεθος της θερμικής ενέργειας του τόξου, άρα για τη διεισδυτικότητα και την ταχύτητα τήξης. Η επιλογή της έντασης του ρεύματος συγκόλλησης εξαρτάται από το είδος του συγκυλλούμενου υλικού και του ηλεκτροδίου, τη διάμετρο του πυρήνα, το είδος ρεύματος, τη θέση συγκόλλησης καθώς και από την τεχνική εναπόθεσης των διάφορων κορδονιών της κόλλησης, *πίνακας 3* και *πίνακας 4*, *σχήμα 5*.

### 6.3.2 Τάση του τόξου

Η τάση του τόξου είναι αναλογική προς το μήκος του τόξου και ασκεί φανερή επίδραση στο χαρακτήρα μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο, στην ταχύτητα συγκόλλησης και στην αποδοτικότητα εναπόθεσης του συγκολλητικού υλικού. Με την αύξηση της τάσης του τόξου αυξάνεται και η ενέργεια του και, στην πραγματικότητα, ο όγκος του λουτρού της κόλλησης. Ιδιαίτερα καθαρά αυξάνεται το πλάτος και το μήκος του λουτρού. Όταν το τόξο έχει αρκετά μεγάλο μήκος, η θερμότητα άγεται εντατικά από την ατμόσφαιρα, ενώ η διαρροή του μετάλλου, μεταφερόμενου από το ηλεκτρόδιο στο λουτρό συγκόλλησης, διασκορπάζεται σημαντικά. Συγχρόνως, ελαττώνεται και η ταχύτητα συγκόλλησης, επειδή η εναπόθεση του απαιτούμενου εναποτιθέμενου υλικού γίνεται πιο αργά. Το μεγάλο μήκος του τόξου είναι, επίσης, πιο ευαίσθητο στο φαινόμενο του φυσήματος του τόξου από ό,τι το μικρό. Το μήκος του τόξου ρυθμίζεται από το χειριστή και εξαρτάται από τις ικανότητες του. Η επιλογή της τάσης του τόξου εξαρτάται από το είδος του ηλεκτροδίου, τη θέση συγκόλλησης, το είδος και την τάση του ρεύματος καθώς και από την τεχνική εναπόθεση των κορδονιών της κόλλησης *πίνακας 3*. Κατά τη συγκόλληση με τη μέθοδο *MMA* σε εξαναγκασμένες θέσεις, απαιτείται όσο το δυνατόν μικρότερο τόξο. Στις αυχενικές κολλήσεις, ιδιαίτερα στο πρώτο στρώμα διείσδυσης, στην περίπτωση πολλαπλών στρώσεων, υποδεικνύεται η εναπόθεση να διενεργείται με σχετικά χαμηλή τάση του τόξου, ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης και, συγχρόνως, μεγαλύτερες ταχύτητες συγκόλλησης. Τα στρώματα του μετώπου, στην περίπτωση των αυχενικών κολλήσεων, όπως και των μετωπικών, υποδεικνύεται εναπόθεση με υψηλότερες τάσεις του τόξου, με σκοπό την επίτευξη επίπεδου και ομαλού μετώπου χωρίς υποκοπές.

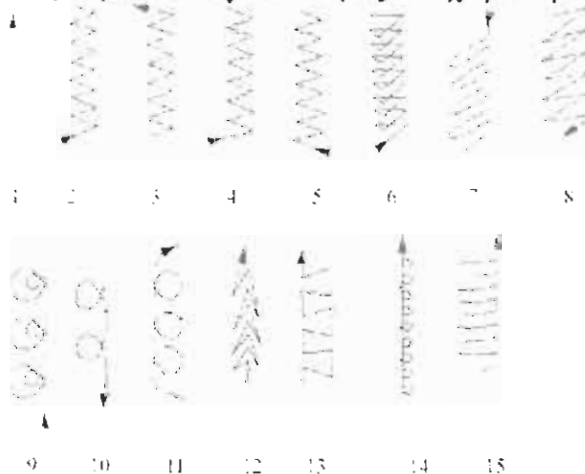


**Σχήμα 5** Προτεινόμενες περιοχές έντασης ρεύματος συγκόλλησης για χαλύβδινα επενδεδυμένα ηλεκτρόδια με διάφορες διαμέτρους.

### 6.3.3 Ταχύτητα συγκόλλησης

Η ταχύτητα συγκόλλησης είναι ταχύτητα μετατόπισης του ηλεκτροδίου, αλλά και ταχύτητα εκτέλεσης ενός μέτρου της σύνδεσης και τότε συσχετίζονται όλοι οι βοηθητικοί χρόνοι. Η ταχύτητα μετατόπισης του ηλεκτροδίου έχει σημασία μόνο κατά τη γραμμική κίνηση του ηλεκτροδίου, που χρησιμοποιείται

για την εκτέλεση των στρώσεων στη ρίζα, επειδή οι υπόλοιπες στρώσεις εκτελούνται με διάφορες μη γραμμικές κινήσεις, **σχήμα 6**. Η ταχύτητα προώθησης του τόξου κατά μήκος της σύνδεσης εξαρτάται από: το είδος του ρεύματος, την πολικότητα και την ένταση την τάση του τόξου, τη θέση συγκόλλησης, την ταχύτητα τήξης του ηλεκτροδίου το πάχος του συγκολλούμενου υλικού και τη μορφή της σύνδεσης, την ακρίβεια τοποθέτησης της σύνδεσης, τις απαιτούμενες κινήσεις του άκρου του ηλεκτροδίου. Η ταχύτητα συγκόλλησης πρέπει να εκλέγεται έτσι, ώστε το τόξο συγκόλλησης να προπορεύεται ελάχιστα του λουτρού της κόλλησης. Η περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης οδηγεί στη στένωση του λουτρού της κόλλησης και την αύξηση του βάθους διείσδυσης. Η υπέρβαση της επιτρεπόμενης ταχύτητας, χαρακτηριστική για δεδομένο τύπο και διάμετρο ηλεκτροδίου, παραμέτρους ρεύματος καθώς και θέσεις συγκόλλησης, οδηγεί στη μείωση του βάθους διείσδυσης και την εμφάνιση υποκοπών, ατελειών τήξης, ανωμαλιών της επιφάνειας του μετώπου και του πορώδους της κόλλησης. Η πάρα πολύ μικρή ταχύτητα συγκόλλησης αποτελεί το αίτιο της ρηχής διείσδυσης, της διαπλάτυνσης του μετώπου και της κύρτωσης του. Η συγκόλληση σε εξαναγκασμένες θέσεις, εκτός της κατακόρυφης θέσης από πάνω προς τα κάτω, πετυχαίνεται συνήθως με μικρές ταχύτητες, σύνθετες κινήσεις του άκρου του ηλεκτροδίου και μικρό όγκο του λουτρού της κόλλησης. Σ' αυτή την περίπτωση, η ταχύτητα συγκόλλησης ρυθμίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ικανότητες του χειριστή.



**Σχήμα 6** Προτεινόμενες κινήσεις τον άκρου τον ηλεκτροδίου κατά τη συγκόλληση στρώσεων διείσδυσης 1, 10, 11, 12, 13, 14, 15 καθώς και στρώσεων αναπλήρωσης και μετωπικών 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.

#### 6.3.4 Διάμετρος επενδεδυμένου ηλεκτροδίου

Η διάμετρος του επενδεδυμένου ηλεκτροδίου επηρεάζει αποφασιστικά την πυκνότητα του ρεύματος συγκόλλησης και εξ' αυτού τη μορφή του κορδονίου της κόλλησης, το βάθος διείσδυσης και τη δυνατότητα συγκόλλησης στις εξαναγκασμένες θέσεις. Η αύξηση της διαμέτρου του ηλεκτροδίου, με σταθερή ένταση του ρεύματος, οδηγεί στη μείωση του βάθους διείσδυσης και στην αύξηση του πλάτους της κόλλησης. Τα ηλεκτρόδια με μεγαλύτερη διάμετρο χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση ελασμάτων μεγάλου πάχους αλλά και για τη συγκόλληση με μεγάλες ταχύτητες. Το είδος των συνδέσεων και ο τρόπος

προετοιμασίας των άκρων των ελασμάτων προς συγκόλληση επιδρούν, επίσης, αποφασιστικά στην επιλογή των διαμέτρων των ηλεκτροδίων. Η επιλογή της διαμέτρου του ηλεκτροδίου εξαρτάται κυρίως από το πάχος του συγκολλούμενου υλικού, τη θέση συγκόλλησης, τον τρόπο προετοιμασίας και το είδος της σύνδεσης **πίνακας 3, πίνακας 4, πίνακας 5, πίνακας 6**. Από οικονομικής άποψης, επιβάλλεται η χρησιμοποίηση ηλεκτροδίων με όσο το δυνατόν μεγαλύτερες διαμέτρους, ενώ από την άποψη της ποιότητας συγκόλλησης

Πάχος της αυχενικής κόλλησης [mm]	Διάμετρος ηλεκτροδίου [mm]	Ένταση ρεύματος [A]	Ταχύτητα συγκόλλησης [m/h]	Χρόνος τήξης ενός ηλεκτροδίου [m/h]	Μήκος κορδονίου από ένα ηλεκτρόδιο [m]
2.5	4	190	24	70	0.47
3	4	185	17	70	0.33
3	5	260	26	80	0.59
4	5	240	14	86	0.34
4.5	5	240	13	90	0.32
5	5	240	11	90	0.26

Προσοχή: Η συγκόλληση πετυχαίνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα και με τάση OVC\* · 70 V ή με συνεχές ρεύμα θετικής πολικότητας. Τα ηλεκτρόδια της κλάσης E5143B9 σύμφωνα με τους κανονισμούς ISO 2560 και E7016 σύμφωνα με τους κανονισμούς AWS A5. 1-69. \*OVC - τάση ανοιχτού κυκλώματος.

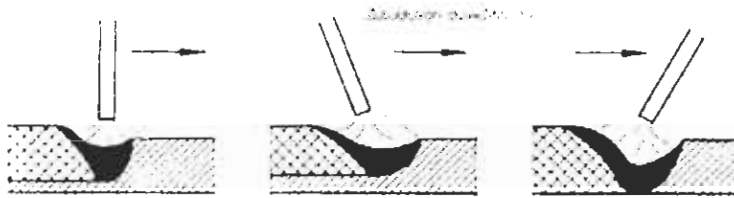
Πάχος της κόλλησης. [mm]	Διάμετρος ηλεκτροδίου [mm]	Ένταση ρεύματος, [A]	Ταχύτητα συγκόλλησης [m/h]	Μήκος κορδονίου από ένα ηλεκτρόδιο [m]
3	4	200	31	0.71
3.5	4	220	26	0.55
	5	310	33	0.83
4	4	320	20	0.42
	5	370	29	0.66
4.5	5	320	36	0.59
	5.6	370	29	0.68
5	6	380	30	0.77
	5	320	20	0.44
5.5	5.6	390	24	0.53
	6	410	26	0.61
6	5.6	400	21	0.46
	6	410	22	0.52
6	6	410	20	0.46

Προσοχή: Η συγκόλληση με εναλλασσόμενο ρεύμα και τάση ανοιχτού κυκλώματος (OVC)  $U_o \cdot 50[V]$  ή με συνεχές ρεύμα θετικής πολικότητας. Τα ηλεκτρόδια κλάσης ESI ZRR 18031 σύμφωνα με τους κανονισμούς ISO 2560 και E7024 σύμφωνα με τους κανονισμούς AWS A5.1-69

**Πίνακας 6** Παράμετροι συγκόλλησης σε πλευρική θέση αυχενικών κολλήσεων, συνδέσεων ταν, χαλύβδινων ελασμάτων με  $R_m > 440$  και κοινών ναυπηγικών λασμάτων κλάσης A και D, ηλεκτρόδια ρουτιλίου υψηλής απόδοσης, με ωφελιμότητα περίπου 180%.

και κυρίως με παραμέτρους όπως: η συγκολλητικότητα του υλικού, η ορθολογική μορφή της κόλλησης και οι συνθήκες συγκόλλησης, επιβάλλεται ο περιορισμός της διαμέτρου του επενδεδυμένου ηλεκτροδίου και της γραμμικής ενέργειας συγκόλλησης. Η κλίση του ηλεκτροδίου ως προς τη σύνδεση επιτρέπει τη διαμόρφωση της κόλλησης, του βάθους διεύθυνσης, του πλάτους του μετώπου και του ύψους της ενίσχυσης **σχήμα 7, πίνακας 7**. Η κλίση του ηλεκτροδίου με αντίθετη διεύθυνση προς τη διεύθυνση της συγκόλλησης προξενεί την πίεση στο ρευστό μέταλλο του λουτρού προς τα εμπρός και απ' αυτό μείωση του βάθους

διείσδυσης, ενώ αυξάνεται το ύψος και το πλάτος του μετώπου. Η κλίση του ηλεκτροδίου προς τη διεύθυνση της συγκόλλησης προξενεί την πίεση του ρευστού μετάλλου του λουτρού προς τα πίσω, ενώ αυξάνεται το βάθος διείσδυσης και μειώνεται ελάχιστα το πλάτος και το ύψος του μετώπου. Οι εγκάρσιες εκκρεμείς κινήσεις του ηλεκτροδίου διευκολύνουν την αύξηση του πλάτους του κορδονίου, του βάθους διείσδυσης προς τα τοιχώματα του αύλακα της κόλλησης, αλλά, συγχρόνως, προξενούν τη μείωση του βάθους διείσδυσης στην προηγούμενη στρώση. Μεταβάλλονται, επίσης, και οι συνθήκες κρυστάλλωσης της κόλλησης και οι δομικές μεταβολές της ζώνης επηρεαζόμενη θερμικά (ΖΕΘ). Ανάλογα με το είδος της σύνδεσης, τη θέση συγκόλλησης ή τη διάμετρο του ηλεκτροδίου, γίνεται η αξιοποίηση της κατάλληλης επιλογής των ταλαντώσεων του ηλεκτροδίου. Συνήθως η συχνότητα είναι 10-60 ταλαντώσεις.



**Σχήμα 7** Επίδραση της κλίσης τον επενδεδυμένου ηλεκτροδίου στη διαμόρφωση της κόλλησης. α κάθετη θέση τον ηλεκτροδίου ως προς τη σύνδεση, β κλίση με αντίθετη διεύθυνση προς τη διεύθυνση συγκόλλησης, γ κλίση με σύμφωνη διεύθυνση προς τη διεύθυνση συγκόλλησης.

Τύπος κόλλησης	Θέση συγκόλλησης	Κλίση ηλεκτροδίου ως προς τα επίπεδα της σύνδεσης	Κλίση του ηλεκτροδίου ως προς τον κάθετο άξονα της κόλλησης	Το ηλεκτρόδιο διευθυνόμενο ως προς τη διεύθυνση συγκόλλησης
Μετωπική	Επίπεδη	90°	5-10° ή 10-30°*	Αντίθετα
Μετωπική	Τοίχου	80-100°	5-10°	Αντίθετα
Μετωπική	Κατακόρυφη από κάτω προς τα άνω	90°	5-10°	Σύμφωνα
Μετωπική	Ουρανού	90°	5-10°	Αντίθετα
Αυχενική	Πλευρική	45°	5-10° ή 10-300°*	Αντίθετα
Αυχενική	Κατακόρυφη από κάτω προς τα άνω	35-55°	5-10°	Σύμφωνα
Αυχενική	Ουρανού	30-45°	5-10°	Αντίθετα

Προσοχή: \* Προτεινόμενη γωνία κλίσης για επενδεδυμένα ηλεκτρόδια υψηλής απόδοσης με σιδηρόσκληση στην επένδυση.

**Πίνακας 7** Προτεινόμενες θέσεις των ηλεκτροδίων ως προς τη σύνδεση και τεχνική συγκόλλησης.

## Κεφάλαιο 7

### 7. Συγκόλληση τόξου στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων

Η συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη περιοχή χρησιμοποίησης των συγκολλήσεων. η μέθοδος αυτή δίνει καλά αποτελέσματα κατά τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων, χρησιμοποιούμενων στην κατασκευή μηχανών, στις μεταλλικές κατασκευές, στην κατασκευή πλοίων, γεφυρών, λεβήτων δεν έχει όμως καλά αποτελέσματα κατά τη συγκόλληση κραματωμένων χαλύβων, που περιέχουν προσθήκες, οι οποίες δυσχεραίνουν τη συγκόλληση, όπως, επίσης, και κατά τη συγκόλληση αλουμινίου και άλλων μη σιδηρούχων μετάλλων, που απαιτούν περισσότερο αποτελεσματική προστασία από την επιβλαβή επίδραση του ατμοσφαιρικού αέρα παρά τη μεγάλη πρόοδο στην παραγωγή επενδεδυμένων ηλεκτροδίων, δεν είναι πάντοτε δυνατό, με την επιλογή κατάλληλης επένδυσης, να αποφευχθεί το κάψιμο μερικών πολύτιμων προσθηκών των κραματωμένων χαλύβων, που επιπλέον στη σκουριά, χειροτερεύοντας σημαντικά τις φυσικές ή τις χημικές ιδιότητες των συγκολλούμενων συνδέσεων. Τα δημιουργούμενα από την επένδυση αέρια έχουν αρκετά χαμηλή πίεση, για να προστατεύσουν το τηκόμενο μέταλλο από τα δυνατά ρεύματα αέρος, που δημιουργούνται φυσιολογικά εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στο τόξο και την περιβάλλουσα ατμόσφαιρα. βάσει αυτών των δυσκολιών αναπτύχθηκαν οι μέθοδοι συγκόλλησης τόξου με προστατευτικά αέρια, που εμποδίζουν την εισχώρηση του ατμοσφαιρικού αέρα με τη ροή αερίου με πίεση σημαντικά υπερβαίνουσα την ατμοσφαιρική πίεση. τα προστατευτικά αέρια που βρήκαν χρησιμότητα γι' αυτές τις μεθόδους είναι: τα αδρανή αέρια αργό, ήλιο, το διοξείδιο του άνθρακα και το υδρογόνο. Ένα από τα πολλά πλεονεκτήματα της συγκόλλησης με προστατευτικά αέρια είναι η εξάλειψη της καλυπτόμενης σκουριάς κάθε κορδονίου με τη συνήθη χειρωνακτική συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο. Το διερχόμενο από το ακροφύσιο αέριο δεν προστατεύει μόνο το λουτρό συγκόλλησης αλλά και τις συνορεύουσες ζώνες του μητρικού υλικού. αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό κατά τη συγκόλληση υλικών, ισχυρά αντιδρώντων (σε θερμή κατάσταση) με τον αέρα, όπως οι κραματωμένοι χάλυβες, τα ελαφρά μέταλλα, το τιτάνιο

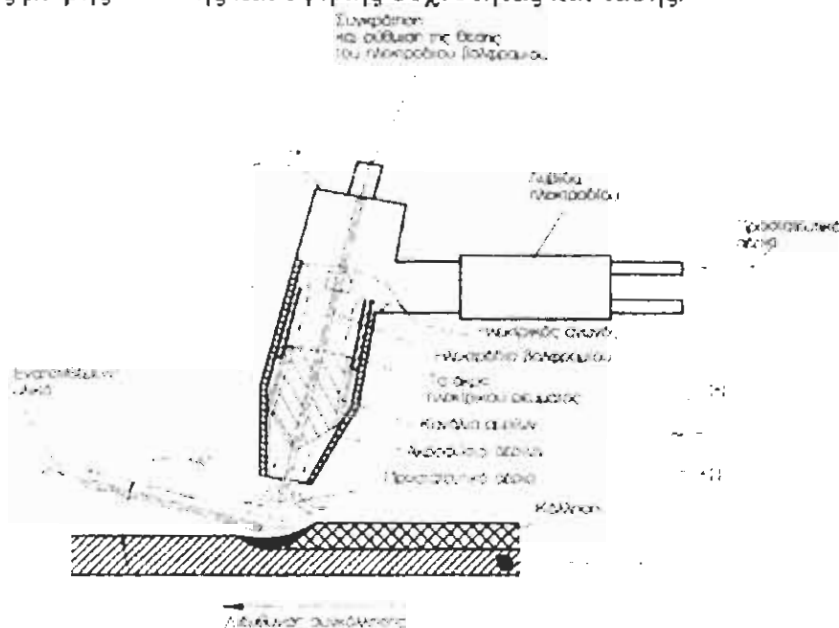
#### 7.1 Συγκόλληση τόξου με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο σε προστατευτική ατμόσφαιρα αερίων, με τη μέθοδο GTA (TIG)

##### 7.1.1 Χαρακτηριστικά της μεθόδου

Η συγκόλληση τόξου με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων, περιγραφόμενη έχει την ακρωνύμια *TIG* ή *GTA*. Η ακρωνύμια *TIG-Tungsten Inert Gas* συμπεριλαμβάνει μόνο τα ευγενή αέρια, ενώ η ακρωνύμια *GTA-Gas Tungsten Arc* στην περιλαμβάνει τη συγκόλληση με όλα τα είδη προστατευτικών αερίων, αδρανών και δραστικών. Η συγκόλληση *GTA* είναι μία από τις βασικές διαδικασίες δημιουργίας κατασκευών, ιδιαίτερα με τους κραματωμένους και τους ειδικούς χάλυβες, τα κράματα νικελίου, αλουμινίου, μαγνησίου, τιτανίου και με άλλα ενεργά και πυρίμαχα μέταλλα καθώς και



κράματα με μεγάλο εύρος παχών. Η συγκόλληση με τη μέθοδο *GTA* μπορεί να διενεργηθεί με συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα, χειρωνακτικά, ημιαυτόματα και αυτόματα, σε συνθήκες μηχανουργικές και συναρμολόγησης, σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης. Οι μηχανές για τη συγκόλληση με τη μέθοδο *GTA* είναι φθηνές και εύκολες στο χειρισμό και με τη φθίνουσα στατική χαρακτηριστική, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως πηγή ρεύματος για τη χειρωνακτική συγκόλληση με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο. Κατά τη διαδικασία συγκόλλησης τόξου με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου, η τήξη πετυχαίνεται με την τήξη των συγκολλούμενων αντικειμένων και του εναποτιθέμενου υλικού *σχήμα 1*. η συγκόλληση πετυχαίνεται χωρίς πρόσθετο υλικό ή με πρόσθετο τηκόμενο υλικό. Το λουτρό του ρευστού μετάλλου σχηματίζεται χωρίς τη συμμετοχή συλλυπασμά-των, άρα είναι απαλλαγμένο από μη μεταλλικά εγκλείσματα στην κόλληση και στην επιφάνεια της, ενώ η τήξη του μητρικού μετάλλου και του εναποτιθέμενου υλικού πραγματοποιείται χωρίς αλλαγές στη χημική του σύνθεση. συγχρόνως δεν έχει πιτσιλίσματα του μετάλλου, τυπικό άλλων διαδικασιών συγκόλλησης τόξου, και η δυνατότητα προσθήκης του εναποτιθέμενου υλικού έξω από το τόξο επιτρέπει να γίνει ανεξάρτητα η ρύθμιση της γραμμικής ενέργειας του τόξου και η ποσότητα προσθήκης του εναποτιθέμενου υλικού στο χώρο συγκόλλησης. η διέλευση του ρεύματος στο τόξο γίνεται στο ιονισμένο αέριο, ενώ οι κύριοι μεταφορείς του ρεύματος είναι τα εκπεμπόμενα από τα άτομα του προστατευτικού αερίου ηλεκτρόνια. το άναμμα του τόξου διενεργείται με μικρής διάρκειας βραχυκυκλώματα του μη τηκόμενο ηλεκτροδίου με το αντικείμενο ή σε ειδικό πλακίδιο εκκίνησης και με γρήγορη επαναφορά. δεύτερος τρόπος για το άναμμα του τόξου είναι η χρησιμοποίηση βοηθητικού τόξου ανάμεσα στο συγκολλούμενο αντικείμενο και στο ηλεκτρόδιο, που δημιουργείται από το αποτέλεσμα της ροής ρεύματος μικρής έντασης και υψηλής συχνότητας και τάσης.



**Σχήμα 1** Διαδικασία χειρωνακτικής συγκόλλησης *GTA* με τη χρησιμοποίηση πρόσθετου υλικού.

### 7.1.2 Παράμετροι συγκόλλησης

Οι βασικοί παράμετροι συγκόλλησης με τη μέθοδο *GTA* είναι: το είδος της έντασης ρεύματος, η τάση του τόξου, η ταχύτητα συγκόλλησης, το είδος και η ένταση ροής του προστατευτικού αερίου, η διάμετρος (διαστάσεις) του εναποτιθέμενου υλικού. Η συγκόλληση με τη μέθοδο *GTA* διενεργείται με συνεχές και εναλλασσόμενο ρεύμα. Η συγκόλληση με συνεχές ρεύμα μπορεί να έχει πορεία με θετική και αρνητική πολικότητα. Όταν το ηλεκτρόδιο είναι συνδεδεμένο με το θετικό πόλο (θετική πολικότητα), η έντονη ροή των ηλεκτρονίων στο ηλεκτρόδιο, με την κρούση τους στην πυρωμένη επιφάνεια του άκρου, προξενεί σημαντική θέρμανση, περιορίζοντας, σε μεγάλο βαθμό, την επιτρεπόμενη ένταση του ρεύματος συγκόλλησης. Γι' αυτό για να μεταφερθεί η ένταση ρεύματος με θετική πολικότητα, το ηλεκτρόδιο πρέπει να έχει μεγαλύτερη διάμετρο απ' ό,τι κατά τη σύνδεση του με τον αρνητικό πόλο **πίνακας 1**. Η σύνδεση του ηλεκτροδίου με τον αρνητικό πόλο (αρνητική πολικότητα) γίνεται κατά τη συγκόλληση στην ατμόσφαιρα αργού ή ηλίου συνήθως όλων των μετάλλων και κραμάτων τους, με εξαίρεση τα λεπτά ελάσματα του αλουμινίου και των κραμάτων του καθώς και τα κράματα μαγνησίου **Πίνακας 2, Πίνακας 3**.

Διάμετρος ηλεκτροδίου [mm]	DC(-)	DC(+)	Εναλλασσόμενο ρεύμα με τη σταθερά συνιστώσα			Εναλλασσόμενο ρεύμα χωρίς τη σταθερά συνιστώσα		
	W καθώς και W+Th	W καθώς και W+Th	W	W+Th	W'	W	W+Th	W'
0.5	5-20	-	5-15	5-10	-	10-20	5-20	10-20
1.0	15-80	-	10-60	15-80	10-80	10-30	20-60	20-60
1.6	70-150	10-20	50-100	70-150	50-150	30-80	60-120	30-120
2.0	150-250	15-30	100-160	140-235	100-235	60-130	100-180	60-180
3.2	250-400	25-40	150-210	225-325	150-325	100-180	160-250	100-250
4.0	400-500	40-55	200-275	300-400	200-400	160-240	200-320	160-320
4.8	500-750	55-80	250-350	400-500	250-500	190-300	290-390	190-390
6.4	750-1000	80-125	325-50	500-630	325-630	250-630	250-525	250-525

\*DC (-) η συγκόλληση με συνεχές ρεύμα, με αρνητική πολικότητα, DC (+) η συγκόλληση με συνεχές ρεύμα, με θετική πολικότητα.

**Πίνακας 1** Προτεινόμενες περιοχές έντασης ρεύματος με τη μέθοδο *GTA* στην ατμόσφαιρα αργού για ηλεκτρόδια με καθαρό βολφράμιο και για ηλεκτρόδια με κραματωμένο βολφράμιο με θόριο, για διάφορα είδη ρεύματος συγκόλλησης.

Στην περίπτωση συγκόλλησης αλουμινίου και μαγνησίου, απαραίτητη είναι η αφαίρεση του πυρίμαχου στρώματος των οξειδίων από την επιφάνεια της περιοχής συγκόλλησης του αντικειμένου, αλλά τότε απαιτείται θετική πολικότητα του ηλεκτροδίου, στην οποία συμβαίνει ο καθοδικός καθαρισμός. Άλλη λύση είναι η χρησιμοποίηση συνεχούς ρεύματος με αρνητική πολικότητα (αρνητικός πόλος στο ηλεκτρόδιο) και με πάρα πολύ μεγάλη ακρίβεια ο μηχανικός ή ο χημικός καθαρισμός της σύνδεσης αμέσως προ της συγκόλλησης. Από την άποψη της δυνατότητας επίτευξης σημαντικού βάρους διείσδυσης και μεγάλης ταχύτητας συγκόλλησης, στην περίπτωση σύνδεσης ελασμάτων πάχους πάνω από 3.2[mm], προτείνεται η συγκόλληση με συνεχές ρεύμα και αρνητική πολικότητα στην

ατμόσφαιρα αργού, με μικρό τόξο κάτω από  $1.5[mm]$ . Στην ατμόσφαιρα με καθαρό ήλιο, και με τη διατήρηση μικρού τόξου, κάτω από  $3.0[mm]$ , παρέχεται η δυνατότητα συγκόλλησης αλουμινίου και μαγνησίου και των κράματων τους, με συνεχές ρεύμα, με αρνητική πολικότητα (στο ηλεκτρόδιο αρνητικός πόλος), χωρίς μηχανικό ή χημικό καθαρισμό του στρώματος των οξειδίων.

Διάμετρος ηλεκτροδίου, [mm]	Γωνία του κώνου του άκρου του ηλεκτροδίου	Διάμετρος στόμωσης της κορυφής του άκρου [mm]	Περιοχή των εντάσεων ρεύμα της συγκόλλησης,	Περιοχή των εντάσεων παλμικού ρεύματος
1.0	12°	0.125	2-15	2-25
1.0	20°	0.25	5-30	5-60
1.6	25°	0.50	8-50	8-100
1.6	30°	0.80	10-70	10 - 140
2.4	35°	0.80	12-90	12- 100
2.4	45°	1.10	15-150	15-250
3.2	60°	1.10	20-200	20-300
5.2	90°	1.50	25-250	25-350

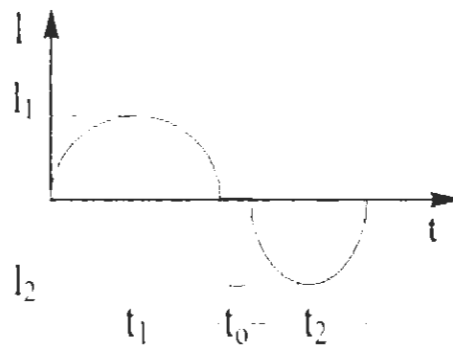
\*Το ηλεκτρόδιο με καθαρό βολφράμιο και βολφράμιο με θόριο DC(-) η συγκόλληση με συνεχές ρεύμα, με αρνητική

**Πίνακας 2** Προτεινόμενες περιοχές των εντάσεων ρεύματος συγκόλλησης με τη μέθοδο GTA καθώς και οι διαστάσεις του κωνικού άκρου τον κραματωμένου ηλεκτροδίου  $W+Th$ ,  $W+Ce$ ,  $W+La$ , κατά τη συγκόλληση με συνεχές ρεύμα, με αρνητική πολικότητα στην ατμόσφαιρα του αργού.

Τύπος συγκολλούμενου υλικού	Πάχος σύνδεσης, [mm]	Είδος ρεύματος συγκόλλησης	Τύπος μη τηκόμενου ηλεκτροδίου	Είδος αερίου προστασίας
Αλουμίνιο	Όλα	AC	Καθαρό $W$ ή $W+ZrO_2$	$Ar$ ή $Ar+He$
	πάνω από 3.2	DC(-)	$W+ThO_2$	$Ar+He$ ή $Ar$
	κάτω από 3.2	DC (+)	$W+ThO_2$ ή $W+ZrO_2$	$Ar$
Χαλκός και κράματα του	Όλα	DC (-)	Καθαρό $W$ ή $W+ZrO_2$	$He$
	κάτω από 3.2	AC	Καθαρό $W$ ή $W+ZrO_2$	$Ar$
Κράματα μαγνησίου	Όλα	AC, DC (-)	Καθαρό $W$ ή $W+ZrO_2$	$Ar$
	κάτω από 3.2	DC (+)	$W+ThO_2$ ή $W+ZrO_2$	$Ar$
Νικέλιο και κράματα του	Όλα	DC (-)	$W+ThO_2$	$Ar$
Χάλυβες C-Mn και ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες	Όλα	DC (-)	$W+ThO_2$ ή $W+ZrO_2$	$Ar$ ή $Ar+He$
	κάτω από 3.2	AC	Καθαρό $W$ ή $W+ZrO_2$	$Ar$
Χάλυβες ανθεκτικοί στη διάβρωση	Όλα	DC (-)	$W+ThO_2$	$Ar$ ή $Ar+He$
	κάτω από 3.2	AC	Καθαρό $W$ ή $W+ZrO_2$	$Ar$
Τιτάνιο	όλα	DC (-)	$W+ThO_2$	$Ar$

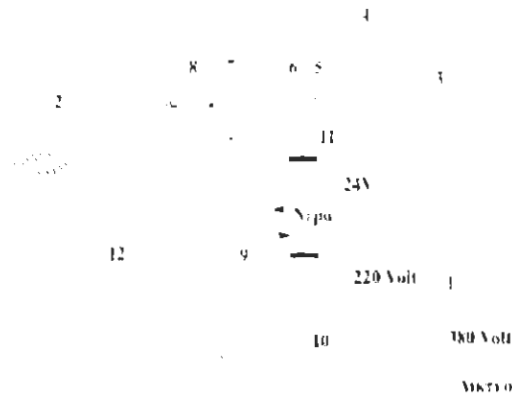
**Πίνακας 3** Προτεινόμενο είδος ρεύματος συγκόλλησης με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο, στην ατμόσφαιρα προστατευτικού αερίου, με τη μέθοδο GTA για διάφορα μέταλλα και κράματα.

Η συγκόλληση με εναλλασσόμενο ρεύμα επιτρέπει την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της συγκόλλησης με συνεχές ρεύμα και θετική πολικότητα (φαινόμενο διάσπασης του στρώματος οξειδίων επί της επιφανείας), χωρίς ειδικούς περιορισμούς του



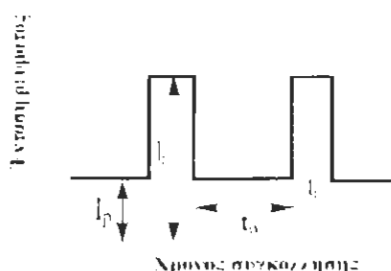
**Σχήμα 2** Παραμόρφωση της ημιτονοειδούς του εναλλασσόμενου ρεύματος με τη συνιστώσα του συνεχούς ρεύματος κατά τη συγκόλληση με τη μέθοδο GTA ελαφρών μετάλλων.

ρεύματος, που απαιτούνται κατά τη συγκόλληση με συνεχές ρεύμα, με θετική πολικότητα. Κατώτερη είναι, όμως, η σταθερότητα του τόξου και, επιπλέον, εμφανίζεται το φαινόμενο ανόρθωσης του ρεύματος **σχήμα 2**. Στο αναμμένο τόξο στην ατμόσφαιρα αδρανών αερίων, το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται με μεγαλύτερη ευκολία από το αρνητικό ηλεκτρόδιο στο θετικό αντικείμενο, επειδή το βολφράμιο έχει σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία απ' ό,τι το συγκολλούμενο μέταλλο και, έτσι, εκπέμπει ευκολότερα τα ηλεκτρόνια. Η ανόρθωση του εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να φτάσει σε τέτοια κατάσταση, που θα παύσει να γίνεται η διέλευση του ρεύματος με θετική πολικότητα του ηλεκτροδίου. Κατά τη συγκόλληση αλουμινίου η μορφή του ρεύματος παραμορφώνεται με τη σταθερά συνιστώσα του συνεχούς ρεύματος **σχήμα 2**. Ο χρόνος  $t_1$  και η ένταση  $I_1$  του ρεύματος με θετική τιμή έχουν σημαντικά μεγαλύτερες τιμές από τις αντίστοιχες  $t_2$  και  $I_2$  του ρεύματος με τιμή αρνητική, ενώ ο χρόνος  $t_0$  είναι τόσο μεγάλος, που το τόξο δεν μπορεί να ανάψει ξανά με μειωμένη ένταση. Για το λόγο αυτό η συσκευή συγκόλλησης είναι εφοδιασμένη με συστοιχία πυκνωτών ή με συσσωρευτή, με σκοπό την εξάλειψη αυτών των αρυθμιών, καθώς και με ιονιστή ο οποίος προξενεί το άναμμα του τόξου με μικρής διάρκειας παλμούς και με πάρα πολύ μεγάλη τάση τη στιγμή διέλευσης των ημιτονοειδών του ρεύματος από το μηδέν. Η διάταξη συγκόλλησης με τη μέθοδο *GTA* φαίνεται στο **σχήμα 3**. Ο ιονιστής *I0* τίθεται σε λειτουργία και η διέλευση του ρεύματος στο ηλεκτρόδιο γίνεται με το διακόπτη *I1*, ενώ η ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα *7* επιτρέπει τη ροή του αργού. Μετά το πέρας της συγκόλλησης, ελευθερώνοντας το διακόπτη *I1*, διακόπτεται η παροχή ρεύματος, ενώ το αργό ρέει για μερικά δευτερόλεπτα, ψύχοντας το ηλεκτρόδιο και προστατεύοντας την οξειδωσή του. Ο χρόνος ροής του αερίου, μετά το σβήσιμο του τόξου, μπορεί να ρυθμισθεί στα όρια από  $0-60$  [sec].



**Σχήμα 3** Διάταξη για τη συγκόλληση GTA: 1 μηχανή συγκόλλησης, 2 λαβίδα, 3 φιάλη αργού, 4 μανομετροεκτονωτής, 5 μετρητής, 6 δικλίδα ρύθμισης του αερίου, 7 ηλεκτρομαγνητική δικλίδα, 8 δοχείο καθυστέρησης του κλεισίματος της ροής του αργού.

Η συσκευή είναι εφοδιασμένη με όργανο σηματοδότησης, σε περίπτωση που είναι ανεπαρκής η ροή του ύδατος ψύξης. Ο μετρητής παροχής 5 και ο μανομετροεκτονωτής 4 είναι συναρμολογημένοι στον ίδιο αγωγό. Η συγκόλληση με παλμικό συνεχές ρεύμα συνίσταται στην παλμική προσαγωγή της θερμότητας στο τόξο. Οι παλμοί του ρεύματος συγκόλλησης επαναλαμβάνονται κυκλικά **σχήμα 4**. Χρησιμοποιείται αποκλειστικά αρνητική πολικότητα ρεύματος στο ηλεκτρόδιο, ενώ το βασικό ρεύμα  $-J_p$  αποτελεί συνήθως το 10%-15% του παλμικού ρεύματος  $-J_i$ . Σκοπός του βασικού ρεύματος είναι η διατήρηση του ανάμματος του τόξου και η μείωση της ταχύτητας ψύξης των διάφορων σημειακών κολλήσεων, δημιουργούμενων από τους διαδοχικούς παλμούς του ρεύματος. Η συνεχόμενη κόλληση αποτελείται από τις συμβαίνουσες διαδοχικές σημειακές κολλήσεις. Μεταβάλλοντας τις παραμέτρους του παλμικού ρεύματος, είναι δυνατόν να ρυθμισθούν, με αποτελεσματικό τρόπο, η μορφή και οι διαστάσεις του λουτρού συγκόλλησης, ώστε να επιδράσουν στην κρυστάλλωση του τήγματος και στο πλάτος της ζώνης επηρεαζόμενης θερμικά και να μειωθούν σημαντικά οι τάσεις και οι παραμορφώσεις συγκόλλησης. Κατά τη συγκόλληση με παλμικό ρεύμα, είναι δυνατόν με τη μέθοδο GTA να γίνει η συγκόλληση σε όλες τις θέσεις, με τις ίδιες παραμέτρους συγκόλλησης **πίνακας 4**. Η συγκόλληση με συνεχές παλμικό ρεύμα είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος σύνδεσης ελασμάτων πάχους από 0,1[mm] μέχρι 2[mm]-3[mm]. Η συγκόλληση με παλμικό ρεύμα με τη μέθοδο GTA διενεργείται χειρωνακτικά ή αυτόματα, με ή χωρίς πρόσθετο εναποτιθέμενο υλικό, χάρη της δυνατότητας ελέγχου της κρυστάλλωσης της κόλλησης και της ταχύτητας ψύξης της σύνδεσης, είναι σημαντικά εκτεταμένες οι περιοχές δυνατοτήτων για τη συγκόλληση υλικών. Υπάρχει και δυνατότητα περιορισμού ακόμη και εξάλειψης των θερμικών κατεργασιών πριν και μετά τη συγκόλληση. Ιδιαίτερα ωφέλιμα αποτελέσματα επιτυγχάνονται κατά τη συγκόλληση ελαφρά κραματωμένων χαλύβων υψηλής αντοχής, ειδικών χαλύβων, κραμάτων νικελίου, τανταλίου, νιοβίου **πίνακας 4**.



Σχήμα 4 Η πορεία εναλλαγής της έντασης ρεύματος συγκόλλησης GTA με παλμικό ρεύμα.

Πάχος τον ελάσματος [mm]	Χρόνος παλμού ρεύματος $t_p$ [sec]	Χρόνος ιακοπής $t_0$ [sec]	Ένταση ρεύματος του παλμού [A]	Ένταση βασικού ρεύματος [A]	Βήμα των σημειακών κολλήσεωνS [mm]
0.4	0.04-0.12	0.11-0.22	40-60	1-4	1.0-1.8
0.8	0.12-0.26	0.24-0.34	80-140	4-8	1.2-1.8
2.0	0.20-0.38	0.20-0.30	160-25	6-10	1.2-2.0
3.0	0.28-0.45	0.16-0.30	250-350	8-15	1.5-2.5

**Πίνακας 4** Τεχνολογικές συνθήκες συγκόλλησης με τη μέθοδο GTA με παλμικό ρεύμα μετωπικών συνδέσεων ελασμάτων από ανοξείδωτους χάλυβες τύπου 18-8, στην ατμόσφαιρα αργού, χωρίς τη χρησιμοποίηση εναποτιθέμενου υλικού.

Η ένταση ρεύματος είναι αποφασιστική για το βάθος διείσδυσης και το πλάτος της κόλλησης, αλλά συγχρόνως επιδρά και στη θερμοκρασία του άκρου του μη τηκόμενου ηλεκτροδίου. Η αύξηση της έντασης του ρεύματος συγκόλλησης μεγαλώνει το βάθος διείσδυσης και επιτρέπει την αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης **πίνακας 5**.

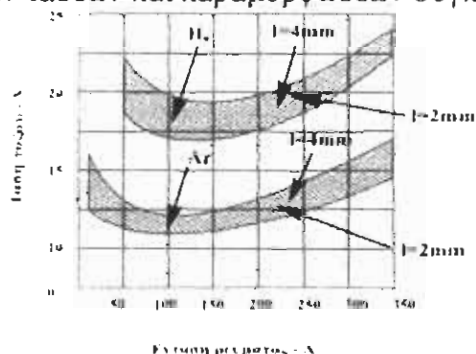
Ένταση ρεύματος, [A]	Διαστάσεις κορδονίου [mm]	Ταχύτητα συγκόλλησης-[mm/sec]		
		1.25	2.50	3.7
150	ύψος	2.94	1.81	-
	πλάτος	10.87	7.61	-
175	ύψος	3.94	2.04	1.48
	πλάτος	13.38	8.64	7.66
200	ύψος	-	2.13	1.67
	πλάτος	-	10.11	8.67
225	ύψος	-	2.30	1.78
	πλάτος	-	11.28	9.68
250	ύψος	-	2.46	1.98
	πλάτος	-	12.66	10.37
275	ύψος	-	-	2.22
	πλάτος	-	-	11.43

Συγκόλληση με συνεχές ρεύμα, με αρνητική πολικότητα στην ατμόσφαιρα του αργού, με ένταση ροής 7.0 [l/min], και μήκος του τόξου 3.0[mm].

**Πίνακας 5** Η επίδραση της έντασης ρεύματος και της ταχύτητας συγκόλλησης στις διαστάσεις τον κορδονίου της κόλλησης, κατά την αυτόματη συγκόλληση με τη μέθοδο GTA ωστενιτικών χαλύβων τύπου 18-8-2, σε επίπεδη θέση.

Το μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο με κράμα βολφραμίου-θωρίου, με γωνία του κώνου του άκρου  $60^\circ$ . Η υπερβολική ένταση του ρεύματος προξενεί στο άκρο του ηλεκτροδίου βολφραμίου μερική τήξη και, έτσι, εμφανίζονται στην κόλληση μεταλλικά εγκλείσματα. Η τάση του τόξου, είναι ανάλογα με το είδος του προστατευτικού αερίου, αποφασιστική για το είδος του τόξου καθώς και για τη μορφή της κόλλησης. Για την ακρίβεια, εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη ένταση του ρεύματος και το είδος του υλικού του ηλεκτροδίου **σχήμα 5**. Η αύξηση της τάσης του τόξου διευρύνει το πλάτος του μετώπου της κόλλησης, μειώνει το βάθος διείσδυσης και, έτσι, χειροτερεύουν οι συνθήκες προστασίας του τόξου και του ρευστού μετάλλου της κόλλησης. Το αργό έχει χαμηλό δυναμικό ιονισμού- $15.7[V]$  και το τόξο διατηρείται σταθερά, αναμμένο. Το δυναμικό ιονισμού του ηλίου είναι σημαντικά υψηλότερο και ισούται με  $24.6[V]$ , άρα με το ίδιο μήκος τόξου, που έχει και το προστατευτικό αργό, δημιουργείται σημαντική αύξηση της πτώσης της τάσεως και, ως αποτέλεσμα, το τόξο στο προστατευτικό ήλιο είναι λιγότερο σταθερό. Οι πηγές του ρεύματος συγκόλλησης με τη μέθοδο *GTA* πρέπει να έχουν χαρακτηριστική με απότομη φθίνουσα πορεία, έτσι που η τάση του τόξου να είναι βασική αποτελεσματική παράμετρος, εξαρτώμενη από την καθορισμένη ένταση του ρεύματος συγκόλλησης, το μήκος το τόξου και το είδος του προστατευτικού αερίου **σχήμα 5**.

**Η ταχύτητα συγκόλλησης**, με σταθερή ένταση ρεύματος και "τάση του τόξου, είναι αποφασιστική για τη γραμμική ενέργεια συγκόλλησης. Μεταβάλλοντας την ταχύτητα συγκόλλησης, είναι δυνατόν να ρυθμισθεί η δομή της κόλλησης και το μέγεθος κατανομής των τάσεων και παραμορφώσεων συγκόλλησης.

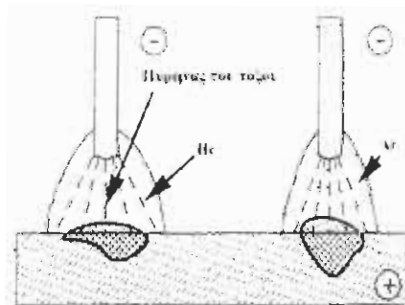


**Σχήμα 5** Επίδραση του είδους προστατευτικού αερίου και της έντασης ρεύματος στην τάση του τόξου κατά τη συγκόλληση *GTA* κράματος αλουμινίου με διαφορετικά μήκη τόξου  $l$ .

Η ταχύτητα συγκόλλησης επιδρά συγχρόνως στο μέγεθος διείσδυσης και στο πλάτος της κόλλησης **πίνακας 5**. Η παράμετρος αυτή είναι επίσης σημαντική από την άποψη του κόστους της διαδικασίας συγκόλλησης. **Τα βασικά προστατευτικά αέρια** που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση με τη μέθοδο *GTA*, είναι τα αδρανή αέρια *Ar* και *He* ή το μίγμα αυτών, με ενδεχόμενη προσθήκη υδρογόνου  $H_2$ . Μερικές φορές στο αδρανές αέριο προστίθεται το άζωτο, σκοπός του οποίου είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του τόξου, που βοηθάει τη συγκόλληση να γίνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Αυτό είναι ωφέλιμο, επειδή απαιτούνται μεγάλες ταχύτητες για τη συγκόλληση του χαλκού και των κραμάτων του, χωρίς αρχική προθέρμανση. Άλλες αντιδράσεις των προστατευτικών αερίων, όπως του  $CO_2$ , προξενούν την ταχεία φθορά του ηλεκτροδίου ή τη μη σταθερότητα του τόξου. Σε **καμιά περίπτωση δεν πρέπει να χρησιμοποιηθούν**

προσθήκες  $CO_2$  ή  $O_2$  στο αργό ή στο ήλιο, επειδή τότε προξενείτε ταχεία φθορά του ακριβού, μη τηκόμενου ηλεκτροδίου. Το προστατευτικό αέριο, εκτός από την κάλυψη του λουτρού συγκόλλησης από τον επιβλαβή ατμοσφαιρικό αέρα, λειτουργεί, επιπλέον, καθοριστικά και για τη γραμμική ενέργεια συγκόλλησης (τάση του τόξου) για τη διαμόρφωση της κόλλησης και για τη χημική σύνθεση του εναποτιθέμενου υλικού. Οι βασικές φυσικές ιδιότητες των προστατευτικών αερίων, που επιδρούν αποφασιστικά στη διαδικασία συγκόλλησης με τη μέθοδο GTA είναι:

- το δυναμικό ιονισμού
- η θερμική αγωγιμότητα
- το ειδικό βάρος
- το σημείο ζέσεως
- η διάσπαση και οι παραλλαγές του αερίου.



**Σχήμα 6** Επίδραση των ειδών του προστατευτικού αερίου στη διαμόρφωση του κορδονίου κατά τη συγκόλληση GTA.

Το δυναμικό ιονισμού προστατευτικού αερίου είναι αποφασιστικό για τη διευκόλυνση του ανάμματος του τόξου, για την αγωγιμότητα του ρεύματος δια του τόξου (αντίσταση του τόξου) και για την τάση του τόξου **σχήμα 5**. Έτσι το άναμμα του τόξου είναι σημαντικά ευκολότερο και σταθερότερο στην ατμόσφαιρα του αργού από ό,τι του ηλίου. Οι χαμηλότερες τάσεις του αναμμένου τόξου στην ατμόσφαιρα αργού είναι ωφελιμότερες κατά τη συγκόλληση συνδέσεων με μικρό πάχος. Μικρότερες είναι επίσης και οι μεταβολές της τάσης του τόξου, όταν μεταβάλλεται το μήκος του τόξου. Άρα η προστασία με ήλιο δεν προτείνεται για τη χειρωνακτική συγκόλληση, επειδή ακόμη και με μικρές μεταβολές του μήκους του τόξου προξενούνται σημαντικές μεταβολές στην τάση του τόξου και, ως αποτέλεσμα αυτού, στην ποσότητα της προσαγώμενης θερμότητας στη συγκολλούμενη σύνδεση. Το υψηλό δυναμικό ιονισμού του ηλίου αυξάνει σημαντικά την ενέργεια του τόξου. Αυτό είναι ιδιαίτερα ωφέλιμο κατά τη συγκόλληση ελασμάτων μεγάλου πάχους ή μετάλλων με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, όπως το αλουμίνιο, το μαγνήσιο και ο χαλκός. Η προστασία με ήλιο προτείνεται, επίσης, για τη μηχανοποιημένη συγκόλληση, με μεγάλες ταχύτητες συγκόλλησης συνδέσεων αποτελούμενων από χάλυβες ανθεκτικοί στη διάβρωση. Επειδή η τάση του καλυμμένου τόξου με ήλιο είναι πάρα πολύ «ευαίσθητη» ακόμη και σε πολύ μικρές μεταβολές του μήκους του τόξου, για την αυτόματη συγκόλληση *GTA* χρησιμοποιείται αποκλειστικά ήλιο ή μίγμα ηλίου με αργό, ενώ η τάση του τόξου είναι η βασική παράμετρος αξιοποίησης για την καθοδήγηση της διαδικασίας συγκόλλησης. Η θερμική αγωγιμότητα του προστατευτικού



αερίου είναι αποφασιστική για τη διαμόρφωση του κορδονίου της κόλλησης. Το ήλιο χαρακτηρίζεται με ιδεώδη θερμική αγωγιμότητα, που έχει ως αποτέλεσμα η στήλη του τόξου *GTA* να είναι πλατιά, η προσαγόμενη θερμότητα να εξαπλώνεται σε μεγαλύτερη περιοχή και η κόλληση να είναι πλατιά, ρηχή, ομαλή και επίπεδη *σχήμα 6*. Το αργό είναι αέριο με πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Κατ' επέκταση, το προστατευόμενο τόξο με αργό έχει θερμό και στενό πυρήνα και σημαντικά πιο κρύα την εξωτερική ζώνη. Η κόλληση έχει βαθύτερη διείσδυση και στενότερο μέτωπο από ό,τι κατά τη συγκόλληση στο ήλιο.

Τύπος συγκολλημένου μετάλλου	Είδος διαδικασίας συγκόλλησης	Είδος προστατευτικού αερίου	Περιγραφή των βασικών ιδιοτήτων
Αλουμίνιο και τα κράματά του	Χειρωνακτική	Ar	Ευκόλο άναμμα του τόξου και μεγάλη καθαρότητα της κόλλησης
	Αυτόματη	He, He + Ar	Μεγάλες ταχύτητες συγκόλλησης, δυνατότητα συγκόλλησης χωρίς αρχική προθέρμανση
Μισάνθριο και τα κράματά του	Πλάγος ονύδεσης κάτω από 15 [mm]	Ar	Ευκόλια ρύθμισης της διεσόδου και μεγάλη καθαρότητα της κόλλησης
	Πλάγος ονύδεσης πάνω από 15 [mm]	He	Καλή διεσόδου, καλύτερα αποτελέσματα κατά τη συγκόλληση με συνεχές αέθια
Ανθρακο-χάλυβας	Χειρωνακτική	Ar	Ευκόλια ρύθμισης της μορφής της κόλλησης και ανάμματος του τόξου, δυνατότητα συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις
	Αυτόματη	Ar - He	Αυξημένη διεσόδου και ταχεία συγκόλληση
	Χειρωνακτική	Ar	Δυσκολούμενη ή ρύθμιση της διεσόδου λεπτών ελασμάτων
		Ar + He	Αυξημένο βάθος διεσόδου και αυξημένη ταχύτητα συγκόλλησης
Χάλυβες Cr-Ni οστενιτικοί	Αυτόματη	Ar - max 3% H <sub>2</sub>	Αποφεύγονται οι υτοκοτές, απαιτείται μειωμένη ένταση ροής από ό,τι στο καθαρό αργό
		He	Αυξημένο βάθος διεσόδου και αυξημένη γραμμική ενέργεια συγκόλλησης
Cu, Ni και τα κράματά τους	Χειρωνακτική και αυτόματη	Ar	Μεγάλη ευκολία συγκόλλησης λεπτών ελασμάτων και κορδονιών ρίγας σελήνων
		Ar + He	Εγγυημένη υψηλή γραμμική ενέργεια συγκόλλησης
		He	Δυνατότητα συγκόλλησης παχών ελασμάτων με μεγάλες ταχύτητες, χωρίς αρχική προθέρμανση
		Ar	Μεγάλη καθαρότητα της κόλλησης
Τίταλιο και τα κράματά του	Χειρωνακτική και αυτόματη	He	Μεγάλο βάθος διεσόδου, κατά τη συγκόλληση χοντρών ελασμάτων.

**Πίνακας 6** Προτεινόμενα είδη προστατευτικών αερίων για τη συγκόλληση με τη μέθοδο GTA διάφορων μετάλλων και κράματών τους.

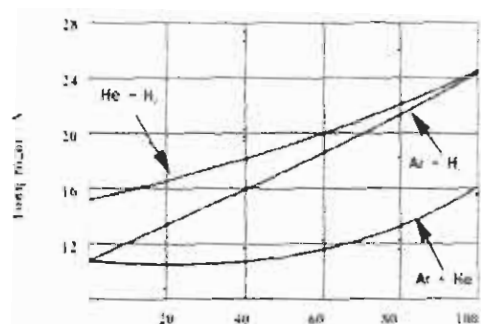
Φυσικές ιδιότητες	Ar	He	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	H	N <sub>2</sub>
Πυκνότητα σε κανονικές συνθήκες [Kgr/mm <sup>3</sup> ]	1.78	0.178	1.98	-	0.098	-	1.25
Δυναμικό ιονισμού e[V]	15.70	24.9	14.4	14.1	15.4	13.6	14.5
Ενέργεια διάσπασης [J/mol]	-	-	2.8 10 <sup>5</sup>	-	4.3 10 <sup>5</sup>	-	9.4 10 <sup>5</sup>
Θερμική χωρητικότητα 600[K-W/m <sup>2</sup> °C]	21	21	60	-	35	-	-
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε 6000[K-W/m °C]	0.17	1.5	5 10 <sup>-2</sup>	6.7 10 <sup>2</sup>	2.0	3.8	-
Θερμοκρασία ζέσεως [°C]	-85.5	-68.9	-78.9	-	-259	-	-196

**Πίνακας 7** Βασικές φυσικές ιδιότητες των προστατευτικών αερίων συγκόλλησης με τη μέθοδο GTA.

Το ειδικό βάρος του αερίου παίζει ρόλο όσον αφορά στο βαθμό προστασίας του λουτρού συγκόλλησης. Το αργό είναι 10 φορές πιο βαρύ από το ήλιο και 1.5 φορά από τον αέρα. Για τη σωστή προστασία του χώρου συγκόλλησης από την εισχώρηση του αέρα, απαιτείται μεγαλύτερη μείωση της έντασης ροής του αργού από ό,τι του ηλίου. Ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνική συγκόλλησης, τη μορφή της σύνδεσης και το είδος του συγκολλούμενου μετάλλου, προτείνεται συνήθως ένταση ροής του αργού της τάξεως των 6[l/min]-16[l/min] ενώ για το ήλιο της τάξεως των 14[l/min]-30[l/min]. Συνοψίζοντας, το αργό, σε σχέση με το ήλιο, παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- ευκολότερο άναμμα του τόξου
- διευκόλυνση στη σταθερότητα και στο σιγανό άναμμα του τόξου
- εγγύηση για την ακριβή ρύθμιση των θερμικών συνθηκών συγκόλλησης
- διευκόλυνση στον καθαρισμό της επιφάνειας της σύνδεσης από το στρώμα των οξειδίων, κατά τη συγκόλληση με συνεχές ρεύμα θετικής πολικότητας και με εναλλασσόμενο ρεύμα
- απαιτεί μικρότερη ένταση ροής για εγγυημένη προστατευτική ατμόσφαιρα του τόξου.

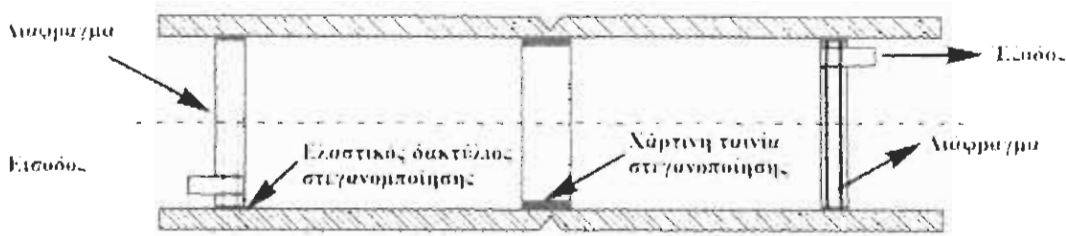
Το υδρογόνο αναμεμιγμένο με το αργό μεταβάλλει τη χαρακτηριστική του τόξου και αυξάνει την αντίσταση του τόξου και, κατ' αυτόν τον τρόπο, μεγαλώνει η γραμμική ενέργεια συγκόλλησης, αυξάνοντας το βάθος διείσδυσης μέχρι 50% σε σχέση με τη συγκόλληση με καθαρό αργό. Τα μίγματα ηλίου και υδρογόνου, που περιέχουν από 5% μέχρι 30% υδρογόνο, εγγυώνται ακόμη πιο υψηλή τάση του τόξου και, κατ' επέκταση, μεγαλύτερη γραμμική ενέργεια συγκόλλησης απ' ό,τι με την προστασία καθαρού ηλίου **σχήμα 7**. Η προσθήκη υδρογόνου στο αργό ή στο ήλιο είναι ανεπίτρεπτη κατά τη συγκόλληση αλουμινίου, μαγνησίου, χαλκού και κραμάτων τους, από την άποψη του κινδύνου δημιουργίας πόρων και ρηγματίων. Κατά τη χειρωνακτική συγκόλληση GTA συνδέσεων από χάλυβα ανθεκτικό στη διάβρωση, με σκοπό την επίτευξη καθαρών κολλήσεων, χωρίς υποκοπές, προτείνεται προσθήκη στο προστατευτικό κάλυμμα του αργού μέχρι 5% υδρογόνο. Μεγάλη επίδραση στην ταχύτητα συγκόλλησης και στην ποιότητα των κολλήσεων ασκεί η καθαρότητα του προστατευτικού αερίου. Ιδιαίτερα ευαίσθητα στις ακαθαρσίες είναι τα δυσκολοτηκόμενα μέταλλα: το τιτάνιο, το ζirkόνιο, το ταντάλιο και το νιόβιο. Οι ανθρακοχάλυβες και οι ανοξείδωτοι χάλυβες δεν απαιτούν αέριο με μεγάλη καθαρότητα, ενώ το αλουμίνιο και το μαγνήσιο πρέπει να συγκολλούνται στην προστατευτική ατμόσφαιρα αερίων με καθαρότητα 99.96% μέχρι 99.995%.



Προστίθεται η πιο κατάλληλη ατμόσφαιρα στο Ar ή στο He - H<sub>2</sub>.

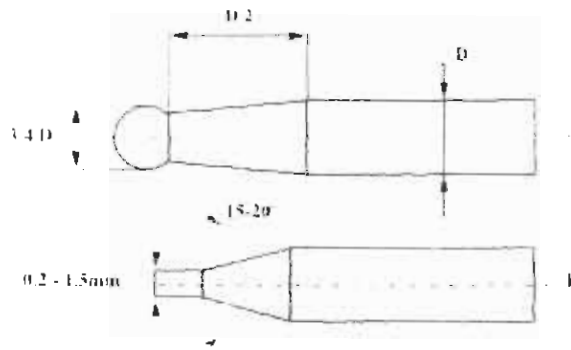
**Σχήμα 7** Επίδραση της προσθήκης ηλίου ή υδρογόνου στην ατμόσφαιρα του αργού καθώς και του υδρογόνου στην ατμόσφαιρα του ηλίου στην τάση του τόξου, κατά τη συγκόλληση GTA ωστενιτικών χαλύβων τύπου 18-8. Η ένταση του ρεύματος συγκόλλησης 100[A] και το μήκος του τόξου 1.8[mm].

Με σκοπό την αποφυγή των ακαθαρσιών από τον αέρα για το ισχυρά θερμαινόμενο μέταλλο της κόλλησης από την πλευρά της ρίζας, κατά τη συγκόλληση του κορδονίου ρίζας της σύνδεσης, πρέπει να προστατευτεί με πρόσθετη προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου, αυτός ο χώρος. Στην περίπτωση συγκόλλησης όλων των μετάλλων με τη μέθοδο GTA στην προστατευτική ατμόσφαιρα της ρίζας, επαρκεί το καθαρό ήλιο ή το αργό. Κατά τη συγκόλληση χαλύβων ανθεκτικών στη διάβρωση, χαλκού και κραμάτων του, επαρκεί προστατευτική ατμόσφαιρα της ρίζας, την οποία παρέχει το άζωτο. Προτεινόμενες εντάσεις ροής προστατευτικού αερίου είναι 0.5[lit/mm] μέχρι 30[lit/mm], ανάλογα με τη μορφή της σύνδεσης, το είδος της κατασκευής, τις κατασκευαστικές λύσεις των θαλάμων ή προστατευτικών καναλιών, όπως και τον όγκο του θαλάμου, από τον οποίο πρέπει να γίνει η εκκένωση του αέρα. Κατά κανόνα, επιβάλλεται το φύσημα όλου του όγκου να γίνει τέσσερις φορές με το προστατευτικό αέριο. Μετά το φύσημα του αέρα, πρέπει να μειωθεί η ένταση ροής του προστατευτικού αερίου στο επίπεδο, που επιβάλλει η προστασία της σύνδεσης, δηλαδή με ελαφρά υπερπίεση από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Στην περίπτωση συγκόλλησης μετωπικών συνδέσεων σωλήνων, σημαντική είναι η χρησιμοποίηση προστατευτικών διαφραγμάτων με δικλίδες εισόδου και εξόδου, με σκοπό την αποφυγή της υπερβολικής πίεσης, κατά τη διάρκεια συγκόλλησης στο μέσο του σωλήνα, έτσι που να μη δημιουργηθεί φύσημα του λουτρού της κόλλησης στο τελευταίο τμήμα του κορδονίου της ρίζας ή να μην εμφανισθεί ατελής τήξη στη ρίζα. Προτείνεται, επίσης, η χρησιμοποίηση ειδικής χάρτινης ταινίας στεγανοποίησης της ρίζας, κολλημένη από το εσωτερικό του σωλήνα ή από την εξωτερική πλευρά του αύλακα συγκόλλησης, στην περίπτωση σωλήνων με μικρή διάμετρο. Η ταινία αυτή επιτρέπει τη σημαντική μείωση κατανάλωσης του προστατευτικού αερίου, ενώ το κάψιμο της από την επίδραση της θερμότητας του τόξου δεν ασκεί αρνητική επιρροή στην ποιότητα της κόλλησης **σχήμα 8**.



Σχήμα 8 Σύστημα προστατευτικής ατμόσφαιρας αερίου του χώρου της ρίζας, προτεινόμενο για τη συγκόλληση GTA μετωπικών συνδέσεων σε περιφέρεια σωλήνας.

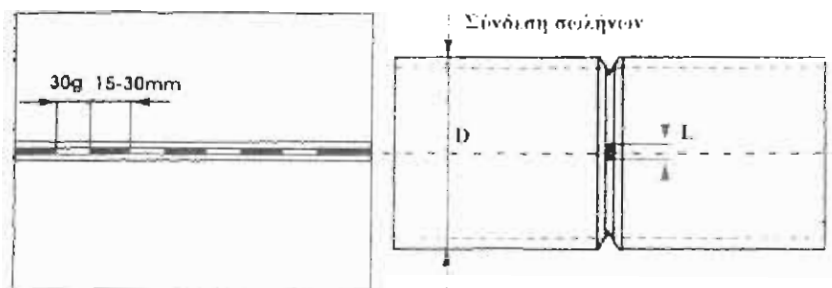
Τα μη τηκόμενα ηλεκτρόδια, για τη μέθοδο *GTA*, αποτελούν το βασικό στοιχείο του κυκλώματος συγκόλλησης, και από τα χαρακτηριστικά τους εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, η ποιότητα συγκόλλησης καθώς και το κόστος της διαδικασίας. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η ευκολία ανάμματος του τόξου και η σταθερότητα του, η διάρκεια και η ταχύτητα φθοράς του ηλεκτροδίου. Τα μη τηκόμενα ηλεκτρόδια παρασκευάζονται ως καθαρά βολφραμίου ή από κράματα βολφραμίου με προσθήκες με μικρό έργο εξόδου των ηλεκτρονίων, όπως το θόριο *Th*, το ζirkόνιο *Zr*, το λανθάνιο *La*, το δημήτριο *Ce*, τα οποία εγγυώνται τη μείωση του έργου εξόδου των ηλεκτρονίων σε σχέση με το καθαρό βολφράμιο και την ψιλόκοκκη δομή του ηλεκτροδίου. Στη σύσταση των κραματωμένων ηλεκτροδίων βολφραμίου εισάγονται συνήθως από 0.2 μέχρι 2%-3% οξειδία των δραστικών στοιχείων  $ThO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $La_2O_3$ ,  $Y_2O_3$  θόριο είναι ραδιενεργό στοιχείο και εκπέμπει ακτινοβολία  $\alpha$  και  $\gamma$ , με μικρή ένταση. Για το χειριστή είναι επικίνδυνη η σκόνη που δημιουργείται κατά τη λείανση του άκρου του ηλεκτροδίου, η οποία επικάθεται στους πνεύμονες του. Προτείνεται, επομένως, η αντικατάσταση των ηλεκτροδίων θορίου με ηλεκτρόδια που περιέχουν  $La_2O_3$  ή  $CeO_2$ . Το ηλεκτρόδιο βολφραμίου που περιέχει 1%  $La_2O_3$  έχει τον ίδιο ποσοστιαίο όγκο οξειδίων με το ηλεκτρόδιο που περιέχει 1.5%  $ThO_2$ . Η ζωή των ηλεκτροδίων βολφραμίου είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα των οξειδίων σε όγκο. Έτσι, λοιπόν, τα ηλεκτρόδια βολφραμίου με προσθήκες  $La_2O_3$  ή  $CeO_2$  παρουσιάζουν καλύτερες ιδιότητες συγκόλλησης και μεγαλύτερη διάρκεια απ' ό,τι τα ηλεκτρόδια με προσθήκη του  $ThO_2$ . Η διάμετρος του σφαιρικού άκρου του μη τηκόμενου ηλεκτροδίου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1.5 της διαμέτρου του ηλεκτροδίου, επειδή, έτσι, μπορεί να αποκοπεί από το ηλεκτρόδιο. Το άκρο του ηλεκτροδίου τροχίζεται σε γωνία της κορυφής του από  $15^\circ$  έως  $120^\circ$ , ανάλογα με την απαιτούμενη συγκεντρότητα του τόξου και τη διάμετρο στόμωσης από 0.2[mm] έως 1.5[mm], που δεν τήκεται και δεν έχει μεταλλικά εγκλείσματα στην κόλληση σχήμα 9. Τα ηλεκτρόδια με προσθήκες 0.3%-0.5% ζirkονίου *Zr* έχουν ενδιάμεσες ιδιότητες μεταξύ των ηλεκτροδίων καθαρού βολφραμίου και των κραματωμένων ηλεκτροδίων βολφραμίου με θόριο *Th*, παρά το ό,τι παρουσιάζουν τα καλύτερα αποτελέσματα κατά τη συγκόλληση με εναλλασσόμενο ρεύμα. Η ικανότητα μεταφοράς υψηλών εντάσεων ρεύματος συγκόλλησης σε μεγάλη χρονική περίοδο, χωρίς αλλαγές στη μορφή του ηλεκτροδίου, εξαρτάται όχι μόνο από τη χημική σύσταση των ηλεκτροδίων αλλά, επίσης, και από το είδος της λαβίδας συγκόλλησης (ψύξη με νερό ή με αέρα), το ελεύθερο μήκος εξόδου του ηλεκτροδίου από τη λαβίδα, τη θέση συγκόλλησης, τον τύπο του προστατευτικού αερίου και το είδος του ρεύματος συγκόλλησης.



Σχήμα 9 Προτεινόμενος τρόπος προετοιμασίας των άκρων των μη τηκόμενων ηλεκτροδίων για τη συγκόλληση GTA: A με εναλλασσόμενο ρεύμα, B με συνεχές ρεύμα.

### 7.1.3 Τεχνολογία και τεχνική συγκόλλησης

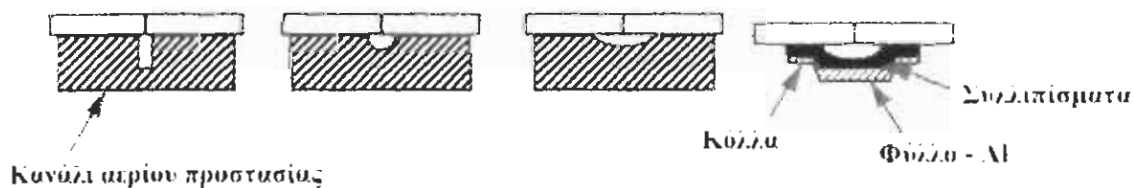
Η συγκόλληση *GTA* απαιτεί ιδιαίτερο και ακριβή τρόπο καθαρισμού των άκρων των αντικειμένων προς συγκόλληση απ' όλες τις ακαθαρσίες, όπως τα οξειδία, οι σκουριές, τα λίπη, τα χρώματα. Εφαρμόζεται, για το σκοπό αυτό, καθαρισμός μηχανικός ή χημικός. Η συγκόλληση *GTA* διενεργείται σε όλες τις θέσεις, χειρωνακτικά, ημιαυτόματα ή αυτόματα. Τα συγκολλούμενα άκρα των αντικειμένων πρέπει να προετοιμαστούν με ακρίβεια, έτσι που να μη σύγκειται παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, μεταβάλλοντας γι' αυτό π.χ. τη γωνία λοξοτόμησης και το διάκενο του αύλακα συγκόλλησης. Για το σκοπό αυτό, επίσης, εφαρμόζεται η συγκράτηση με κολλήσεις πονταρίσματος, με μήκη από  $10[mm]$  έως  $30[mm]$  και με απόσταση μεταξύ των κολλήσεων από  $10[mm]$  έως  $60[mm]$ , ανάλογα με τη στιβαρότητα (πάχος) των συγκολλούμενων αντικειμένων *σχήμα 10*, αλλιώς πρέπει να συγκρατηθούν με ειδικά εργαλεία (ιδιοσυσκευές) με υποστηρίγματα από χαλκό. Η χειρωνακτική συγκόλληση *GTA* διενεργείται από τους περισσότερους χειριστές με την τεχνική συγκόλλησης με διακοπτόμενη μετατόπιση της λαβίδας και του σύρματος. Η τεχνική αυτή συνίσταται στο ό,τι, μετά το άναμμα του τόξου, εκτελούνται μικρές, κυκλικές κινήσεις με το ηλεκτρόδιο, μέχρι που να επιτευχθεί ο απαιτούμενος όγκος του λουτρού συγκόλλησης και, μετά, δίνεται κλίση στη λαβίδα, από κάθετη, σε περίπου  $15^\circ$ , στην αντίθετη διεύθυνση προς τη διεύθυνση συγκόλλησης κατά μήκος της σύνδεσης. Στην περίπτωση συγκόλλησης με πρόσθετο υλικό (σύρμα ή ράβδος), πρέπει να εναποτίθεται στην περιοχή συγκόλλησης υπό γωνία  $10^\circ-25^\circ$  προς το επίπεδο της

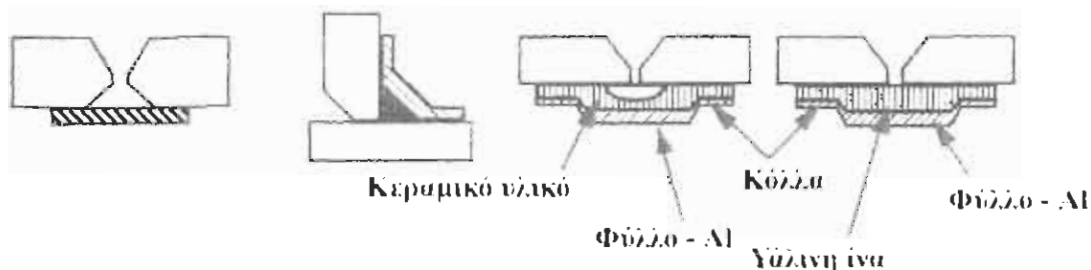


Διάμετρος σωλήνα $D$	Αριθμός κολλήσεων συγκράτησης	Μήκος κόλλησης
$2^{\circ}-12^{\circ}$ (50-200[mm])	4	15[mm]
$14^{\circ}-18^{\circ}$ (350-480[mm])	5	20[mm]
$>20^{\circ}$ (>500[mm])	8	25[mm]

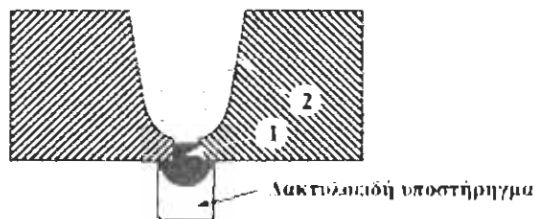
**Σχήμα 10** Προτεινόμενη σειρά εναποθέτησης και διαστάσεις κολλήσεων συγκράτησης σε μετωπικές συνδέσεις.

σύνδεσης, προ του λουτρού συγκόλλησης. Στη συνέχεια, το σύρμα οπισθοχωρεί από την περιοχή του τόξου και η λαβίδα μετατοπίζεται προς τη διεύθυνση συγκόλλησης. Οι ενέργειες αυτές επαναλαμβάνονται μέχρι την εκτέλεση όλης της σύνδεσης. Η ημιαυτόματη συγκόλληση *GTA* γίνεται με τη χρήση εξοπλισμού, ο οποίος καθοδηγεί μόνο την προώθηση του εναποτιθέμενου υλικού στην περιοχή της συγκόλλησης, ενώ η μετατόπιση της λαβίδας γίνεται χειρωνακτικά. Αυτή η τεχνική εφαρμόζεται περιορισμένα, μόνο για εξειδικευμένες χρησιμότητες. Η αυτόματη συγκόλληση *GTA* συνίσταται στη διενέργεια διαδικασίας συγκόλλησης, χωρίς τη συμμετοχή του χειριστή στην καθοδήγηση των παραμέτρων συγκόλλησης, οι οποίες εκτελούνται με ηλεκτρονικά συστήματα προσαρμογής. Το σύστημα καθοδήγησης εκτελεί τις διορθώσεις των παραμέτρων συγκόλλησης βάσει των πληροφοριών που επιτεύχθηκαν από τα σήματα των ιδιοτήτων ποιότητας της περιοχής συγκόλλησης, όπως οι διαστάσεις, η θερμοκρασία του λουτρού συγκόλλησης, ο ήχος του τόξου. Η συγκόλληση μπορεί να διενεργηθεί χωρίς τη συμμετοχή του εναποτιθέμενου υλικού ή με τη συμμετοχή του εναποτιθέμενου υλικού με μορφή σύρματος, προωθούμενο στην περιοχή της συγκόλλησης με γωνία  $15^{\circ}-45^{\circ}$  προς τον άξονα της λαβίδας (ηλεκτροδίου). Η σημειακή συγκόλληση *GTA* διενεργείται χειρωνακτικά ή αυτόματα, με τη χρήση ειδικών λαβίδων πιστολιού, εφοδιασμένοι με ακροφύσιο αερίου, ψυχόμενο με νερό από τα διαμήκη διάκενα, που επιτρέπει τη στήριξη της λαβίδας άμεσα στο συγκολλούμενο αντικείμενο. Η συγκόλληση μονόπλευρων μετωπικών συνδέσεων διενεργείται με τη χρήση υποστηριγμάτων χαλκού, κεραμικών, τηκόμενων ή μεταλλικών τηκόμενων, ακριβώς εφαρμοσμένων στην περιοχή της ρίζας **σχήμα 11**, ή με ελεύθερη διαμόρφωση της ρίζας προστατευόμενης με αέριο. Όλο και περισσότερο χρησιμοποιούνται οι κεραμικές τηκόμενες ταινίες από ινώδη ύαλο επί του φυλλωτού αλουμινίου, επικαλυμμένες στην περιοχή της ρίζας της κόλλησης. Αυτές εγγυώνται την ακριβή διαμόρφωση της στρώσης της ρίζας και, συγχρόνως, εξαλείφουν το αναγκαίο προστατευτικό αέριο, από την πλευρά της ρίζας, στα περισσότερα μέταλλα.





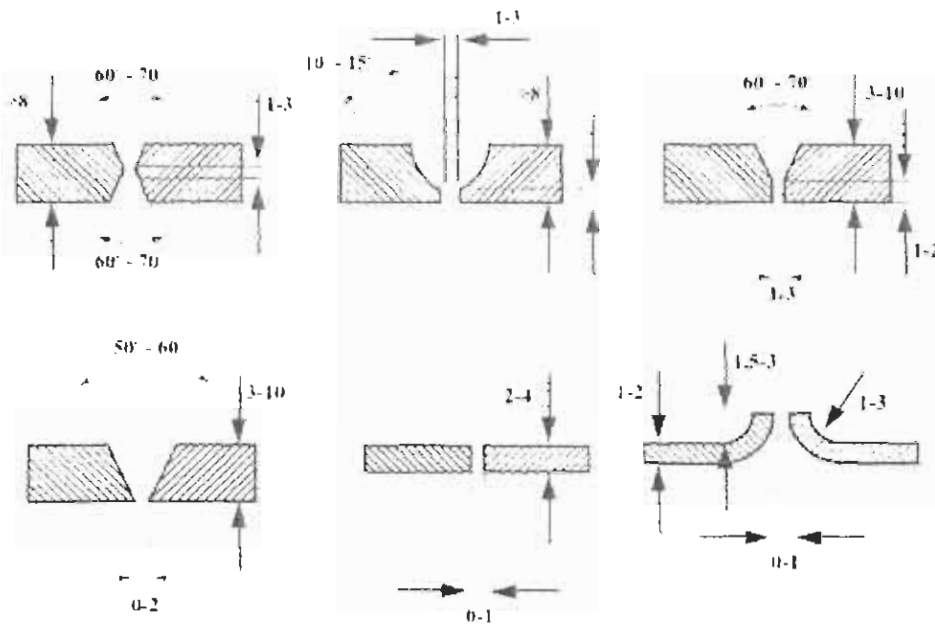
**Σχήμα 11** Προτεινόμενα υποστηρίγματα διαμόρφωσης και προστασίας των ριζών συνδέσεων κατά τη μονόπλευρη ή δίπλευρη συγκόλληση GTA και GMA: A, B, C μεταλλικά υποστηρίγματα από χαλκό ή από ωστενιτικό χάλυβα (προτείνεται για τη συγκόλληση τιτανίου και τα κράματα του), D, E, F υποστηρίγματα κεραμικών ταινιών, Το υποστήριγμα ταινίας από ίνες ύαλου.



**Σχήμα 12** Προτεινόμενος τρόπος εκτέλεσης μετωπικών συνδέσεων χοντρών τοιχωμάτων σωλήνων: 1 στρώμα διείσδυσης εκτελούμενο με τη μέθοδο GTA με τήξη του υποστηρίγματος δακτυλίου, 2 στρώματα αναπλήρωσης εκτελούμενα με τη μέθοδο GTA ή με βυθιζόμενο τόξο.

Η συγκόλληση *GTA* χρησιμοποιείται συνήθως για τη σύνδεση λεπτών ελασμάτων με πάχη μέχρι  $2.0[mm]-3.0[mm]$  ή για την εκτέλεση στρώσεων ρίζας χοντρών συνδέσεων, αναπληρωμένων με άλλες πιο αποδοτικές μεθόδους **σχήμα 12**. Πολλές υπεύθυνες συνδέσεις συγκολλητών κατασκευών με παχιά τοιχώματα συγκολλούνται με τη μέθοδο *GTA* επειδή παρέχει υψηλή ποιότητα παρά τη χαμηλή απόδοση της. Για πάχη συνδέσεων της τάξης  $3.0[mm]-6.0[mm]$ , είναι δυνατόν να συγκολληθούν οι μετωπικές συνδέσεις χωρίς λοξοτόμηση σε επαφή, με ή χωρίς προσθήκη εναποτιθέμενου υλικού. Για πιο παχιά ελάσματα, επιβάλλεται η λοξοτόμηση **σχήμα 13**. Τα πρόσθετα εναποτιθέμενα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση *GTA*, στις περισσότερες περιπτώσεις έχουν την ίδια χημική σύσταση με το συγκολλούμενο υλικό. Σε μερικές περιπτώσεις, είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση εναποτιθέμενου υλικού με καθαρά διαφορετική χημική σύσταση από το συγκολλούμενο υλικό. Για τη συγκόλληση χαλύβων ανθεκτικών στη διάβρωση τύπου  $9\%Ni$ , χρησιμοποιούνται κράματα νικελίου. Οι ορείχαλκοι συγκολλούνται με μπρούντζο αλουμινίου, φωσφόρου ή πυριτίου. Η επιλογή του εναποτιθέμενου υλικού είναι συνδυασμός μεταξύ μεταλλουργικών παραμέτρων και λειτουργικών ιδιοτήτων της σύνδεσης. Συνήθως, γίνεται προσπάθεια ώστε το εναποτιθέμενο υλικό να έχει καλύτερες ιδιότητες απ' ό,τι το συγκολλούμενο υλικό. Το σύρμα για την αυτόματη συγκόλληση *GTA* τροφοδοτείται στο χώρο του τόξου ως κρύο ή ως προθερμαινόμενο με αντίσταση (θερμό) **σχήμα 14**.

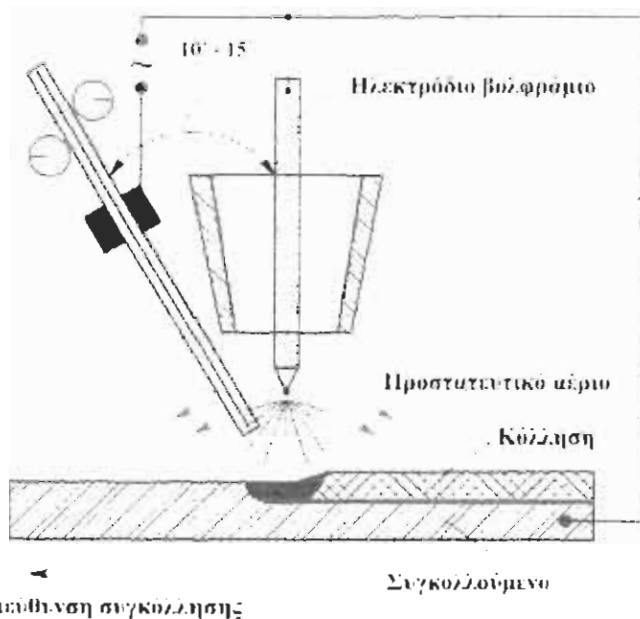




Σχήμα 13 Προτεινόμενοι τρόποι προετοιμασίας των άκρων των χαλύβδινων ελασμάτων για τη συγκόλληση GTA μετοχικών συνδέσεων

Το θερμό σύρμα, προ της εισόδου στο χώρο του τόξου, προθερμαίνεται με ηλεκτρική αντίσταση και ρεύμα, τροφοδοτούμενο από ξεχωριστή πηγή εναλλασσόμενου ή συνεχούς ρεύματος, με σταθερά στατική χαρακτηριστική. Η διέλευση του ρεύματος ξεκινάει τη στιγμή της εισόδου του σύρματος στο τόξο. Και χάρι αυτού πετυχαίνεται μεγαλύτερη απόδοση τήξης απ' ό,τι με το κρύο σύρμα. Το θερμό σύρμα χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση χαλύβων ανθεκτικών στη διάβρωση, χαλύβων ειδικών καθώς και κραμάτων χαλκού και νικελίου. Η τεχνική αυτή δεν προτείνεται για τη συγκόλληση αλουμινίου και χαλκού, επειδή η χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση αυτών των μετάλλων απαιτεί μεγάλες εντάσεις ρεύματος, που, στη συνέχεια, μπορεί να οδηγήσουν στο φύσημα του τόξου και σε σφάλματα ατελούς διείσδυσης ή ατελούς τήξης. Η αύξηση της απόδοσης της αυτόματης συγκόλλησης *GTA* μπορεί να επιτευχθεί, χρησιμοποιώντας την τεχνική συγκόλλησης, με την παράλληλη τοποθέτηση των λαβίδων συγκόλλησης στον άξονα της σύνδεσης. Κατά την παράλληλη τοποθέτηση των λαβίδων ή κατά τη συγκόλληση με μη ακριβή εφαρμογή των άκρων, είναι δυνατόν να αυξηθεί η ταχύτητα συγκόλλησης πολλαπλών στρώσεων. Κατά την παράλληλη συγκόλληση, η πρώτη λαβίδα έχει ως σκοπό την αρχική προθέρμανση του χώρου συγκόλλησης, μειώνοντας την ταχύτητα θέρμανσης της σύνδεσης, και, επιπλέον, τη βαθιά διείσδυση με μεγάλη ταχύτητα. Οι συνδέσεις με παχιά ελάσματα απαιτούν υψηλό κόστος της λοξοτόμησης και μεγάλη ποσότητα εναποτιθέμενου υλικού. Η πλέον αποτελεσματική λύση είναι η συγκόλληση με στενό διάκενο και με τη μέθοδο *GTA*. Η αδρανής ατμόσφαιρα αερίων εγγυάται τη σταθερότητα, την εντατικότητα της πηγής θερμότητας, ενώ η διαδικασία συγκόλλησης *GTA* είναι πολύ «καθαρή» και επεκτείνει σημαντικά την περιοχή συγκολλητότητας διάφορων μετάλλων και κραμάτων.

Γροφοδότηση σύρματος



Σχήμα 14 Τεχνική συγκόλλησης GTA με θερμό σύρμα προθερμαινόμενο με ηλεκτρική αντίσταση

Η χειρωνακτική συγκόλληση *GTA* εγγυάται την απόδοση συγκόλλησης, που πλησιάζει τη χειρωνακτική συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια, της τάξεως των  $0.5[Kgr/h]-3.0[Kgr/h]$ . Η αυτόματη συγκόλληση *GTA* με θερμαινόμενο σύρμα διευκολύνει την αύξηση της απόδοσης τήξης μέχρι και  $10[Kgr/h]-12[Kgr/h]$ , ανάλογα με το είδος του συγκολλούμενου υλικού. Κύριος, όμως, σκοπός των τεχνολογικών διεργασιών της συγκόλλησης *GTA*, είναι η εξασφάλιση της υψηλής ποιότητας των συνδέσεων και όχι της απόδοσης συγκόλλησης. Όπως, ήδη, αναφέρθηκε, η συγκόλληση *GTA* μπορεί να διενεργηθεί χωρίς τη συμμετοχή του πρόσθετου υλικού, και, τότε, η κόλληση σχηματίζεται με υποκοπές στα άκρα των συγκολλούμενων υλικών, ή με πρόσθετο υλικό με μορφή σύρματος, ράβδου ή με ειδικό τοποθετημένο υποστήριγμα στον αύλακα συγκόλλησης. Άρα, μπορούν να συγκολληθούν σχεδόν όλα τα μέταλλα, που τήκονται με την επίδραση της θερμότητας του τόξου, που δεν ατμοποιούνται με την επίδραση του και μπορούν να συγκολληθούν χωρίς ρηγματώσεις. Η συγκόλληση *GTA* προσφέρεται για τη σύνδεση εκτελούμενων αντικειμένων από τα περισσότερα μέταλλα και κράματα. Πολύ μεγάλη ποιότητα της σύνδεσης πετυχαίνεται κατά τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων, κραματωμένων χαλύβων, ανθεκτικών στη διάβρωση, ειδικών χαλύβων, νικελίου, και κραμάτων του, αλουμινίου και κραμάτων αλουμινίου, κραμάτων μαγνησίου, χαλκού και κραμάτων αυτού, όπως *Cu-Ni*, μπρούντζων και ορείχαλκων. Μερικά μέταλλα ραδιενεργά και δυσκολοτηκόμενα μπορούν να συγκολληθούν μόνο με συγκόλληση της μεθόδου *GTA*, επειδή μόνο τότε εξασφαλίζεται, με κατάλληλη προστατευτική ατμόσφαιρα, ο χώρος συγκόλλησης προ της εισχώρησης ατμοσφαιρικού αέρα (παραλείποντας τη δαπανηρή συγκόλληση με εστιασμένη πηγή θερμότητας, δηλαδή δέσμη ακτινών λέιζερ και ηλεκτρονίων). Μη συγκολλούμενα είναι επίσης με τη μέθοδο *GTA* τέτοια μέταλλα, όπως το κάδμιο, ο κασσίτερος κι ο ψευδάργυρος, τα οποία, σε ρευστή κατάσταση, έχουν τάση για

ατμοποίηση. Τα δυσκολοτηκόμενα μέταλλα: το βολφράμιο, το ταντάλιο, το νιόβιο και το χρώμιο, καθώς και τα ραδιενεργά μέταλλα: το τιτάνιο, το ζιρκόνιο και τα κράματα τους, που εύκολα οξειδώνονται σε υψηλές θερμοκρασίες, εφόσον δεν προστατεύονται με κάλυψη αδρανούς αερίου. Η απορρόφηση τέτοιων ακαθαρσιών, όπως το οξυγόνο, άνθρακας, το υδρογόνο και το άζωτο, ελαττώνουν τη δυσθραυστότητα και την πλαστικότητα του μετάλλου της κόλλησης των συνδέσεων αυτών των μετάλλων. Άρα, η συγκόλληση πρέπει να γίνεται σε ειδικούς προστατευτικούς θαλάμους ή με τη χρησιμοποίηση πρόσθετων, τοποθετημένων μετά τη λαβίδα, καλυμμάτων αερίων και με ακρίβεια προστατευτικού υποστηρίγματος από την πλευρά της ρίζας. Η συγκόλληση *GTA* τέτοιων μετάλλων εξασφαλίζει την υψηλή εστίαση της θερμότητας του τόξου, την πολύ μεγάλη ακρίβεια καθοδήγησης της γραμμικής ενέργειας συγκόλλησης και την καλύτερη δυνατή προστασία με αδρανές αέριο στον χώρο συγκόλλησης **πίνακας 5, πίνακας 8 και πίνακας 9.**

Ένταση ρεύματος, [A]	Τάση τόξου, [V]	Ταχύτητα συγκόλλησης	Συχνότητα μαγνητικής ταλάντωσης του τόξου	Είδος και ένταση ροής προστατευτικού αερίου
55[A] σε 0.5[sec] αύξηση ρεύματος από 55[A] σε 116[A], σε χρόνο 7.3[sec], πτώση του ρεύματος από 116[A] σε 22[A], σε χρόνο 3.0[sec]	15.6[V], μήκος τόξου 0.9[mm]	0.0[mm/min] η σε 0.4[sec] και, στη συνέχεια, 750[mm/min] σε 10.3[sec]	55[Hz]	75%He+25%Ar 14[l/min]
Με σκοπό προστασίας της πάστας από το ραδιενεργό υλικό, ανάμεσα στην πάστα και στο τοίχωμα του δοχείου τοποθετήθηκε φυλλωτό (foil) από κράμα ιριδίου, με πάχος 0.127[mm].				

**Πίνακας 8** Τεχνολογικές συνθήκες χειρωνακτικής συγκόλλησης *GTA*, χωρίς τη συμμετοχή πρόσθετου υλικού, για περιφερειακές κολλήσεις μετωπικών περιφερειακών συνδέσεων δοχείου καυσίμων ραδιενεργού πλουτωνίου 238 καθετήρα ερευνητικό *Cassini*. Το κυλινδρικό δοχείο με διάμετρο 30[mm] και πάχος τοιχώματος 0.685[mm] εκτελέστηκε με κράμα ιριδίου *DOP-26*.

Προετοιμασία της σύνδεσης	Ένταση του ρεύματος, [A]	Τάση του τόξου [V]	Ταχύτητα συγκόλλησης, [m/min]	Μήκος του τόξου, [mm]	Διάμετρος ηλεκτροδίου [mm]
Φρεζάρισμα σε 1 με διάκενο 1.0[mm]	125-130	16-20	0.75 – 0.80	2.0 – 3.0	2.4

Η συγκόλληση με συνεχές ρεύμα και αρνητική πολικότητα. Το πρόσθετο υλικό με μορφή ταινίας μήκους 200[mm] και διατομής 2[mm]x25[mm]. Το προστατευτικό αέριο αργό με ένταση 5[l/min]-7[l/min] για προστασία του τόξου, 3.5[l/min] για πρόσθετη προστασία, 2.5[l/min] για προστασία από την πλευρά της ρίζας.

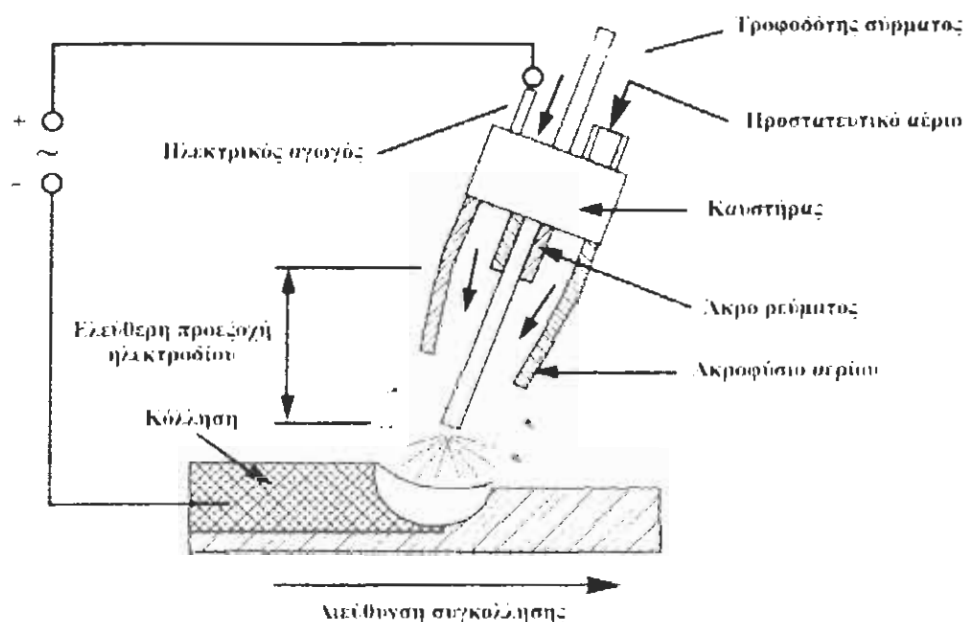
**Πίνακας 9** Τεχνολογικές συνθήκες χειρωνακτικής συγκόλλησης *GTA* μετωπικών συνδέσεων από κράμα τιτανίου Ti 6[V], Al 4[V], με πάχος 2.4[mm], σε θέση επίπεδη.

## 7.2 Συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων—GMA (MIG)

### 7.2.1 Χαρακτηριστικά της μεθόδου

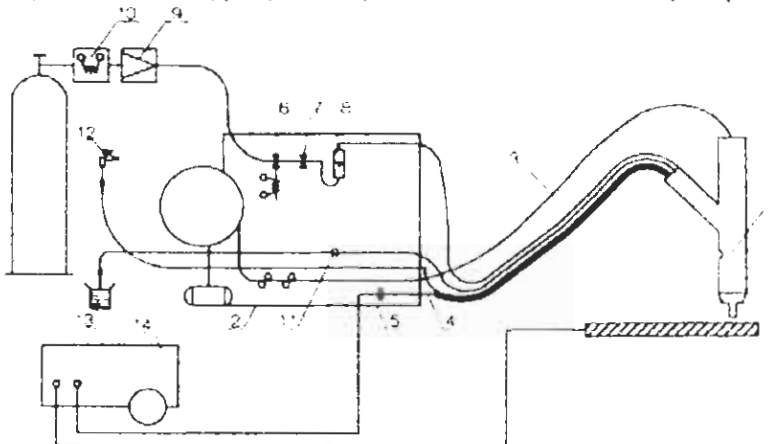
Η συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα προστατευτικών αερίων (ακρωνύμια *GMA* ή *MIG*) είναι η πιο διαδεδομένη

μέθοδος που χρησιμοποιείται για τις συγκολλητές κατασκευές. Η ακρωνύμια *GMA* (*Gas Metall Arc*) αναφέρεται ως υποχρεωτική κυρίως στις Η.Π.Α. και χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στις ευρωπαϊκές χώρες. Η ακρωνύμια αυτή περιέχει όλα τα είδη των προστατευτικών αερίων. Η ακρωνύμια *MIG* (*Metal Inert Gas*) αναφέρεται στις ευρωπαϊκές χώρες ως υποχρεωτική και αφορά μόνο στην προστατευτική ατμόσφαιρα των αδρανών αερίων. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται λιγότερο η ακρωνύμια *MAG* (*Metal Active Gas*), μόνο για τα δραστικά προστατευτικά αέρια. Μερικές φορές χρησιμοποιείται και η συνένωση των ακρωνυμίων *MIG/MAG*. Το αναμμένο τόξο, προστατευόμενο με ακρίβεια ανάμεσα στο τηκόμενο ηλεκτρόδιο (σύρμα) και στο συγκολλούμενο υλικό, εξασφαλίζει ότι η σχηματιζόμενη κόλληση γίνεται σε πολύ ωφέλιμες θερμικές και μεταλλουργικές συνθήκες. Άρα, η συγκόλληση *GMA* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση με υψηλή ποιότητα των συνδέσεων όλων των μετάλλων που μπορούν να συνδεθούν με τη συγκόλληση τόξου. Σ' αυτά ανήκουν οι ανθρακοχάλυβες, οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες, οι χάλυβες που είναι ανθεκτικοί στη διάβρωση, οι ειδικοί χάλυβες, το αλουμίνιο, το μαγνήσιο, ο χαλκός, το νικέλιο και τα κράματα του, όπως, επίσης, το πτάνιο και τα κράματα του. Η συγκόλληση *GMA* συνίσταται στην τήξη του συγκολλούμενου μετάλλου και του υλικού του τηκόμενου ηλεκτροδίου με θερμότητα από το αναμμένο ηλεκτρικό τόξο ανάμεσα στο τηκόμενο ηλεκτρόδιο και στο συγκολλούμενο αντικείμενο, στην ατμόσφαιρα του αερίου, αδρανούς ή δραστικού **σχήμα 15**. Τα βασικά προστατευτικά αέρια που χρησιμοποιούνται για τη συγκόλληση *GMA* είναι τα αδρανή αέρια αργό και ήλιο καθώς και τα δραστικά:  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  και  $NO$ , χρησιμοποιούμενα ξεχωριστά ή μόνο ως προσθήκες στο αργό ή στο ήλιο. Το τηκόμενο ηλεκτρόδιο συνήθως με τη μορφή συμπαγούς σύρματος, με διάμετρο από  $0.5[mm]$ - $4.0[mm]$ , τροφοδοτείται, κατά συνεχή τρόπο, με ειδικό σύστημα τροφοδοσίας, με ταχύτητα στην περιοχή από  $2.5[m/min]$  μέχρι και  $50[m/min]$ .



**Σχήμα 15** Πορεία της διαδικασίας συγκόλλησης με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα προστατευτικού αερίου-GMA.

Ο καυστήρας *GMA* ψύχεται με νερό ή με αέρα. Η συγκόλληση *GMA* διενεργείται με συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα σε όλες τις θέσεις. Τώρα, σχεδόν αποκλειστικά, χρησιμοποιείται στη συγκόλληση *GMA* μόνο συνεχές ρεύμα, με θετική πολικότητα. Η συγκόλληση *GMA* εκτελείται ως ημιαυτόματη μηχανοποιημένη, ως αυτόματη ή ως ρομποτική. Χάρη της μεγάλης πολλαπλότητας της διαδικασίας, της εύκολης ρύθμισης της μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο, η συγκόλληση *GMA* χρησιμεύει για την εκτέλεση διάφορων κατασκευών και με διάφορα μέταλλα και κράματα, σε συνθήκες μηχανουργικές και συναρμολόγησης, σε όλες τις θέσεις. Τώρα είναι, επίσης, βασική διαδικασία συγκόλλησης κατασκευών πλατφόρμων γεώτρησης και υποθαλάσσιων αεραγωγών, βάθους μέχρι και  $600[m]$ . Στο *σχήμα 16*, φαίνεται η διάταξη συγκόλλησης *GMA*. Στη χειρολαβίδα *1* εισέρχονται: το σύρμα που ξετυλίγεται από το τύμπανο, ο αγωγός νερού για την ψύξη, ο αγωγός του αδρανούς αερίου και ο ηλεκτρικός αγωγός. Η ατμόσφαιρα των αδρανών αερίων επιτρέπει τη φόρτιση του ηλεκτροδίου με πολύ υψηλές εντάσεις, γι' αυτό χρησιμοποιείται εναποτιθέμενο υλικό, με σύρματα λεπτής διαμέτρου  $0.8[mm]$ ,  $1.2[mm]$ ,  $1.6[mm]$ ,  $2.0[mm]$ ,  $2.4[mm]$ , ενώ η ένταση του ρεύματος είναι σχετικά υψηλή, από  $100[A]$  έως  $400[A]$ . Επειδή η τήξη του σύρματος γίνεται με μεγάλες ταχύτητες, η προώθηση του αποκτά πολύ υψηλές τιμές, από  $100[m/h]$  μέχρι  $700[m/h]$ . Το σύρμα τροφοδοτείται με σταθερή ταχύτητα, ανεξάρτητη από την τάση του τόξου. Η πηγή του ρεύματος είναι ανορθωτής συγκόλλησης, με σταθερή χαρακτηριστική. Όταν ο χειριστής πατήσει τη σκανδάλη του πιστολιού, ανοίγει η ηλεκτρομαγνητική δικλείδα *6* για τη ροή του αδρανούς αερίου και τίθεται σε λειτουργία ο ηλεκτρικός προθερμαντήρας του αερίου *10*. Συγχρόνως αρχίζει και λειτουργεί το κύκλωμα του νερού ψύξης *12* και *13* και απαραίτητο ρεύμα για το άναμμα του τόξου. Η απελευθέρωση της σκανδάλης από το χειριστή (μετά από  $3[sec]$  έως  $5[sec]$ ) προξενεί τη λειτουργία του μηχανισμού *2* τροφοδοσίας του σύρματος. Με αναλογικό τρόπο, με την απελευθέρωση της σκανδάλης του πιστολιού, ο χειριστής διακόπτει τη λειτουργία της συσκευής. Ύστερα απ' αυτό, οι διάφοροι μηχανισμοί λειτουργούν με αντίθετη σειρά απ' ό,τι κατά την έναρξη της συγκόλλησης. Στο κύκλωμα του νερού ψύξης βρίσκεται ο διακόπτης *11*, ο οποίος διακόπτει το ρεύμα, όταν η ροή του νερού δεν είναι ικανοποιητική



*Σχήμα 16* Διάταξη για τη συγκόλληση τόξου με τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην ατμόσφαιρα προστατευτικού αερίου—*GMA* : *1* λαβίδα, *2* τροφοδότης, *3* ηλεκτρόδιο, *4* ηλεκτρικός αγωγός τροφοδοσίας ρεύματος συγκόλλησης, *5* ζευκτήρας, *6* ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα, *7*,

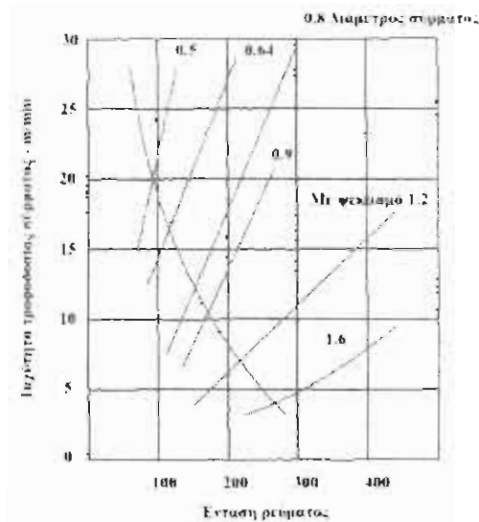
6 βαλβίδα ρύθμισης αερίου, 8 μετρητής αερίου, 9 μανομετροεκτονωτής, 10 προθερμαντήρας αερίου, 11 αποξευκτήρας ρεύματος σε περίπτωση έλλειψης νερού, 12, 13, εισροή και εκροή του νερού, 14 μηχανή συγκόλλησης.

### 7.2.2 Παράμετροι συγκόλλησης

Οι βασικοί παράμετροι συγκόλλησης *GMA* είναι:

- ο τύπος και η ένταση ρεύματος (ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος)
- η τάση του τόξου
- η ταχύτητα συγκόλλησης
- το είδος και η ένταση ροής του προστατευτικού αερίου
- η διάμετρος σύρματος ηλεκτροδίου
- το ελεύθερο μήκος προεξοχής ηλεκτροδίου
- η ταχύτητα τροφοδοσίας σύρματος ηλεκτροδίου
- η κλίση της σύνδεσης ή του ηλεκτροδίου.

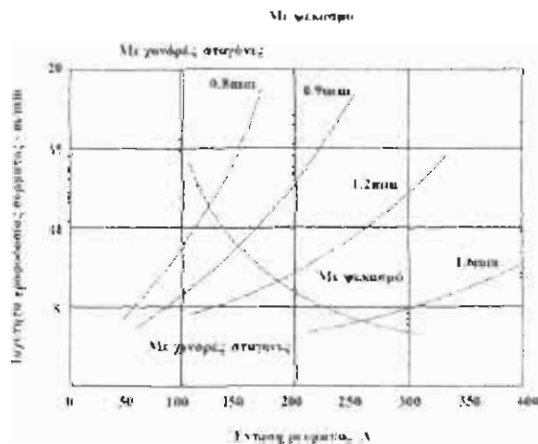
Η συγκόλληση *GMA* με συνεχές ρεύμα και θετική πολικότητα είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος χρησιμοποίησης στη διενέργεια της διαδικασίας *GMA*. Με μικρές εντάσεις ρεύματος, το ηλεκτρόδιο τήκεται, στην ατμόσφαιρα των αδρανών, προστατευτικών αερίων, με χοντρές σταγόνες, χωρίς διασκορπισμό, ενώ στην ατμόσφαιρα  $CO_2$  με σημαντικό διασκορπισμό. Η αποκοπή των σταγόνων από το άκρο του ηλεκτροδίου δυσχεραίνεται και η μεταφορά τους από το τόξο γίνεται μη αξονικά. Με την αύξηση της έντασης του ρεύματος πάνω από ορισμένη κρίσιμη τιμή, στην ατμόσφαιρα με περιεκτικότητα το ελάχιστο 80% *Ar* ή *He*, ο χαρακτήρας μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο μεταβάλλεται από χοντρές σε λεπτές σταγόνες, με ψεκασμό *σχήμα 17*, μέχρι *σχήμα 20*). Η κρίσιμη τιμή της έντασης ρεύματος εξαρτάται από το είδος του προστατευτικού αερίου, την τάση του τόξου, τη διάμετρο του ηλεκτροδίου, το είδος του μετάλλου του ηλεκτροδίου και το ελεύθερο μήκος προεξοχής του ηλεκτροδίου *πίνακας 10* και *σχήμα 17* μέχρι *σχήμα 20*). Για μεγάλες πυκνότητες ρεύματος, το άκρο του ηλεκτροδίου αποκτά αιχμηρή μορφή και, τότε, αποκόπτονται απ' αυτό λεπτές σταγόνες μετάλλου, με όγκο και ταχύτητα μεταφοράς, δια του τόξου, η οποία εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος και το είδος της προστατευτικής ατμόσφαιρας *σχήμα 21*. Στην ατμόσφαιρα  $CO_2$ , ακόμη και με σημαντική αύξηση της έντασης του ρεύματος, δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί η μεταφορά του μετάλλου με ψεκασμό στο τόξο, το μέγεθος των σταγόνων ελαττώνεται, αλλά δεν έχουν όλες αξονική διεύθυνση και, πάλι,



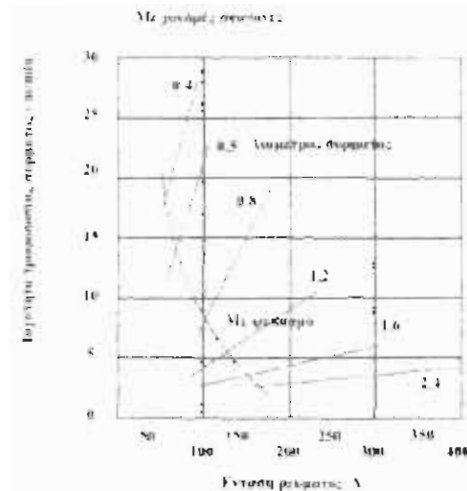
Σχήμα 17 Η σχέση της ταχύτητας τροφοδοσίας του σύρματος ηλεκτροδίου από ελαφρά κραματωμένο χάλυβα με την ένταση του ρεύματος και τη διάμετρο του σύρματος, κατά τη συγκόλληση GMA με συνεχές ρεύμα και θετική κολικότητα στην ατμόσφαιρα Ar+2%O<sub>2</sub>. Το ελεύθερο μήκος προεξοχής του σύρματος 15[mm]-20[mm], οριακή γραμμή κρίσιμων ρευμάτων.

Διάμετρος ηλεκτροδίου, [mm]	Ένταση κρίσιμου ρεύματος, [A]	
	Χάλυβας-ατμόσφαιρα Ar+2%O <sub>2</sub>	Αλουμίνιο-ατμόσφαιρα Ar
0.75	155	90
0.90	170	95
1.15	220	120
1.60	275	170

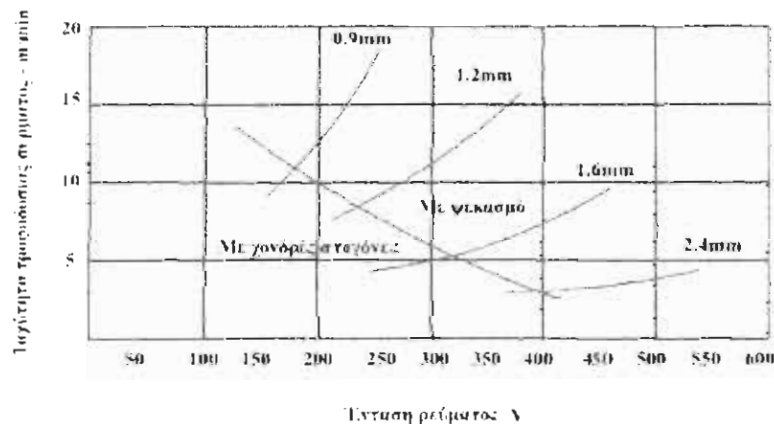
Πίνακας 10 Η επίδραση του υλικού και της διαμέτρου του ηλεκτροδίου στο μέγεθος της έντασης του κρίσιμου ρεύματος



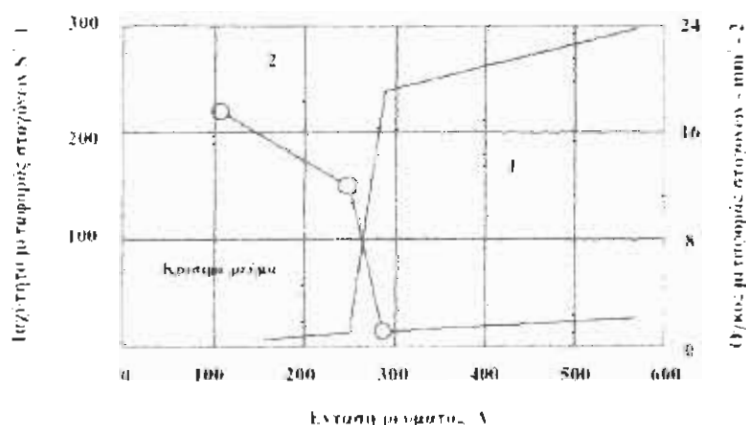
Σχήμα 18 Η σχέση της ταχύτητας τροφοδοσίας του σύρματος ηλεκτροδίου από ωστενιτικό χάλυβα τύπου 18.8 με την ένταση του ρεύματος και τη διάμετρο του σύρματος, κατά τη συγκόλληση GMA με συνεχές ρεύμα και θετική κολικότητα στην ατμόσφαιρα Ar+2%O<sub>2</sub>. Το ελεύθερο μήκος προεξοχής του σύρματος 15[mm]-20[mm] οριακή γραμμή κρίσιμων ρευμάτων.



**Σχήμα 19** Η σχέση της ταχύτητας τροφοδοσίας του σύρματος ηλεκτροδίου από αλουμίνιο με την ένταση του ρεύματος και τη διάμετρο του σύρματος, κατά τη συγκόλληση GMA με συνεχές ρεύμα και θετική πολικότητα στην ατμόσφαιρα αργού. Το ελεύθερο μήκος προεξοχής του σύρματος 20[mm]-25[mm] οριακή γραμμή κρίσιμων ρευμάτων.



**Σχήμα 20** Η σχέση της ταχύτητας τροφοδοσίας του σύρματος ηλεκτροδίου από χαλκό με την ένταση του ρεύματος και τη διάμετρο του σύρματος, κατά τη συγκόλληση GMA με συνεχές ρεύμα και θετική πολικότητα στην ατμόσφαιρα αργού. Το ελεύθερο μήκος προεξοχής του σύρματος 20[mm]-25[mm] οριακή γραμμή κρίσιμων ρευμάτων.



**Σχήμα 21** Η επίδραση της έντασης ρεύματος συγκόλλησης GMA, στην ατμόσφαιρα Ar+1% O<sub>2</sub>, με σύρμα διαμέτρου 1.6[mm] από ελαφρά κραματωμένο χάλυβα, με συνεχές ρεύμα και



θετική πολικότητα στον όγκο των σταγόνων του ρευστού μετάλλου; στο τόξο και στην ταχύτητα μεταφοράς τους.

εμφανίζεται μεγάλος διασκορπισμός. Το μέγεθος αυτού του διασκορπισμού μπορεί να μειωθεί με τέτοια ρύθμιση των παραμέτρων συγκόλλησης, που το άκρο του ηλεκτροδίου να βρεθεί κάτω από την επιφάνεια του λουτρού συγκόλλησης, με δυναμική δράση του τόξου. Οι περισσότερες μη αξονικές σταγόνες συγκρατώνται από το ρευστό μέταλλο του λουτρού και ο διασκορπισμός είναι μόνο 2%-3%. Χρησιμοποιώντας κατάλληλη επαγωγιμότητα του κυκλώματος συγκόλλησης, επίσης, ελαττώνεται ο διασκορπισμός, με τον περιορισμό του δυναμικού του ρεύματος, που αποτελεί μία από τις αιτίες του

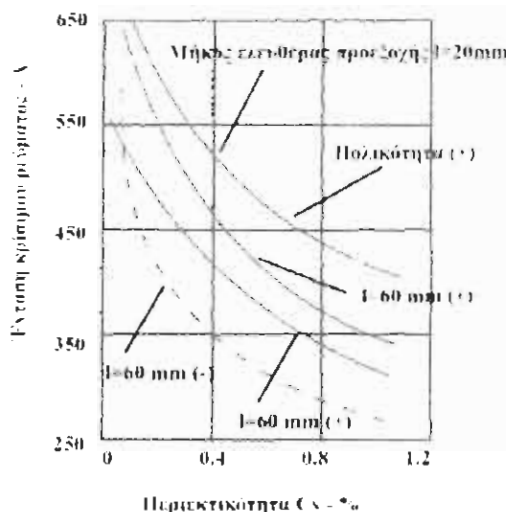
Τύπος υλικού ηλεκτροδίου	Διάμετρος ηλεκτροδίου, [mm]	Είδος προστατευτικού αερίου	Ελάχιστη ένταση κρίσιμου ρεύματος
Χάλυβας C-Mn	0.8	98% Ar+2% O <sub>2</sub>	150
	0.9	98% Ar+2% O <sub>2</sub>	165
	1.1	98% Ar+2% O <sub>2</sub>	220
	1.2	92% Ar+8% CO <sub>2</sub>	220
	1.2	82% Ar+18% CO <sub>2</sub>	242
	1.2	72% Ar+28% CO <sub>2</sub>	250
	1.6	98% Ar+2% O <sub>2</sub>	275
Χάλυβας ωστενιτικός	0.9	98% Ar+2% O <sub>2</sub>	170
	1.1	98% Ar+2% O <sub>2</sub>	225
	1.6	98% Ar+2% O <sub>2</sub>	285
Αλουμίνιο	0.8	Αργό	95
	1.1	Αργό	135
	1.6	Αργό	180
Χαλκός αποξειδωμένος	0.9	Αργό	180
	1.1	Αργό	210
	1.6	Αργό	310
Μπρούντζος πυρτίου	0.9	Αργό	165
	1.1	Αργό	205
	1.6	Αργό	270

**Πίνακας 11** Ελάχιστες τιμές κρίσιμου ρεύματος κατά τη συγκόλληση GMA διάφορων μετάλλων και κραμάτων

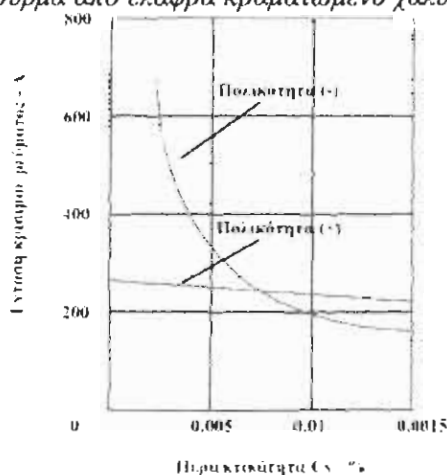
διασκορπισμού, εμφανιζόμενος κατά τη βραχυκύκλωση των σταγόνων του μετάλλου του ηλεκτροδίου με το λουτρό συγκόλλησης. Η συγκόλληση GMA, στην ατμόσφαιρα αδρανών αερίων ή με προσθήκη O<sub>2</sub> και CO<sub>2</sub>, διενεργείται κυρίως με ψεκασμό του μετάλλου στο τόξο, επειδή τότε το όφελος ανέρχεται μέχρι 99% και πρακτικά δεν υπάρχει διασκορπισμός, ενώ η διεισδυτικότητα είναι μεγάλη.

**Η συγκόλληση GMA με συνεχές ρεύμα, με αρνητική πολικότητα,** στην ατμόσφαιρα αδρανών και δραστικών αερίων, διευκολύνει μόνο τη συγκόλληση με χοντρές σταγόνες και με μη αξονική μεταφορά του μετάλλου στο τόξο, ανεξάρτητα από το μέγεθος της έντασης του ρεύματος. Ο διασκορπισμός του μετάλλου είναι σημαντικός, ενώ η διεισδυτικότητα είναι σημαντικά μειωμένη απ' ό,τι με τη θετική πολικότητα, παρόλο που η απόδοση τήξης του ηλεκτροδίου είναι μέχρι και 100% υψηλότερη. Το τόξο δεν έχει σταθερό άναμμα αλλά κατά διακοπτόμενο τρόπο. Η καθοδική κηλίδα ταξιδεύει γύρω από το άκρο του ηλεκτροδίου και εξαλείφει το φαινόμενο της πλασμικής ροής του αερίου. Η προσθήκη μέχρι 5%O<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα του αργού, με κατάλληλα υψηλές πυκνότητες ρεύματος, μεταβάλλει το χαρακτήρα μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο έτσι, που πλησιάζει τη μορφή ψεκασμού. Η επικάλυψη των επιφανειών του

ηλεκτροδίου με αλκαλικά στοιχεία και με αρνητικό πόλο στο ηλεκτρόδιο, στην ατμόσφαιρα των αδρανών αερίων ή μιγμάτων αδρανών αερίων με  $CO_2$  και  $O_2$ , ακόμη και στην καθαρή ατμόσφαιρα  $CO_2$ , εξασφαλίζει τη μεταφορά του μετάλλου στο τόξο με ψεκασμό και την εξάλειψη του διασκορπισμού *σχήμα 22* και *σχήμα 23*. Με σκοπό τη μείωση του κρίσιμου ρεύματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, επίσης, μεγαλύτερη ελεύθερη προεξοχή του ηλεκτροδίου *σχήμα 24*.



*Σχήμα 22* Επίδραση της περιεκτικότητας του καυσίου, στην επίστρωση του σύρματος, στο μέγεθος της έντασης του κρίσιμου ρεύματος, κατά τη συγκόλληση GMA με συνεχές ρεύμα στην ατμόσφαιρα  $CO_2$  με σύρμα από ελαφρά κραματωμένο χάλυβα με διάμετρο 1.6

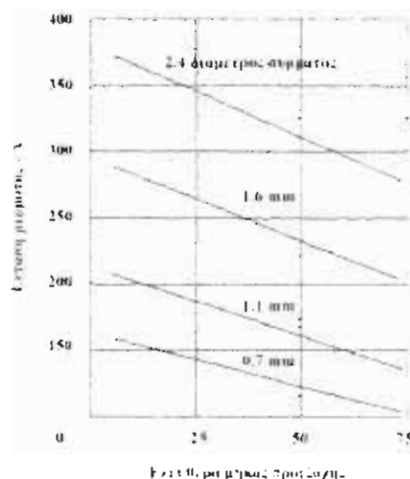


*Σχήμα 23* Επίδραση της περιεκτικότητας του καυσίου, στην επίστρωση του σύρματος, στο μέγεθος του κρίσιμου ρεύματος, κατά τη συγκόλληση GMA με συνεχές ρεύμα στην ατμόσφαιρα  $Ar+1\%O_2$ , με σύρμα από ελαφρά κραματωμένο χάλυβα με διάμετρο 16[mm]. Το ελεύθερο μήκος προεξοχής-20[mm].

**Η συγκόλληση GMA με εναλλασσόμενο ρεύμα** απαιτεί τη χρησιμοποίηση πηγών ρεύματος με υψηλή τάση εν κενό (OVC), με σκοπό την εξασφάλιση της σταθερότητας του ανάμματος του τόξου και τη μεταφορά του μετάλλου με χοντρές σταγόνες στο τόξο. Όταν το ηλεκτρόδιο έχει αρνητική πολικότητα, η μεταφορά του μετάλλου δυσχεραίνεται και εμφανίζεται διασκορπισμός, ενώ με θετική πολικότητα το τόξο έχει σταθερότητα. Με το επικαλυμμένο ηλεκτρόδιο με αλκαλικά στοιχεία εξασφαλίζεται, όπως και κατά τη συγκόλληση με συνεχές

ρεύμα, με αρνητική πολικότητα, η σταθερή μεταφορά του μετάλλου με ψεκασμό. Η συγκόλληση με εναλλασσόμενο ρεύμα δεν έχει μεγάλη εφαρμογή στη βιομηχανία.

**Η συγκόλληση GMA με συνεχές παλμικό ρεύμα** διευκολύνει τη μείωση του κρίσιμου ρεύματος, σε σχέση με τη συγκόλληση με σταθερό συνεχές ρεύμα, με θετικό πόλο στο ηλεκτρόδιο. Στο βασικό ρεύμα με θετικό πόλο στο ηλεκτρόδιο προστίθενται παλμοί ρεύματος μικρής διάρκειας, με την επίδραση των οποίων αυξάνεται η ταχύτητα τήξης του άκρου του ηλεκτροδίου και της αποκοπής των σταγόνων του μετάλλου **σχήμα 25**.

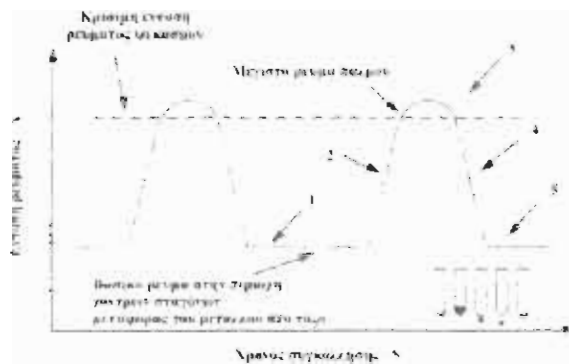


**Σχήμα 24** Επίδραση του ελεύθερου μήκους προεξοχής του ηλεκτροδίου στο μέγεθος της έντασης του κρίσιμου ρεύματος, για διάφορες διαμέτρους σύρματος, κατά τη συγκόλληση GMA με συνεχές ρεύμα και θετική πολικότητα στην ατμόσφαιρα Ar + 2% O<sub>2</sub>.

Η τιμή της έντασης του βασικού ρεύματος  $J_p$  είναι υψηλότερη από την ένταση του κρίσιμου ρεύματος. Εξαιτίας αυτού, το ηλεκτρόδιο τήκεται με ψεκαστικό τρόπο και με μεγαλύτερη ταχύτητα. Μεταβάλλοντας τις βασικές παλμικές παραμέτρους του ρεύματος μεταφοράς του μετάλλου, είναι δυνατόν το ρεύμα να ρυθμισθεί κατά τέτοιο τρόπο, που με κάθε παλμό του ρεύματος, από το άκρο του ηλεκτροδίου αποκόπτεται μία σταγόνα μετάλλου με καθορισμένες διαστάσεις.

Προτείνεται η συγκόλληση με συχνότητα παλμών ρεύματος από 30[Hz]-100[Hz] ανάλογα με το είδος του συγκολλούμενου μετάλλου και τη θέση συγκόλλησης, στην περιοχή των εντάσεων του ρεύματος **πίνακας 12**. Η συγκόλληση σε εξαναγκασμένες θέσεις, για την υπερνίκηση των δυνάμεων βαρύτητας, απαιτεί την αύξηση του παλμικού ρεύματος  $J_i$  όπως και τη συχνότητα των παλμών.

**Η μεταφορά του μετάλλου με βραχυκύκλωση στο τόξο** εμφανίζεται με ένταση ρεύματος συγκόλλησης κάτω από το κρίσιμο και με χαμηλότερη τάση του τόξου απ' ό,τι κατά τη μεταφορά του μετάλλου με χονδρές σταγόνες **σχήμα 26**, **πίνακας 13**. Το μέταλλο μεταφέρεται από το τηκόμενο ηλεκτρόδιο στην περιοχή της συγκόλλησης μόνο κατά το χρόνο που είναι βραχυκυκλωμένο το τηκόμενο άκρο του ηλεκτροδίου με το λουτρό της κόλλησης. Δεν υπάρχει ελεύθερη μεταφορά των σταγόνων του μετάλλου από το τόξο, όπως συμβαίνει με το τόξο των χονδρών σταγόνων και ψεκασμού. Το ηλεκτρόδιο βραχυκυκλώνεται με το ρευστό λουτρό, με σταθερή συχνότητα στην περιοχή από 20 ως άνω από 200 βραχυκυκλώσεις ανά δευτερόλεπτο **σχήμα 26**.



**Σχήμα 25** Πορεία μεταβολών ρεύματος και μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο, κατά τη συγκόλληση GMA με παλμικό ρεύμα.

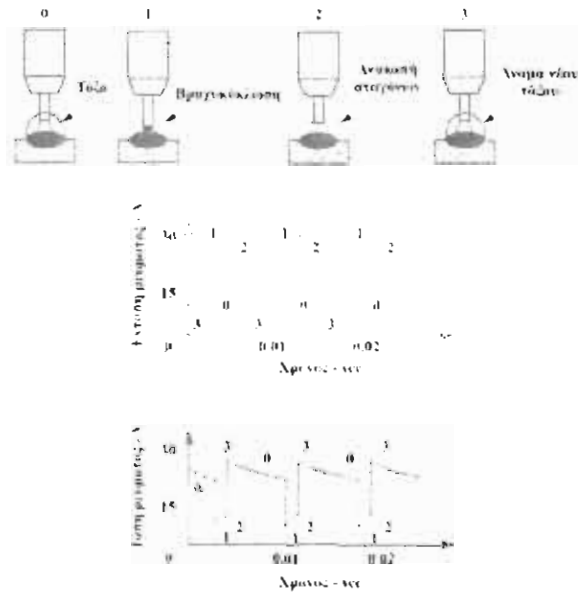
Διάμετρος σύρματος [mm]	Ένταση ρεύματος [A]					
	Κράμα αλουμινίου προστατευτικό αέριο Ar		Ωστενιτικός χάλυβας προστατευτικό αέριο Ar+2% O <sub>2</sub>		Κράμα μαγνησίου προστατευτικό αέριο Ar	
	J <sub>p</sub>	J <sub>i</sub>	J <sub>p</sub>	J <sub>i</sub>	J <sub>p</sub>	J <sub>i</sub>
0.8	30	80	40	130	-	-
1.0	-	-	-	-	40	100
1.2	-	-	60	180	-	-
1.4	60	130	-	-	60	125
1.6	70	250	90	250	80	250
2.0	120	300	-	-	80	375

**Πίνακας 12** Προτεινόμενες περιοχές εντάσεων ρεύματος κατά τη συγκόλληση GMA διάφορων μετάλλων, με συνεχές παλμικό ρεύμα, με θετική πολικότητα.

Η ένταση ρεύματος, με σταθερές τις υπόλοιπες παραμέτρους, μεταβάλλεται με τη μεταβολή της ταχύτητας τροφοδοσίας του σύρματος, η οποία πρέπει να είναι ίδια με την ταχύτητα τήξης του σύρματος **σχήμα 17** μέχρι **σχήμα 20**. Με την περαιτέρω αύξηση της έντασης του ρεύματος άνω της κρίσιμης τιμής, για δεδομένη διάμετρο ηλεκτροδίου μικραίνει το μέγεθος των σταγόνων, αυξάνεται η συχνότητα διάβασης τους και διορθώνεται η σταθερότητα του τόξου **σχήμα 21**. Η υπέρβαση της δεύτερης κρίσιμης έντασης του ρεύματος **σχήμα 27** έχει ως αποτέλεσμα να μετατοπίζονται σε τροχιά σπείρας οι λεπτές σταγόνες και να αυξάνεται σημαντικά η απόδοση τήξης. Με μεγάλες πυκνότητες ρεύματος, της τάξης των 600-700

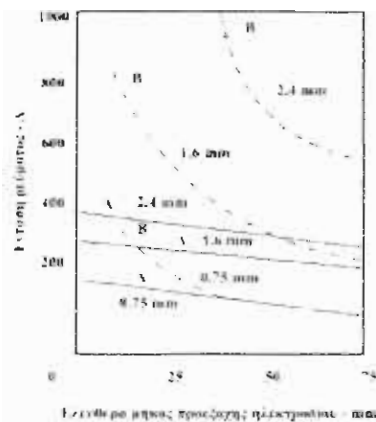
Διάμετρος	Θέση επίπεδη		Θέση εξαναγκασμένη	
	I <sub>min</sub> [A]	I <sub>max</sub> [A]	I <sub>min</sub> [A]	I <sub>max</sub> [A]
0.8	50	150	50	125
0.9	75	175	75	150
1.2	100	225	100	175

**Πίνακας 13** Προτεινόμενες περιοχές έντασης ρεύματος συγκόλλησης GMA, με συνεχές ρεύμα και θετική πολικότητα, ελαφρά κραματομένων χάλυβων. Η μεταφορά του μετάλλου με βραχυκύκλωση.



**Σχήμα 26** Μεταφορά βραχυκύκλωσης του μετάλλου στο τόξο, κατά τη διαδικασία συγκόλλησης GMA και οι συνδεόμενες μ' αυτό μεταβολές της έντασης ρεύματος και της τάσης του τόξου.

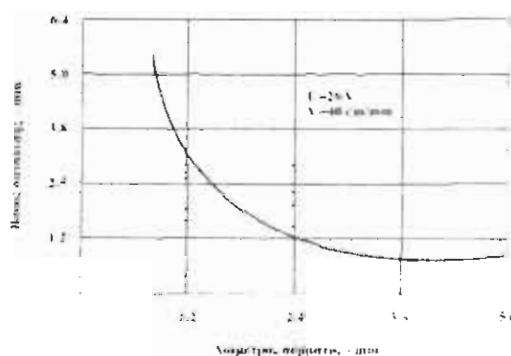
$[A/mm^2]$ , πετυχαίνονται καλύτερα αποτελέσματα συγκόλλησης, υψηλή απόδοση συγκόλλησης που ανέρχεται πάνω από  $20[Kgr]$  εναποτιθέμενου υλικού ανά ώρα. Με σταθερή ένταση ρεύματος, το βάθος διείσδυσης αυξάνεται με τη μείωση της διαμέτρου του ηλεκτροδίου **σχήμα 28**. Η ημιαυτόματη συγκόλληση διενεργείται, συνήθως, με μεσαίες τιμές έντασης ρεύματος έτσι, που ο χειριστής να μπορεί, καταλλήλως, να μετακινεί γρήγορα τον καυστήρα. Στις διαδικασίες μηχανοποίησης και αυτόματης συγκόλλησης GMA, γίνεται χρήση των μεγαλύτερων δυνατών πυκνοτήτων και ταχυτήτων συγκόλλησης. **Η τάση του τόξου** εξαρτάται από την προστατευτική ατμόσφαιρα **πίνακας 14**. Η αύξηση της τάσης του τόξου επιδρά στην αύξηση του πλάτους του κορδονίου της κόλλησης και μειώνει το βάθος διείσδυσης. Η υπερβολική αύξηση της τάσης του τόξου δημιουργεί διασκορπισμό, πορώδες και υποκοπές στο μέτωπο της κόλλησης. Η αρκετά χαμηλή τάση του τόξου προξενεί το πορώδες της κόλλησης και εμφανίζει εκροές στο μέτωπο. Η σωστή επιλογή της τάσης είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων, όπως του είδους και της έντασης του ρεύματος συγκόλλησης, του πάχους της σύνδεσης και του είδους της κόλλησης, της θέσης συγκόλλησης, της διαμέτρου του ηλεκτροδίου, του είδους του συγκολλούμενου υλικού και της χημικής σύστασης του προστατευτικού αερίου. Κατά τη συγκόλληση GMA σε επίπεδη θέση, χρησιμοποιείται υψηλή τάση του τόξου σε σχέση με ό,τι συμβαίνει σε εξαναγκασμένες θέσεις. Οι χαμηλότερες τάσεις του τόξου προτείνονται για τη συγκόλληση λεπτών έλασμάτων και σε χαμηλές εντάσεις του ρεύματος συγκόλλησης καθώς και για την τεχνική συγκόλλησης GMA με τόξο βραχυκύκλωσης.



**Σχήμα 27** Επίδραση της διαμέτρου και του ελεύθερου μήκους του ηλεκτροδίου στο μέγεθος της έντασης κρίσιμου ρεύματος, κατά τη συγκόλληση GMA, με σύρμα από ανθρακοχάλυβα χαμηλού άνθρακα, με συνεχές ρεύμα και θετική πολικότητα στην ατμόσφαιρα  $Ar+1\% O_2$ . A καμπύλη κρίσιμου ρεύματος ανάμεσα στη με μεγάλες σταγόνες και με ψεκασμό μεταφορά του μετάλλου στο τόξο

Η ταχύτητα συγκόλλησης είναι παράμετρος αποτελέσματος, για δεδομένη ένταση ρεύματος και τάση τόξου, με τη διατήρηση ορθής μορφής κορδονίου της κόλλησης. Για σημαντική αλλαγή της ταχύτητας συγκόλλησης επιβάλλεται, συγχρόνως, και η αλλαγή της έντασης ρεύματος και της τάσης του τόξου. Η αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης επιδρά στη στένωση της κόλλησης και στη μείωση του βάθους διείσδυσης, ενώ με την περαιτέρω αύξηση της δημιουργούνται υποκοπές στο μέτωπο. Με τη χρήση μεγάλων ταχυτήτων συγκόλλησης αποφεύγεται η δημιουργία υποκοπών. Αυτό πετυχαίνεται με την αύξηση του μήκους ελεύθερης προεξοχής του ηλεκτροδίου, και με την κλίση του αντικειμένου από πάνω προς τα κάτω ή με την κλίση του καυστήρα προς τη διεύθυνση της συγκόλλησης. Οι μικρές ταχύτητες συγκόλλησης προξενούν την αύξηση του βάθους διείσδυσης, το πλάτος του μετώπου και το ύψος της ενίσχυσης.

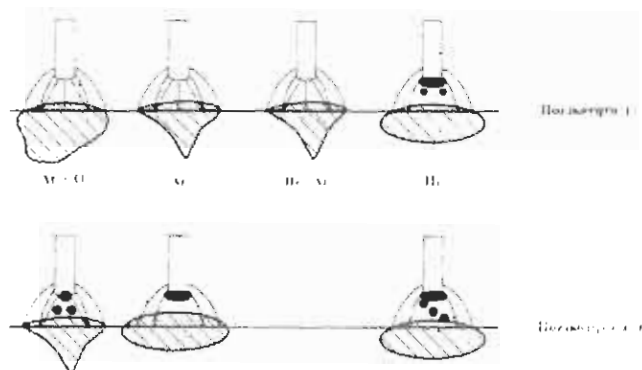
Το προστατευτικό αέριο είναι αποφασιστικό για την απόδοση της ατμόσφαιρας προστασίας του χώρου συγκόλλησης, τον τρόπο μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο, την ταχύτητα συγκόλλησης και τη σχηματιζόμενη μορφή της κόλλησης (σχήμα 29, σχήμα 30 και σχήμα 31).



**Σχήμα 28** Επίδραση της διαμέτρου του σύρματος στο βάθος διείσδυσης, κατά τη συγκόλληση GMA στην ατμόσφαιρα  $Ar+2\% O_2$ , ελασμάτων από ωστενιτικό χάλυβα τύπου 18.8 και πάχος 8[mm] η συγκόλληση με συνεχές ρεύμα και θετική πολικότητα, με ένταση 300[A].

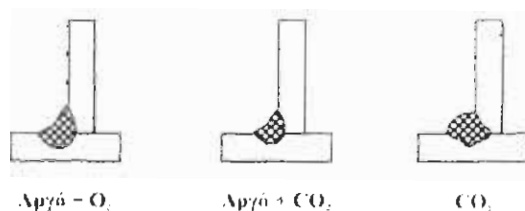
Σηκκολλούμενο μέταλλο	Μεταφερόμενες σταθόνες μετάλλου-σύμμα-1.6 [mm]					Μεταφερόμενο μέταλλο με βραχυκύκλιωση-σύμμα-0.9 [mm]				
	Ar	He	He+25% Ar	Ar+1%-5% O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Ar	Ar+1-5% O <sub>2</sub>	Ar+25% CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Αλουμίνιο+ Μάγγανιο	25-26	-	28-29	-	-	16-19	-	-	-	-
Ανθρακοχάλυβας	-	-	-	26	30	-	18-19	19-21	20	20
Χάλυβας C-Mn	-	-	-	26-28	30	17-18	18-19	19-21	20	20
Χάλυβας 18-8	24	-	-	28	-	-	18-19	19-21	-	-
Νικέλιο-Κράματα Ni-Cu	26	30	28	-	-	22	-	-	-	-
Ni-Cu-Cr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Χαλκός-Κράματα Cu-Ni	28-30	32-36	30-33	-	-	23-24	-	-	-	-
Μαρουντζοί	28	32	30	23-28	-	23	-	-	-	-

**Πίνακας 14** Προτεινόμενες τάσεις τόξου κατά τη συγκόλληση GMA για διάφορα μέταλλα και κράματα.



**Σχήμα 29** Επίδραση του είδους προστατευτικής ατμόσφαιρας αερίου και της ποικιότητας του ρεύματος συγκόλλησης GMA στον τρόπο μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο και στη μορφή του κορδονιού της κόλλησης, για συνδέσεις χαλύβδινων ελασμάτων.

Τα αδρανή αέρια αργό και ήλιο, παρά το γεγονός ότι προστατεύουν απόλυτα το ρευστό μέταλλο της κόλλησης από την εισχώρηση του ατμοσφαιρικού αέρα, δεν είναι κατάλληλα για όλες τις χρήσεις με τη συγκόλληση GMA **πίνακας 14** και **πίνακας 15**.



**Σχήμα 30** Επίδραση του είδους μίγματος προστατευτικών αερίων στη μορφή τον κορδονιού αυχενικής κόλλησης, κατά τη συγκόλληση GMA σύνδεσης του.



**Σχήμα 31** Επίδραση της προσθήκης ηλίου, στην ατμόσφαιρα αργού, στη μορφή της κόλλησης, κατά τη συγκόλληση GMA ελαφρά κραματωμένων χαλύβων.

Με την ανάμιξη σε κατάλληλες αναλογίες του ηλίου και του αργού με τα δραστικά χημικά αέρια πετυχαίνεται η μεταβολή του χαρακτήρα μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο, διατηρείται η σταθερότητα του τόξου και προσφέρεται η δυνατότητα αλληλεπίδρασης στις μεταλλουργικές διαδικασίες, στο λουτρό συγκόλλησης. Συγχρόνως, παρέχεται σημαντική δυνατότητα για τον περιορισμό ή ακόμη και για την καθολική εξάλειψη του διασκορπισμού (πιτσιλίσματος). Τα βασικά δραστικά αέρια είναι:  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $NO$ ,  $N_2$  και  $H_2$ . Από τα δραστικά αέρια, μόνο το  $CO_2$  χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση χωρίς προσθήκες άλλων αερίων, επειδή όμως είναι φθηνό αέριο, στην ατμόσφαιρα του συγκολλούνται συνδέσεις από ανθρακοχάλυβες και μερικοί ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες. Η προσθήκη  $CO_2$  στην ατμόσφαιρα του αργού αυξάνει ξεκάθαρα το μέγεθος του κρίσιμου ρεύματος **πίνακας 16**, αλλά συγχρόνως διορθώνει και τη σταθερότητα



του τόξου και, ουσιαστικά, μειώνει το κόστος συγκόλλησης.

Προστατευτικό αέριο	Χημική αντίδραση	Συγκολλούμενα μέταλλα
1	2	3
Ar	αδρανή	βασικά όλα τα μέταλλα εκτός των ανθρακοχαλύβων
He	αδρανή	Al, Cu, κράματα Cu, κράματα Mg, βεβαιότητα για μεγάλη γραμμική ενέργεια
Ar+20-80% He	αδρανή	Al, Ca, κράματα Cu, Mg, εξασφαλισμένη μεγάλη γραμμική ενέργεια συγκόλλησης, μικρή θερμική αγωγιμότητα αερίου.
N <sub>2</sub>	αναγωγικό	συγκόλληση του χαλκού με μεγάλη γραμμική ενέργεια
Ar+25-20% N <sub>2</sub>	αναγωγικό	συγκόλληση του χαλκού με μεγάλη γραμμική ενέργεια του τόξου, καλύτερο άναμμα του τόξου απ' ό,τι στην ατμόσφαιρα με 100% N <sub>2</sub>
Ar+1-2% O <sub>2</sub>	ελαφρά οξειδωτικό	προτείνεται κυρίως για τη συγκόλληση χαλύβων ανθεκτικών στη διάβρωση και χαλύβων κραματωμένων
Ar+3-5% O <sub>2</sub>	οξειδωτικό	προτείνεται για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων και ελαφρά κραματωμένων χαλύβων
CO <sub>2</sub>	οξειδωτικό	προτείνεται αποκλειστικά για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων
Ar+20-50% CO <sub>2</sub>	οξειδωτικό	προτείνεται αποκλειστικά για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων και ελαφρά κραματωμένων χαλύβων
Ar+10% CO <sub>2</sub> +5% O <sub>2</sub>	οξειδωτικό	προτείνεται αποκλειστικά για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων και ελαφρά κραματωμένων χαλύβων
CO <sub>2</sub> +20% O <sub>2</sub>	οξειδωτικό	προτείνεται αποκλειστικά για τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων και ελαφρά κραματωμένων χαλύβων
90% He+7.5% Ar+2.5% CO <sub>2</sub>	Ελαφρά οξειδωτικό	χάλυβες ανθεκτικοί στη διάβρωση, συγκόλληση με τόξο βραχυκύκλωσης
610% He+35% Ar+5% CO <sub>2</sub>	οξειδωτικό	χάλυβες ελαφρά κραματωμένοι με υψηλή δυσθραυστότητα, συγκόλληση με τόξο βραχυκύκλωσης.

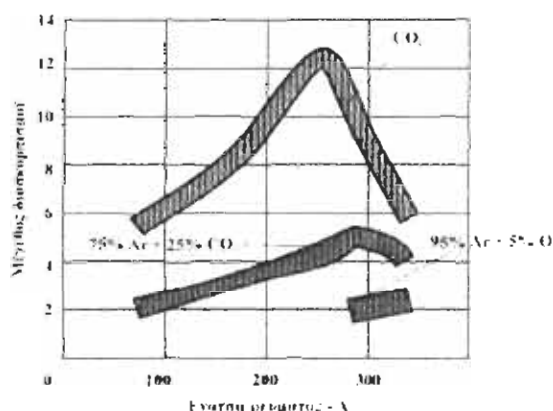
**Πίνακας 15** Αέρια και μίγματα που χρησιμοποιούνται κατά τη συγκόλληση GMA

Στη συνέχεια για τη μείωση του διασκορπισμού απαιτείται περιεκτικότητα του οξυγόνου στο τήγμα όπως και η διόρθωση της ποιότητας της σύνδεσης και γι' αυτό, κατά τη συγκόλληση στην ατμόσφαιρα του CO<sub>2</sub>, επιβάλλεται η προσθήκη Ar ή O<sub>2</sub> **σχήμα 32**. Με την προσαγωγή, στην ατμόσφαιρα αργού+CO<sub>2</sub>, ακόμη και ελάχιστης ποσότητας οξειδίου του αζώτου, της τάξεως του 0.02%-0.05%, το διοξείδιο του αζώτου αντιδρά με το όζον και, κατ' αυτόν τον τρόπο, είναι πολύ ωφέλιμες οι συνθήκες εργασίας του χειριστή.

Σύσταση του μίγματος	Τάση του τόξου, [V]	Μέθοδος του κρίσιμου ρεύματος, [A]
Αργό+8% CO <sub>2</sub>	31.7	220
Αργό+18% CO <sub>2</sub>	30.8	242
Αργό+28% CO <sub>2</sub>	31.5	250

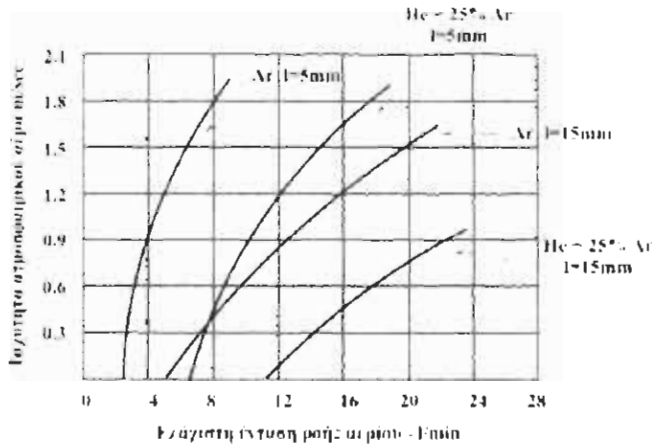
**Πίνακας 16** Η επίδραση της σύστασης του προστατευτικού αερίου στο μέγεθος του κρίσιμου ρεύματος, κατά τη συγκόλληση GMA με συνεχές ρεύμα, με θετικό πόλο στο ηλεκτρόδιο

Το άζωτο και το υδρογόνο χρησιμοποιούνται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όταν σκοπός είναι η αύξηση της θερμικής ενέργειας του τόξου, χωρίς τον κίνδυνο δημιουργίας σφαλμάτων στη σύνδεση. Μερικές φορές, η ατμόσφαιρα καθαρού αζώτου χρησιμεύει για τη συγκόλληση GMA χονδρών ελασμάτων χαλκού, αλλά η διαδικασία συγκόλλησης είναι αρκετά ασταθής. Η προσθήκη  $O_2$  ή  $CO_2$  στην αδρανή ατμόσφαιρα αερίων, του αργού ή του μίγματος αργού και ηλίου, συντελεί ώστε η ατμόσφαιρα του τόξου να είναι οξειδωμένη, άρα περισσότερα οξειδία εμφανίζονται στην επιφάνεια της κόλλησης και είναι μειωμένο το έργο εξόδου των ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του λουτρού συγκόλλησης. Αυτό εξασφαλίζει τη σταθερότητα ανάμματος του τόξου και μειώνει σημαντικά το διασκορπισμό του μετάλλου. Επίσης, εξαλείφονται και ο υποκοπές του μετώπου. Το μέταλλο μεταφέρεται στο τόξο με ψεκασμό και υπάρχει δυνατότητα αύξησης της ταχύτητας συγκόλλησης. Η προσθήκη ακόμη και μέχρι 5%  $O_2$ , στην ατμόσφαιρα του αργού ή του ηλίου, δεν προξενεί εμφανή οξείδωση της κόλλησης ή απώλεια των προσθηκών κραμάτωσης στους ανθεκτικούς στη διάβρωση χάλυβες.



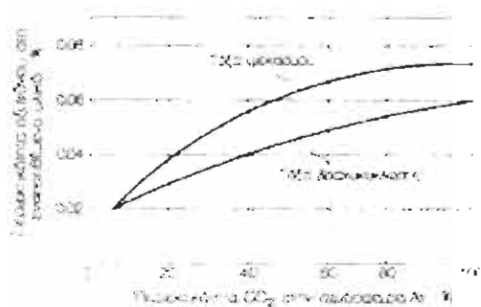
**Σχήμα 32** Επίδραση της προσθήκης  $CO_2$  στην προστατευτική ατμόσφαιρα αργού, στο μέγεθος διασκορπισμού και το όφελος που επιφέρει το εναποτιθέμενο υλικό, κατά τη συγκόλληση GMA, με σύρμα από ελαφρά κραματωμένο χάλυβα και διάμετρο 1.1 [mm], με συνεχές ρεύμα και θετική πολικότητα.

Η ένταση ροής προστατευτικού αερίου επιλέγεται κατά τέτοιο τρόπο, που να εξασφαλίζεται σταθερά η προστασία του χώρου συγκόλλησης, ακόμη και από εγκάρσια ρεύματα ατμοσφαιρικού αέρα **σχήμα 33**. Οι προτεινόμενες εντάσεις των προστατευτικών αερίων, κατά τη μεταφορά του μετάλλου με ψεκασμό των σταγόνων ή με βραχυκύκλωση, παρουσιάζονται στον **πίνακα 17**. Πρακτικός κανόνας είναι ο καθορισμός της έντασης ροής, σύμφωνα με το κριτήριο 1.0 [lt/min] κάθε χιλιοστόμετρο της διαμέτρου του ακροφυσίου του αερίου. Για τον ομοιογενή καθορισμό των χρησιμοποιούμενων προστατευτικών αερίων στη συγκόλληση GMA, το Διεθνές Ινστιτούτο Συγκολλήσεων προτείνει την ταξινόμηση, 1 σύμφωνα με το δείκτη περιεκτικότητας οξυγόνου στην προστατευτική ατμόσφαιρα 1 **πίνακας 18**. Η περιεκτικότητα του οξυγόνου στο τήγμα, που προξενείται με την προσθήκη οξειδωτικού αερίου στην προστατευτική ατμόσφαιρα, ασκεί ουσιώδη επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες, και, ιδιαίτερα, ελαττώνει την ανθεκτικότητα στις δυναμικές καταπονήσεις, συγχρόνως αυξάνει τη δυνατότητα δημιουργίας πόρων και μη μεταλλικών εγκλεισμάτων.



**Σχήμα 33** Επίδραση της ταχύτητας του ατμοσφαιρικού αέρα με εγκάρσια ροή προς την προστατευτική ατμόσφαιρα του τόξου, για την απαιτούμενη ένταση ροής του προστατευτικού αερίου, κατά τη συγκόλληση GMA, με καυστήρα που έχει διάμετρο ακροφυσίου 16[mm] . 1 ελεύθερο μήκος προεξοχής ηλεκτροδίου.

Η συγκόλληση GMA με τόξο βραχυκύκλωσης εξασφαλίζει καθαρά τη μείωση της ποσότητας οξυγόνου στο τήγμα, σε σχέση με τη συγκόλληση τόξου σταγόνων, με την ίδια περιεκτικότητα  $CO_2$  στην προστατευτική ατμόσφαιρα του τόξου **σχήμα 34**. Η διάμετρος του σύρματος ηλεκτροδίου είναι αποφασιστική για την πυκνότητα του ρεύματος, στην ουσία, για το βάθος διείσδυσης στο συγκολλούμενο υλικό και το χαρακτήρα μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο 16 μέχρι 20. Για δεδομένη τιμή έντασης, η απόδοση τήξης αυξάνεται με τη μείωση της διαμέτρου του σύρματος, επειδή αυξάνεται η πυκνότητα του ρέοντος ρεύματος δια του σύρματος. Συγχρόνως, με μικρή διάμετρο του σύρματος, είναι μικρότερη η ένταση του κρίσιμου ρεύματος, το λουτρό της κόλλησης έχει μικρότερο όγκο και στερεοποιείται γρήγορα. Τα σύρματα με μικρή διάμετρο, της τάξεως από 0.4[mm]-1.2[mm], προτείνονται για τη συγκόλληση GMA συνδέσεων λεπτών ελασμάτων καθώς και για τη συγκόλληση σε εξαναγκασμένες θέσεις. Μεγαλύτερες διαμέτρους, από 1.2[mm]-4.0[mm], χρησιμοποιούνται κατά την ημιαυτόματη ή μηχανοποιημένη και αυτόματη συγκόλληση, με τόξο βραχυκύκλωσης ή περιστρεφόμενο, κυρίως σε επίπεδη θέση. Με τη χρησιμοποίηση παλμικού ρεύματος, για τη συγκόλληση GMA με σύρματα μεγαλύτερης διαμέτρου, εξασφαλίζεται μεγάλη απόδοση συγκόλλησης και, συγχρόνως, παρέχεται η δυνατότητα συγκόλλησης



**Σχήμα 34** Επίδραση της περιεκτικότητας  $CO_2$  στην ατμόσφαιρα αργού, στην περιεκτικότητα του οξυγόνου στο εναποτιθέμενο υλικό, κατά τη συγκόλληση GMA, χαλύβων C-Mn. Η περιεκτικότητα του οξυγόνου στο εναποτιθέμενο υλικό-0.02%.

Κύρια κατηγορία	Υποκατηγορία	Πλήθος αερίων	Σύσταση σε όγκο επί τοις %					Χημική δραστηριότητα της προστατευτικής ατμόσφαιρας	Περσεκτικότητα οξυγόνου στην κόλληση
			Οξείδωτικά CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Αίρα	He	Ανοργανικά H <sub>2</sub>		
I K<1	1	1			100		-	αδρανής	0.02
	2	1			100		-	αδρανής	
	3	2			25-75	R	-	αδρανής	
	4	2			85-95		-	ανταγωνική	
M1 K 1-5	1	2	-	1-3	R		-	ελαφρά	0.03
	2	2	2-5	-	R		-	οξειδωτική	
	3	3	2-5	1-3	R		-		
M2 K>5-9	2	2	15-30		R		-		0.03-0.05
	3	3	5-15	1-4	R		-	οξειδωτική	
	1	2	-	4-8	R		-		
M3 K>9-16	2	2	30-40		R		-		-0.05
	1	2		9-12	R		-	οξειδωτική	
	3	3	5-20	4-6	R		-		
	4	3	15-20	1-3	R		-		
C K>16	1	1	100	K			-	οξειδωτική	0.05
	2	2	15-30						

Οι περιεκτικές ταξινομήσεις των προστατευτικών αερίων βασίζονται στο δείκτη της καημότητας  $K = \%O_2 + 1/2\% CO_2$  R-το υπόλοιπο στη σύσταση του μίγματος, μέχρι 100%.

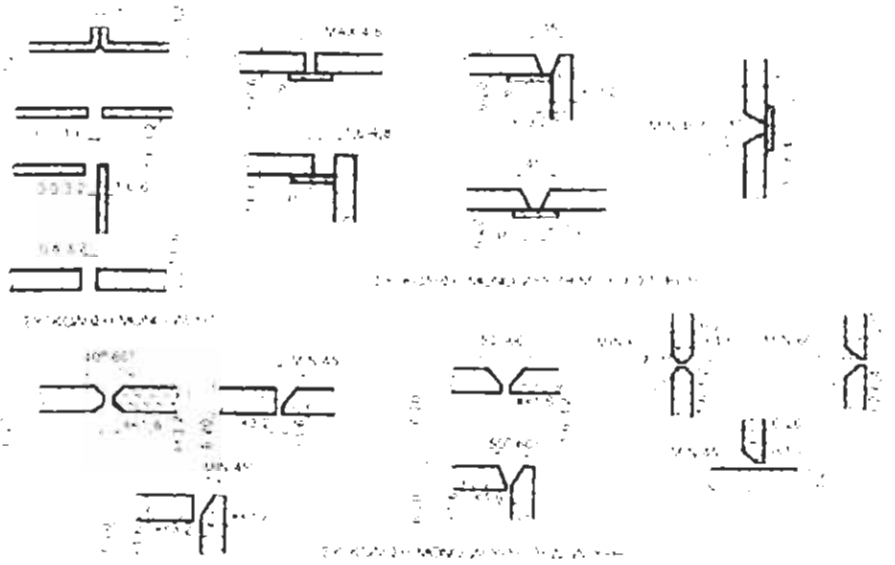
Πίνακας 17 Ταξινόηση των προστατευτικών αερίων, για τη συγκόλληση GMA, επεξεργασμένη από το διεθνές Ινστιτούτο Συγκολλήσεων.

σε εξαναγκασμένες θέσεις. Στις μεθόδους συγκόλλησης *GMA* με μεγάλες αποδόσεις, που σκοπό έχουν την αξιοποίηση των δυνατοτήτων συγκόλλησης, με πολύ μεγάλες πυκνότητες ρεύματος, χρησιμοποιούνται σύρματα με μικρή διάμετρο, από  $0.8[mm]-1.2[mm]$ . Το ελεύθερο μήκος προεξοχής του ηλεκτροδίου επιδρά στην εντατικότητα προθέρμανσης του σύρματος, με ηλεκτρική αντίσταση, στο μήκος ανάμεσα στο άκρο του ρεύματος και στο τηκόμενο άκρο του σύρματος, άρα καθοριστικό για τη θερμοκρασία και την ταχύτητα τήξης. Έτσι, με την αύξηση του ελεύθερου μήκους προεξοχής, ακόμη και μέχρι  $60[mm]-75[mm]$ , με την ίδια ένταση ρεύματος, αυξάνεται, σε σημαντικό βαθμό, η απόδοση τήξης του ηλεκτροδίου, άρα είναι μεγαλύτερες οι ταχύτητες εναπόθεσης των κορδονιών πληρώσεως, κατά τη συγκόλληση με πολλαπλές στρώσεις. Παρόμοια με την αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος, έτσι και με την αύξηση του ελεύθερου μήκους προεξοχής μειώνεται η τιμή του κρίσιμου ρεύματος *σχήμα 23* και *σχήμα 24*. Το ελεύθερο μήκος προεξοχής του ηλεκτροδίου, κατά τη συγκόλληση με τόξο βραχυκύκλωσης, πρέπει να διατηρείται στα όρια από  $6[mm]-12[mm]$ , ενώ, κατά τη συγκόλληση με ψεκασμό, από  $12[mm]-25[mm]$ , ανάλογα με το είδος του υλικού του ηλεκτροδίου. Η κλίση του συγκολλούμενου αντικειμένου, με γωνία περίπου  $15^\circ$ , και η συγκόλληση από πάνω προς τα κάτω, επιτρέπουν την επίτευξη περισσότερο ίσιου μετώπου της κόλλησης, ακόμη και με παραμέτρους που προξενούν υπερβολική ενίσχυση του μετώπου της κόλλησης. Χάρη αυτού, είναι δυνατή η αύξηση της ταχύτητας συγκόλλησης μέχρι  $50\%$ . Για τη συγκόλληση των μετωπικών συνδέσεων των σωλήνων, προτείνεται, επομένως, η διενέργεια της τεχνικής από πάνω προς τα κάτω όπως συμβαίνει με τις συνδέσεις λεπτών ελασμάτων σε κατακόρυφη θέση. Με την κλίση του καυστήρα-ηλεκτροδίου, σε σχέση με τη σύνδεση προς τη διεύθυνση συγκόλλησης, πολύ λίγο αυξάνεται το βάθος διείσδυσης, ενώ με αντίθετη διεύθυνση μειώνεται το βάθος διείσδυσης και αυξάνεται, συγχρόνως, το ύψος της ενίσχυσης του μετώπου της κόλλησης.

### 7.2.3 Τεχνολογία και τεχνική συγκόλλησης

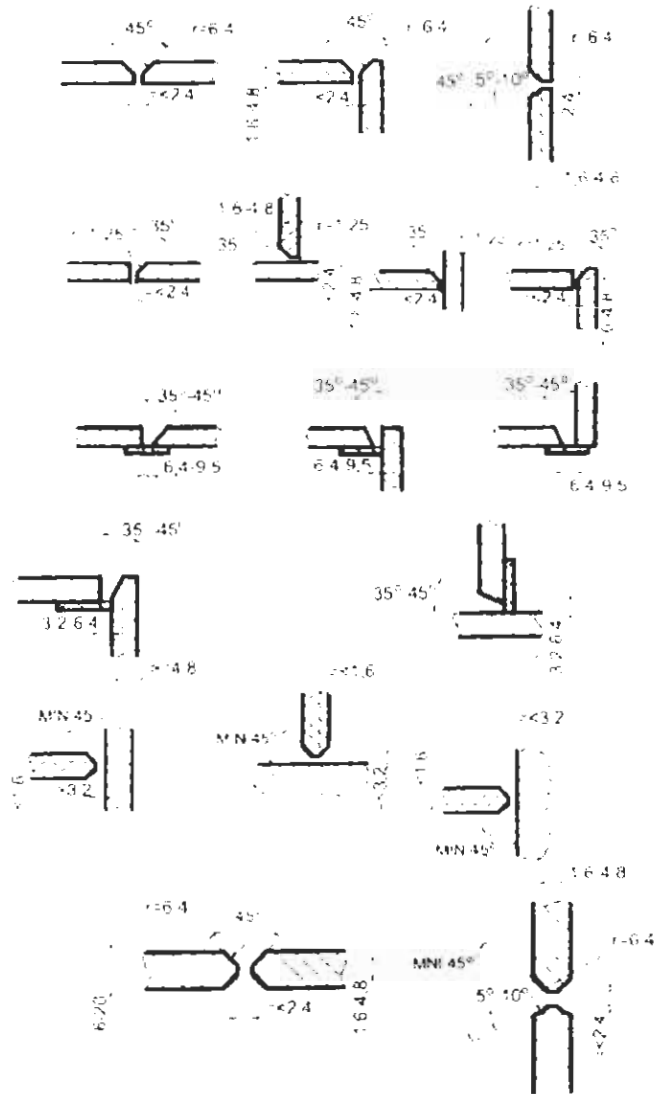
Η συγκόλληση *GMA* διενεργείται κυρίως με συνεχές ρεύμα και θετικό πόλο στο ηλεκτρόδιο. Το εναλλασσόμενο ρεύμα είναι ωφελιμότερο από την άποψη συμμετρικής φόρτισης του δικτύου του ρεύματος και μεγάλης απόδοσης της πηγής ρεύματος, χρησιμοποιείται, όμως, σπάνια. Τα άκρα των συγκολλούμενων αντικειμένων πρέπει να καθαρίζονται, πριν από τη συγκόλληση απ' όλες τις ακαθαρσίες, τουλάχιστον  $25[mm]-30[mm]$  από κάθε πλευρά της σύνδεσης. Στη περίπτωση συνδέσεων αλουμινίου και μαγνησίου απαιτείται πρόσθετη αφαίρεση πριν τη συγκόλληση του στρώματος οξειδίων, σε πλάτος τουλάχιστο  $10[mm]$  από τα άκρα της σύνδεσης, με περιστρεφόμενη βούρτσα ή λίμα. Η ημιαυτόματη συγκόλληση εκτελείται με την τεχνική συγκόλλησης προς τα αριστερά, με μικρότερες ταχύτητες συγκόλλησης και μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης ή με την τεχνική συγκόλλησης προς τα δεξιά, με μεγαλύτερη ταχύτητα. Τότε, όμως, υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης τέτοιων σφαλμάτων όπως είναι η ατελής τήξη και η ανώμαλη επιφάνεια του μετώπου της κόλλησης. Η συγκόλληση *GMA*, χάρη της μεγάλης διείσδυσης και της ευκολίας ρύθμισης της γραμμικής ενέργειας του τόξου, επιτρέπει τη σύνδεση κατασκευαστικών εξαρτημάτων, εκτελούμενων από

ανθρακοχάλυβες, ελαφρά κραματωμένους χάλυβες, ανθεκτικούς στη διάβρωση, αλουμινίου, μαγνησίου, χαλκού, νικελίου, τιτανίου, όπως και κραμάτων αυτών των μετάλλων, σε μεγάλη κλίμακα παχών, από  $0.5[mm]$  μέχρι  $300[mm]$  και με μικρή συμμετοχή του μητρικού υλικού στην κόλληση. Τα πρόσθετα συγκολλητικά υλικά έχουν συνήθως χημική σύσταση που πλησιάζει την αντίστοιχη του συγκολλούμενου υλικού, αλλά, μερικές φορές, μπορούν να διαφέρουν κατά πολύ. Για παράδειγμα, η συγκόλληση των κραμάτων Οι απαιτεί τη χρήση συρμάτων με αποξειδωτικά  $Ti$ ,  $Si$  ή  $P$ , τα κράματα  $Al-Mg-Si$  με σύρματα  $Al+5\% Si$ , ενώ οι φερριτικοί χρωμιούχοι με σύρματα  $Cr-Ni$ . Κατά τη συγκόλληση μετάλλων με βάση το σίδηρο, σε μεγάλη περιοχή χημικής σύστασης, προτείνονται προστατευτικές ατμόσφαιρες ελαφρά οξειδωτικές ή οξειδωτικές. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη χρησιμοποίησης συρμάτων με αυξημένη ποσότητα αποξειδωτικών, όπως,  $Mn$ ,  $Si$ ,  $Al$  και  $Ti$ . Κατά κανόνα, οι ανθρακοχάλυβες συγκολλούνται στην ατμόσφαιρα  $CO_2$ , ενώ οι ελαφρά κραματωμένοι στην ατμόσφαιρα μίγματος  $Ar+CO_2$ . Για τα κράματα με βάση το σίδηρο που περιέχουν πάνω από  $3\%$  κραματικών προσθηκών, προτείνεται η συγκόλληση στην ατμόσφαιρα αργού, με προσθήκη  $1\%-2\%$  οξυγόνου, ενώ οι συνδέσεις με μικρότερη υπευθυνότητα ακόμη και μέχρι  $5\% O_2$ . Για τις συνδέσεις αντικειμένων από ανθρακοχάλυβες, ελαφρά κραματωμένους και ισχυρά κραματωμένους χάλυβες, ανθεκτικούς στη διάβρωση όπως νικελίου και κράματα του, προτείνεται η προετοιμασία για τη συγκόλληση  $GMA$  με γωνίες λοξοτόμησης μικρότερες απ' ό,τι κατά τη χειρωνακτική συγκόλληση με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο,  $GTA$  ή με βυθιζόμενο τόξο **σχήμα 35** και **σχήμα 36**. Παρόμοιος τρόπος λοξοτόμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση συνδέσεων αλουμινίου, μαγνησίου και χαλκού, αλλά για την αποφυγή σφαλμάτων τύπου ατελούς διείσδυσης και ατελούς τήξης προτείνεται η αύξηση της γωνίας λοξοτόμησης ακόμη και μέχρι  $90^\circ$ . Οι κατασκευαστικές συνδέσεις από ανθρακοχάλυβες και ελαφρά κραματωμένους χάλυβες πάχους κάτω από  $3[mm]-4[mm]$  πρέπει να συγκολλούνται με τόξο βραχυκύκλωσης, ενώ τα μεγαλύτερα πάχη με τόξο ψεκασμού. Για τη συγκόλληση στην ατμόσφαιρα  $CO_2$ , προτείνεται η τεχνική του βυθισμένου τόξου. Η αυτόματη συγκόλληση  $GMA$  χρησιμοποιείται για τη σύνδεση μετωπικών και αυχενικών κολλήσεων, συνδέσεων με χαλύβδινα ελάσματα πάχους από  $0.5[mm]$  και πάνω, με ταχύτητες που φτάνουν μέχρι  $1[m/min]-2.0[m/min]$ . Στην περίπτωση λεπτών ελασμάτων συνιστάται ατμόσφαιρα  $Ar+O_2$  ή  $Ar+CO_2$  και σύρματα με διάμετρο  $0.5[mm]-1.6[mm]$ . Η κεφαλή του αυτομάτου πρέπει να τοποθετηθεί κάθετα προς τη σύνδεση. Για τις συνδέσεις με πάχος μέχρι  $10[mm]$ , προτείνεται η μονόπλευρη ίνες ύαλου, όπως και κατά τη συγκόλληση  $GTA$  **σχήμα 10**. Μπορεί να γίνει συγκόλληση χωρίς ή με διάκενο από  $0[mm]-3[mm]$ , με σκοπό τη μείωση του ύψους της ενίσχυσης. Τα μεγαλύτερα πάχη των χαλύβδινων συνδέσεων πρέπει να συγκολλούνται με την τεχνική μονόπλευρης ή δίπλευρης συγκόλλησης, με λοξοτομημένα τα άκρα των ελασμάτων. Η αυτόματη συγκόλληση απαιτεί πολύ στιβαρή εργαλειοδέτηση.

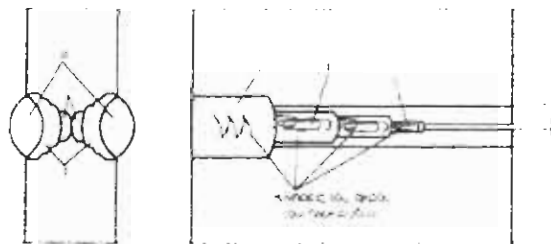


**Σχήμα 35** Προτεινόμενοι τρόποι προετοιμασίας άκρων λεπτών χαλύβδινων ελασμάτων με πάχος μέχρι 20[mm], για τη συγκόλληση GMA σε όλες τις θέσεις, συνδέσεων μετωπικών, ταυ και ακμής με μετωπικές κολλήσεις, P υποστήριγμα φορμαρίσματος χάλκινο, συλλιπάσματος ή τηκόμενο.

Τα στρώματα πλήρωσης των συγκολλούμενων συνδέσεων πολλαπλών στρώσεων πρέπει να συγκολλώνται με ταλαντωτική κίνηση του ηλεκτροδίου, όπως κατά την αυτόματη και ημιαυτόματη συγκόλληση. Η προτεινόμενη τεχνική δίπλευρης ημιαυτόματης συγκόλλησης GMA, σε θέση επίπεδη μετωπικής σύνδεσης ελασμάτων παρουσιάζεται στο **σχήμα 37**. Η συγκόλληση σε κατακόρυφη θέση με την τεχνική από πάνω προς τα κάτω, ενώ με μεγάλα πάχη-από κάτω προς τα πάνω. Οι προτεινόμενες τεχνικές συγκόλλησης μετωπικών και συνδέσεων σε διάφορες θέσεις δίνονται στο **σχήμα 38**. Για την αυτόματη συγκόλληση GMA συνδέσεων ταυ σε θέση τοίχου, προτείνεται η διενέργεια με κλίση της κεφαλής, με γωνία  $25^{\circ}$ - $35^{\circ}$ . Η ημιαυτόματη συγκόλληση αυχενικών κολλήσεων σε πλευρική θέση εκτελείται με την τεχνική συγκόλλησης προς τα αριστερά ή προς τα δεξιά. Η τεχνική συγκόλλησης προς τα δεξιά εξασφαλίζει μεγαλύτερη ταχύτητα συγκόλλησης από ό,τι η τεχνική συγκόλλησης προς τα αριστερά, αλλά μπορεί να εμφανισθεί ατελής τήξη. Η συγκόλληση χαλύβδινων ελασμάτων πάχους μέχρι 3[mm] σε θέση τοίχου διενεργείται χωρίς λοξοτόμηση, ενώ με μεγαλύτερο πάχος με λοξοτόμηση του άνω ελάσματος.

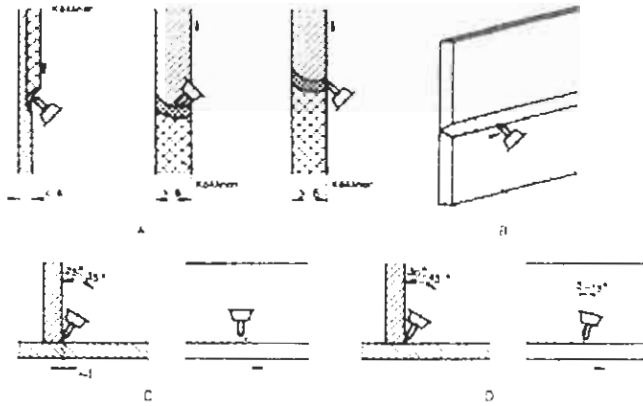


Σχήμα 36 Προτεινόμενοι τρόποι προετοιμασίας άκρων χαλύβδινων ελασμάτων με πάχος άνω των 20[mm], για τη συγκόλληση GMA σε όλες τις θέσεις, συνδέσεων μετωπικών, ταυ και ακμής με μετωπικές κολλήσεις, P υποστήριγμα μορμαρίσματος χάλκινο, συλλικόσματος ή τηκόμενο.

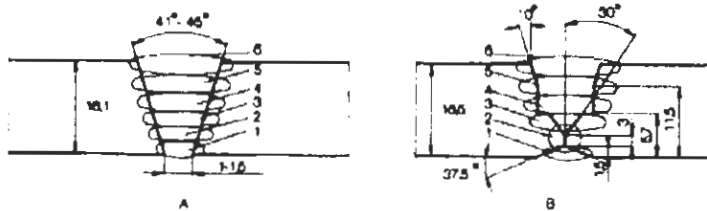


Σχήμα 37 Προτεινόμενη τεχνική ημιαυτόματης συγκόλλησης GMA, σε επίπεδη θέση μετωπικής σύνδεσης χοντρών ελασμάτων από ανθρακοχάλυβες και ελαφρά κραματωμένους χάλυβες.





Σχήμα 38 Υπόδειξη θέσης και οδήγησης του καυστήρα ως προς τη σύνδεση κατά τη συγκόλληση GMA. Ημιαυτόματη συγκόλληση A, B, C. Αυτόματη συγκόλληση C



Σχήμα 39 Προετοιμασία άκρων αεραγωγού με διάμετρο 1400[mm] για την ημιαυτόματη συγκόλληση A και αυτόματης B με τη μέθοδο GMA, πίνακες 21 και πίνακες 22.

Ο καυστήρας πρέπει να οδηγείται με την τεχνική προς τα δεξιά, με το ηλεκτρόδιο προς τα κάτω για λεπτά ελάσματα και προς τα άνω κατά τη συγκόλληση ελασμάτων μεγάλου πάχους. Για τη συγκόλληση σε δύσκολες θέσεις, επιβάλλεται η χρησιμοποίηση συρμάτων με μικρή διάμετρο της τάξεως 0.5[mm]-1.6[mm] και μεταφορά του μετάλλου με τόξο βραχυκυκλώσης ή παλμικό.

## Κεφάλαιο 8

### 8. Συγκόλληση ηλεκτροσκωριακή-Electroslag

#### 8.1. Χαρακτηριστικά της μεθόδου

Η ηλεκτροσκωριακή συγκόλληση είναι μέθοδος συγκόλλησης υψηλής απόδοσης. Προσφέρεται για την εκτέλεση μετωπικών συγκολλήσεων και αναγομώσεων, σε θέση κατακόρυφη. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε ως επιβελτιωτική της διαδικασίας συγκόλλησης με βυθιζόμενο τόξο. Το κύριο πρόβλημα ήταν η μείωση της κατανάλωσης του ακριβού συλλιπάσματος και, ιδιαίτερα κατά τη συγκόλληση εξαρτημάτων με μεγάλο πάχος πάνω από  $100[mm]$ . Η ηλεκτροσκωριακή μέθοδος χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση κατασκευαστικών χαλύβων, καθώς επίσης και για τη συγκόλληση των ελαφρά και ισχυρά κραματωμένων χαλύβων. Η μέθοδος αυτή, σε σχέση με τις άλλες μεθόδους συγκόλλησης χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

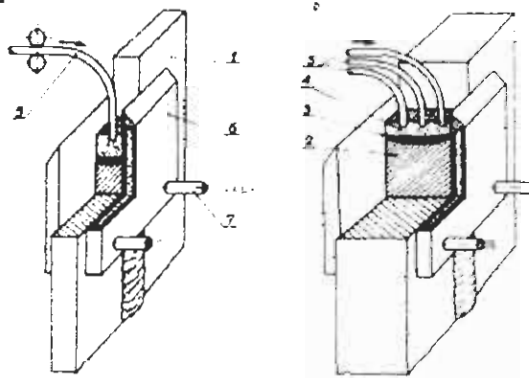
1. Δυνατότητα συγκόλλησης εξαρτημάτων με πάρα πολύ μεγάλα πάχη, ακόμη και μέχρι  $2000[mm]$ . Ο βαθμός απόδοσης για τη μέθοδο ηλεκτροσκωριακής συγκόλλησης είναι 1.0, για τη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο 0.7 ενώ για τη χειρωνακτική συγκόλληση με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο 0.5.
2. Μεγάλη απόδοση της διαδικασίας, από την άποψη της χρησιμοποίησης μεγαλύτερης πυκνότητας ρεύματος. Ο συντελεστής τήξης (ποσότητα τηκόμενου μετάλλου σε χρόνο  $1[h]$ , με ρεύμα  $1[A]$  για την ηλεκτροσκωριακή συγκόλληση φτάνει από  $18[g/Ah]$  μέχρι  $22[g/Ah]$ , για τη συγκόλληση σε βυθιζόμενο τόξο από  $14[g/Ah]$  μέχρι  $18[g/Ah]$  και για τη χειρωνακτική συγκόλληση από  $8[g/Ah]$ - $12[g/Ah]$ .
3. Πολύ μικρή κατανάλωση συλλιπάσματος, περίπου το 15-20% της ποσότητας, η οποία καταναλώνεται κατά τη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο.

Η μέθοδος αυτή, όμως, έχει και μια σειρά μειονεκτήματα, τα οποία είναι:

1. Δεν προσφέρεται για τη συγκόλληση λεπτών ελασμάτων, αφού δεν είναι δυνατόν να συγκολληθούν ελάσματα κάτω από  $12[mm]$ .
2. Δημιουργείται μεγάλη ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά, που προξενεί σημαντική διόγκωση των κόκκων και μειώνει τη δυσθραυστότητα της σύνδεσης.
3. Σχηματίζεται δενδριτική δομή, που επιδρά, ισχυρά, στις ιδιότητες αντοχής της σύνδεσης.

Στο *σχήμα 1* παρουσιάζεται η μέθοδος της ηλεκτροσκωριακής συγκόλλησης. Κατά τη συγκόλληση τα ελάσματα [1] με άκρα μη λοξοτομημένα (κομμένα κάθετα προς την επιφάνεια) τοποθετούνται κατακόρυφα, με διάκενο μεταξύ των άκρων  $25[mm]$ - $35[mm]$ . Η θέση συγκόλλησης-ο χώρος μεταξύ των άκρων είναι κλειστή με χάλκινα επικαλύμματα, ψυχόμενα με νερό [7]. Σε αυτόν τον οριοθετημένο χώρο, τροφοδοτούνται σύρματα-ένα ή περισσότερα - ηλεκτροδίων [5] και προσάγεται, με μικρές μερίδες συλλιπάσμα. Η τηκόμενη σκουριά [4] διατηρείται στην επιφάνεια του λουτρού του ρευστού μετάλλου της κόλλησης. Το ηλεκτρόδιο μπορεί να είναι και χαλύβδινη ταινία, προωθούμενη, επίσης, με κατάλληλη ταχύτητα, στο λουτρό της σκουριάς. Η διαδικασία συγκόλλησης, μετά τη σταθεροποίηση της, έχει πορεία με μη αναμμένο τόξο και η μετατροπή

της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική πετυχαίνεται στο στρώμα της ρευστής σκουριάς. Η λιωμένη σκουριά μεταφέρει το ρεύμα με σημαντική ενεργό αντίσταση, παίζοντας το ρόλο της πηγής θερμότητας. Η σκουριά, ισχυρά πυρωμένη, λιώνει το τροφοδοτούμενο σύρμα ηλεκτροδίου και, συγχρόνως, λιώνει και τα συγκολλούμενα άκρα των ελασμάτων. Το λιωμένο μέταλλο ενώνεται με τα λιωμένα άκρα του συγκολλούμενου υλικού και, μετά τη στερεοποίηση, σχηματίζεται η κόλληση [2].



Σχήμα 1 Συγκόλληση ηλεκτροσκωριακή: α) με ένα ηλεκτρόδιο, β) με πολλαπλά ηλεκτρόδια, [1] συγκολλούμενο αντικείμενο, [2] κόλληση, [3] λουτρό ρευστού μετάλλου, [4] σκουριά - ρευστή, [5] ηλεκτρόδια, [6] επικαλύμματα χαλκού, [7] υδάτινη ψύξη.

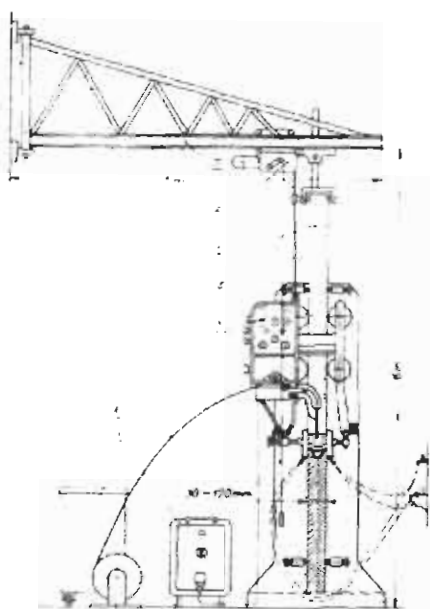
## 8.2 Μηχανές συγκόλλησης για την ηλεκτροσκωριακή συγκόλληση

Οι συσκευές για την ηλεκτροσκωριακή συγκόλληση είναι κεφαλές με μηχανοποίηση, ημιαυτόματες και αυτόματες. Σε συνθήκες συναρμολόγησης, χρησιμοποιούνται συσκευές με μηχανοποίηση, στις οποίες η μετατόπιση των επικαλυμμάτων χαλκού εκτελείται χειροκίνητα. Τα παραγόμενα αυτόματα έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Αυτόματα προοριζόμενα για την εκτέλεση συγκολλήσεων επαφής ελασμάτων με πάχος  $40[mm]-120[mm]$  και μήκος μέχρι  $5[m]$  κατακόρυφα. Το αυτόματο προσφέρεται για τη συγκόλληση δεξαμενών με τοιχώματα μεγάλου πάχους καθώς και για κορμούς μηχανών.
- Αυτόματο με τη σύγχρονη τήξη των οδηγών των ηλεκτροδίων σχήμα 3 προορίζεται για τη συγκόλληση χαλύβδινων εξαρτημάτων με πάχος από  $50[mm]-420[mm]$  και μήκος  $1300[mm]$ .
- Αυτόματο για τη συγκόλληση λεπτών ελασμάτων, ιδιαίτερα για τη συγκόλληση σκαφών και δεξαμενών. Τα συγκολλούμενα πάχη είναι από  $12[mm]-40[mm]$  με μήκος συγκόλλησης μέχρι  $12[m]$ .
- Οι χρησιμοποιούμενες πηγές ρεύματος είναι το συνεχές και το εναλλασσόμενο ρεύμα.

Η συσκευή ηλεκτροσκωριακής συγκόλλησης σχήμα 2 περιέχει: το αυτόματο συγκόλλησης 1, το χειριστήριο 3, το μετασχηματιστή συγκόλλησης 2, το τύμπανο με το σύρμα ηλεκτροδίου 8, τον ελκυστήρα 6, το βραχίονα του ελκυστήρα και το πλαίσιο για την τοποθέτηση των ελασμάτων προς συγκόλληση. Το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται με ταχύτητα  $500[m/h]$ . Ο μηχανισμός που προξενεί την εκκρεμή κίνηση του ηλεκτροδίου κινείται με κινητήρα συνεχούς ρεύματος, με ισχύ  $55[W]$ . Η ένταση του ρεύματος συγκόλλησης ρυθμίζεται στα όρια από

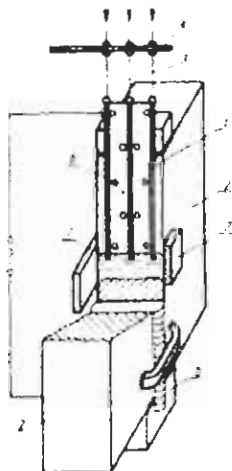
300[A]-1000[A]. Το πάχος των συγκολλούμενων ελασμάτων από χάλυβα είναι 30[mm]-120[mm], το διάκενο μεταξύ των άκρων (το πλάτος της κόλλησης)-13[mm]-30[mm], η διάμετρος του ηλεκτροδίου 3[mm], η ταχύτητα πρόωσης σε κατακόρυφη θέση από 0.3[m/h]-3.2[m/h], μια περίοδος της εκκρεμούς κίνησης του ηλεκτροδίου από 2[sec]-30[sec]. Όταν το μήκος της ραφής δεν είναι μεγάλο μπορεί να απλοποιηθεί η κατασκευή, χρησιμοποιώντας, αντί του κινουμένου οδηγού του σύρματος ηλεκτροδίου, οδηγούς μη κινούμενους, με μήκος ίσο με το μήκος της ραφής. Επειδή ο οδηγός του σύρματος τήκεται, στο ανυψωμένο λουτρό, προς τα άνω, άρα εκτελείται με την ίδια κατηγορία χάλυβα, στην οποία ανήκει και το σύρμα, ή από άλλη κατηγορία, με τέτοιο τρόπο επιλεγμένη, που το εναποτιθέμενο υλικό, από το μίγμα των δύο κατηγοριών του χάλυβα, να έχει επιθυμητή σύσταση. Η συσκευή αυτού του είδους, με τρεις οδηγούς για τρία σύρματα ηλεκτροδίων, φαίνεται στο *σχήμα 3*. Είναι μεγάλη απλοποίηση της κατασκευής της ίδιας συσκευής, επειδή αποσύρεται ο μηχανισμός χειρισμού των οδηγών. Στο *σχήμα 3* φαίνεται το επικάλυμμα 5 στην εκροή της κόλλησης, το οποίο χρησιμοποιείται για την καλή πλήρωση του αύλακα, στη διαδικασία της συγκόλλησης. Επίσης, και στο τελικό μέρος, προστίθεται παρόμοιο επικάλυμμα για τον ίδιο σκοπό. Οι φελλοί 6 τοποθετούνται για τη μόνωση των οδηγών, προς αποφυγή συμπτωματικής επαφής τους με το μητρικό υλικό. Η συσκευή είναι εφοδιασμένη με τους ολισθητήρες 7 για την προστασία του τήγματος. Η συσκευή αυτού του είδους παράγεται για τη συγκόλληση ελασμάτων πάχους μέχρι και 300[mm], με τη χρήση 1 έως 3 συρμάτων ηλεκτροδίων, με τους οδηγούς τηκόμενους μαζί με τα σύρματα. Η ταχύτητα πρόωσης των συρμάτων φτάνει από 50[m/h] έως 150[m/h], η διάμετρος των συρμάτων έως 3[mm], το μέγιστο μήκος της κόλλησης-1800[mm] και το μέγιστο ρεύμα συγκόλλησης 2000[A].



*Σχήμα 2* Συσκευή συγκόλλησης με την ηλεκτροσκιωριακή μέθοδο: [1] αυτόματο συγκόλλησης τύπου As-9, [2] μετασχηματιστής συγκόλλησης ETb-1000, [3] πίνακας ελέγχου, [4] πλαίσιο, [5] πλάκα εξόδου του αυτόματου συγκόλλησης, [7] βραχίονας.

### 8.3 Χρησιμοποίηση της ηλεκτροσκοωριακής συγκόλλησης

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η μέθοδος αυτή έχει χρησιμότητα μόνο για τη συγκόλληση ελασμάτων μεγάλου πάχους από 12[mm] και άνω), άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή λεβήτων, δεξαμενών υψηλής πίεσης, σκελετών για πρέσες, για σφύρες. Οι συνθήκες στις οποίες πετυχαίνεται η ηλεκτροσκοωριακή συγκόλληση των χαλύβων, με πάχη 70[mm]-155[mm], δίνονται στον **πίνακα 1**. Επειδή η κόλληση σχηματίζεται σε κλειστό χώρο, η ψύξη της κόλλησης πετυχαίνεται περίπου 10 φορές πιο αργά απ' ό,τι κατά τη συγκόλληση σε επίπεδη θέση. Η πολύ αργή και διάρκειας πτώση της θερμοκρασίας ευνοεί την καλή απαέρωση του μετάλλου της κόλλησης και αποφεύγεται, έτσι, η βαφή του μετάλλου. Οι ειδικοί χάλυβες πρέπει, κανονικά, να προθερμανθούν προ της συγκόλλησης τους, να προστατευθούν από την ταχεία ψύξη και να ανοιχθούν μετά το πέρας της συγκόλλησης. Είναι, όμως, δυνατόν να αποφευχθούν αυτές οι διαδικασίες, επειδή η συγκόλληση γίνεται σε κατακόρυφη θέση. Με τη μέθοδο αυτή δεν εκτελούνται μόνο ευθύγραμμες συγκολλήσεις, αλλά επίσης και συγκολλήσεις κυκλικές, εγκάρσιες συγκολλήσεις τύμπανων **σχήμα 4** Στην προκειμένη περίπτωση τοποθετείται στο εσωτερικό του τύμπανου χάλκινος δακτύλιος, ο οποίος συγκρατεί το ρευστό τήγμα από την εκροή του. Ο εσωτερικός ολισθητήρας ολισθαίνει επί της επιφάνειας κατά τη διάρκεια περιστροφής του τύμπανου. Η συγκόλληση αρχίζει **σχήμα 4α** επί του επικαλύμματος με πάχος 30[mm]-40[mm].

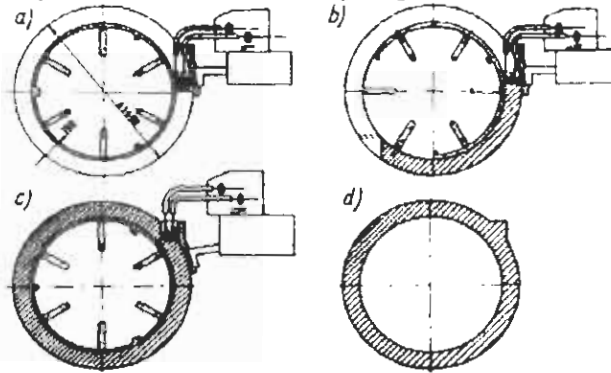


**Σχήμα 3** Συσκευή συγκόλλησης με την ηλεκτροσκοωριακή μέθοδο με τήξη των οδηγών συρμάτων: [1] οδηγός τηκόμενος μαζί με το σύρμα, [2] εξαρτήματα συγκολλούμενα, [3] σύρμα ηλεκτροδίου, [4] τροφοδότης σύρματος με τρία κανάλια, [5] επικάλυμμα στην εκροή της κόλλησης, [6] φελλοί μόνωσης των οδηγών από το αντικείμενο, [7] κινούμενοι ολισθητήρες.

Πάχος συγκολλούμενου υλικού	Αριθμός ηλεκτροδίων	Διάκενο [mm]	Ταχύτητα πρόωσης ηλεκτροδίου [m/h]	Ταχύτητα συγκόλλησης [m/h]
70	1	26-29	350	1.4
90	1	26-29	350	1.1
110	2	30-32	200	0.85
	2	34-36	200	0.50

**Πίνακας 1** Ηλεκτροσκοωριακή συγκόλληση χαλύβων

Μετά την εκτέλεση  $1/4$  της περιφέρειας, αποκόπτεται το αρχικό τμήμα της συγκόλλησης όπως φαίνεται στη **σχήμα 4b**. Αυτή η αποκοπή γεμίζεται στο τέλος μετά από το σταμάτημα του τύμπανου **σχήμα 4c**. Με σκοπό την καλή περάτωση της συγκόλλησης, χωρίς πόρους και ακαθαρσίες, εκτελείται μικρή ενίσχυση **σχήμα 4d**. Το πλάτος του διακένου είναι  $30[mm]$ .



**Σχήμα 4** Παράδειγμα εκτέλεσης περιφερειακής συγκόλλησης με την ηλεκτροσκωριακή συγκόλληση: *a* αρχή της συγκόλλησης, *b* αποκοπή του άκρου της αρχικής συγκόλλησης, *c* περάτωση της συγκόλλησης, *d* διατομή της περατωμένης συγκόλλησης.

## Κεφάλαιο 9

### 9. Συγκόλληση με πίεση

#### 9.1 Χαρακτηρισμός των μεθόδων συγκόλλησης με πίεση

Η συγκόλληση με πίεση είναι διαδικασία δημιουργίας στερεάς αυτοτελούς σύνδεσης υλικών, που επιτυγχάνεται με πίεση και θέρμανση. Με τη χρησιμοποίηση της θερμότητας μεταβάλλονται οι συνθήκες της διαδικασίας, καθιστώντας εύπλαστο το υλικό στην περιοχή της συγκόλλησης. Με τη θέρμανση των συνδεόμενων εξαρτημάτων στο σημείο επαφής τους, η εφαρμοσμένη πίεση μειώνεται κατά πολύ και αυτό είναι ωφέλιμο, επειδή στη συμπιεσμένη επιφάνεια θα παραμείνουν μόνο ελάχιστα ίχνη παραμόρφωσης. Η αυτοτελής σύνδεση των μετάλλων, με την εφαρμογή πίεσης και προσαγωγής θερμότητας στα σημεία επαφής των συνδεόμενων εξαρτημάτων, επιτυγχάνεται, ανάλογα με τον τύπο, τη μορφή και το πάχος των αντικειμένων, με τις ακόλουθες μεθόδους:

*Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση με εναλλασσόμενο ρεύμα*

*Συγκόλληση με πυκνωτές με δυναμική πίεση*

*Συγκόλληση με τριβή*

*Συγκόλληση με έκρηξη*

*Συγκόλληση με υπέρηχους*

*Συγκόλληση με διάχυση*

*Συγκόλληση επαγωγική*

*Συγκόλληση με συμπίεση εν ψυχρώ*

*Συγκόλληση με περιστρεφόμενο ηλεκτρικό τόξο*

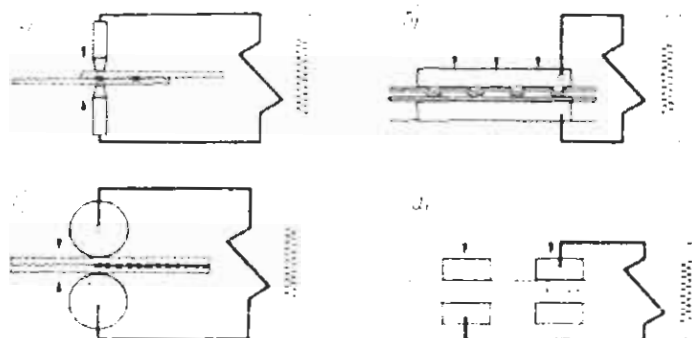
*Συγκόλληση με φλόγα αερίων*

*Συγκόλληση θερμοχημική*

Από τις μεθόδους συγκόλλησης, τη μεγαλύτερη χρησιμοποίηση στη βιομηχανική πρακτική, έχει η μέθοδος συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση, για τη σύνδεση εξαρτημάτων από όμοια ή διαφορετικά υλικά καθώς και με διάφορα πάχη.

##### 9.1.1 Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση

Η συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση είναι μέθοδος με την οποία επιτυγχάνεται η σύνδεση των μετάλλων και κραμάτων, επωφελομένης της πίεσης καθώς και της θερμότητας που εκλύεται συνεπεία της διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος από την περιοχή της σύνδεσης, που αποτελεί μέρος του κυκλώματος συγκόλλησης με αυξημένη αντίσταση. Κατά τη συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση, τα συγκολλούμενα εξαρτήματα συνδέονται με το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή *σχήμα 1*. Με την επαφή των συγκολλούμενων εξαρτημάτων, κλείνει το κύκλωμα του ρεύματος, ενώ η θέση επαφής τους θερμαίνεται ισχυρά, ως αποτέλεσμα της αντίστασης που προβάλλει στο διερχόμενο ηλεκτρικό ρεύμα.

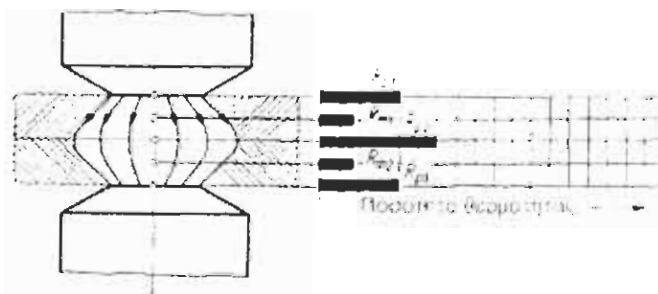


Σχήμα 1 Συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση: *a* συγκόλληση σημειακή, *b* συγκόλληση με προεξοχές, *c* συγκόλληση γραμμική και *d* συγκόλληση μετωπική.

Υπάρχουν διάφορες εναλλαγές συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση, οι οποίες διαφέρουν από τον τρόπο σύνδεσης των εξαρτημάτων, δηλαδή:

1. σημειακή σύνδεση με σημειακές κολλήσεις σχήμα 1*a*
2. με προεξοχές σύνδεση στις θέσεις των δημιουργημένων προεξοχών σχήμα 1*b*
3. γραμμική σύνδεση με συνεχόμενες σημειακές επικαλυπτόμενες κολλήσεις η μία στην άλλη σχήμα 1*c*
4. μετωπική σχήμα 1*d*, με σπινθηρισμό σύνδεση διατομών στο μέτωπο, με τηκόμενη επιφάνεια επαφής σχήμα 1*b*, με βραχυκύκλωση σύνδεση διατομών στο μέτωπο, συμπιεσμένες μεταξύ τους οι επιφάνειες, πριν τη διέλευση του ρεύματος σχήμα 1*a*.

Στο σχήμα 2 φαίνεται καθαρά ότι η αντίσταση  $R_{p2}$ , η οποία αναπτύσσεται από τη διέλευση του ρεύματος μεταξύ των συνδεόμενων ελασμάτων, είναι σημαντικά μεγαλύτερη από της αντιστάσεις  $R_{p1}$  και  $R_{p2}$  μεταξύ ελασμάτων και ηλεκτροδίων. Οι αντιστάσεις του υλικού  $R_{m1}$ , και  $R_{m2}$ , συγκρινόμενες με την αντίσταση  $R_{p2}$ , είναι μικρότερες.



Σχήμα 2 Σχηματική παράσταση εκλυόμενης θερμότητας κατά τη σημειακή συγκόλληση.

Οι ηλεκτρικές αντιστάσεις στις επαφές  $R_{p1}$ ,  $R_{p2}$  και  $R_{p3}$ , εξαρτώνται από τον τύπο του υλικού, την κατάσταση της επιφάνειας, τη δύναμη πίεσης και την τιμή του ρεύματος συγκόλλησης. Στις καθαρές επιφάνειες, η δημιουργούμενη αντίσταση στο σημείο επαφής τους είναι μικρή, ενώ στις σκουριασμένες επιφάνειες, μερικές φορές η αντίσταση είναι τόσο μεγάλη, που η διαδικασία συγκόλλησης είναι αδύνατον να πραγματοποιηθεί. Κατά τη διαδικασία συγκόλλησης, με το μέτρο αύξησης της θερμοκρασίας, η αντίσταση στο κέντρο της επαφής ελαττώνεται βαθμιαία. Αυτό συμβαίνει, επειδή αρχικά πλαστικοποιείται το υλικό και έτσι έχουμε αύξηση της επιφάνειας των



προσκολλημένων υλικών, οι επιφάνειες των οποίων, στη συνέχεια, τήκονται. Άρα απ' αυτό, στην τελική φάση συγκόλλησης, έχουμε διέλευση ρεύματος όχι με επαφή των επιφανειών αλλά μόνο μέσω του τηκόμενου μετάλλου. Συνήθως χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο ρεύμα, επειδή διευκολύνεται η μετατροπή του ρεύματος του δικτύου σε ρεύμα με χαμηλή τάση, με τη βοήθεια των μετασχηματιστών. Η ποσότητα της θερμότητας που παράγεται κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση, γενικά, ορίζεται βάσει του νόμου *Joule-Lenz*:  $Q=I^2 \cdot R \cdot t [J]$  ή  $Q=0.24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t [cal]$  όπου:  $I$  ένταση ρεύματος συγκόλλησης σε  $[A]$ ,  $R=R_{p1}+R_{p2}+R_{m1}+R_{m2}+R_{p3}$  συνολική αντίσταση της ζώνης συγκόλλησης σε  $[\Omega]$ ,  $t$  χρόνος συγκόλλησης σε  $[sec]$ . Ουσιαστική επίδραση στη θέρμανση ασκεί η ένταση του ρεύματος συγκόλλησης. Επειδή οι απώλειες της θερμότητας, εξαιτίας της υψηλής θερμικής αγωγιμότητας των μετάλλων, της ακτινοβολίας καθώς και της υπερθέρμανσης της ίδιας της μηχανής συγκόλλησης, αυξάνουν μαζί με το χρόνο διέλευσης του ρεύματος, υποδεικνύεται η χρησιμοποίηση όσο το δυνατόν **μικρότερων χρόνων συγκόλλησης**. Αυτό οδηγεί στην κατασκευή μηχανών συγκόλλησης με πάρα πολύ μεγάλη ισχύ. Σε σύγκριση με τη συγκόλληση τόξου, η συγκόλληση με πίεση έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1. Η καταναλωμένη θερμότητα δεν είναι μεγάλη, επειδή η συγκόλληση περιορίζεται σε λεπτό στρώμα του μετάλλου στο σημείο επαφής.
2. Επειδή η προσαγόμενη θερμότητα, στο μέταλλο δεν έρχεται απ' έξω, όπως κατά τη συγκόλληση τόξου, αλλά από το ίδιο το συγκολλούμενο μέταλλο και σε πολύ μικρό χρόνο, ο ατμοσφαιρικός αέρας δεν έχει προσπέλαση στην κόλληση και γι' αυτό δεν είναι δυνατόν να δημιουργηθούν εγκλείσματα.
3. Η δομή του μετάλλου στη σύνδεση διαφέρει λίγο από τη δομή του μητρικού υλικού απ' ό,τι η δομή της κόλλησης τόξου.
4. Επειδή η ισχύς του ρεύματος και ο χρόνος διέλευσης του μπορούν με ακρίβεια να ρυθμισθούν, είναι εύκολη η αποφυγή της υπερθέρμανσης ή του καψίματος του μετάλλου στη θέση της σύνδεσης.
5. Η ταχύτητα της διαδικασίας και η ασυνήθιστα εστιασμένη θερμότητα στην επαφή επιτρέπουν τη σύνδεση μετάλλων που συγκολλούνται πολύ δύσκολα, ανθρακοχάλυβες υψηλού άνθρακα και ειδικοί χάλυβες, διαφορετικά μέταλλα χάλυβες με χαλκό.
6. Επειδή η συγκόλληση με πίεση είναι μηχανοποιημένη διαδικασία, η εργασία συγκόλλησης δεν είναι κουραστική, ενώ ο χρόνος συγκόλλησης είναι αμελητέος, σε σύγκριση με το χρόνο συγκόλλησης με τόξο.

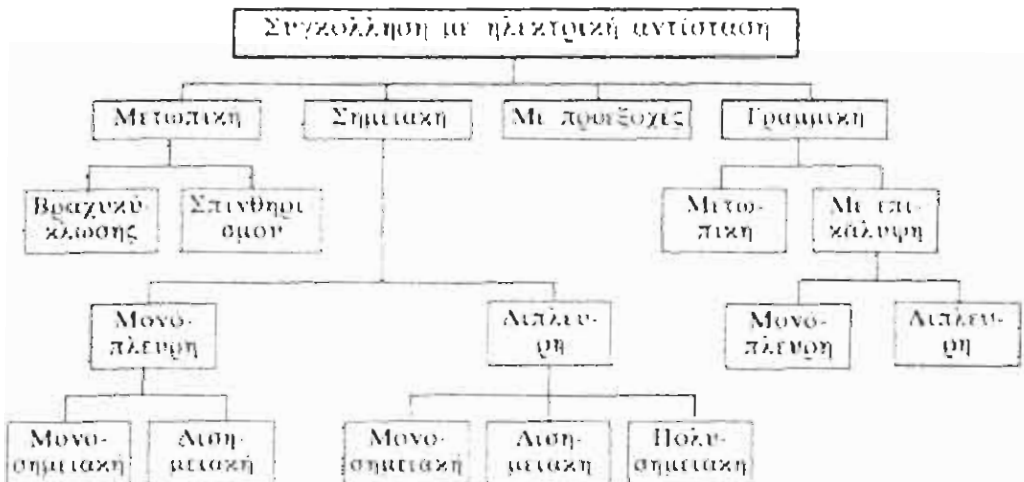
Στα μειονεκτήματα της συγκόλλησης με πίεση πρέπει να συμπεριληφθεί η αναγκαιότητα χρησιμοποίησης συσκευών με υψηλότερο κόστος από ό,τι οι συσκευές οξυγονοκόλλησης ή οι συσκευές συγκόλλησης τόξου. Οι μηχανές συγκόλλησης με πίεση πρέπει να παρέχουν μεγάλη ισχύ, επειδή η συνολική ηλεκτρική ενέργεια, που είναι απαραίτητη για τη θέρμανση της θέσης επαφής, πρέπει να τροφοδοτείται σε πολύ μικρό χρόνο. Αυτές οι μηχανές συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση και πίεση προσφέρονται κυρίως για τη μαζική βιομηχανική παραγωγή. Αρνητική πλευρά της συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση και πίεση είναι, επίσης, ο περιορισμός των διαστάσεων του συγκολλούμενου αντικειμένου που προκύπτει από τη συμμετοχή σ' αυτήν τη διαδικασία μηχανών, 'που ασκούν τη δύναμη πίεσης στα συνδεδεμένα εξαρτήματα, στη θέση σχηματισμού της κόλλησης. Αυτού του είδους περιορισμοί δεν έχουν θέση στη διαδικασία

συγκόλλησης τόξου. Η ποιότητα των εκτελούμενων εργασιών εξαρτάται κυρίως από την επιλογή των βασικών ενεργειών: την ένταση ρεύματος, το χρόνο συγκόλλησης και πίεσης καθώς και από τη ρύθμιση τους στις διάφορες περιόδους της διαδικασίας συγκόλλησης. Οι μηχανές συγκόλλησης με πίεση πρέπει να είναι εφοδιασμένες με κατάλληλες συσκευές, για τη ρύθμιση των παραμέτρων συγκόλλησης σε αρκετά μεγάλα όρια.

## 9.2 Διαχωρισμός των μεθόδων συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση

Οι μέθοδοι συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση **σχήμα 3** μπορούν να διαχωριστούν, ανάλογα με πάρα πολλούς παράγοντες, οι βασικότεροι από τους οποίους είναι:

- ο τρόπος τροφοδοσίας του ρεύματος, δηλαδή η χρησιμοποίηση του εναλλασσόμενου ρεύματος ή της αποθηκευμένης σε πυκνωτές ηλεκτρικής ενέργειας στον επαγωγέα συγκόλλησης στις συστοιχίες πυκνωτών
- η μορφή της συγκολλητής σύνδεσης, από την οποία εξαρτάται ο τύπος της μηχανής συγκόλλησης μπορούν να είναι μηχανές μετωπικές, σημειακές, προεξοχής, γραμμικές και γραμμικές - μετωπικές.
- η τεχνολογία συγκόλλησης, δηλαδή η εκλογή του κύκλου συγκόλλησης ρύθμισης των μεγεθών πίεσης, του ρεύματος και του χρόνου, όπως και η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου, π.χ. συγκόλληση βραχυκύκλωσης ή σπινθηρισμού. Η πιο ενδεδειγμένη κατάταξη των μεθόδων συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση είναι σύμφωνα με τη μορφή της συγκολλητής σύνδεσης.



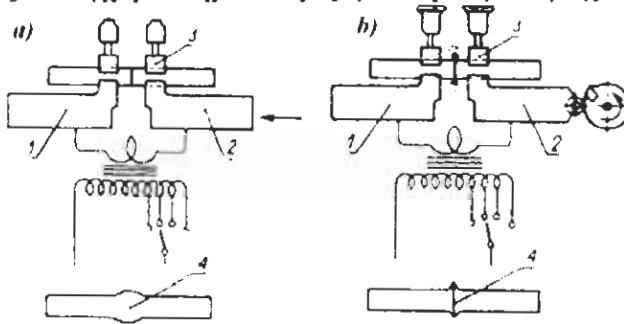
**Σχήμα 3** Διάκριση των μεθόδων συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση

### 9.2.1 Συγκόλληση μετωπική

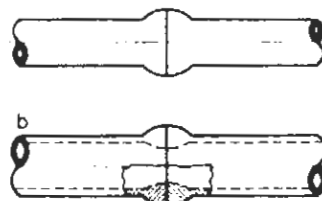
Με τη μέθοδο αυτή τα προορισμένα για τη συγκόλληση εξαρτήματα συνδέονται σε όλη την επιφάνεια επαφής μετωπικά **σχήμα 6**. Ανάλογα με το είδος του μετάλλου, την κατάσταση της επιφάνειας της διατομής των συγκολλούμενων εξαρτημάτων και τις απαιτήσεις ως προς την ποιότητα της σύνδεσης, η μετωπική συγκόλληση διενεργείται με τη μέθοδο βραχυκύκλωσης ή σπινθηρισμού.

### 9.2.2 Συγκόλληση βραχυκύκλωσης

Κατά τη συγκόλληση βραχυκύκλωσης *σχήμα 4α*, τα προορισμένα για τη συγκόλληση εξαρτήματα συγκρατούνται στις σιαγόνες-ηλεκτρόδια της μηχανής συγκόλλησης και πιέζονται μετωπικά. Στη συνέχεια, διοχετεύεται το ηλεκτρικό ρεύμα σε αυτά. Μετά τη θέρμανση του μετάλλου και την επίτευξη εύπλαστης κατάστασης, ακολουθεί ισχυρή πίεση, η οποία προξενεί τη **χαρακτηριστική εξόγκωση** στη θέση της σύνδεσης.



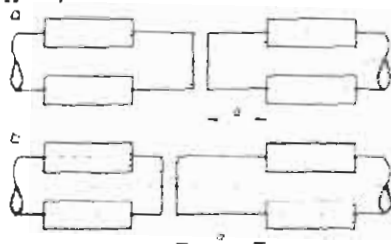
*Σχήμα 4 Μετωπική συγκόλληση: α συγκόλληση βραχυκύκλωσης, β συγκόλληση σπινθηρισμού 1 σταθερό ηλεκτρόδιο, 2 κινούμενο ηλεκτρόδιο, 3 σιαγόνες χάλκινες, που συμπιέζουν το συγκολλούμενο αντικείμενο, 4 κόλληση.*



*Σχήμα 5 Εξωτερική εμφάνιση συνδέσεων, που επιτεύχθηκαν με τη συγκόλληση βραχυκύκλωσης: α χαλύβδινη ράβδος, β χαλύβδινος σωλήνας*

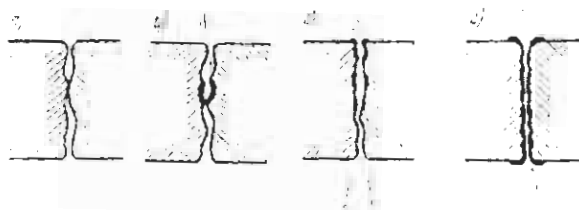
Για να μην επιτραπεί η υπερθέρμανση, η παροχή του ρεύματος διακόπτεται αυτόματα, πριν την τελική φάση συγκόλλησης. Χαρακτηριστική μορφή σύνδεσης που επιτυγχάνεται με βραχυκύκλωση για δύο διαφορετικά εξαρτήματα φαίνεται στο *σχήμα 5*. Αυτή η μέθοδος συγκόλλησης απαιτεί επιμελημένη κατεργασία της μετωπικής επιφάνειας. Η ανομοιόμορφη θέρμανση και η οξείδωση του μετάλλου στις μετωπικές επιφάνειες, κατά τη συγκόλληση βραχυκύκλωσης, προξενούν τη μείωση της αντοχής της κόλλησης, ιδιαίτερα σε εξαρτήματα με μεγάλες διατομές των επιφανειών. Εξαιτίας αυτού, η περιοχή συγκόλλησης περιορίζεται για εξαρτήματα συμπαγή με πάχος μέχρι  $30[\text{mm}]$ . Στη διαδικασία συγκόλλησης με βραχυκύκλωση η πίεση έχει στατικό χαρακτήρα, σε αντίθεση με τη συγκόλληση σπινθηρισμού, που η πίεση πραγματοποιείται με δυναμική ώθηση. Κατά τη διαδικασία βραχυκύκλωσης εξαρτημάτων με επιφάνειες που έχουν ακαθαρσίες, δημιουργείται ατελής τήξη. Κατά τη συγκόλληση βραχυκύκλωσης, οι βασικές παράμετροι είναι: **το μήκος συγκράτησης το μήκος προεξοχής, η μοναδιαία ισχύς  $A/[\text{mm}^2]$  της επιφάνειας, ο χρόνος διέλευσης του ρεύματος συγκόλλησης, η μοναδιαία πίεση και το πλεόνασμα ανοχής για την εξόγκωση.** Οι παράμετροι αυτές επιλέγονται ανάλογα με τον τύπο του συγκολλούμενου υλικού, τη μορφή του, την επιφάνεια της διατομής, τα χαρακτηριστικά της μηχανής συγκόλλησης και την απαιτούμενη απόδοση.

### 9.2.3 Συγκόλληση σπινθηρισμού

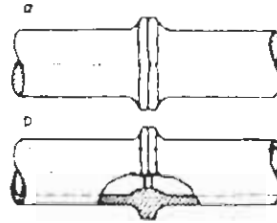


*Σχήμα 6 Τρόπος συγκράτησης συγκολλούμενων εξαρτημάτων: α κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό β κατασκευασμένα από διαφορετικό υλικό*

Η μετωπική συγκόλληση με συνεχή σπινθηρισμό *σχήμα 6b* επιτυγχάνεται σε δύο στάδια: το πρώτο στάδιο είναι ο σπινθηρισμός, ενώ το δεύτερο η εξόγκωση. Τα συγκολλούμενα εξαρτήματα συγκρατώνται στις σιαγόνες ηλεκτρόδια της μηχανής *σχήμα 6*. Στη συνέχεια διοχετεύεται το ηλεκτρικό ρεύμα και με αργό ρυθμό πλησιάζουν τα εξαρτήματα το ένα προς το άλλο. Οι μετωπικές επιφάνειες των συγκολλούμενων εξαρτημάτων έρχονται σε επαφή μόνο σε μερικά σημεία της τραχείας επιφάνειας. Ως αποτέλεσμα της μεγάλης πυκνότητας του διερχόμενου ρεύματος στα σημεία αυτά έχουμε τη δημιουργία των λεγόμενων **γεφυρών του ρευστού μετάλλου**, που αυτοθερμαίνονται στιγμιαία μέχρι τη θερμοκρασία βρασμού *σχήμα 7*. Η πίεση των ατμών του μετάλλου και η επίδραση του μαγνητικού πεδίου, που δημιουργείται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, παρασύρουν τα καμένα και τα μερικώς λιωμένα στοιχεία του υλικού προς τα έξω, τα οποία φαίνονται με μορφή ισχυρού σπινθηρισμού. Οι δημιουργούμενοι ατμοί του μετάλλου προστατεύουν την τηκόμενη επιφάνεια από τη διείσδυση του ατμοσφαιρικού αέρα, που ασκεί ωφέλιμη επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες της σύνδεσης. Η γενική εικόνα της σύνδεσης φαίνεται στο *σχήμα 8*. Το πέρασμα από τη διαδικασία σπινθηρισμού στην εξόγκωση γίνεται ακαριαία. Η έναρξη της εξόγκωσης γίνεται με διοχετευμένο το ρεύμα ενώ η περάτωση, χωρίς ρεύμα. Η συγκόλληση σπινθηρισμού με συνεχή σπινθηρισμό εξασφαλίζει την ομοιόμορφη θέρμανση των εξαρτημάτων σε όλη τη διατομή και με καλή ποιότητα της σύνδεσης. Το ουσιαστικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα εύκολης μηχανοποίησης της διαδικασίας.



*Σχήμα 7 Πορεία σπινθηρισμού κατά τη μετωπική συγκόλληση: α, β, γ διαδοχικές φάσεις δημιουργίας γεφυρών, δ τηκόμενες επιφάνειες συγκόλλησης*



Σχήμα 8 Εξωτερική εμφάνιση των συνδέσεων με συγκόλληση σπινθηρισμού: α χαλύβδινη ράβδος, β χαλύβδινος σωλήνας

Η μετωπική συγκόλληση σπινθηρισμού με προθέρμανση διαφέρει από τη συγκόλληση με συνεχή σπινθηρισμό στο ότι, πριν την έναρξη του σταδίου σπινθηρισμού των εξαρτημάτων, τα εξαρτήματα αυτά, προθερμαίνονται με την πολλαπλή επαφή μεταξύ τους, με συνεχή διέλευση του ρεύματος. Σ' αυτό το χρονικό διάστημα συμβαίνει η διακοπόμενη διαδικασία σπινθηρισμού και τα εξαρτήματα σμικρύνονται με το μέγεθος του πλεονάσματος ανοχής. Ο χρόνος επαφής των εξαρτημάτων, δηλαδή ο χρόνος σπινθηρισμού, ισούται με  $0.5[sec]/-3[sec]$  ενώ η διακοπή μεταξύ των διαδοχικών διαλειμμάτων με  $2[sec]/-6[sec]$ . Ο αριθμός των βραχυκυκλώσεων μπορεί να φτάσει μέχρι 5-30, ανάλογα με το μέγεθος της διατομής της σύνδεσης. Κατά τη σύνδεση σπινθηρισμού με προθέρμανση, δεν έχουμε ταχεία απαγωγή της θερμότητας και, έτσι, επιτυγχάνεται περισσότερο πλαστική σύνδεση κατά τη συγκόλληση χαλύβων που σκληρύνονται-βάφονται εύκολα. Υπάρχει, επίσης, δυνατότητα μείωσης της ισχύος της μηχανής συγκόλλησης ή της συγκόλλησης εξαρτημάτων με μεγαλύτερη διατομή, για δεδομένη ισχύ της μηχανής συγκόλλησης. Η εξόγκωση τότε απαιτεί την εφαρμογή μικρότερης δύναμης και, γενικά, μειώνεται το πλεόνασμα ανοχής για τη συγκόλληση. Τα πλεονεκτήματα της συγκόλλησης σπινθηρισμού, σε σύγκριση με τη συγκόλληση βραχυκύκλωσης, είναι τα ακόλουθα:

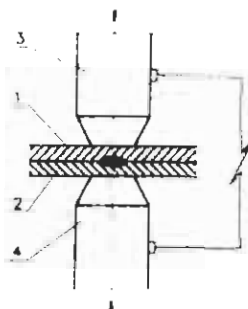
1. φθηνότερη προετοιμασία των συγκολλούμενων επιφανειών, οι οποίες δεν απαιτούν κατεργασία ακριβείας, καθαρισμό, εφαρμογή, επειδή το ίσιωμα της επιφάνειας συμβαίνει αυτενεργά, ενώ το τηκόμενο μέταλλο παίζει το ρόλο συλλιπάσματος, καθαρίζοντας τα οξειδία από τη διατομή·
2. λιγότερη κατανάλωση ρεύματος και μεγαλύτερη ταχύτητα της διαδικασίας συγκόλλησης
3. καλύτερα αποτελέσματα από την άποψη ιδιοτήτων αντοχής της σύνδεσης. Οι κατά μέσο όρο συνθήκες συγκόλλησης σπινθηρισμού κοινών χαλύβων δίνονται στον πίνακα 1.

Διατομή [mm <sup>2</sup> ]	Ισχύς συγκόλλησης [KVA]	Χρόνος [sec]	Διατομή [mm <sup>2</sup> ]	Ισχύς συγκόλλησης [KVA]	Χρόνος [sec]	Διατομή [mm <sup>2</sup> ]	Ισχύς συγκόλλησης [KVA]	Χρόνος [sec]
30	2	3.0	250	9	9	800	19	25
50	3	4.5	300	10	10	1000	25	30
70	4	6.0	350	11	12	1250	30	35
100	5	6.5	400	12	15	1350	40	37
125	6	7.0	450	12	17	1500	45	40
150	7	7.5	500	12	18	1800	50	45
200	8	8.0	650	16	20	2000	60	45

Πίνακας 1 Συγκόλληση σπινθηρισμού ανθρακοχαλύβων χαμηλού άνθρακα

### 9.2.4 Συγκόλληση σημειακή

Ανεξάρτητα από τον τρόπο συγκόλλησης και το χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό, η διαδικασία συγκόλλησης διακρίνεται σε τρία βασικά στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η συμπίεση μεταξύ των συνδεόμενων εξαρτημάτων σε επιφάνεια που περιορίζεται από τις διαστάσεις των κεφαλών των ηλεκτροδίων.

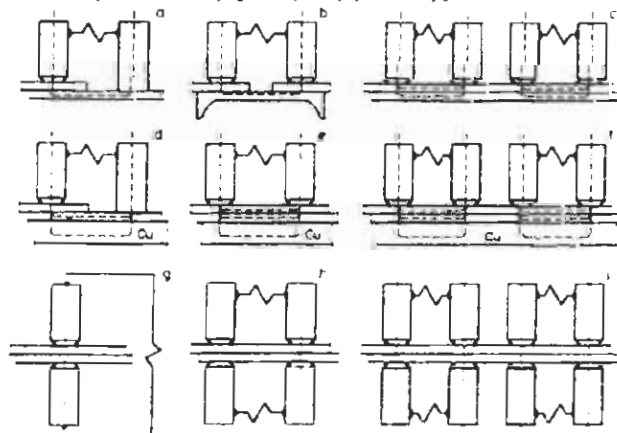


**Σχήμα 10** Σημειακή συγκόλληση: 1 και 2 συγκολλούμενα εξαρτήματα. 3 και 4 ηλεκτρόδια συγκόλλησης

Το **δεύτερο** είναι η θέρμανση των συνδεόμενων επιφανειών σε θερμοκρασία συγκόλλησης με το ηλεκτρικό ρεύμα. Το **τρίτο στάδιο** είναι η ψύξη της κόλλησης σε συνθήκες συμπίεσης. Κατά τη διάρκεια σημειακής συγκόλλησης επιτυγχάνεται μία ή και περισσότερες κολλήσεις μαζί. Η αρχή της σημειακής συγκόλλησης παρουσιάζεται στο **σχήμα 10**. Η σημειακή συγκόλληση διαφείνεται, επίσης, και ανάλογα με:

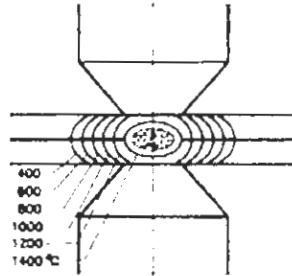
1. το ρεύμα μονοπαλικό, πολυπαλικό
2. τον τρόπο προσαγωγής του ηλεκτρικού ρεύματος στα συγκολλούμενα εξαρτήματα μονόπλευρα **σχήμα 11 a-f**, δίπλευρα **σχήμα 11**,
3. το πλήθος των σχηματιζόμενων κολλήσεων, κατά τη διάρκεια ενός κύκλου μονοσημειακή **σχήμα 11 a**, **σχήμα 11d**, **σχήμα 11g** δισημειακή **σχήμα 11b**, **σχήμα 11e**, **σχήμα 11h** πολυσημειακή **σχήμα 11c**, **σχήμα 11f**, **σχήμα 11i**.

Το φαινόμενο σχηματισμού του πυρήνα της κόλλησης εξαρτάται από τη θερμοκρασία που επικρατεί στη ζώνη θέρμανσης

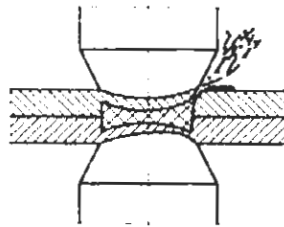


**Σχήμα 11** Σημειακή συγκόλληση: [a], [d] μονοσημειακή μονόπλευρη, [b], [e] δισημειακή μονόπλευρη, [c], [f] πολυσημειακή μονόπλευρη, [g] μονοσημειακή δίπλευρη, [h] δισημειακή δίπλευρη, [i] πολυσημειακή δίπλευρη

Στο **σχήμα 12** φαίνεται η κατανομή των θερμοκρασιών στη συγκολλούμενη σύνδεση η υψηλότερη θερμοκρασία επικρατεί στο μέσο τμήμα της συγκολλούμενης σύνδεσης και πλησιάζει τη θερμοκρασία τήξης του συγκολλούμενου υλικού.

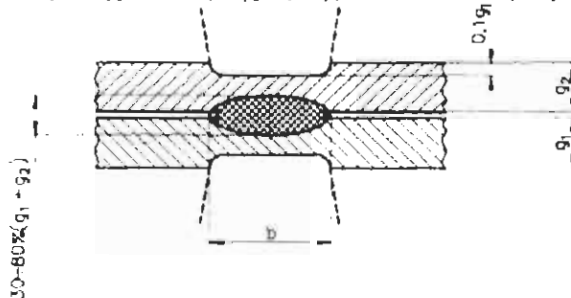


**Σχήμα 12** Κατανομή θερμοκρασιών στη ζώνη σημειακής συγκόλλησης

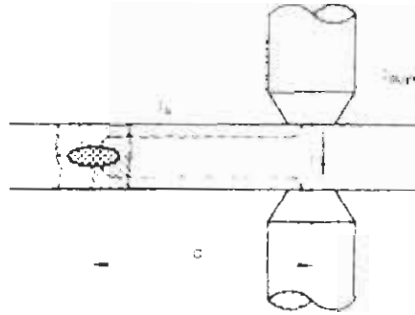


**Σχήμα 13** Εκτόξευση μετάλλου κατά τη σημειακή συγκόλληση

Τα εξωτερικά στρώματα, εξαιτίας της ψύξης, έχουν αρκετά χαμηλή θερμοκρασία και το μέταλλο που περιβάλλει τον πυρήνα της κόλλησης βρίσκεται σε εύπλαστη κατάσταση. Εάν το περικάλυμμα του εύπλαστου μετάλλου δεν είναι ισχυρό, τότε εκτοξεύεται ρευστό μέταλλο από την κόλληση **σχήμα 13**. Αυτή η εκτόξευση προξενείται από τη μεγάλη πίεση που ασκούν τα ηλεκτρόδια ή από την πίεση των ατμών του τηκόμενου μετάλλου της κόλλησης. Στο **σχήμα 14** φαίνεται η σωστή μορφή εκτελεσμένης κόλλησης, περιβαλλόμενη από χαρακτηριστικό δακτύλιο, ο οποίος διαμορφώθηκε από τη μερική συμπίεση του εύπλαστου υλικού μεταξύ των ηλεκτροδίων. Το βάθος διείσδυσης του ηλεκτροδίου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το 10% του πάχους των συγκολλούμενων ελασμάτων. Το τρίτο στάδιο της συγκόλλησης αρχίζει από τη στιγμή διακοπής του ρεύματος. Επειδή τα ηλεκτρόδια είναι κατασκευασμένα από υλικά με μεγάλη θερμική αγωγιμότητα, η ψύξη δεδομένης κόλλησης πραγματοποιείται με μεγάλη ταχύτητα.



**Σχήμα 14** Γενική εμφάνιση σωστά εκτελούμενης κόλλησης



**Σχήμα 15** Το φαινόμενο διακλάδωσης των ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη σημειακή συγκόλληση:  $I_{σπκ}$  ρεύμα συγκόλλησης,  $I_b$  ρεύμα διακλάδωσης,  $a$  βήμα ραφής

Εάν τα σημεία των κολλήσεων είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, τότε μπορεί να εμφανισθεί το φαινόμενο διακλάδωσης **σχήμα 15**. Αυτό συνίσταται στο ότι μέρος του ρεύματος συγκόλλησης, αντί να διέρχεται από την καινούρια εκτελούμενη κόλληση, ακολουθεί το δρόμο της μικρότερης ηλεκτρικής αντίστασης της πλησιέστερης εκτελεσθείσης κόλλησης. Αυτό το φαινόμενο έχει ασφαλώς αρνητική επίδραση στη διαμόρφωση της νέας κόλλησης και, έτσι, έχουμε ατελή τήξη.

### 9.2.5 Παράμετροι συγκόλλησης

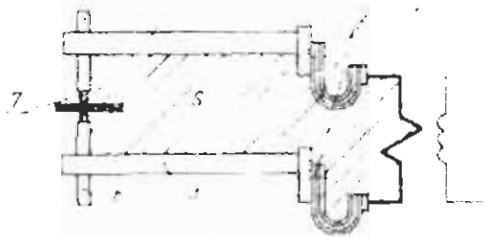
Οι συνθήκες της σημειακής συγκόλλησης περιέχουν τις ακόλουθες βασικές παραμέτρους: την ένταση  $I$  σε  $[A]$  και την πυκνότητα του ρεύματος  $[A/mm^2]$ , το χρόνο συγκόλλησης  $t_2$  σε  $[sec]$ , τη δύναμη πίεσης  $P$  σε  $[N]$ , τη μορφή και τη διάμετρο της επιφάνειας της κεφαλής των ηλεκτροδίων  $d_e$  σε  $[mm]$ . Όλες οι παράμετροι αναφέρονται στο λεπτότερο έλασμα της σύνδεσης. Εάν η διαφορά των παχών είναι μεγάλη, τότε πρέπει να αυξηθούν σχετικά προς το λεπτότερο έλασμα.

### 9.2.6 Ένταση και πυκνότητα ρεύματος

Με το μέτρο αύξησης του πάχους των συγκολλούμενων ελασμάτων, η ένταση του ρεύματος πρέπει να αυξηθεί. Για τη συγκόλληση εξαρτημάτων από ανθρακοχάλυβα με χαμηλό άνθρακα και πάχος  $1[mm]-3[mm]$ , στις κλασικές μηχανές σημειακής συγκόλλησης ονομαζόμενες και ηλεκτροπόντες, η επιλογή της έντασης  $[I]$  του ρεύματος γίνεται, κατά προσέγγιση, σύμφωνα με τον εμπειρικό τύπο  $I=6500g[A]$ , όπου:  $g$  πάχος του λεπτότερου ελάσματος, σε  $[mm]$ . Η πυκνότητα ρεύματος  $I$ , αναφερόμενη στην επιφάνεια επαφής του ηλεκτροδίου με το συγκολλούμενο εξάρτημα, κυμαίνεται στα όρια  $160[A/mm^2]-400[A/mm^2]$  για μεγάλες εντάσεις ρεύματος και  $80[A/mm^2]-160[A/mm^2]$  για μικρές εντάσεις. Με το μέτρο αύξησης των παχών των συνδεόμενων ελασμάτων, η πυκνότητα του ρεύματος ελαττώνεται. Εάν το μέταλλο των συνδεόμενων εξαρτημάτων έχει αυξημένη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, τότε η πυκνότητα αυξάνεται. Κατά τη συγκόλληση του αλουμινίου και των κραμάτων του, φτάνει και ξεπερνά τα  $1000[A/mm^2]$ , ενώ κατά τη συγκόλληση εξαρτημάτων από ανοξείδωτο και πυρίμαχο χάλυβα  $I=100+300[A/mm^2]$ . Επιπλέον, όμως, στην τιμή του ρεύματος ουσιώδη επίδραση ασκούν τα φαινόμενα που συμβαίνουν στο κύκλωμα



συγκόλλησης. Στο κύκλωμα συγκόλλησης *σχήμα 16*, εισέρχονται οι περιελίξεις του δευτερεύοντος κυκλώματος του μετασχηματιστή της μηχανής *1*, συνδεδεμένες με τις χάλκινες τροχιές *2* και τους βραχίονες της μηχανής *3* και *4*. Στους βραχίονες της μηχανής είναι τοποθετημένα τα ρυθμιζόμενα στελέχη των ηλεκτροδίων και *6* με τα ηλεκτρόδια *7*. Το κύκλωμα συγκόλλησης κλείνει με τα συγκολλούμενα εξαρτήματα. Χαρακτηρίζεται από την ορισμένη **ονομαστική αντίσταση**, η οποία αποτελείται από την αθροιστική αντίσταση όλων των εισερχόμενων σ' αυτήν επαφών και εξαρτημάτων. Εκτός από την ονομαστική αντίσταση, κάθε κύκλωμα συγκόλλησης χαρακτηρίζεται, επίσης, και από την ορισμένη **επαγωγική αντίσταση**, η οποία εξαρτάται από το μέγεθος του κυκλώματος (από την προέκταση και την απόσταση των βραχιόνων της μηχανής) καθώς και από τη μαγνητική μάζα του μετάλλου, η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό του κυκλώματος.



*Σχήμα 16* Δευτερεύον κύκλωμα του ρεύματος συγκόλλησης: *1* περιέλιξη δευτερεύοντος κυκλώματος, *2* πλάκες σύνδεσης, *3, 4* βραχίονες της μηχανής συγκόλλησης, *5, 6* ρυθμιζόμενα στελέχη των ηλεκτροδίων, *7* ηλεκτρόδια

Οι μεταβολές στην επαγωγική αντίσταση εξαρτώνται κυρίως από τα μήκη των βραχιόνων της μηχανής. Οι ονομαστικές τιμές του ρεύματος συγκόλλησης, που δίνονται στους καταλόγους των μηχανών συγκόλλησης, είναι επεξεργασμένες για την ονομαστική προέκταση και την απόσταση μεταξύ των βραχιόνων της μηχανής. Κάθε αύξηση της προέκτασης των βραχιόνων ή της ρυθμισμένης απόστασης μεταξύ τους δηλαδή η αύξηση της επιφάνειας του δευτερεύοντος κυκλώματος *S* προξενεί τη μείωση του ρεύματος συγκόλλησης, σε

σχέση με τις ονομαστικές τιμές, σύμφωνα με τον τύπο: 
$$I_{Z\chi} = \frac{I_{Z\chi}^{ονομ}}{\sqrt[3]{\frac{S_{\chi}}{S_{\eta}}}} [I_{Z\chi}] \text{ ρεύμα}$$

συγκόλλησης με αυξημένη την επιφάνεια του δευτερεύοντος κυκλώματος,  $[I_{Z\chi}]$  ρεύμα συγκόλλησης με την ονομαστική επιφάνεια του δευτερεύοντος κυκλώματος  $[S_{\chi}]$  επιφάνεια του αυξημένου δευτερεύοντος κυκλώματος ονομαστική,  $[S_{\eta}]$  επιφάνεια του δευτερεύοντος κυκλώματος. Η εισχώρηση των συγκολλούμενων εξαρτημάτων φερρομαγνητικών ανάμεσα στους βραχίονες της μηχανής, δηλαδή στο χώρο του δευτερεύοντος κυκλώματος *S*, προξενεί **αύξηση της επαγωγικής αντίστασης**. Η αύξηση αυτή είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερες είναι οι διαστάσεις των συγκολλούμενων ελασμάτων και όσο πιο βαθιά βρίσκονται στο χώρο του δευτερεύοντος κυκλώματος. Η αύξηση της επαγωγικής αντίστασης προξενεί την πτώση της έντασης του ρεύματος συγκόλλησης" αυτό συνοδεύεται με τη μείωση της αντοχής των κολλήσεων.

### 9.2.7 Ηλεκτρόδια

Τα ηλεκτρόδια αποτελούν στοιχείο του δευτερεύοντος της μηχανής συγκόλλησης, διοχετεύοντας το ρεύμα άμεσα στη θέση συγκόλλησης. Διαμέσου των ηλεκτροδίων ασκείται πίεση στα συνδεόμενα εξαρτήματα. Η ποιότητα του υλικού των ηλεκτροδίων είναι μια από τις βασικές τεχνολογικές συνθήκες συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση, αποφασιστική για την πορεία και την απόδοση της διαδικασίας συγκόλλησης καθώς και για την ποιότητα των επιτευχθέντων συνδέσεων. Στη βιομηχανική πρακτική χρησιμοποιείται μεγάλη ποικιλία υλικών για την κατασκευή των ηλεκτροδίων συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση.

### 9.2.8 Απαιτήσεις που αναφέρονται στα υλικά των ηλεκτροδίων

Τα υλικά για τα ηλεκτρόδια συγκόλλησης πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες βασικές συνθήκες:

1. δυνατότητα εύκολης εκτέλεσης των ηλεκτροδίων με την απαιτούμενη μορφή και διαστάσεις
2. εγγύηση για τη σωστή πορεία της διαδικασίας συγκόλλησης
3. δυνατότητα εκτέλεσης των συνδέσεων με τις απαιτούμενες ιδιότητες εκμετάλλευσης
4. εγγύηση μεγάλης διάρκειας ζωής των ηλεκτροδίων

Για την εκπλήρωση των παραπάνω απαιτήσεων, τα υλικά για τα ηλεκτρόδια πρέπει να χαρακτηρίζονται από:

1. υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα
2. μεγάλη σκληρότητα και αντοχή σε κανονικές και ανυψωμένες θερμοκρασίες.
3. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού επιλέγεται με γνώμονα τις ελάχιστες θερμικές απώλειες κατά τη συγκόλληση καθώς και την εστίαση της στη θέση σύνδεσης.

Πάχος κάθε ελάσματος,	Ακτίνα σφαιρικού άκρου του ηλεκτροδίου,	Δύναμη πίεσης των ηλεκτροδίων		Χρόνος συγκόλλησης	Μέγιστη ένταση ρεύματος του καλωδίου.
1.5	75	5.5+6.0	20.0-22.5	0.16	38.000
2.0	100	6.5+7.0	22.5-25.0	0.22	47.000
3.0	150	8.0+8.5	25.0-30.0	0.30	56.000
3.5	150	9.0+9.5	30.0-35.0	0.35	75.000

Πίνακας 2 Παράμετροι σημειακής συγκόλλησης ελαφρών κραμάτων

Η βιομηχανική παραγωγή υλικών για τα ηλεκτρόδια με υψηλή σκληρότητα επιτυγχάνεται με:

- τη χρησιμοποίηση κραματικών προσθηκών Cr, Zr, Co, Be, Cd, Ni, Si, με βάση το χαλκό.
- τη θερμική κατεργασία σκλήρυνση με γήρανση
- τη σφυρηλασία, έλαση, όλκιση, συμπίεση.

### 9.2.9 Κατασκευή μηχανής σημειακής συγκόλλησης ηλεκτροπόντα

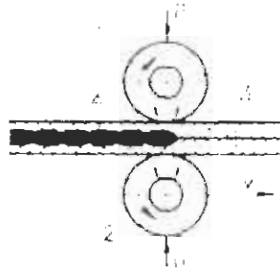
Οι μηχανές σημειακής συγκόλλησης χρησιμεύουν για την εκτέλεση συνδέσεων με επικάλυψη με σημειακές κολλήσεις εναποτιθέμενες σε σειρά, κατά μήκος των συνδεόμενων άκρων. Στις σύγχρονες μηχανές σημειακής συγκόλλησης, η πίεση των ηλεκτροδίων επιτυγχάνεται μηχανικά με πεπιεσμένο αέρα ή στην περίπτωση χονδρών ελασμάτων με υδραυλική αντλία. Η ενεργοποίηση και η διακοπή της πίεσης και του ρεύματος επιτυγχάνονται ηλεκτρικά ή μηχανικά με κνώδακες. Στις πλέον σύγχρονες μηχανές η ρύθμιση είναι ηλεκτρονική.



Σχήμα 18 Μηχανή σημειακής συγκόλλησης

### 9.2.10 Συγκόλληση γραμμική

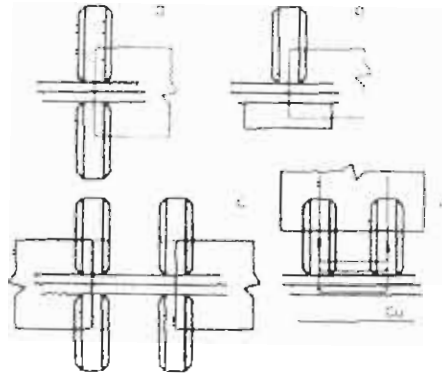
Η γραμμική συγκόλληση *σχήμα 19* χρησιμοποιείται για την σύνδεση εξαρτημάτων κατά μήκος της γραμμής καθορισμένης με την κύλιση του ηλεκτροδίου με μορφή ράουλου ή ζεύγους ηλεκτροδίων της μηχανής συγκόλλησης. Τα τμήματα εργασίας των ηλεκτροδίων που εφάπτονται των συγκολλούμενων εξαρτημάτων σχηματίζουν στιγμιαίες θέσεις συγκέντρωσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία των κολλήσεων. Η σχετική κίνηση των ηλεκτροδίων και των συγκολλούμενων εξαρτημάτων πραγματοποιείται με μηχανική μετάδοση των ηλεκτροδίων (ή του ηλεκτροδίου). Ανάλογα με τον τρόπο τροφοδοσίας του ρεύματος στα συγκολλούμενα εξαρτήματα, η διάκριση είναι παρόμοια με αυτήν της σημειακής συγκόλλησης: μονόπλευρη *σχήμα 20b*, *σχήμα 20d* και δίπλευρη *σχήμα 20a*, *σχήμα 20c* μονής ραφής *σχήμα 20a*, *σχήμα 20b* και πολλαπλής ραφής *σχήμα 20c*, *σχήμα 20d*. Ανάλογα με το χαρακτήρα πορείας των παλμών του ρεύματος και το χρόνο διάρκειας τους καθώς και τον τρόπο μετατόπισης των συγκολλούμενων εξαρτημάτων ως προς τα ηλεκτρόδια διακρίνεται: **συγκόλληση γραμμική βηματική**, κατά την οποία η διέλευση του ρεύματος επιτυγχάνεται με ρυθμικά, διαλείμματα, ενώ η μετατόπιση των εξαρτημάτων συγκρατείται κατά την περίοδο διέλευσης του ρεύματος *σχήμα 21a*



**Σχήμα 19** Αρχή της μεθόδου γραμμικής συγκόλλησης: [1], [2] ηλεκτρόδια συγκόλλησης, [3] συγκολλούμενα εξαρτήματα, [4] κόλληση, [I] ρεύμα συγκόλλησης [P] ασκούμενη πίεση διαμέσου ηλεκτροδίων, [v] ταχύτητα συγκόλλησης

**συγκόλληση γραμμική διακοπόμενη**, κατά την οποία η διέλευση του ρεύματος επιτυγχάνεται με ρυθμικά διαλείμματα, ενώ η μετατόπιση των εξαρτημάτων δε συγκρατείται κατά τη διάρκεια διέλευσης του ρεύματος **σχήμα 21b**.

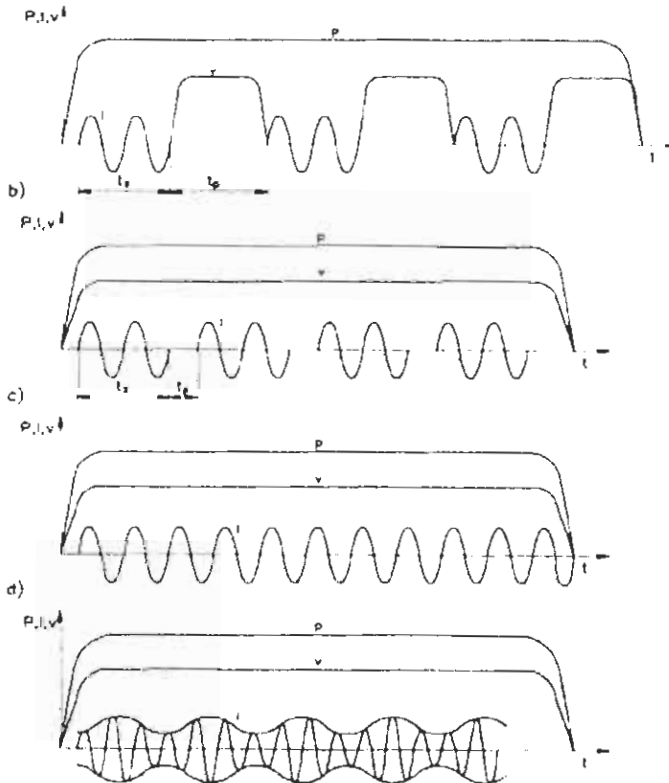
**συγκόλληση γραμμική συνεχής**, κατά την οποία, στο χρόνο μετατόπισης των εξαρτημάτων, η διέλευση του ρεύματος γίνεται κατά συνεχή τρόπο **σχήμα 21b**.



**Σχήμα 20** Γραμμική συγκόλληση: a, b δίπλευρη μονοραφής, c δίπλευρη πολλαπλών ραφών, d μονόπλευρη πολλαπλών ραφών

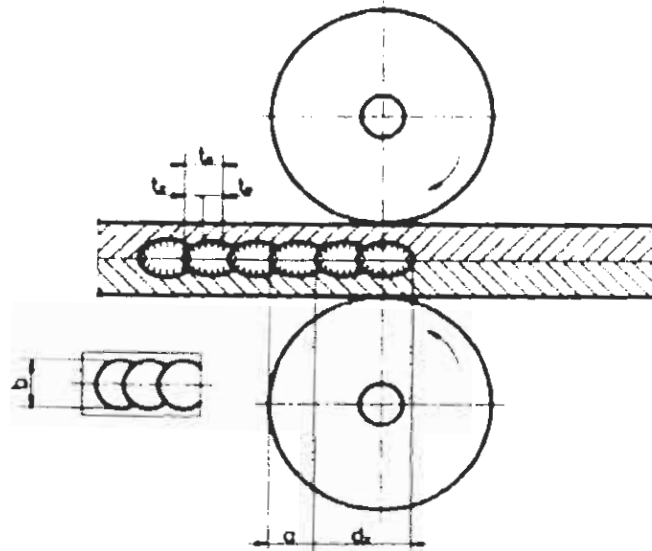
Η γραμμική συγκόλληση διενεργείται, βασικά, με επικαλυπτόμενα τα ελάσματα, εφαρμόζοντας το πρόγραμμα σύμφωνα με το **σχήμα 21**. Τα θερμικά και ηλεκτρικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη γραμμική συγκόλληση με επικαλυπτόμενα ελάσματα είναι παρόμοια με αυτά που συμβαίνουν στην σημειακή συγκόλληση. Το ρεύμα συγκόλλησης, ο χρόνος διέλευσης του και η πίεση των ηλεκτροδίων, όπως και κατά τη σημειακή συγκόλληση, μεταβάλλουν τις διαστάσεις του πυρήνα το πλάτος ραφής και το μέγεθος με το οποίο επικαλύπτονται μεταξύ τους οι διάφορες κολλήσεις. Για τη γραμμική συγκόλληση, χαρακτηριστική είναι η αυξημένη αντίσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και στις συνδεόμενες επιφάνειες των εξαρτημάτων. επειδή η αντίσταση επαφής κινούμενου στοιχείου είναι σημαντικά υψηλότερη από την αντίσταση επαφής μη κινούμενου στοιχείου. Η αύξηση της αντίστασης προξενεί την αύξηση της εκλυόμενης ποσότητας θερμότητας στην επαφή ηλεκτροδίου - εξαρτήματος, που κατά τη συνεχή γραμμική συγκόλληση, ιδιαίτερα ελασμάτων μεταλλικής επίστρωσης, οδηγεί στην υπέρθεξη των επιφανειών και την προσκόλληση μετάλλου στην επιφάνεια εργασίας των ηλεκτροδίων. Τα διαλείμματα ανάμεσα στους παλμούς ρεύματος, κατά τη διακοπόμενη συγκόλληση, διευκολύνουν την ψύξη των ηλεκτροδίων, που επιδρά θετικά στη

διαδικασία συγκόλλησης. Καλά αποτελέσματα επιτυγχάνονται κατά τη βηματική συγκόλληση. Στην περίπτωση αυτή, δημιουργούνται επίσης καλύτερες συνθήκες στερεοποίησης και κρυστάλλωσης του πυρήνα της συγκόλλησης, επειδή η διαδικασία αυτή συμβαίνει σε στιγμές που τα ηλεκτρόδια είναι μη κινούμενα. Στη βιομηχανική πρακτική, χρησιμοποιείται συχνότερα η **διακοπτόμενη γραμμική συγκόλληση**. Ο κύκλος συγκόλλησης,  $t_c$  κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης, επαναλαμβάνεται πολλαπλώς, αποτελείται από το χρόνο διέλευσης του ρεύματος συγκόλλησης  $t_z$  χρόνος ενός παλμού ρεύματος και από το χρόνο διαλείμματος  $t_p$  σχήματος 26:

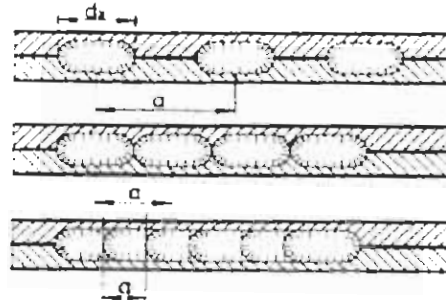


**Σχήμα 21** Πρόγραμμα σημειακής συγκόλλησης: *a* βηματική, *b* διακοπτόμενη, *c* συνεχής με σταθερή τιμή του ρεύματος, *d* συνεχής με μεταβαλλόμενη τιμή του ρεύματος.

Ο κύκλος συγκόλλησης καθορίζεται από το βήμα της ραφής  $a$  [mm] και από την ταχύτητα συγκόλλησης  $V$  [m/min], σύμφωνα με τη σχέση:  $t_c = \frac{0.06 \cdot a}{V}$  [sec]



**Σχήμα 22** Κύκλος γραμμικής διακοπόμενης συγκόλλησης:  $t_2$  χρόνος διέλευσης ρεύματος συγκόλλησης,  $t_1$  χρόνος διαλειμάτων διέλευσης του ρεύματος συγκόλλησης,  $t_p$  Χρόνος ενός κύκλου συγκόλλησης,  $b$  πλάτος της γραμμικής κόλλησης.



**Σχήμα 23** Γραμμική ραφή εκτελούμενη με σταθερή ταχύτητα συγκόλλησης και διαφορετικό βήμα των κολλήσεων.

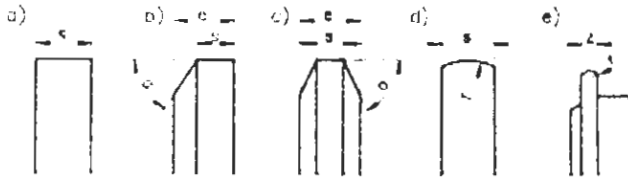
Ο αριθμός σημείων (σημειακών κολλήσεων) που αντιστοιχεί ανά  $1[cm]$  της τρέχουσας συγκολλούμενης ραφής, για τη δεδομένη ταχύτητα συγκόλλησης  $V[m/min]$  καθώς και για τον κύκλο συγκόλλησης  $t_c$  περιόδου, υπολογίζεται από τον τύπο: 
$$n = \frac{30}{t_c \cdot V} \text{ σημείων/cm}$$
 Στο **σχήμα 23** φαίνεται παράδειγμα για ραφές

γραμμικής συγκόλλησης, εκτελεσμένες με σταθερή ταχύτητα συγκόλλησης και με διαφορετικό βήμα κολλήσεων. Κατά τη διακοπόμενη γραμμική συγκόλληση, το μέγεθος του φαινομένου διακλάδωσης ρεύματος εξαρτάται από το βήμα της ραφής  $a$ . Σύμφωνα με τα δεδομένα ερευνητικών πειραμάτων, κατά τη συγκόλληση ελασμάτων με διακοπόμενη ραφή στεγανότητας η διακλάδωση ρεύματος δεν παίζει σοβαρό ρόλο. Το φαινόμενο διακλάδωσης ρεύματος εμφανίζεται κατά τη συγκόλληση στεγανότητας, στην περίπτωση που προηγουμένως εκτελέσθηκαν κολλήσεις συγκράτησης - πόντες.

### 9.2.11 Ηλεκτρόδια

Το υλικό των ηλεκτροδίων επιλέγεται για τη δεδομένη κατηγορία συγκολλούμενων υλικών, ενώ η μορφή και οι διαστάσεις της επιφάνειας εργασίας

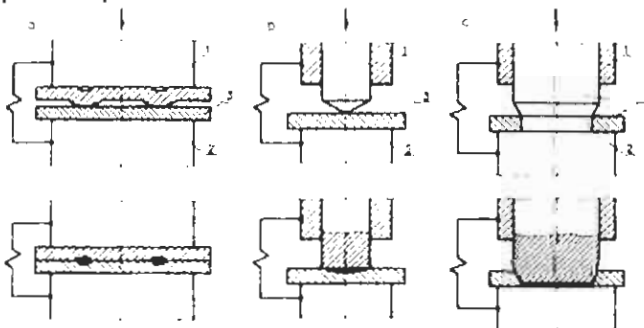
των ηλεκτροδίων πρέπει να επιλέγονται ανάλογα με το πάχος των συγκολλούμενων εξαρτημάτων και το χρησιμοποιούμενο τρόπο συγκόλλησης. Τα τμήματα εργασίας των ηλεκτροδίων με μορφή ράουλων μπορούν να διαμορφωθούν κατά διαφορετικό τρόπο. Οι προτεινόμενες μορφές και διαστάσεις των τμημάτων εργασίας των ηλεκτροδίων παρουσιάζονται στη **σχήμα 24**.



**Σχήμα 24** Μορφή και βασικές διαστάσεις των ηλεκτροδίων με δισκοειδή μορφή, για επίπεδα ηλεκτρόδια *a*, για τραπεζοειδή μονόπλευρα ηλεκτρόδια *b*, για τραπεζοειδή δίπλευρα ηλεκτρόδια *c*, για κανονικά σφαιροειδή ηλεκτρόδια, ιδιαίτερα για τη συγκόλληση ελαφρών κραμάτων *d* Η γωνία  $\alpha$  λοξοτόμησης των ηλεκτροδίων ισούται με  $30^\circ$ - $60^\circ$ .

### 9.2.12 Συγκόλληση με προεξοχές

Η συγκόλληση με προεξοχές συνίσταται στη σύνθεση εξαρτημάτων σε ένα ή μερικά σημεία συγχρόνως. Ο τρόπος σχηματισμού της κόλλησης είναι παρόμοιος με αυτόν της σημειακής συγκόλλησης. Τα σημεία επαφής επιτυγχάνονται με διεργασία κοίλανσης, στο ένα από τα δύο συνδεόμενα εξαρτήματα, σχηματίζονται κατάλληλα κυρτώματα - προεξοχές **σχήμα 25**. Προεξοχή μπορεί επίσης να αποτελέσει και κάποιο στοιχείο του συνδεόμενου εξαρτήματος η ακμή οπής **σχήμα 25c** ή η ακίδα του πείρου **σχήμα 25b**. Κατά τη συγκόλληση με προεξοχές, το ηλεκτρικό ρεύμα τροφοδοτείται στα συνδεόμενα εξαρτήματα διαμέσου των χάλκινων ηλεκτροδίων. Το διερχόμενο από τα ηλεκτρόδια ρεύμα θερμαίνει τις προεξοχές στις θέσεις επαφής τους με την επίπεδη επιφάνεια του δεύτερου από τα δύο συνδεόμενα εξαρτήματα και, έτσι, σχηματίζεται ο πυρήνας της κόλλησης. Το υπόλοιπο μέρος της κάθε προεξοχής καθίσταται εύπλαστο και πλαταίνεται από την επίδραση της συμπίεσης. Η σωστή πορεία της διαδικασίας εξαρτάται από τη λεπτότητα της διεργασίας κοίλανσης των προεξοχών. Επιβάλλεται να έχουν ίδιες διαστάσεις, επειδή, σε αντίθετη περίπτωση, θα προκύψουν μεγάλες εκτοξεύσεις του ρευστού μετάλλου κατά τη συγκόλληση. Οι προεξοχές πρέπει να είναι αρκετά στιβαρές, για να αντέξουν στην αρχική πίεση, προκειμένου να μην καταστραφούν πριν το σχηματισμό του τηκόμενου πυρήνα του μετάλλου.



**Σχήμα 25** Συγκόλληση με προεξοχές: *a* εξαρτήματα επίπεδα, *b*, *c* πείροι, ακραξόνια, 1, 2 ηλεκτρόδια, 3 συγκολλούμενα εξαρτήματα.

Η συγκόλληση προεξοχής έχει εφαρμογή κυρίως στην παραγωγή μεγάλων σειρών, για τη σύνδεση εξαρτημάτων εκτελεσθέντων από ανθρακοχάλυβα με χαμηλό άνθρακα και ψυχρή έλαση και για μερικούς κραματωμένους χάλυβες. Συγκρινόμενη η συγκόλληση προεξοχής με τη σημειακή προκύπτει ότι η συγκόλληση προεξοχής έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα,

- κατά τη διάρκεια μιας φάσης μπορούν να εκτελεστούν μέχρι 10 κολλήσεις
- εξαιτίας της μικρότερης μοναδιαίας πίεσης και της μικρότερης πυκνότητας ρεύματος έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής
- οι κολλήσεις μπορούν να εναποτεθούν πιο κοντά στα άκρα των εξαρτημάτων
- οι κολλήσεις σχηματίζονται σε ακριβώς καθορισμένες θέσεις
- υπάρχει μεγαλύτερη δυνατότητα μηχανοποίησης

### 9.3 Συγκόλληση με πυκνωτές (δυναμικής πίεσης)

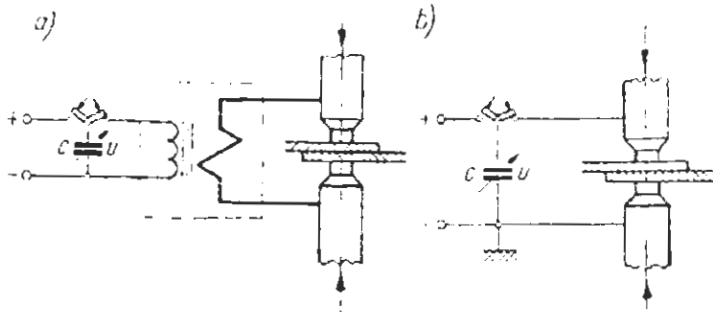
Η συγκόλληση με πυκνωτές και με δυναμική πίεση είναι η μέθοδος σύνδεσης υλικών, που επιτυγχάνεται με χρησιμοποίηση της θερμότητας εκλύομενης στο διάκενο μεταξύ των εξαρτημάτων, από το αποτέλεσμα της παλμικής εκκένωσης των πυκνωτών όπως και της δυναμικά εφαρμοσμένης πίεσης. Όπως ήδη αναφέρθηκε κατά την επεξεργασία των παραμέτρων συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση, στις μηχανές συγκόλλησης μετασχηματιστών, παρουσιάζεται το φαινόμενο της φόρτισης του ηλεκτρικού δικτύου, με αυτές τις μηχανές. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται ιδιαίτερα οξύ, όταν χρησιμοποιούνται οι λεγόμενες **σκληρές παράμετροι συγκόλλησης**, δηλαδή αυτό συμβαίνει όταν σε μικρά χρονικά διαστήματα παίρνουμε μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Όμως υπάρχει δυνατότητα χρησιμοποίησης ακόμη και πολύ σκληρών παραμέτρων συγκόλλησης, χωρίς την υπέρμετρη, συγχρόνως, φόρτιση του ηλεκτρικού δικτύου. Στην υλοποίηση αυτής της διαδικασίας βοηθάει η συγκόλληση με **συσσωρευμένη ενέργεια**. Μία από τις περισσότερο ανεπτυγμένες μεθόδους συγκόλλησης με συσσωρευμένη ενέργεια είναι η **συγκόλληση με πυκνωτές**. Η διαδικασία συγκόλλησης με πυκνωτές συνίσταται στη συσσώρευση από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας στη συστοιχία πυκνωτών με ορισμένη χωρητικότητα  $C$  και η φόρτιση αυτών μέχρι την τάση  $U$ . Στη συνέχεια, με απότομη εκκένωση της συσσωρευμένης ενέργειας, επιτυγχάνεται πολύ μεγάλη ένταση ρεύματος, σε πάρα πολύ μικρό χρόνο. Η συσσωρευμένη ποσότητα ενέργειας στη συστοιχία των πυκνωτών υπολογίζεται από τον

ακόλουθο τύπο:  $A_k = \frac{C \cdot U^2}{2} \cdot 10^{-6} [Joule]$  όπου:  $A_k$  συσσωρευμένη ενέργεια σε

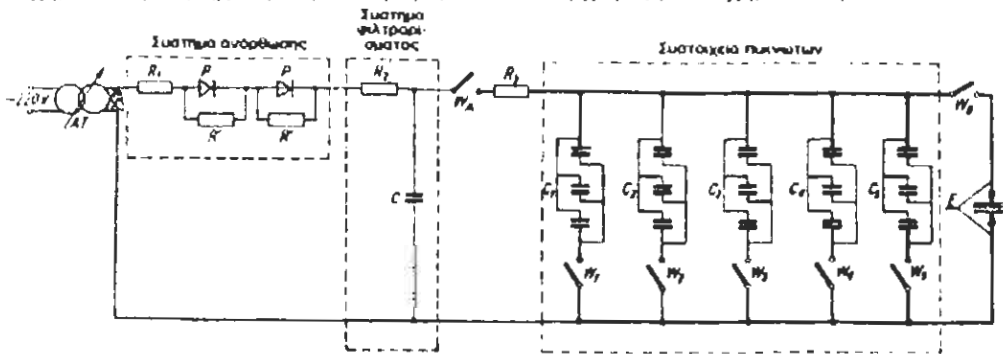
$[Joule]$ ,  $C$  χωρητικότητα της συστοιχίας σε  $[\mu F]$ ,  $U$  τάση φόρτισης σε  $[V]$ . Όπως φαίνεται από τον τύπο, η τιμή της συσσωρευμένης ενέργειας καθορίζεται ακριβώς και με τη διατήρηση σταθερής χωρητικότητας και σταθερής τάσης, μη μεταβαλλόμενης για κάθε κύκλο. Η σταθερότητα της συσσωρευμένης ενέργειας έχει μεγάλη σημασία, επειδή επιτρέπει την επίτευξη αποτελεσμάτων συγκόλλησης με μεγάλη σταθερότητα. Στη διαδικασία συγκόλλησης, η συσσωρευμένη ενέργεια εκκενώνεται ή άμεσα στα συγκολλούμενα εξαρτήματα ή στο πρωτεύον του μετασχηματιστή. Ανάλογα με τον τρόπο εκκένωσης, οι μηχανές συγκόλλησης με πυκνωτές διακρίνονται με μετασχηματιστές και χωρίς μετασχηματιστές **σχήμα 26**. Οι μηχανές συγκόλλησης πυκνωτών με μετασχηματιστές κατασκευάζονται σε



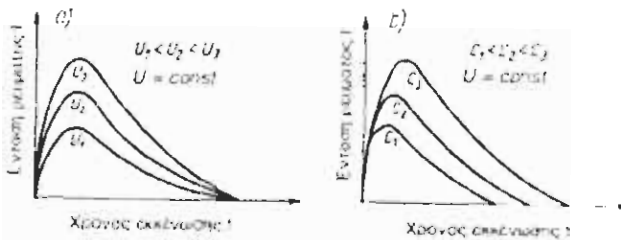
μεγάλη ισχύ, ενώ η κατασκευαστική λύση χωρίς μετασχηματιστές χρησιμοποιείται για τις μηχανές μικρής ισχύος. Το ηλεκτρικό σχήμα μηχανής συγκόλλησης με πυκνωτές μικρής ισχύος φαίνεται *1* στο **σχήμα 27**. Η συσκευή αυτή τροφοδοτείται από το ηλεκτρικό δίκτυο με τάση 220[V]



**Σχήμα 26** Μηχανές συγκόλλησης με πυκνωτές: *a* μηχανή συγκόλλησης με πυκνωτή - μετασχηματιστή, *b* μηχανή συγκόλλησης με πυκνωτή χωρίς μετασχηματιστή.



**Σχήμα 27** Ηλεκτρικό σχήμα μηχανής συγκόλλησης με πυκνωτές: *AT* αυτομετασχηματιστής με περιοχή από 0[V]-250[V],  $R_1$  αντίσταση 68[Ω]/6[W],  $R_2$  αντίσταση 620[Ω]/6[W],  $R_3$  αντίσταση 620[Ω]/12[W],  $R'$  αντίσταση 11[KΩ]/1[W], *P* ανορθωτική διάδος 52E,  $C_1 - C_5$  πυκνωτές με χωρητικότητα 600[μF]/350[V],  $C = 3000[μF]$ , διακόπτες, *C* πυκνωτής φιλτραρίσματος 32[μF]/350[V].



**Σχήμα 28** Ένταση ρεύματος και χρόνος εκκένωσης κατά τη συγκόλληση με πυκνωτές, για σταθερή αντίσταση *K*, συγκολλούμενων εξαρτημάτων: *a* καμπύλες έντασης για διαφορετικές τάσεις φόρτισης της συστοιχίας και με σταθερή χωρητικότητα, *b* καμπύλες έντασης με διαφορετικές χωρητικότητες της συστοιχίας και σταθερή τάση φόρτισης.

Η τάση φόρτισης μπορεί να ρυθμισθεί με τη βοήθεια του αυτομετασχηματιστή *AT*. Το ρεύμα φόρτισης από τον αυτομετασχηματιστή διέρχεται από το σύστημα ανόρθωσης και φιλτραρίσματος και, με κλειστό το διακόπτη  $W_A$ , φορτώνει τη συστοιχία των πυκνωτών. Μόνο που μπορεί να συμβεί η φόρτιση σε όλη τη συστοιχία οι διακόπτες  $W_1, W_2, \dots, W_6$  κλειστοί ή μόνο σ' ένα μέρος της, αναλόγως της ανάγκης. Από τη στιγμή που φορτώθηκαν οι πυκνωτές ανοίγουμε το διακόπτη  $W_A$  η μηχανή συγκόλλησης είναι προετοιμασμένη για εργασία. Εάν τώρα

κλείσουμε το διακόπτη  $W_B$  τότε θα συμβεί η εκκένωση της συστοιχίας και, ανάμεσα από τα συμπιεσμένα συγκολλούμενα εξαρτήματα με τα ηλεκτρόδια  $E$ , θα διέλθει το ρεύμα συγκόλλησης, ενώ η εκλυόμενη θερμότητα θα δημιουργήσει την κόλληση. Ο χρόνος εκκένωσης της συστοιχίας των πυκνωτών είναι πάρα πολύ μικρός και ανέρχεται από  $0.0008-0.0023$ , ανάλογα με την αντίσταση των συγκολλούμενων εξαρτημάτων και τη χωρητικότητα της συστοιχίας των πυκνωτών. Η ένταση του ρεύματος συγκόλλησης στη διαδικασία πυκνωτών είναι πολύ μεγάλη, ενώ η τιμή του εξαρτάται από την αντίσταση των συγκολλούμενων εξαρτημάτων, της χωρητικότητας και τάσης φόρτισης. Η σχέση της έντασης ρεύματος  $I$  και του χρόνου συγκόλλησης  $t$ , για σταθερή αντίσταση, παρουσιάζεται στο *σχήμα 28*.

### 9.3.1 Περιοχή χρησιμοποίησης

Κατά βάση, η συγκόλληση με πυκνωτές έχει εφαρμογή στη μετωπική σύνδεση συρμάτων συνήθως με διαμέτρους από  $1.5[mm]-5[mm]$  από αλουμίνιο, χαλκό, ορείχαλκο, νικέλιο, πλατίνη, ασήμι, βολφράμιο και ωστενιτικούς χάλυβες τύπου *18.8*. Μεγάλη εφαρμογή (ιδιαίτερα στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη βιομηχανία μηχανών, βαγονιών, στη χημική βιομηχανία, την ηλεκτροτεχνική καθώς και στην κατασκευή οικιακών συσκευών) βρίσκει στη συγκόλληση πείρων και κοχλιών με διαμέτρους από  $1.5[mm]-6[mm]$ , κατασκευασμένων από αλουμίνιο, ορείχαλκο καθώς και από ανθρακοχάλυβες και ανοξείδωτους χάλυβες με επίπεδα εξαρτήματα κατασκευασμένα συνήθως από ελάσματα με μονόπλευρη επίστρωση, για να προστατεύει ή άλλως να διακοσμή.

### 9.3.2 Παράμετροι συγκόλλησης

Στις βασικές παραμέτρους συγκόλλησης με πυκνωτές ανήκουν: το μήκος του προεξέχοντος τμήματος υλικού από τα ηλεκτρόδια της μηχανής συγκόλλησης (κατά τη μετωπική συγκόλληση συνήθως ισούται με  $l=(1-2)d$ , η χωρητικότητα των πυκνωτών και η τάση φόρτισης τους (είναι καθοριστική για την ποσότητα της προσαγόμενης ενέργειας στη θέση σύνδεσης), η ταχύτητα με την οποία πλησιάζουν τα συνδεόμενα εξαρτήματα μεταξύ τους αυτή συνήθως ισούται με  $0.5[m/h]-2.5[m/h]$ , η πίεση εξόγκωσης (διενεργούμενη δυναμικά αμέσως μετά το σβήσιμο του ηλεκτρικού τόξου).

## 9.4 Συγκόλληση με τριβή

Η συγκόλληση με τριβή είναι διαδικασία σύνδεσης μετάλλων, στην οποία ο επιφάνειες των συνδεόμενων εξαρτημάτων θερμαίνονται μέχρι τη δημιουργία εύπλαστης κατάστασης, με τη δράση των δυνάμεων τριβής, και, στη συνέχεια, με την εφαρμογή πίεσης, επιτυγχάνεται η συγκόλληση. Η μετατόπιση των επιφανειών μεταξύ τους (δημιουργώντας τις συνθήκες τριβής) πραγματοποιείται με: **την περιστροφική κίνηση** η συνδεόμενη επιφάνεια του ενός εξαρτήματος περιστρέφεται αξονικά προς την άλλη συνδεόμενη επιφάνεια *σχήμα 29α*, **τη γωνιακή ταλάντωση** η συνδεόμενη επιφάνεια του ενός εξαρτήματος μετακινείται με γωνιακή ταλάντωση ως προς τη συνδεόμενη επιφάνεια του άλλου εξαρτήματος

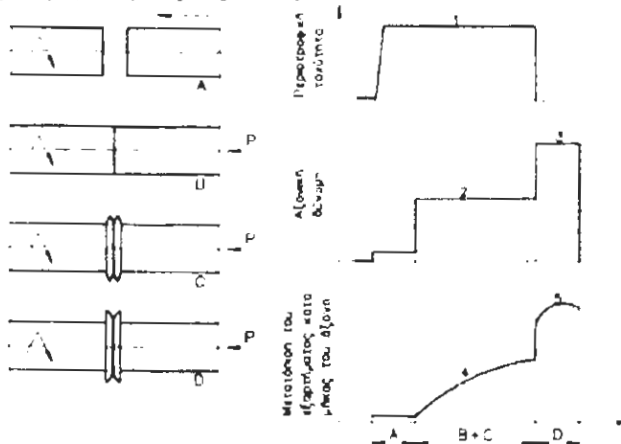
γύρω από κοινό άξονα *σχήμα 29b* την **κυκλική τροχιά** η συνδεδεμένη επιφάνεια του ενός εξαρτήματος μετακινείται με κυκλική κίνηση ως προς την επιφάνεια του άλλου εξαρτήματος ή και οι δύο συνδεδεμένες επιφάνειες περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα και φορά διεύθυνσης γύρω από τους μετατοπισμένους άξονες μεταξύ τους *σχήμα 29c*, τη **γραμμική ταλάντωση** η συνδεδεμένη επιφάνεια του ενός εξαρτήματος μετακινείται με γραμμική κίνηση ταλάντωσης ως προς τη συνδεδεμένη επιφάνεια του άλλου εξαρτήματος *σχήμα 29d*.



*Σχήμα 29* Χρησιμοποιούμενες κινήσεις για την επίτευξη της τριβής μεταξύ των συγκολλούμενων επιφανειών: *a* περιστροφική κίνηση, *b* γωνιακή ταλάντωση, *c* κίνηση τροχιάς

Για την εύκολη υλοποίηση, γενικά στην πρακτική της βιομηχανίας, χρησιμοποιείται η περιστροφική κίνηση, παρόλο που αυτή περιορίζει τη συγκόλληση με τριβή εξαρτημάτων, από τα οποία τουλάχιστον το ένα στη θέση σύνδεσης πρέπει να έχει κυκλική διατομή (ή να πλησιάζει την κυκλική) και να εξασφαλίζει τη γωνιακή προσέγγιση. Λαμβάνοντας ως σημείο αναφοράς την **απαραίτητη ενέργεια για την επίτευξη της περιστροφικής κίνησης**, διακρίνουμε τις εξής συγκολλήσεις:

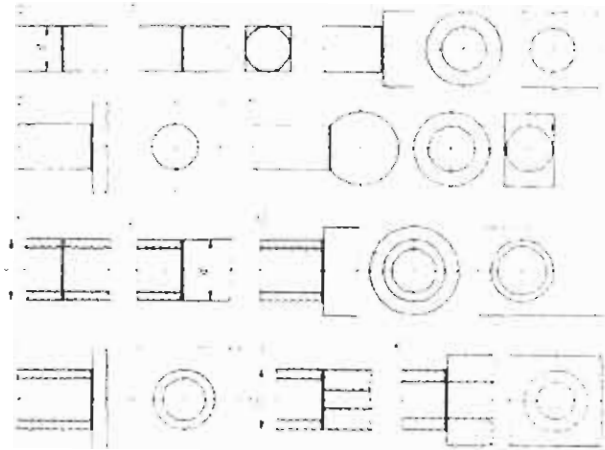
**συμβατική συγκόλληση τριβής** (γενικά εφαρμοσμένη στην Ευρώπη και Ιαπωνία), στην οποία η περιστροφική κίνηση του εξαρτήματος, στην απαιτούμενη χρονική περίοδο, υλοποιείται άμεσα από ηλεκτρικό κινητήρα ή από υδραυλικό, **συγκόλληση τριβής αδράνειας** τυπικό σχήμα της συμβατικής διαδικασίας συγκόλλησης με τριβή φαίνεται στο *σχήμα 30*. Γενικά, η σύνδεση που προκύπτει από το αποτέλεσμα της συγκόλλησης με τριβή μπορεί να θεωρηθεί ως αποτέλεσμα επαφής καθαρών επιφανειών όπου τα άτομα αντίστοιχων μετάλλων ή κραμάτων διατάσσονται σε χωροκεντρωμένο πλέγμα. Οι ξένες ακαθαρσίες και τα οξειδία, που καλύπτουν τις εφαιπόμενες επιφάνειες της σύνδεσης, εμποδίζουν την προσκόλληση και απομάκρυνση από τη θέση σύνδεσης, ενώ η στεγανή επαφή μεταξύ αυτών των επιφανειών, ως αποτέλεσμα της πίεσης τριβής και της μετέπειτα εξόγκωσης αποτρέπει την εκ νέου οξείδωση. Το συμπιεσμένο υλικό εκτός του επιπέδου σύνδεσης σχηματίζει τη χαρακτηριστική εξογκωμένη ράχη της σύνδεσης, τη λεγόμενη **εκροή του μετάλλου**.



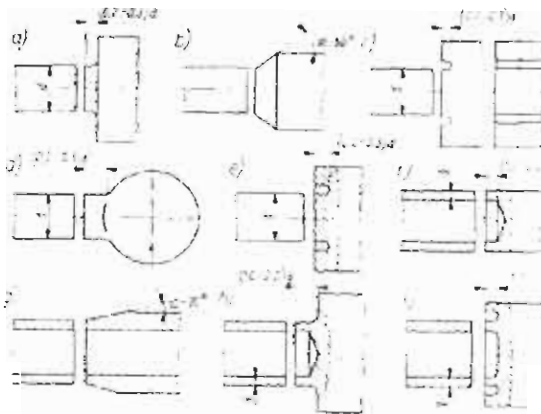
*Σχήμα 30* Τυπική διαδικασία συμβατικής συγκόλλησης με τριβή: 1 περιστροφική ταχύτητα, 2 αξονική δύναμη ασκούμενη κατά τη διάρκεια της τριβής-πίεση τριβής, 3 αξονική δύναμη ασκούμενη μετά το πέρας της διαδικασίας τριβής πίεση εξόγκωσης, 4 μετατόπιση των εξαρτημάτων κατά τη διάρκεια της τριβής.

#### 9.4.1 Περιοχή χρησιμοποίησης

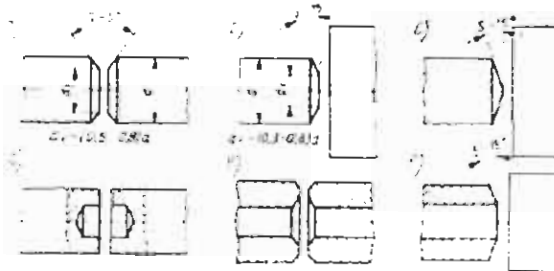
Η συγκόλληση με τριβή χρησιμοποιείται, μεταξύ άλλων, για τη σύνδεση κατασκευαστικών ανθρακοχαλύβων, κραματωμένων χαλύβων, πολλών άλλων κατηγοριών χαλύβων, εργαλείων ανοξείδωτων, οξύμαχων και πυρίμαχων, χαλκού, αλουμινίου, τιτανίου, ζirkονίου και νιοβίου. Η μέθοδος αυτή προσφέρεται ιδιαίτερα για τη σύνδεση υλικών με πάρα πολύ διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, όπως το αλουμίνιο με ανθρακοχάλυβα χαμηλού άνθρακα, χάλυβα οξύμαχο, τιτανίου, νιοβίου, νικελίου, μαγνησίου, χαλκού. Δεν προτείνεται για τη συγκόλληση με τριβή αυτόματων χαλύβων, και ιδιαίτερα αυτών που περιέχουν πάνω από  $0.13\%Pb$ , εξαιτίας της εμφάνισης στη ζώνη σύνδεσης χαρακτηριστικών ανισοτροπιών. Η συγκόλληση με τριβή χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία, χαρακτηρισμένη ως μέθοδος ασφαλής και αξίας, για τη σύνδεση μετάλλων και κραμάτων, για πάρα πολλά παραγόμενα προϊόντα. Οι υψηλές και ωφέλιμες οικονομοτεχνικές παράμετροι της συγκόλλησης με τριβή (μεγάλη απόδοση, μικρή απαιτούμενη ισχύ, μικρή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, μεγάλη σταθερότητα της διαδικασίας, πολύ καλές ιδιότητες των συνδέσεων, ασφαλείς και υγιεινές συνθήκες εργασίας επηρεάζουν την: αντικατάσταση πολύπλοκων σφυρήλατων, κοιλωμάτων και χυτών, συγκολλούμενα ημιπροϊόντα, με δύο ή περισσότερα εξαρτήματα με εξαιρετικά απλοποιημένη μορφή, αντικατάσταση κατασκευαστικών εξαρτημάτων, εκτελούμενων στην ολότητα τους από ένα κομμάτι μετάλλου, με τη μέθοδο αφαίρεσης υλικού, συγκολλούμενα εξαρτήματα από ράβδους με διαστάσεις που να πλησιάζουν τις ονομαστικές διαστάσεις, αντικατάσταση κατασκευαστικών εξαρτημάτων, εκτελούμενων στην ολότητα τους από ακριβά μέταλλα, διμεταλλικά ή πολυμεταλλικά, κατασκευασμένα από εξαρτήματα με μέταλλα αρκετά φθηνότερα, εξάλειψη μερικών λιγότερο αποδοτικών και μη εύχρηστων μεθόδων στην παραγωγή συγκολλητών κατασκευών, χρησιμοποίηση νέων κατασκευαστικών λύσεων στην παραγωγή προϊόντων, οι οποίες δεν ήταν δυνατόν να υλοποιηθούν με τη βοήθεια των γνωστών μέχρι σήμερα τεχνολογιών συγκόλλησης. Η συγκόλληση με τριβή, μεταξύ άλλων, χρησιμοποιείται στην παραγωγή σειράς κατασκευαστικών εξαρτημάτων φορητών και επιβατικών αυτοκινήτων, ελκυστήρων, πλατφόρμων, ποδηλάτων, μοτοσικλετών, γεωργικών μηχανημάτων. Στα σχήματα 41, 42 και 43 φαίνονται οι βασικές εκτελούμενες συνδέσεις και οι διάφοροι τρόποι προετοιμασίας για τη συγκόλληση με τριβή.



Σχήμα 31 Βασικές συνδέσεις εκτελούμενες με τη βοήθεια της συγκόλλησης με τριβή.



Σχήμα 32 Τυπικοί τρόποι διαμόρφωσης εξαρτημάτων, με διάφορες επιφάνειες διατομών, για τη συγκόλληση με τριβή.



Σχήμα 33 Τρόποι διαμόρφωσης εξαρτημάτων για τη συγκόλληση με τριβή, που διευκολύνουν τη μείωση της αρχικής ροπής της τριβής.

#### 9.4.2 Παράμετροι συγκόλλησης

Οι βασικές παράμετροι συγκόλλησης με τριβή είναι: η **περιστροφική ταχύτητα** ή **γραμμική**, η **πίεση τριβής**, ο **χρόνος τριβής**, η **πίεση** και ο **χρόνος εξόγκωσης**. Οι αριθμητικές τιμές των παραμέτρων εξαρτώνται κυρίως από τους τύπους των συγκολλούμενων υλικών, τη μορφή της επιφάνειας της διατομής των εξαρτημάτων στη θέση σύνδεσης καθώς και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων μηχανών συγκόλλησης. Κατά την επιλογή των παραμέτρων συγκόλλησης, πρέπει να γνωρίζουμε ότι η **περιστροφική ταχύτητα** και η **πίεση**

**τριβής** διαμορφώνουν τις θερμικές συνθήκες στην περιοχή σύνδεσης. Με αρκετά μεγάλη περιστροφική ταχύτητα και μικρή πίεση τριβής, η θέρμανση του υλικού στη θερμοκρασία συγκόλλησης έχει αρκετά αργή πορεία, πράγμα που αυξάνει το χρόνο τριβής, με συνέπεια να αυξάνεται και η ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά. Η ταχεία θέρμανση της περιοχής της σύνδεσης επιτυγχάνεται με μικρότερη περιστροφική ταχύτητα και μεγάλη πίεση τριβής.

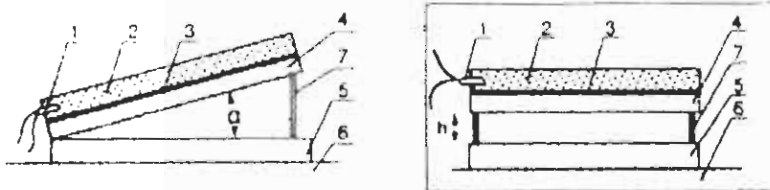
**Η πίεση εξόγκωσης**, σκοπός της οποίας είναι το πλησίασμα των θερμαινόμενων επιφανειών σε απόσταση που να διευκολύνεται ο σχηματισμός του μεταλλικού δεσμού, εξαρτάται από τις ιδιότητες αντοχής του υλικού στην περιοχή των θερμοκρασιών, τέτοιων που συνήθως χρησιμοποιούνται στην πλαστική κατεργασία εν θερμώ. Αρκετά μεγάλη πίεση προξενεί τεράστιες παραμορφώσεις στη ζώνη σύνδεσης, επιζήμιες όσον αφορά την αντοχή. Οι εξαιρετικές συνθήκες συγκόλλησης με τριβή εξασφαλίζουν την επίτευξη χαρακτηριστικών συνδέσεων στις οποίες εκλείπουν τυπικά σφάλματα που παρατηρούνται σε άλλες μεθόδους συγκόλλησης. Επειδή για τις μηχανικές ιδιότητες των συνδέσεων καθοριστικό ρόλο παίζουν οι δημιουργούμενες δομές στη ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά, πρέπει, όπου είναι απαραίτητο, να διενεργούνται σ' αυτές, για δεδομένο υλικό, θερμικές κατεργασίες. Αυτό αφορά στις συνδέσεις με ανθρακοχάλυβες και ελαφρά κραματωμένους χάλυβες με ισοδύναμο του άνθρακα  $C_e = C + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + Mn/6$  άνω του 0.5. Οι εργαστηριακοί έλεγχοι, όπως και οι δοκιμές εκμετάλλευσης έτοιμων προϊόντων, καταδεικνύουν ότι τα κατασκευαστικά εξαρτήματα συγκολλούμενα με τριβή χαρακτηρίζονται από την ίδια διάρκεια ζωής και αξιοπιστία με τα εξαρτήματα εκτελούμενα από ένα τμήμα υλικού ή ως σφυρήλατα.

## 9.5 Συγκόλληση με έκρηξη

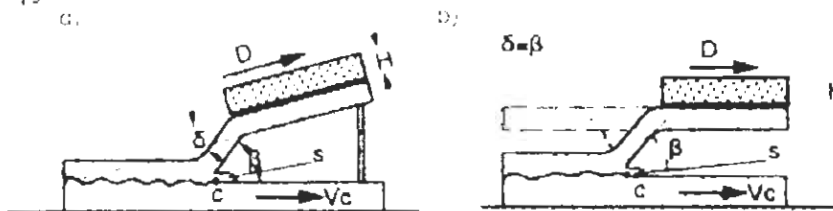
Τα εκρηκτικά υλικά συσχετίζονται συνήθως με την καταστροφή, την ανατίναξη και το διαχωρισμό. Η σύγχρονη τεχνική μας προσφέρει μια σειρά νέων δημιουργικών εφαρμογών των εκρηκτικών υλικών. Μια απ' αυτές τις εφαρμογές είναι η σχετικά λίγο γνωστή μέχρι σήμερα διαδικασία συγκόλλησης με έκρηξη. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται από τη δυνατότητα ευρείας χρησιμοποίησης της σύνδεσης διάφορων μετάλλων και κραμάτων, τη δυνατότητα σύνδεσης μετάλλων τόσο με πολύ μεγάλες επιφάνειες όσο και με μικρές, τις ικανοποιητικές μηχανικές και τεχνολογικές ιδιότητες των συνδέσεων καθώς και από την ανθεκτικότητα στη διάβρωση και στην επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών και το χαμηλό κόστος. Οι ωφέλιμες αυτές ιδιότητες της διαδικασίας συγκόλλησης με έκρηξη αιτιολογούν τη χρησιμοποίηση της σήμερα από τις πλέον εκβιομηχανισμένες χώρες του κόσμου. Πρέπει να σημειωθεί, όμως, ότι η συγκεκριμένη διαδικασία δε βρήκε, μέχρι σήμερα, ευρεία εφαρμογή. Η πολύ υψηλή πίεση, ο ασυνήθιστα μικρός χρόνος και οι μεταβολές της πυκνότητας των υλικών είναι συνθήκες που αιτιολογούν το γεγονός ότι τα συνδεόμενα μέταλλα βρίσκονται σε φυσικές καταστάσεις που δεν ερμηνεύονται από τις κλασικές θεωρίες της μηχανικής. Φαίνεται, όμως, ότι παρά τις μη πλήρεις γνώσεις αξίζει να αναφερθούν αυτά που ερευνήθηκαν και έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία. Παρακάτω εκτίθενται οι αρχές και οι εφαρμογές στη βιομηχανία, της τεχνικής συγκόλλησης μετάλλων με έκρηξη.

### 9.5.1 Τα βασικά συστήματα και η διαδικασία της συγκόλλησης με έκρηξη

Το βασικό σύστημα στο οποίο διενεργείται η συγκόλληση με έκρηξη φαίνεται στο **σχήμα 34**. Οι συγκολλούμενες πλάκες 4 και 5 είναι τοποθετημένες υπό γωνία  $\alpha$  ή παράλληλα πάνω στη βάση 6. Το εκρηκτικό υλικό 2 είναι τοποθετημένο στην επιφάνεια της πλάκας 4, που πυροδοτείται διαμέσου του προστατευτικού καλύμματος 3. Ο πυροκροτητής 1 προξενεί την έκρηξη του εκρηκτικού υλικού 2, της οποίας το μέτωπο μετακινείται με ταχύτητα  $O$  κατά μήκος της πλάκας 4. Από τη μετατόπιση του μετώπου της πυροκρότησης, η πλάκα 4 **σχήμα 35**, κατά συνεχή τρόπο, ωθείται και κάμπτεται κατά γωνία  $\delta$  ως προς τη διεύθυνση της πλάκας 5, που προξενεί τη σύγκρουση των πλακών με γωνία  $\beta = \alpha + \delta$ , για το σύστημα με αρχική γωνία  $\alpha$  **σχήμα 35a**, ή  $\beta = \delta$ , για το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο παράλληλο σύστημα **σχήμα 35b**. Η γωνία  $\beta$  ονομάζεται γωνία κρούσης. Η γωνία  $\delta$  έγινε αποδεκτή ως γωνία ώθησης ή επιστροφής.



**Σχήμα 34** Σχήματα βασικών συστημάτων συγκόλλησης με έκρηξη 1 πυροκροτητής, 2 εκρηκτικό υλικό, 3 προστατευτικό επικάλυμμα, 4 πυροδοτούμενη πλάκα, 5 βασική πλάκα, 6 υπόβαθρο, 7 κείρας αποστάσεως,  $h$  αρχική απόσταση μεταξύ των πλακών,  $\alpha$  αρχική γωνία τοποθέτησης.

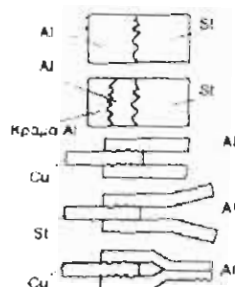


**Σχήμα 35** Σχήματα πορείας της κρούσεως και συγκόλληση με έκρηξη:  $\beta$  γωνία κρούσεως,  $\delta$  γωνία ώθησης,  $D$  ταχύτητα πυροκρότησης του εκρηκτικού υλικού,  $V_c$  ταχύτητα του σημείου κρούσεως,  $H$  ύψος του στρώματος του εκρηκτικού υλικού,  $S$  ροή καθαρισμού επιστροφής.

### 9.5.2 Εφαρμογές της συγκόλλησης με έκρηξη

Γενικά, μπορεί να αναφερθεί ότι η συγκόλληση με έκρηξη χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για την επίτευξη σύνθετων μεταλλικών φύλλων στρωματικής διάταξης. Η επίτευξη σύνθετων μετάλλων με έκρηξη δεν αποτελεί ανταγωνιστικό παράγοντα για τις παραδοσιακές μεθόδους όπως η επίτευξη σύνθετων επικαλυμμένων μεταλλικών φύλλων με έλαση. Απλώς διευρύνει, κατά ωφέλιμο τρόπο, την περιοχή των δυνατοτήτων επίτευξης σύνθετων φύλλων, που με άλλες μεθόδους, όπως με έλαση ή με αναγόμωση, είναι αδύνατο να επιτευχθεί η σύνδεση, τιτάνιο με χάλυβα ή αλουμίνιο με χάλυβα. Ασυνήθιστα ωφέλιμη είναι η επίτευξη πλινθωμάτων, τα οποία, μετά τη συγκόλληση τους με έκρηξη και με την

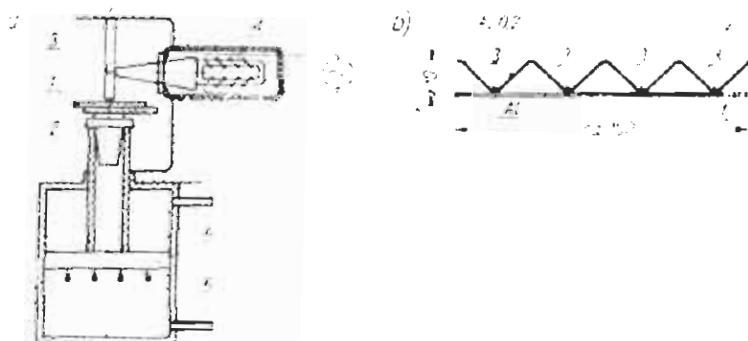
κατοπινή τους έλαση, πετυχαίνουν μεγάλα σύνθετα φύλλα, που χαρακτηρίζονται από μεγάλη αντοχή. Ασυνήθιστα αξιοπερίεργη και ωφέλιμη είναι η χρησιμοποίηση της συγκόλλησης με έκρηξη για τη δημιουργία ενδιάμεσων εξαρτημάτων που να επιτρέπουν τη συγκόλληση των μετάλλων και κραμάτων, όταν αυτά δε συγκολλούνται μεταξύ τους. Τέτοια εξαρτήματα σχήμα 36 επιτρέπουν, με την παραδοσιακή συγκόλληση, τη σύνδεση του αλουμινίου με το χάλυβα, του αλουμινίου με το χαλκό, των κραμάτων του αλουμινίου με το χάλυβα Ευρεία εφαρμογή βρήκε η τεχνική αυτή στην παραγωγή εξαρτημάτων χάλυβας+αλουμίνιο+κράματα αλουμινίου, τα οποία επέτρεψαν την κατασκευή μονάδων στις οποίες οι κατασκευές από κράματα αλουμινίου συνδέονται με χαλύβδινο υπόβαθρο, με συνήθη συγκόλληση. Η συγκόλληση με έκρηξη επιτρέπει, επίσης, την επικάλυψη των αξόνων, τη σύνδεση των σωλήνων με διάτρητα



Σχήμα 36 Διάφορα σχήματα ενδιάμεσων εξαρτημάτων για την παραδοσιακή συγκόλληση του αλουμινίου με χάλυβα και με χαλκό.

## 9.6 Συγκόλληση με υπέρηχους

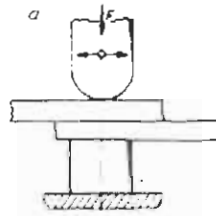
Η συγκόλληση με υπέρηχους είναι μέθοδος σύνδεσης όμοιων ή διαφορετικών υλικών (μέταλλα και κράματα τους με μέταλλα ή μη μέταλλα) σε στερεή κατάσταση, με προσαγωγή υπερηχητικών μηχανικών ταλαντώσεων στην περιοχή συγκόλλησης, δηλαδή στην επιφάνεια που πρόκειται να συνδεθεί. Παρά την ελλιπή γνώση σχετικά τα φαινόμενα που συμβαίνουν στη διαδικασία συγκόλλησης με υπέρηχους, τα δεδομένα των πειραμάτων που έγιναν μέχρι σήμερα επαρκούν για την καθοδήγηση και εφαρμογή αυτής της μεθόδου, ώστε να επιτευχθούν καλά αποτελέσματα στην πρακτική. Κατά τη συγκόλληση χρησιμοποιείται συνήθως συχνότητα των μηχανικών



Σχήμα 37 Συγκόλληση με υπέρηχους: α συσκευή συγκόλλησης, β παράδειγμα συγκόλλησης ελάσματος αλουμινίου πάχους 0.2[mm] με έλασμα πάχους 0.1[mm].  
ταλαντώσεων της τάξεως των 18[KHz] έως 20[KHz] και επομένως είναι



ταλαντώσεις στην περιοχή των υπερηχητικών ταλαντώσεων από όπου προκύπτει και η ονομασία συγκόλληση με υπέρηχους. Στο **σχήμα 37** φαίνεται η συσκευή συγκόλλησης με υπέρηχους. Ο πιεζοηλεκτρικός μεταλλάκτης 4 μετασχηματιστής ταχύτητας τροφοδοτείται με ρεύμα υψηλής συχνότητας από τη γεννήτρια. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο προξενεί μεταβολή στις διαστάσεις του πυρήνα του μεταλλάκτη 4 και, ως εκ τούτου, θέτει σε ταλαντωτική κίνηση με συχνότητα ταλαντώσεων του ρεύματος και με σχετικά μικρό εύρος. Οι ταλαντώσεις αυτές μεταφέρονται στο συγκολλούμενο αντικείμενο διαμέσου του ταλαντωτή 3 Η πίεση επιτυγχάνεται με πνευματικό τρόπο με τη βοήθεια του εμβόλου 5 μετατοπιζόμενου στον κύλινδρο 6 Ανάλογα με το είδος και το πάχος του συγκολλούμενου μετάλλου, η πίεση ρυθμίζεται στα όρια  $25[Kgr] (daN)$ - $300[Kgr] (daN)$ .



**Σχήμα 38** Σημειακή συγκόλληση με υπέρηχους

### 9.6.1 Παράμετροι συγκόλλησης με υπέρηχους.

Η συγκόλληση με υπέρηχους συνήθως χρησιμοποιείται για τη σύνδεση εξαρτημάτων με επίπεδες επιφάνειες, ενώ, ακόμη, είναι δυνατή η σύνδεση και συρμάτων με επίπεδα εξαρτήματα. Η ποιότητα των συνδέσεων αυτής της μεθόδου εξαρτάται από τις παραμέτρους όπως είναι η συχνότητα, το εύρος και ο χρόνος δράσης των ταλαντώσεων, καθώς και το μέγεθος της πίεσης. Το εύρος

των ταλαντώσεων υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:  $A_m = K_n \frac{n_e \cdot N_e}{2\pi \cdot f \cdot p_s}$

όπου:  $K_n$  σύνολο συντελεστών που συσχετίζουν τις ιδιότητες του συστήματος ταλαντώσεων, τις απώλειες του, το χαρακτήρα αντίστασης της φόρτισης,  $n_e$  ηλεκτροακουστικός συντελεστής απόδοσης του συστήματος ταλαντώσεων,  $N_e$  ηλεκτρική ισχύς του μεταλλάκτη ταλαντώσεων,  $f$  συχνότητα ταλαντώσεων,  $p_s$  πίεση.

Το εύρος  $A_m$  είναι ο κύριος αποφασιστικός παράγοντας για την ταχύτητα αφαίρεσης του στρώματος ακαθαρσιών και οξειδίων από την επιφάνεια των συγκολλούμενων υλικών, για την ποσότητα εκλυόμενης θερμότητας και την κατανομή της θερμοκρασίας στη θέση της σύνδεσης. Με την αύξηση του εύρους των ταλαντώσεων, αυξάνονται γραμμικά και οι ιδιότητες αντοχής της σύνδεσης. Η αύξηση όμως του εύρους των ταλαντώσεων άνω της βέλτιστης τιμής, για δεδομένες συνθήκες, οδηγεί στη γρήγορη μείωση των ιδιοτήτων, ακόμη και στην καταστροφή της κόλλησης. Από την άλλη μεριά, η μείωση του εύρους των ταλαντώσεων ελαττώνει τις ιδιότητες αντοχής της κόλλησης, ενώ όταν πέφτει κάτω από κάποια ελάχιστη τιμή, η κόλληση δε σχηματίζεται καθόλου, ανεξάρτητα από το χρόνο θέρμανσης. Ανάλογα με τις ιδιότητες και των διαστάσεων πάχους, διαμέτρου των συνδεόμενων υλικών, το μέγεθος του εύρους των ταλαντώσεων γίνεται αποδεκτό στα όρια  $5[\mu m]$ - $25[\mu m]$ . Στην πρακτική, η

τιμή του εύρους των ταλαντώσεων (με σταθερές τις υπόλοιπες συνθήκες) ρυθμίζεται με τη μεταβολή της ηλεκτρικής ισχύος που προσάγεται στον ηλεκτρομηχανικό μεταλλάκτη.

**Η πίεση  $p_s$**  εξασφαλίζει την επαφή των συνδεόμενων επιφανειών καθώς και την προσαγωγή της μηχανικής ενέργειας σ' αυτή τη θέση. Για διαφορετικά υλικά υπάρχουν διάφορες οριακές τιμές της πίεσης, με τις οποίες επιτυγχάνεται η σύνδεση. Η τιμή της πίεσης αυξάνεται με την αύξηση της σκληρότητας, του πάχους των συνδεόμενων υλικών και του ορίου πλαστικότητας. Η τιμή της πίεσης υπολογίζεται κατά προσέγγιση από τον ακόλουθο τύπο:  $p_s = R_e \cdot S$  όπου:  $R_e$  όριο πλαστικότητας συγκολλούμενου υλικού,  $S$  επιφάνεια εργασίας

**Ο χρόνος συγκόλλησης  $t$**  είναι συνάρτηση του εύρους των ταλαντώσεων και της πίεσης. Γενικά, αυτός επιλέγεται πειραματικά, συσχετίζοντας τις ιδιότητες και το πάχος των συγκολλούμενων υλικών. Ο απαραίτητος χρόνος για το σχηματισμό της σύνδεσης μειώνεται με το μέτρο αύξησης του εύρους των ταλαντώσεων, της πίεσης και με τη μείωση του πάχους των συγκολλούμενων υλικών. Πρακτικά, κατά τη σύνδεση μεταλλικών ελασμάτων, ο χρόνος συγκόλλησης δεν υπερβαίνει τα  $6[sec]$ .

**Η συχνότητα των ταλαντώσεων  $f$**  είναι επίσης βασική παράμετρος συγκόλλησης με υπέρηχους. Αυτή καθορίζεται από την ίδια συχνότητα του συστήματος ταλαντώσεων και είναι σταθερά, εάν εργάζεται συντονισμένη με τη συχνότητα της γεννήτριας. Η επιλογή της συχνότητας των ταλαντώσεων εξαρτάται από το πάχος και τις ιδιότητες του συγκολλούμενου μετάλλου. Για τη συγκόλληση χοντρών υλικών με μικρή σκληρότητα, συνήθως οι συσκευές εργάζονται με συχνότητες  $18[KHz]-22[KHz]$ . Ενώ κατά τη συγκόλληση πολύ λεπτών μεταλλικών ελασμάτων και συρμάτων υποδεικνύεται η χρησιμοποίηση συχνοτήτων των ταλαντώσεων στην περιοχή  $40[KHz]-160[KHz]$ .

### 9.6.2 Περιοχή συγκόλλησης

Η συγκόλληση με υπέρηχους συνήθως χρησιμοποιείται για τη σύνδεση μετάλλων που χαρακτηρίζονται από καλή πλαστικότητα και μικρή ηλεκτρική αντίσταση, όπως το καθαρό αλουμίνιο, ο ηλεκτρολυτικός χαλκός, ο άργυρος, ο χρυσός, ο λευκό-χρυσός. Το μέγιστο πάχος των συνδεόμενων εξαρτημάτων πρακτικά δεν υπερβαίνει τα  $2.1[mm]$ , στην περίπτωση του αλουμινίου,  $1.2[mm]$  στην περίπτωση του χαλκού. Η διαδικασία σύνδεσης των μετάλλων με τη χρήση των υπέρηχων παρουσιάζει μια σειρά από πλεονεκτήματα, όπως πολύ υψηλές ιδιότητες αντοχής της σύνδεσης από την άποψη των ελάχιστων φυσικοχημικών μεταβολών του υλικού στην περιοχή της σύνδεσης, δυνατότητα εύκολης σύνδεσης του χαλκού, του αλουμινίου και πολλών άλλων μετάλλων, μικρή απαιτούμενη ισχύ περίπου 5% της ισχύος απαραίτητη για τη συγκόλληση με ηλεκτρική αντίσταση, δυνατότητα συγκόλλησης επιφανειών ελαφρά καθαρισμένων. Η συγκόλληση με υπέρηχους, χάρη αυτών των πλεονεκτημάτων, βρήκε πλατιά εφαρμογή κυρίως στην ηλεκτροτεχνική, για τη σύνδεση καλωδίων και περιελίξεων πυκνωτών, τηλεοράσεων, ραδίων και μετασχηματιστών μικρής ισχύος.

### 9.7 Θερμοσυγκόλληση

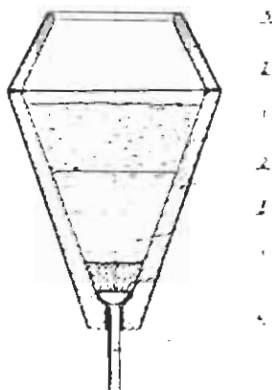
Ο θερμίτης είναι μίγμα κονιάματος οξειδίων σιδήρου  $Fe_2O_3$ ,  $FeO$ ,  $Fe_3O_4$  κονίαμα αλουμινίου  $Al$ , σε αναλογία βάρους περίπου 3.5:1. Οι διάφορες κατηγορίες του θερμίτη, ανάλογα με τον προορισμό, περιέχουν μίγματα παλαιοσιδήρου όπως και σιδηροκραμάτων μεταβάλλοντας το σίδηρο που επιτυγχάνονται με την αλουμινιοθερμική αντίδραση στο χάλυβα. Η αλουμινιοθερμική αντίδραση συνίσταται στην αναγωγή των οξειδίων σιδήρου με το αλουμίνιο. Αυτή είναι ισχυρή εξωθερμική αντίδραση και έχει πορεία σύμφωνα με τους τύπους:

$3FeO+2Al-Al_2O_3+3Fe+78.35KJ$	1
$3Fe_2O_3+2Al-Al_2O_3+2Fe+760.5 KJ$	2
$3Fe_3O_3+8Al-4Al_2O_3-4Al_2O_3+9Fe+3013.9KJ$	3

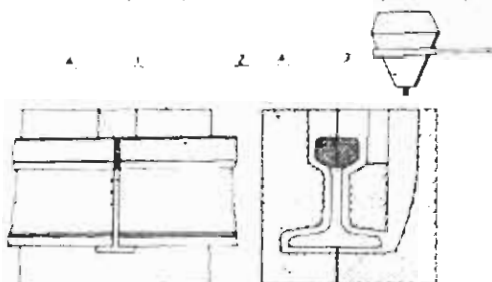
Από την άποψη της μεγάλης εκλυόμενης θερμότητας κατά τη διάρκεια της αντίδρασης, ο θερμίτης εναποτίθεται σε κάδο από πυρίμαχο υλικό και αναφλέγεται με τη βοήθεια ειδικού καυστήρα. Η αλουμινιοθερμική αντίδραση αρχίζει στην επιφάνεια και συνεχίζεται μέχρι την τελική κατανάλωση του θερμίτη στον κάδο. Η θερμοκρασία των προϊόντων της αντίδρασης είναι  $2400[^\circ C]-2600[^\circ C]$ . Ο ρευστός σίδηρος, ως βαρύτερος, πέφτει στον πυθμένα του κάδου, ενώ στην επιφάνεια επιπλέει το οξείδιο του αλουμινίου ως ελαφριά σκουριά. Από  $1[Kgr]$  θερμίτη επιτυγχάνεται περίπου  $0.5[ltr]$  σίδηρος και σκουριά, της οποίας η θερμοκρασία στερεοποίησης ανέρχεται περίπου σε  $2000[^\circ C]$ . Ο σίδηρος και η σκουριά αποτελούν την πηγή θερμότητας κατά τη συγκόλληση με τήξη ή πίεση. Η χρήση του θερμίτη για κάθε μία απ' αυτές τις διαδικασίες απαιτεί διαφορετικές συσκευές και την κατάλληλη προετοιμασία των συνδεόμενων εξαρτημάτων.

### 9.7.1 Θερμιτοσυγκόλληση με τήξη

Με τη χρησιμοποίηση του ρευστού μετάλλου ως πηγή θερμότητας, κατά τη συγκόλληση με τήξη, τα συγκολλούμενα εξαρτήματα τοποθετούνται σε καλούπι από πυρίμαχο υλικό, το οποίο θα αποδώσει τη μορφή της κόλλησης. Ο θερμίτης εναποτίθεται σε κάδο ειδικής κατασκευής **σχήμα 39**, που είναι εφοδιασμένος με πρόσθετο κάλυμμα, ώστε να προφυλάσσει από τα πιτσιλίσματα. Μετά το πέρας της θερμοχημικής αντίδρασης, ο χάλυβας χύνεται με την ανύψωση του κλείστρου **4**. Ο τρόπος προετοιμασίας του προς συγκόλληση αντικείμενου φαίνεται στο **σχήμα 40**. Πριν τη συγκόλληση, το συγκολλούμενο αντικείμενο προθερμαίνεται με καυστήρα ασετιλίνης-οξυγόνου ως τη θερμοκρασία των  $800[^\circ C]-1000[^\circ C]$ . Η συγκόλληση με θερμίτη χρησιμοποιείται για τις επισκευές, ιδιαίτερα για μεγάλα χυτοχαλύβδινα εξαρτήματα όταν πρόκειται για πλήρωση μεγάλων όγκων μετάλλου και για τη σύνδεση μεγάλης ποσότητας όμοιων διατομών, όπως σιδηροτροχιών τρένων. Σύμφωνα με δεδομένα, ο χρόνος εκτέλεσης  $l$  σύνδεσης κανονικής σιδηροτροχιάς τρένου ισούται με  $11[min]$  και  $25[sec]$ .



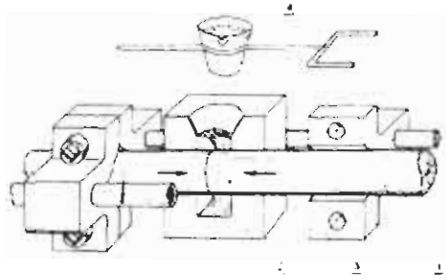
**Σχήμα 39** Χρησιμοποιούμενος κάδος κατά τη Θερμιτοσυγκόλληση: 1 χαλύβδινο περίβλημα, 2 πυρίμαχο υλικό, 3 πώμα αμιάντου, 4 κλείστρο, 5 προφυλακτικό κάλυμμα.



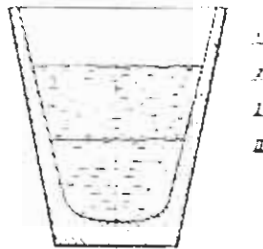
**Σχήμα 40** Προετοιμασία αντικειμένου για τη θερμιτοσυγκόλληση με τήξη: 1 αντικείμενο, 2 καλούπι, 3 κάδος, 4 καυστήρας για την αρχική προθέρμανση

### 9.7.2 Θερμιτοσυγκόλληση με πίεση

Κατά τη συγκόλληση με πίεση, ο θερμίτης χρησιμοποιείται μόνο ως πηγή θερμότητας. Κατά τη θερμιτοσυγκόλληση τα συνδεόμενα άκρα συμπέζονται με πρέσα κοχλία ή με υδραυλική πρέσα. Η επαφή περιβάλλεται από καλούπι με μάζα φορμαρίσματος **σχήμα 41**. Κατά τη θερμιτοσυγκόλληση με πίεση, ο χρησιμοποιούμενος κάδος δεν έχει οπή στον πυθμένα **σχήμα 42**. Με την κλίση του κάδου, πρώτα χύνεται στο καλούπι η σκουριά και έπειτα ο σίδηρος. Η σκουριά περιβάλλει τα τοιχώματα του αντικειμένου και στερεοποιείται σε αυτά με λεπτό στρώμα, το οποίο, στη συνέχεια, διαχωρίζεται, με το ρευστό σίδηρο, από το αντικείμενο. Οι συνδεόμενες διατομές, που περιβάλλονται από τη ρευστή μάζα με πολύ υψηλή θερμοκρασία, γρήγορα θερμαίνονται, με αποτέλεσμα το σχηματισμό εύπλαστης κατάστασης, και συμπιεζόμενες, συνδέονται μεταξύ τους. Μετά τη στερεοποίηση και την αφαίρεση του καλουπιού, ο σχηματισμένος λαιμός, κατά τη διαδικασία συγκόλλησης, αφαιρείται με κρούση ή με οξυγονοκοπή. Η θερμιτοσυγκόλληση με πίεση έχει εφαρμογή στη σύνδεση μεγάλων διατομών οι οποίες δεν είναι δυνατόν να συνδεθούν στις μηχανές συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση από χάλυβα με περιεκτικότητα μέχρι 0.4%C.



**Σχήμα 41** Προετοιμασία αντικειμένου για τη θερμιτοσυγκόλληση με πίεση: 1 αντικείμενο, 2 καλούπι, 3 πρέσα κοχλίας, 4 κάδος

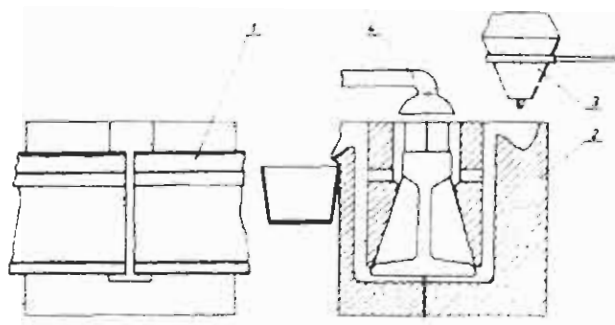


**Σχήμα 42** Χρησιμοποιούμενος κάδος για τη θερμιτοσυγκόλληση με πίεση : 1 χαλύβδινο περίβλημα, 2 πυρίμαχο υλικό, 1 σκουριά, 2 σίδηρος

αντά με λεπτό στρώμα, το οποίο, στη συνέχεια, διαχωρίζεται, με το ρευστό σίδηρο, από το αντικείμενο. Οι συνδεόμενες διατομές, που περιβάλλονται από τη ρευστή μάζα με πολύ υψηλή θερμοκρασία, γρήγορα θερμαίνονται, με αποτέλεσμα το σχηματισμό εύπλαστης κατάστασης, και συμπιεζόμενες, συνδέονται μεταξύ τους. Μετά τη στερεοποίηση και την αφαίρεση του καλουπιού, ο σχηματισμένος λαιμός, κατά τη διαδικασία συγκόλλησης, αφαιρείται με κρούση ή με οξυγονοκοπή. Η θερμιτοσυγκόλληση με πίεση έχει εφαρμογή στη σύνδεση μεγάλων διατομών οι οποίες δεν είναι δυνατόν να συνδεθούν στις μηχανές συγκόλλησης με ηλεκτρική αντίσταση από χάλυβα με περιεκτικότητα μέχρι 0.4% C.

### 9.7.3 Συγκόλληση σιδηρογραμμών με συνδυαστική μέθοδο

Η συνδυαστική μέθοδος **σχήμα 43** έγκειται στη χρησιμοποίηση σε μία φάση -συγκόλληση με πίεση και συγκόλληση με τήξη. Πρώτα συγκολλούνται με πίεση οι κεφαλές και έπειτα οι κορμοί και τα κάτω πέλματα με τήξη. Ανάμεσα στις κεφαλές τοποθετείται παρέμβαση Α από ανθρακοχάλυβα με χαμηλό άνθρακα πάχους 6[mm]-10[mm]. Ανάμεσα στους καρμούς και τα πέλματα παραμένει διάκενο, το οποίο γεμίζει με σίδηρο που επιτεύχθηκε από το θερμίτη. Στον κάδο καίγεται μόνο τόσος θερμίτης, ώστε ο σίδηρος που απέμεινε να γεμίσει το διάκενο μέχρι την κεφαλή όπως φαίνεται στο **σχήμα 43** και περιβάλλεται μόνο από σκουριά, η οποία έχει ως μοναδικό στόχο τη θέρμανση του μετάλλου της κεφαλής και του χαλύβδινου παρεμβάσματος. Η συγκόλληση των κεφαλών πετυχαίνεται με την εφαρμογή πίεσης με πρέσα. Η συνδυαστική μέθοδος απαιτεί περισσότερο χρόνο προετοιμασίας και, τώρα, αντικαταστάθηκε από την τυπική θερμιτοσυγκόλληση με τήξη.



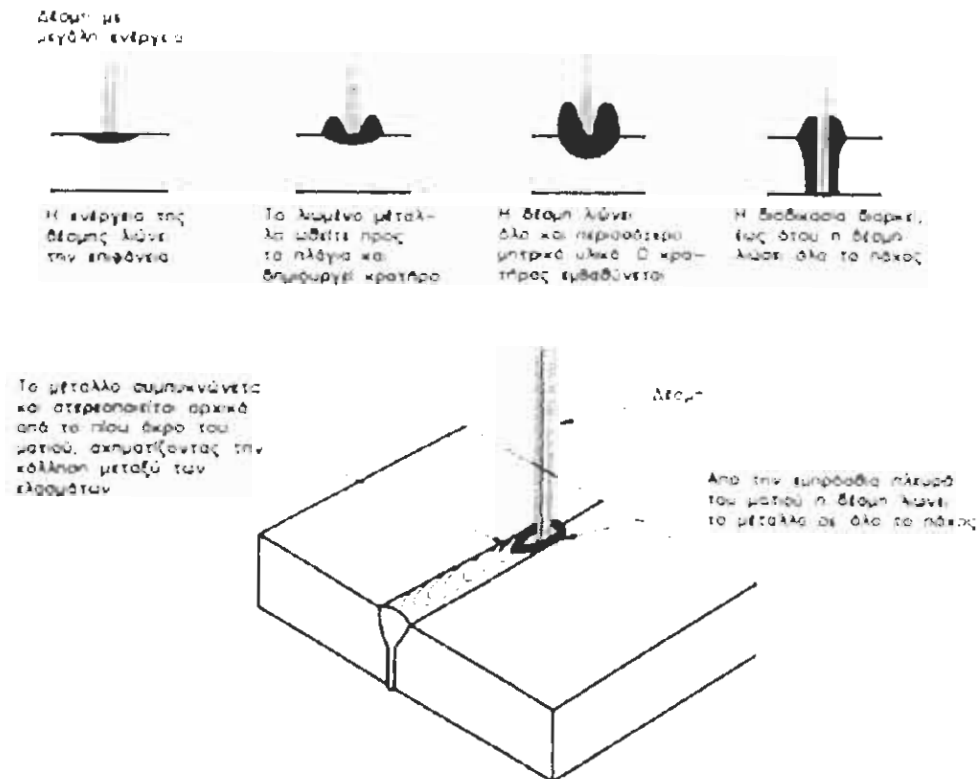
*Σχήμα 43 Συγκόλληση σιδηροτροχιών με τη συνδυαστική μέθοδο: 1 σιδηροτροχιά, 2 καλούπι, 3 κάδος*

## Κεφάλαιο 10

### 10.1 Συγκόλληση με εστιασμένη δέσμη ενέργειας

Κατά τη συγκόλληση τόξου η διάμετρος της επιφάνειας του λουτρού συγκόλλησης ισούται με  $5[mm]-10[mm]$ . Αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα του τόξου διασκορπίζεται σε επιφάνεια που ισούται με  $40[mm^2]-180[mm^2]$ , ανάλογα με την τάση του τόξου, την ένταση του ρεύματος και την ταχύτητα συγκόλλησης. Εάν η θερμότητα αναπτύσσεται στη σύνδεση, το λουτρό σχηματίζεται με χαρακτηριστική μορφή ποδώματος. Εντελώς διαφορετική προσέγγιση για τη διαμόρφωση της κόλλησης έχουμε με την αξιοποίηση των τριών σχετικά σύγχρονων μεθόδων συγκόλλησης: με πλάσμα, δέσμη ηλεκτρονίων και *Laser*. Σε καθεμιά απ' αυτές η τήξη και η σύνδεση επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας την τεχνική της συγκόλλησης «ματιού». Για αυτή την κατάσταση απαιτείται δέσμη ακτινών με μεγάλη ενέργεια.

**Σχηματισμός του ματιού στην κόλληση.** Ο τρόπος λειτουργίας του ματιού, μπορεί να παρατηρηθεί με την κάθετη οδήγηση στη μεταλλική πλάκα της δέσμης ενέργειας *σχήμα 1*. Η δέσμη με μικρή διάμετρο  $1[mm]-2[mm]$  εστιάζεται στο σημείο που βρίσκεται στη μεταλλική επιφάνεια της πλάκας. Η δέσμη έχει, επίσης, μεγάλη κινητική ενέργεια η οποία ελευθερώνεται κατά την πρόσπτωση στο αντικείμενο που βρίσκεται σε στερεή φάση. Για το σχηματισμό ορθής κόλλησης, η προσπίπτουσα ενέργεια πρέπει να υπερβαίνει τα  $10[KW/mm^2]$ . Στο ελεγχόμενο σημείο η θερμοκρασία της δέσμης αυξάνεται γρήγορα σε μικρή περιοχή. Το μέταλλο λιώνει και γίνεται μερική εξάχνωσή του. Το υπόλοιπο ρευστό μέταλλο ωθείται προς τα έξω και σχηματίζεται κρατήρας. Με τη συνεχιζόμενη δράση της δέσμης των ακτινών δημιουργείται κρατήρας στο σημείο πρόσκρουσης, το δε υλικό ωθείται προς τις πλευρές του κρατήρα, όπου και συγκρατείται, λόγω της επιφανειακής τάσης και πίεσης των υπαρχόντων ατμών του μετάλλου στην οπή. Σ' αυτή την κατάσταση η δέσμη διέρχεται απ' την οπή με μικρή απώλεια ενέργειας. Εάν μετατοπισθεί η δέσμη, θα προσκρούσει στα τοιχώματα και θα απολέσει αυτή την ενέργεια της. Η οπή προς στιγμή διανοίγεται, ενώ στη θέση που ελευθερώθηκε από τη δέσμη αρχίζει η στερεοποίηση του μετάλλου λόγω έλλειψης θερμότητας. Προ του λωμένου μετάλλου, σε σχέση με τη δέσμη, σχηματίζεται οπή με την επίδραση της επιφανειακής τάσης, διατηρώντας την κυλινδρική διατομή. Η μετατόπιση της δέσμης κατά μήκος της γραμμής συγκόλλησης διατηρεί τη διαδικασία τήξης στο μέτωπο και από πίσω στερεοποιείται με τη διατήρηση της σταθερής μορφής της οπής. Κατά μήκος της γραμμής διαπέρασης της δέσμης σχηματίζεται στενή λωρίδα λωμένου μετάλλου, που διέρχεται απ' όλο το πάχος του ελάσματος.



Σχήμα 1 Αρχή συγκόλλησης με δέση υψηλής ενέργειας με την τεχνική τον «ματιού».



Σχήμα 2 Κόλληση εκτελεσμένη με δέση Laser

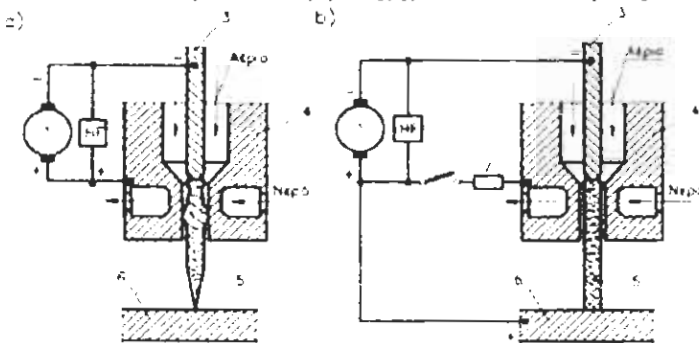
Η πορεία που περιγράφηκε ονομάζεται συγκόλληση ματιού. Αυτή είναι ωφέλιμη μέθοδος συγκόλλησης. Η μετατόπιση της δέσης κατά μήκος της γραμμής σύνδεσης με ορθογώνια άκρα και με τη διατήρηση στενού διακένου ανάμεσα στα μέτωπα προξενεί τη σύνδεση αμφοτέρων των στοιχείων με το ρευστό μέταλλο, που καλύπτει τα τοιχώματα της οπής. Η βαθμιαία στερεοποίηση του ρευστού μετάλλου από την πίσω πλευρά της οπής συνδέει αμφότερα τα στοιχεία όπως και σε άλλες μεθόδους συγκόλλησης. Οι κολλήσεις, εκτελεσμένες με την τεχνική του ματιού έχουν μεγάλο λόγο του βάθους προς το πλάτος, που φτάνει περ. μέχρι 20:1. Στη συνήθη συγκόλληση τόξου, στην οποία η στερεοποίηση συμβαίνει από τα όρια της σύντηξης προς το κέντρο, με το σχηματισμό χοντρών κόκκων, με βεβαιότητα θα αναπτυχθούν ρηγματώσεις, προϋποθέτοντας, όμως, ότι θα επιτευχθεί τέτοια κόλληση. Κατά τη συγκόλληση με την τεχνική του ματιού με δέση υψηλής ενέργειας, άνω των  $10 [KW/mm^2]$ , για δεδομένη χρονική στιγμή, μόνο στενό στρώμα μετάλλου στερεοποιείται. Σχηματίζονται μικροί κόκκοι, ενώ



το μέταλλο της κόλλησης έχει καλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, διευκολύνεται η τροφοδοσία πρόσθετου απαραίτητου ρευστού μετάλλου εξαιτίας της συστολής, επειδή η στερεοποίηση της κόλλησης συμβαίνει κατά μήκος της γραμμής μετατόπισης της δέσμης και όχι κάθετα, κατά μήκος του πάχους της κόλλησης. Η τεχνική συγκόλλησης του ματιού με δέσμη υψηλής ενέργειας έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα: εύκολη επίτευξη ενιαίας σύντηξης των κορδονιών και μ' αυτό η κόλληση με παράλληλα άκρα εξασφαλίζει την ομοιόμορφη συστολή με ελάχιστη, συνήθως, παραμόρφωση. Για την συγκόλληση μ' αυτήν την τεχνική, έγιναν δοκιμές αξιοποίησης διάφορων πηγών ενέργειας, αλλά στην πρακτική χρησιμοποιούνται μόνο τρεις: το τόξο πλάσματος, η δέσμη ηλεκτρονίων και η δέσμη των *Laser*.

### 10.1.1 Συγκόλληση με πλάσμα - πλασμική συγκόλληση

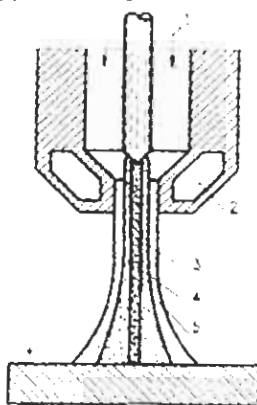
Με την ονομασία πλάσμα εννοούμε την ατμόσφαιρα ιονισμένου αερίου με υψηλή θερμοκρασία, αποτελούμενη από θετικά ιόντα και ηλεκτρόνια, που σχηματίζουν τη στήλη του ηλεκτρικού τόξου, η οποία άγει ρεύμα. Με τη στένωση του τόξου επιτυγχάνεται συγκεντρωτική ροή του πλάσματος, με σημαντικά υψηλότερη θερμοκρασία απ' ό,τι η θερμοκρασία του ελεύθερα αναμμένου τόξου στον ατμοσφαιρικό αέρα ή στην ατμόσφαιρα άλλων αερίων. Η συγκόλληση με πλάσμα μοιάζει πολύ με τη συγκόλληση *GTA (TIG)* στην ατμόσφαιρα του αργού. Και στις δύο μεθόδους το τόξο σχηματίζεται στην ατμόσφαιρα του αργού, αλλά κατά την πλασμική συγκόλληση το ηλεκτρόδιο βρίσκεται στο εσωτερικό του ακροφυσίου, δια του οποίου ρέει το αργό **σχήμα 3**, ενώ στην έξοδο του



**Σχήμα 3** Πλασμικός καυστήρας, α) τόξο εσωτερικό ή μη εξαρτώμενο, 1 πηγή ρεύματος, HF ενισχυτής, 3 ηλεκτρόδιο βολφραμίου, 4 ακροφύσια χάλκινο, 5 ροή πλάσματος, 6 συγκολλούμενο αντικείμενο, β τόξο εξωτερικό ή εξαρτώμενο, 7 αντιστάτης

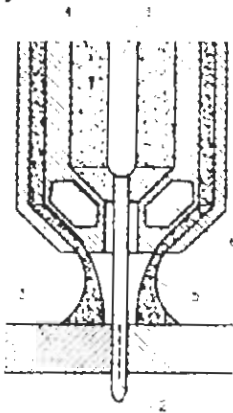
ακροφυσίου διέρχεται το αργό ήδη με μορφή πλάσματος, του οποίου η θερμοκρασία είναι τουλάχιστον 2 φορές υψηλότερη από αυτήν του τόξου της μεθόδου *GTA (TIG)*. Το ηλεκτρόδιο από βολφράμιο συνδέεται με τον αρνητικό πόλο της πηγής ρεύματος με το θετικό πόλο μπορεί να συνδεθεί ή το ακροφύσιο του καυστήρα-εσωτερικό τόξο **σχήμα 3α** ή το συγκολλούμενο αντικείμενο - εξωτερικό τόξο **σχήμα 3β**. Το ακροφύσιο δεν είναι μόνο άνοδος με το εσωτερικό τόξο, αλλά πληρεί και το ρόλο της ανόδου για κάθε άναμμα του τόξου, το οποίο επιτυγχάνεται με τη βοήθεια των υψίσυχων παλμών και της υψηλής τάσης από ξεχωριστή πηγή ρεύματος -ιονιστή. Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το τόξο προξενεί στένωση στη ροή του πλάσματος και πολύ μεγάλη συγκέντρωση

της θερμικής ενέργειας στο εσωτερικό **τμήμα 3 σχήμα 4**. Η θερμοκρασία σ' αυτό το τμήμα, η οποία αποτελεί το 20%-40% της διαμέτρου της ροής του πλάσματος ανέρχεται στην έξοδο του ακροφυσίου από  $8000[^\circ\text{C}]$ - $30.000[^\circ\text{C}]$ . Η πτώση της θερμοκρασίας προς την εγκάρσια διεύθυνση της ροής του πλάσματος είναι πολύ ταχεία, το εξωτερικό στρώμα 4, εξαιτίας της χαμηλής θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας, προστατεύει τον πυρήνα σε αυτό προστίθεται και η ενεργητική ψύξη του ακροφυσίου με την κυκλοφορία του νερού, η οποία, προστατεύοντας αυτό από την ακτινοβολία του τόξου, αποφεύγει συγχρόνως και τον ιονισμό του εξωτερικού στρώματος 5. Με διάμετρο του ακριφυσίου  $2.5[\text{mm}]$ - $3[\text{mm}]$  η ροή του πλάσματος είναι αρκετά συγκεντρωμένη, ώστε να προστατεύσει το λιωμένο μέταλλο από την εισχώρηση του ατμοσφαιρικού αέρα. Γι' αυτό ο καυστήρας έχει πρόσθετο δακτυλιοειδές ακροφύσιο, δια του οποίου ρέει το αργό ή το υδρογόνο, που προστατεύουν το λιωμένο μέταλλο **σχήμα 5**. Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλασματικού τόξου σε σχέση με το τόξο *GTA* δεν



**Σχήμα 4** Πλασμικό τόξο εξωτερικό: 1 εισροή του αερίου, 2 κυκλοφορία του νερού ψύξης, 3 ροή πλάσματος, 4 ροή αερίου με υψηλή θερμοκρασία, 5 μονωτικό στρώμα αερίου προστασίας

αποτελεί το βασικό πλεονέκτημα, επειδή οι θερμοκρασίες του τόξου *GTA* είναι επαρκείς για την τήξη όλων των συγκολλούμενων μετάλλων. Τα κύρια πλεονεκτήματα του πλασματικού τόξου είναι: η υψηλή σταθερότητα εστιασμένου τόξου, η ανεξάρτητη μορφή του τόξου από τις μεταβολές της απόστασης του καυστήρα (πιστολιού) από το συγκολλούμενο αντικείμενο, δυνατότητα ρύθμισης της γραμμικής ενέργειας του τόξου.

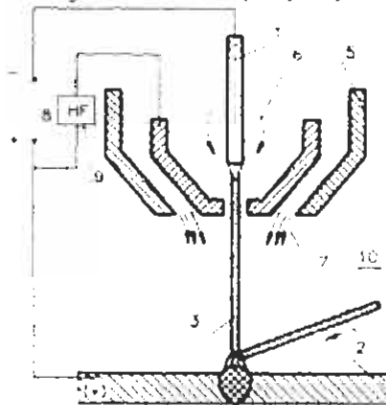


**Σχήμα 5** Πλασμική συγκόλληση σε προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου: 1 ηλεκτρόδιο

βολφραμίου, 2 ροή πλάσματος, 3 συγκολλούμενο αντικείμενο, 4 αργό, 5 προστατευτική ατμόσφαιρα αερίου αργό με προσθήκη υδρογόνου, 6 νερό ψύξης

### 10.1.2 Πλασμική συγκόλληση GTA-Χαρακτηριστικά της μεθόδου

Η πλασμική συγκόλληση *GTA* (*TIG*) είναι διαδικασία στην οποία η στερεή σύνδεση επιτυγχάνεται με το αποτέλεσμα τήξης των άκρων των συνδεόμενων αντικειμένων με πλασμικό τόξο, αναμμένο μεταξύ του μη τηκόμενου ηλεκτροδίου και του συγκολλούμενου αντικειμένου *σχήμα 6*. Η συγκόλληση διενεργείται με εναλλασσόμενο ρεύμα, με συνεχές σταθερό ρεύμα ή με παλμικό αρνητικής πολικότητας. Η απόδοση της ενέργειας του πλασμικού τόξου *GTA* στο αργό ισούται από 60%-66%, ενώ του τόξου *GTA* στο αργό περίπου με 45%. Ο βαθμός εστίασης του πλασμικού τόξου, η δυναμική του τόξου καθώς και η προσαγόμενη ποσότητα θερμότητας στο συγκολλούμενο αντικείμενο είναι συνάρτηση των ακόλουθων παραμέτρων: της έντασης του ρεύματος τόξου, της διαμέτρου του ακροφυσίου στένωσης και του σχήματος της, του είδους και της έντασης διέλευσης του πλασμικού αερίου, του είδους και της έντασης του αερίου προστασίας. Σε σχέση με την κλασική συγκόλληση *GTA* η πλασμική συγκόλληση παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα: υψηλότερη συγκέντρωση της γραμμικής ενέργειας και απόδοσης του τόξου, υψηλότερη ενθαλπία του τόξου, αυξημένη σταθερότητα του τόξου, δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας και του

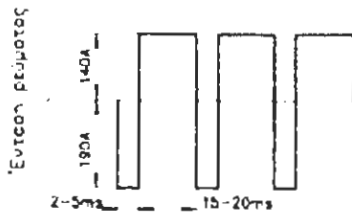


*Σχήμα 6* Πλασμική συγκόλληση *GTA*: 1 ηλεκτρόδιο βολφραμίου, 2 συγκολλούμενο αντικείμενο, 3 πλασμικό τόξο, 4 κόλληση, 5 πλασμικό ακροφύσιο, 6 πλασμικό αέριο, 7 αέριο προστασίας, 8 πηγή ρεύματος, 9 σύστημα υψηλής συχνότητας, 10 πρόσθετο υλικό

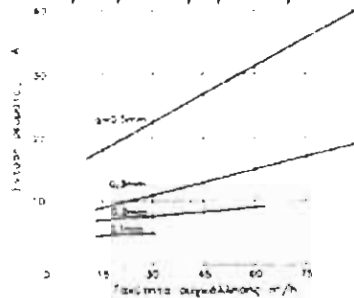
σχήματος ροής του πλάσματος, σημαντικά μεγαλύτερη ταχύτητα συγκόλλησης, στενά κορδόνια με μεγάλο βάθος διείσδυσης που εγγυώνται τη μείωση των παραμορφώσεων και των τάσεων συγκόλλησης, πιο απλές ιδιοσκευές και εργαλεία. Τα κύρια μειονεκτήματα της πλασμικής συγκόλλησης είναι η ανάγκη ακριβέστερης προετοιμασίας των συγκολλούμενων εξαρτημάτων καθώς και η πιο πολύπλοκες και ακριβότερες συσκευές. Η πλασμική συγκόλληση *GTA*, χάρη των ιδιόμορφων ιδιοτήτων του πλασμικού τόξου, χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση κατασκευών εκτελούμενων από υλικά πάχους από 0.025[mm] μέχρι περίπου 50[mm]. Πρακτικά μπορούν να συγκολλούνται όλα τα μέταλλα και κράματα που θεωρούνται σήμερα ως κατασκευαστικά στοιχεία. Ιδιαίτερα καλά αποτελέσματα συγκόλλησης επιτυγχάνονται κατά τη συγκόλληση ανθρακοχαλύβων,

κραματωμένων χαλύβων, ωστενιτικών χαλύβων, χαλκού και κραμάτων του, αλουμινίου και κραμάτων του, νικελίου και κραμάτων του, κραμάτων κοβαλτίου, τιτανίου, ζirkονίου, τανταλίου και παλλαδίου.

**Παράμετροι συγκόλλησης.** Στις βασικές παραμέτρους πλασμικής συγκόλλησης *GTA* ανήκουν: το είδος και η ένταση ρεύματος, η τάση τόξου και η απόσταση του ακροφυσίου από το συγκολλούμενο αντικείμενο, η ταχύτητα και η ένταση ροής του πλασμικού αερίου, το είδος και η ένταση ροής του αερίου προστασίας ο τύπος και η διάμετρος του ηλεκτροδίου βολφραμίου, το σχήμα και οι διαστάσεις του πλασμικού ακροφυσίου. Η πλασμική συγκόλληση *GTA* μπορεί να διενεργηθεί με ρεύμα πολύ μικρής έντασης, συνεχές ή εναλλασσόμενο, πράγμα που δεν επιτυγχάνεται με την κλασική συγκόλληση *GTA*, όπως επίσης και με εντάσεις ρεύματος που φτάνουν τα  $400[A]-660[A]$ . Η συγκόλληση με εντάσεις ρεύματος περίπου από  $0.01[A]-0.02[A]$  μέχρι  $25[A]-30[A]$  ονομάζεται μικροπλασμική συγκόλληση. Οι πηγές ρεύματος συνήθως έχουν φθίνουσες στατικές χαρακτηριστικές με απότομη πτώση και με τάση εν κενό λειτουργίας *OVC* της τάξης των  $60[V]-80[V]$ . Τις περισσότερες φορές που χρησιμοποιείται πλασμική συγκόλληση *GTA* εφαρμόζεται συγκόλληση με συνεχές ρεύμα αρνητικής πολικότητας. Το εναλλασσόμενο ρεύμα με ημιτονοειδή πορεία εφαρμόζεται αποκλειστικά στη συγκόλληση αλουμινίου και κραμάτων του, ενώ οι πηγές ρεύματος πρέπει να έχουν σύστημα υψηλής συχνότητας που να λειτουργεί συγχρονισμένα με την πορεία των μεταβολών της έντασης ρεύματος, χρησιμοποιώντας ένταση ρεύματος στην περιοχή των  $10[A]-100[A]$ . Η συγκόλληση με συνεχές ρεύμα θετικής πολικότητας αξιοποιείται σε μικρό βαθμό για τη συγκόλληση αλουμινίου, εξαιτίας της περιορισμένης δυνατότητας φόρτισης με ρεύμα του ηλεκτροδίου βολφραμίου, ενώ η ένταση ρεύματος δεν ξεπερνά τα  $100[A]$ . Το εναλλασσόμενο ρεύμα με ορθογώνιο σχήμα των κυμάτων και μεγαλύτερο θετικό εύρος *σχήμα 6* και *σχήμα 7*, που δεν απαιτεί τη σταθερότητα του ρεύματος υψηλής συχνότητας, χρησιμοποιείται ευρέως κατά τη συγκόλληση των κραμάτων αλουμινίου και μαγνησίου. Κατά το χρόνο του θετικού παλμού ρεύματος με μεγαλύτερη ένταση εξασφαλίζεται ο καθοδικός καθαρισμός, ενώ ο μακρύτερος χρόνος του αρνητικού παλμού ρεύματος εξασφαλίζει την προσαγωγή μεγαλύτερης θερμικής ενέργειας συγκόλλησης. Η αύξηση της έντασης ρεύματος αυξάνει και το βαθμό ιονισμού του πλασμικού αερίου, τη δύναμη Lorentz και, στην ουσία, τη γραμμική ενέργεια του τόξου. Αυξάνεται άρα το βάθος διείσδυσης, το πλάτος της κόλλησης, από την πλευρά του μετώπου, και της πλευράς της ρίζας, καθώς και η απόδοση και η ταχύτητα συγκόλλησης *σχήμα 8*. Η υψηλότερη ποιότητα της σύνδεσης επιτυγχάνεται με μικρή ένταση ροής του πλασμικού αερίου και μεγάλη ένταση ρεύματος και, συγχρόνως, με μεγάλο ρυθμό συγκόλλησης.

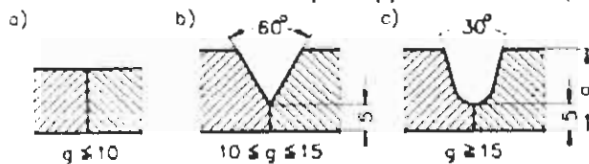


Σχήμα 7 Πορεία μεταβολών έντασης εναλλασσόμενου ρεύματος με ορθογώνιο σχήμα των κυμάτων, χρησιμοποιούμενο κατά τη συγκόλληση αλουμινίου και μαγνησίου



Σχήμα 8 Προτεινόμενες περιοχές της έντασης ρεύματος και ταχύτητας συγκόλλησης κατά τη μικροπλασμική συγκόλληση GTA μετωπικών συνδέσεων χαλύβδινων ελασμάτων πλασμικό αέριο Ar αέριο προστασίας Ar+5% H<sub>2</sub>

Η προετοιμασία των συνδεόμενων εξαρτημάτων για συγκόλληση, ανάλογα με το πάχος, παρουσιάζεται στο **σχήμα 9**. Με αυτή τη μέθοδο είναι δυνατόν με ένα πέρασμα και χωρίς διάκενο μεταξύ των ελασμάτων να εκτελεσθεί κόλληση σε υλικό με πάχος από 3[mm]-15[mm] και με ένταση ρεύματος από 150[A]-300[A]. Οι ταχύτητες γενικά είναι από 40%-80% μεγαλύτερες από ό,τι κατά τη συγκόλληση αυτών των ίδιων συνδέσεων με τη μέθοδο GTA (TIG).



Σχήμα 9 Προετοιμασία εξαρτημάτων για την πλασμική συγκόλληση

Για πάχη από 7[mm]-10[mm] διαμορφώνεται κόλληση σε **σχήμα 1** μονόπλευρη, άνω 1 δίπλευρη ή κόλληση V με διάκενο του αυχένα. Για μεγαλύτερα πάχη υποδεικνύεται το σχήμα U. Στο **σχήμα 10** φαίνεται η διατομή κόλλησης με πάχος 5[mm]. Η μεγάλη εστίαση της θερμότητας είναι το αίτιο τήξης του μετάλλου στο άνω τμήμα, σε μεγαλύτερο πλάτος. Στην περίπτωση μετωπικών κολλήσεων, για πάχη μέχρι περ. 10[mm] η ροή του πλάσματος λιώνει το μέταλλο σε όλο το πάχος και εξέρχεται με τηκόμενη οπή στην άλλη πλευρά (στη ρίζα) πληρείται η αρχή της διάτρησης με δέσμη, όπως εξηγήθηκε στην αρχή.

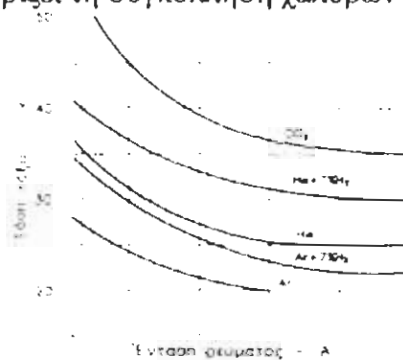


**Σχήμα 10** Κόλληση εκτελεσμένη με πλασματικό καυστήρα σε οξύμαχο χάλυβα πάχους  $7.5[mm]$  η κόλληση  $I$  χωρίς διάκενο

σε ποιες συνθήκες υλοποιείται η συγκόλληση. Αξίζει να σημειωθεί η πολύ μικρή κατανάλωση αερίου για το σχηματισμό του πλάσματος, με σημαντικά μεγαλύτερη κατανάλωση προστατευτικού αερίου, καθώς και η μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης, οι οποίες δε διευκολύνουν τη χειρωνακτική συγκόλληση τόξου. Στην περίπτωση κολλήσεων με αύλακα, μόνο το πρώτο στρώμα εκτελείται χωρίς πρόσθετο συγκολλητικό. Για προστατευτικό αέριο, χρησιμοποιείται αργό με προσθήκη υδρογόνου από  $5\%$  μέχρι  $10\%$ . Το υδρογόνο προστατεύει από την οξείδωση και αυξάνει την ταχύτητα συγκόλλησης. Όλη η διαδικασία συγκόλλησης είναι αυτοματοποιημένη, άρα προσφέρεται για κολλήσεις μεγάλου μήκους. Η τάση του ρεύματος συγκόλλησης ισούται περίπου με  $35[V]$  και η ένταση μπορεί να ρυθμίζεται στα όρια από  $0.2[A]$ - $10[A]$ . Παρόμοιες συνθήκες εφαρμόζονται και κατά τη συγκόλληση του νικελίου, τιτανίου και των κραμάτων χαλκού.

**Η επιλογή του πλασματικού και προστατευτικού αερίου** εξαρτάται κυρίως από την ενθαλπία του και τη θερμική αγωγιμότητα αλλά και από τη χημική αντίδραση στο συγκολλούμενο μέταλλο. Το πλασματικό αέριο, όπως και κατά τη συγκόλληση *GTA*, πρέπει να είναι αδρανές αέριο, από την άποψη της διάρκειας ζωής του μη τηκόμενου ηλεκτροδίου. Το αέριο προστασίας μπορεί να είναι χημικά δραστικό, με την προϋπόθεση ότι δε μειώνει τις ιδιότητες της συγκολλητής σύνδεσης. Το βασικό πλασματικό αέριο είναι το αργό, που χαρακτηρίζεται από χαμηλό δυναμικό ιονισμού και χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Αυτό επιτρέπει τη διατήρηση του τόξου με μικρή ισχύ και σημαντικό μήκος. Η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα του αργού, υποβοηθούμενη από την αντίδραση της δύναμης *Lorentz*, έχει ως αποτέλεσμα, στο εξωτερικό του πλασματικού τόξου, το σχηματισμό επίστρωσης με πιο κρύο αέριο προστασίας του πλασματικού ακροφυσίου από την υπέρμετρη θερμική φόρτιση που προξενείται από την υψηλή θερμοκρασία του τόξου. Κατά την πλασματική συγκόλληση *GTA* με εξαρτώμενο (εξωτερικό) τόξο στο εσωτερικό του πλασματικού ακροφυσίου του καυστήρα το τόξο περιβάλλεται από αέριο ψύξης, το οποίο δεν υπέστη ιονισμό και το οποίο χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλο θερμικό *gradient*. Αυτό το σχετικά πιο κρύο στρώμα, που δεν άγει αέριο στο τοίχωμα του ακροφυσίου, εξασφαλίζει τη θερμική και ηλεκτρική μόνωση, που προστατεύει την εσωτερική επιφάνεια του ακροφυσίου. Η χρησιμοποίηση καθαρού ήλιου ως πλασματικού αερίου αυξάνει τη θερμική φόρτιση του πλασματικού ακροφυσίου και ελαττώνει τη ζωή του, καθώς μειώνει και την επιτρεπόμενη ένταση του ρεύματος συγκόλλησης. Επίσης, εξαιτίας της μικρότερης μάζας του ήλιου, είναι δύσκολη η διατήρηση της τεχνικής του ματιού *σχήμα I* της

κόλλησης, ακόμη και με μεγάλες εντάσεις ροής. Το ήλιο χρησιμοποιείται μόνο για την εκτέλεση κολλήσεων με την τεχνική του λουτρού συγκόλλησης. Η προσθήκη του ήλιου στο αργό αυξάνει τη θερμοκρασία του τόξου σε μεγάλες εντάσεις ρεύματος, αλλά το μίγμα πρέπει να περιέχει τουλάχιστον 40% ήλιο, ώστε να είναι αισθητό. Συνήθως χρησιμοποιούνται μίγματα που περιέχουν 50%-75% ήλιο, ιδιαίτερα προτεινόμενα για τη συγκόλληση χοντρών συνδέσεων από τιτάνιο και αλουμίνιο με την τεχνική του «ματιού» και για την εναπόθεση κορδονιών αναπλήρωσης για όλα τα μέταλλα, όταν είναι απαραίτητη η επίτευξη πρόσθετης ενέργειας του τόξου και μεγαλύτερης επιφάνειας προσαγωγής θερμότητας συγκόλλησης. Όταν ως αέριο πλασμικό και προστασίας χρησιμοποιείται αποκλειστικά το αργό, η στήλη του τόξου, μετά την έξοδο της από το πλασμικό ακροφύσιο, μεγαλώνει, εξαιτίας του ιονισμού του αερίου προστασίας και της σημαντικής μείωσης της ισχύος που αντιστοιχεί στη μονάδα της επιφάνειας της εργασίας διατομής της ροής του πλάσματος. Με το αποτέλεσμα χρησιμοποίησης ως αερίου προστασίας του μίγματος  $Ar+He$  ή ήλιου, αζώτου ή  $CO_2$ , ο ιονισμός έχει πορεία με σημαντικά μειωμένο βαθμό και, συγχρόνως, χάρη της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας αυτών των αερίων, προκύπτει η στένωση του πλασμικού τόξου, παρόμοια με το εμφανιζόμενο κατά τη συγκόλληση του μίγματος  $Ar+H_2$ . Η υψηλότερη ισχύς του τόξου εξασφαλίζεται με τη χρήση του αερίου προστασίας  $CO_2$  *σχήμα 11* αλλά η χημική δραστηριότητα του περιορίζει τη συγκόλληση χαλύβων τύπου *C-Mn*



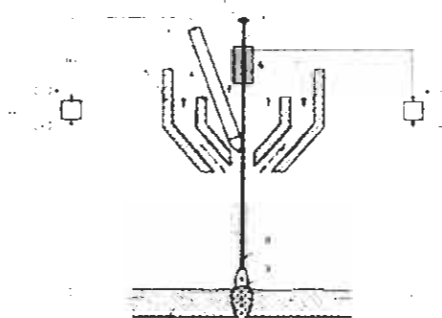
*Σχήμα 11* Επίδραση του είδους του αερίου προστασίας στην τάση του τόξου κατά τη μικροπλασμική συγκόλληση.

και ελαφρά κραματομένων χαλύβων. Η ένταση ροής του πλασμικού αερίου ισούται συνήθως με  $0.1[l/min]-15.0[l/min]$ , ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνική συγκόλλησης και την κατασκευή του καυστήρα. Η ένταση ροής του αερίου προστασίας κατά τη μικροπλασμική συγκόλληση πρέπει να είναι από  $10[l/min]-15[l/min]$ , ενώ κατά τη συγκόλληση με μεγάλες εντάσεις ρεύματος από  $15[l/min]-30[l/min]$ , ανάλογα με το είδος του αερίου.

### 10.1.3 Πλασμική συγκόλληση GMA

Η πλασμική συγκόλληση *GMA (MIG)* είναι ορθολογικός συνδυασμός των χαρακτηριστικών της πλασμικής συγκόλλησης *GTA* και της συγκόλλησης *GMA*. Το σύρμα συγκόλλησης τροφοδοτείται κατά συνεχή τρόπο στο λουτρό συγκόλλησης και στο ηλεκτρικό τόξο, αναμμένο μεταξύ του άκρου του σύρματος και του προς συγκόλληση αντικειμένου και περιβάλλεται με θερμικά ιονισμένο

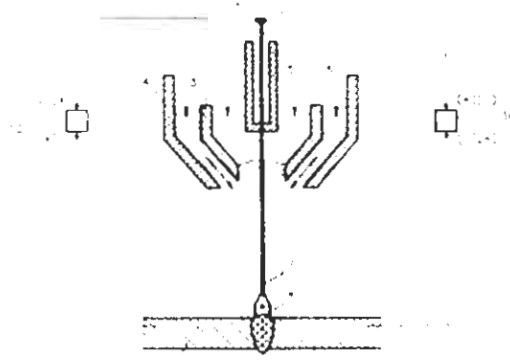
αέριο-πλάσμα *σχήμα 12*. Το αέριο αυτό, με υψηλή θερμοκρασία, είναι πλάσμα του τόξου, συνήθως αναμμένο από την εκκένωση υψηλής συχνότητας ανάμεσα στο συγκολλούμενο αντικείμενο και στο μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο βολφραμίου. Ως πλασματικό αέριο χρησιμοποιείται το αργό, το ήλιο ή μίγμα αυτών με περιεκτικότητα συνήθως 50%-80%He. Το προστατευτικό αέριο, ανάλογα με το είδος του συγκολλούμενου μετάλλου, μπορεί να είναι το αργό, το ήλιο ή και μίγμα αυτών, ενώ στην περίπτωση συγκόλλησης χαλύβων ανθρακούχων και ισχυρά κραματωμένων επίσης δραστικό μίγμα είναι το  $Ar+CO_2$ . Το πλασματικό τόξο είναι εξαρτημένου τύπου και είναι συγκεντρωμένο από ειδικό ακροφύσιο χαλκού ψυχωμένου με νερό. Το ηλεκτρόδιο βολφραμίου, του οποίου η λαβίδα επίσης ψύχεται με νερό, έχει έκκεντρη θέση στο εσωτερικό του κορμού του καυστήρα. Η διαδικασία συγκόλλησης έχει πορεία χωρίς οποιονδήποτε τυπικό διασκορπισμό της συγκόλλησης με τη μέθοδο *GMA*, ιδιαίτερα στην ατμόσφαιρα  $CO_2$ . Η μεταφορά του μετάλλου στο πλασματικό τόξο *GMA* επιτυγχάνεται με μη κινούμενο στενό τόξο μεγάλης μοναδιαίας ισχύος και με στροβιλώδες τόξο μικρότερης μοναδιαίας ισχύος. Η πρώτη μορφή μεταφοράς του μετάλλου στο τόξο εμφανίζεται, όταν από το σύρμα διέρχεται ρεύμα με σχετικά μικρή ένταση και χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση μετωπικών συνδέσεων λεπτών ελασμάτων με μεγάλες ταχύτητες ή μετωπικών συνδέσεων παχέων ελασμάτων με μεγάλο βάθος διείσδυσης.



*Σχήμα 12* Πλασματική συγκόλληση *GMA* με μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο βολφραμίου: 1 σύρμα συγκόλλησης, 2 μη τηκόμενο ηλεκτρόδιο βολφράμιο, 3 τροφοδότης σύρματος, 4 πλασματικό ακροφύσιο, 5 ακροφύσιο αερίου προστασίας, 6 αέριο πλασματικό, 7 αέριο προστασίας, 8 πλασματικό τόξο, 9 τόξο *GMA*, 10 συγκολλούμενο αντικείμενο, 11 πηγή ρεύματος.

Για την απλοποίηση της κατασκευής του καυστήρα και τη διευκόλυνση της χειρωνακτικής συγκόλλησης, επεξεργάστηκε καυστήρας, στον οποίο το ρόλο του ηλεκτροδίου του πλασματικού τόξου παίζει το πλασματικό ακροφύσιο *σχήμα 13*. Το πλασματικό



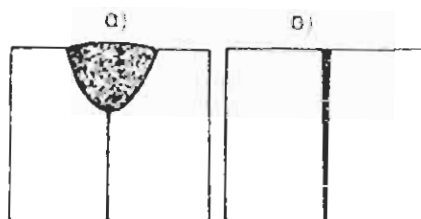


**Σχήμα 13** Πλασμική συγκόλληση GMA με πλασμικό ακροφύσιο, που αποτελεί το ηλεκτρόδιο τον πλασμικό τόξου: 1 σύρμα συγκόλλησης, 2 τροφοδότης σύρματος, 3 πλασμικό ακροφύσιο, 4 ακροφύσιο αερίου προστασίας, 5 πλασμικό αέριο, 6 αέριο προστασίας, 7 πλασμικό τόξο, 8 τόξο GMA, 9 συγκολλούμενο αντικείμενο, 10 πηγή ρεύματος.

τόξο είναι μεταφερόμενο με το ακροφύσιο χαλκού, ψυχόμενο με νερό, ενώ το πλασμικό τόξο είναι αναμμένο μεταξύ του ακροφυσίου, από το οποίο διαρρέει το πλασμικό αέριο, και του συγκολλούμενου αντικειμένου. Η πλασμική συγκόλληση GMA εξασφαλίζει τέλεια τον καθοδικό καθαρισμό των ελασμάτων αλουμινίου. Συγχρόνως, δεν εμφανίζεται η μαύρη απόχρωση στα άκρα της κόλλησης, χαρακτηριστική για τη συγκόλληση GMA ένωση 59% MgO και 41%  $Al_2O_3$ . Η τέλεια προστασία με τη ροή του πλάσματος και η χαμηλή θερμοκρασία των σταγόνων του μετάλλου εξασφαλίζουν την ολική εξάλειψη του πορώδους των κολλήσεων, σε αντίθεση με τη συγκόλληση GMA, όπου η αποφυγή του πορώδους είναι δυσκολότερη. Η πλασμική συγκόλληση GMA, τώρα, χρησιμοποιείται με επιτυχία για την ανέγερση διάφορων κατασκευών από ανθρακοχάλυβες χαμηλού άνθρακα, ελαφρά κραματωμένους χάλυβες, ανθεκτικούς στη διάβρωση, αλουμινίου και κραμάτων του. Επίσης του χαλκού και κραμάτων του. Ιδιαίτερα αξιόλογα αποτελέσματα επιτυγχάνονται κατά τη συγκόλληση αλουμινίου.

## 10.2 Συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων-Χαρακτηρισμός της μεθόδου

Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων στο εξής ονομαζόμενη και ηλεκτρονοδέσμη είναι μία από τις σύγχρονες μεθόδους σύνδεσης μετάλλων και κραμάτων. Αρχικά, εξαιτίας του υψηλού κόστους και της μικρής ισχύος αυτών των συσκευών συγκόλλησης, διενεργούνταν συγκολλήσεις μόνο σε υπεύθυνες κατασκευές, κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία και σε εξαρτήματα πυρηνικών αντιδραστήρων. Οι καλές ιδιότητες των συνδέσεων και οι μεγάλες τεχνολογικές δυνατότητες αυτής της μεθόδου συγκόλλησης οδήγησαν στην εντατική ερευνητική προσπάθεια για την εξέλιξη αυτών των μηχανών και τη χρησιμοποίησή τους. Τώρα η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων είναι ευρέως διαδεδομένη και εφαρμόζεται με επιτυχία στη μαζική παραγωγή για την ανέγερση μεταλλικών προϊόντων και στην επισκευή εξαρτημάτων μηχανών.



Σχήμα 14 Μορφή των κολλήσεων: α) κόλληση εκτελεσμένη με μεθόδους τόξου, β) κόλληση εκτελεσμένη με δέσμη ηλεκτρονίων.

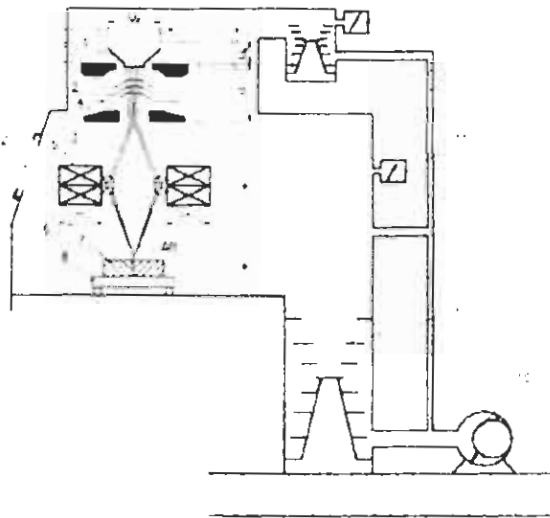
Η χρησιμοποίηση της δέσμης ηλεκτρονίων εξαλείφει πολλά προβλήματα που εμφανίζονται κατά τη χρήση παραδοσιακών μεθόδων συγκόλλησης *σχήμα 14*. Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων πρέπει να πούμε ότι έχει πολλά **πλεονεκτήματα**, τα σπουδαιότερα απ' τα οποία είναι:

- ελάχιστη προσαγόμενη ποσότητα θερμότητας στα συγκολλούμενα αντικείμενα
- επίτευξη κολλήσεων με απαιτούμενο βάθος με ένα πέρασμα της δέσμης
- ελάχιστο εύρος της ζώνης επηρεαζόμενης θερμικά (ΖΕΘ)
- η συγκόλληση επιτυγχάνεται συνήθως χωρίς πρόσθετα υλικά
- ασήμαντες παραμορφώσεις συγκόλλησης, που κυμαίνονται στα προδιαγραφμένα όρια ανοχών των συγκολλητών συνδέσεων
- μεγάλη καθαρότητα των κολλήσεων
- δυνατότητα συγκόλλησης εξαρτημάτων με μεγάλη διαφορά διατομών
- δυνατότητα συγκόλλησης μετάλλων με διαφορετικές φυσικό-χημικές ιδιότητες (ανομοιογενείς)
- ευκολία αλλαγής παραμέτρων συγκόλλησης, επίσης κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης
- δυνατότητα συγκόλλησης σε θέσεις με δύσκολη πρόσβαση
- μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης.

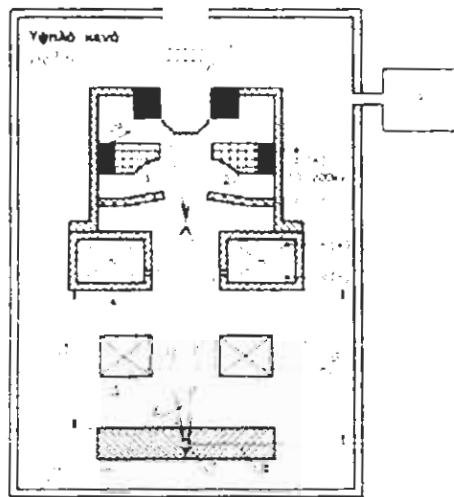
Για τη χρησιμοποίηση της δέσμης ηλεκτρονίων στις συγκολλήσεις **οι καθοριστικοί παράγοντες** είναι οι ακόλουθοι: η ευκολία με την οποία η δέσμη ηλεκτρονίων εστιάζεται σε μικρή επιφάνεια, που δίνει μεγάλη πυκνότητα ενέργειας  $10^7 [W/cm^2]-10^9 [W/cm^2]$  η δυνατότητα επίτευξης μεγάλης κινητικής ενέργειας με την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων στο ηλεκτρικό πεδίο, με μεγάλη διαφορά δυναμικού η ευκολία καθοδήγησης της δέσμης και η ακρίβεια καθορισμού της μεταφερόμενης ισχύος.

### 10.2.1 Δημιουργία της δέσμης ηλεκτρονίων

Ένα από τα σημαντικότερα συγκροτήματα της συσκευής συγκόλλησης *σχήμα 15* είναι ο εκτοξευτήρας των ηλεκτρονίων, ο οποίος χρησιμεύει για τη δημιουργία και καθοδήγηση της δέσμης των ηλεκτρονίων. Η δέσμη ηλεκτρονίων επιτυγχάνεται με τη θερμοεκπομπή από την κάθοδο 1, με μεγάλη ικανότητα εκπομπής βολφράμιο, λανθάνιο, ταντάλιο.



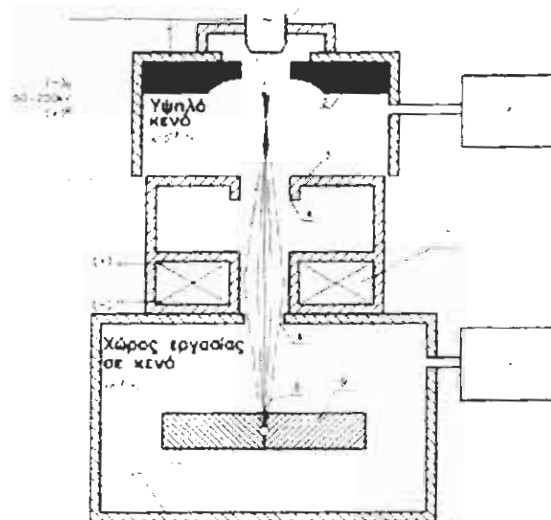
**Σχήμα 15** Συγκρότηση της συσκευής συγκόλλησης με ηλεκτρονοδέσμη:  $U_z$  τάση τροφοδοσίας του συστήματος της καθόδου 1,  $U_k$  τάση καθοδήγησης με τον κύλινδρο Wehnelt 2 κάθοδος καθοδήγησης,  $U$  τάση επιτάχυνσης της δέσμης ηλεκτρονίων  $\Delta H$  μεταξύ της καθόδου καθοδήγησης, 2 και της ανόδου 3, 4 ηλεκτροστατικό πεδίο εστιασμού της δέσμης ηλεκτρονίων, 5 μαγνητικό πηνίο εστιασμού της δέσμης ηλεκτρονίων, 6 μαγνητικό πηνίο απόκλισης της δέσμης ηλεκτρονίου, 7 συγκολλούμενο αντικείμενο, 8 τράπεζα συγκράτησης του αντικειμένου, 9 αντλίες διάχυσης, 10 μηχανική αντλία, 11 μετρητές κενού, 12 παράθυρο οπτικής παρατήρησης της πορείας συγκόλλησης.



**Σχήμα 16** Συσκευή συγκόλλησης ηλεκτρονοδέσμης με υψηλό κενό,  $10^{-6}$ - $10^{-3}$  [Tor], 1 κάθοδος, 2 κύλινδρος Wehnelt κάθοδος οδήγησης, 3 άνοδος, 4 μαγνητικό πηνίο εστίασης της δέσμης ηλεκτρονίων, 5 μαγνητικό πηνίο κλίσης της δέσμης ηλεκτρονίων, 6 δέσμη ηλεκτρονίων, 7 εστία δέσμης ηλεκτρονίων, 8 συγκολλούμενο αντικείμενο, 9 σύστημα μηχανικών αντλιών και διάχυσης, 10 ηλεκτρική μόνωση, 11 θάλαμος εργασίας,  $D_R$  απόσταση εργασίας,  $D_f$  εστιακή απόσταση.

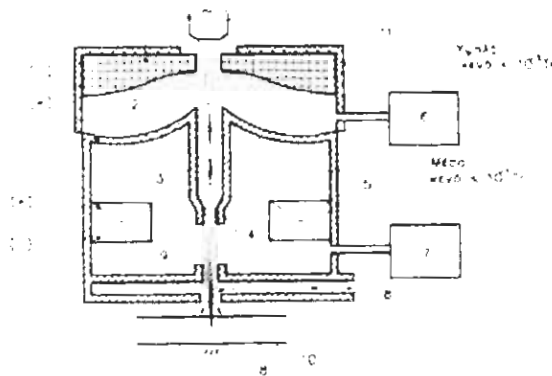
Σε συνθήκες μεγάλης διαφοράς δυναμικού το σύννεφο των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων μετακινείται με ταχύτητα προς την πλευρά της ανοιχτής ανόδου 3 και διέρχεται απ' αυτήν με μορφή δέσμης. Η δέσμη μετά τη διέλευση από την άνοδο έχει τάση για διασκορπισμό. Για να αποφευχθεί αυτό και να επιτευχθεί η συγκέντρωση της σε όσο μικρότερη επιφάνεια, χρησιμοποιούνται επιπροσθέτως

ηλεκτρομαγνητικά πηνία εστίασης 5. Με το αποτέλεσμα των αναφερθέντων διαδικασιών, τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια στο ηλεκτρικό πεδίο και εστιασμένα διαθέτουν μεγάλη συγκεντρωμένη ενέργεια σε μικρή επιφάνεια. Εάν η δέσμη ηλεκτρονίων με τέτοιες ιδιότητες πετύχει στο αντικείμενο 7 τοποθετημένο στην τράπεζα 8, τότε ως αποτέλεσμα της σύγκρουσης έχουμε την ενέργεια, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα. Η ποσότητα αυτής της ενέργειας είναι ικανοποιητική για την τήξη της ζώνης επαφής του υλικού σε πολύ μικρό χρόνο και την εκτέλεση της κόλλησης. Τέτοιες δυνατότητες για την πορεία των ηλεκτρονίων επιτυγχάνονται μόνο σε κενό. Εάν στο δρόμο της δέσμης ηλεκτρονίων βρίσκονται μόρια των ατμών των μετάλλων ή αερίων, τότε κατά τη σύγκρουση τους με τη δέσμη προξενείται ο ιονισμός τους, ενώ η δέσμη χάνει ενέργεια και υφίσταται διασκορπισμό. Για αυτό οι συσκευές για τη συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων πρέπει να έχουν θάλαμο κενού, στον οποίο εξασφαλίζεται για τα ηλεκτρόνια ανάλογη μεγάλη ελεύθερη διαδρομή. Το κενό είναι επίσης απαραίτητο, ώστε η πυρωμένη κάθοδος να μην οξειδώνεται υπερβολικά. Οι συσκευές μηχανές συγκόλλησης παράγονται σε ευρεία περιοχή ισχύος της δέσμης από μερικά μέχρι  $300[KW]$ , με υψηλό κενό του θαλάμου εργασίας, της τάξης  $10^{-6}-10^{-3}$  με μέτριο κενό  $10^{-3}[Tor]-1.0[Tor]$  καθώς και με χαμηλό κενό  $1.0[Tor]-25[Tor]$  *σχήμα 15*, *σχήμα 16* και *σχήμα 17*.



*Σχήμα 17* Συσκευή συγκόλλησης ηλεκτρονοδέσμης με μέτριο και χαμηλό κενό της τάξης  $10^{-3}-25.0[Tor]$  1 κάθοδος, 2 κύλινδρος Wehnelt κάθοδος οδήγησης, 3 άνοδος, 4 στόμιο στραγγαλισμού, 5 μαγνητικό πηνίο εστίασης της δέσμης ηλεκτρονίων, 6 σύστημα αντλιών μηχανικών και διάχυσης, 7 μηχανική αντλία, 8 δέσμη ηλεκτρονίων, 9 συγκολλούμενο αντικείμενο, 10 θάλαμος εργασίας.

Και οι δύο θάλαμοι συνδέονται με πολύ μικρή οπή, που ανοίγει μόνο κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Εκτός των αναφερθέντων συσκευών συγκόλλησης παράγονται επίσης και συσκευές συγκόλλησης με πλήρωση του θαλάμου εργασίας με αδρανές αέριο ή επιτρέπεται η έξοδος της δέσμης ηλεκτρονίου στην ατμόσφαιρα με κανονική πίεση *σχήμα 18*.



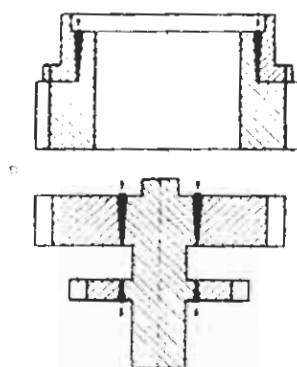
**Σχήμα 18** Συσκευή συγκόλλησης ηλεκτρονοδέσμης χωρίς κενό : 1 κάθοδος, 2 κύλινδρος Wehnlei κάθοδος οδήγησης, 3 άνοδος, 4 στόμιο στραγγαλισμού, 5 μαγνητικό πεδίο εστίασης, 6 σύστημα αντλιών μηχανικών και διάχυσης, 7 μηχανική αντλία, 8 φύσημα αερίου προστασίας, 9 δέσμη ηλεκτρονίων, 10 συγκολλούμενο αντικείμενο, 11 ηλεκτρική μόνωση.

Το πλεονέκτημα των τελευταίων είναι η δυνατότητα συγκόλλησης αντικειμένων με μεγάλες διαστάσεις, αλλά τα περισσότερα οφέλη που συνδέονται με τη συγκόλληση στο κενό εξαλείφονται. Μεταξύ άλλων, το βάθος διείσδυσης πέφτει περίπου στο ήμισυ, ενώ η μορφή της κόλλησης χάνει τη χαρακτηριστική μορφή της.

### 10.2.2 Τεχνολογία και τεχνική συγκόλλησης

Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες της δέσμης ηλεκτρονίων πρωταρχικά αξιοποιούνται για τη σύνδεση υλικών που δύσκολα συγκολλούνται, όπως το: βολφράμιο, μολυβδαίνιο, ταντάλιο, τιτάνιο, ζirkόνιο, κράματα νικελίου και μερικά κράματα ισχυρά κραματωμένα. Εξίσου ευρέως χρησιμοποιείται η δέσμη ηλεκτρονίων στη **σύνδεση ανομοιογενών υλικών μεταξύ τους** **σχήμα 23**. Με τη χρήση της δέσμης ηλεκτρονίων επιτυγχάνεται σε ευρεία κλίμακα συγκόλληση αντικειμένων χωρίς άλλες διαδικασίες. Αυτό αποδεικνύεται από τη στενή εγκάρσια διατομή της κόλλησης **σχήμα 19**, με μικρό όγκο του λιωμένου μετάλλου, και από το μικρό πλάτος της ζώνης επηρεαζόμενης θερμικά, που προξενούν **ελάχιστη παραμόρφωση**. Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων επιτρέπει την εκτέλεση με ένα πέρασμα κάθε είδους σύνδεσης μετάλλων και κραμάτων με πάχη από εκατοστά του χιλιοστού μέχρι  $250[mm]-450[mm]$ , σε ελεύθερη θέση. Οι συνδέσεις εκτελούνται με μετωπικές ή σημειακές κολλήσεις.. Οι αυχενικές συγκολλήσεις είναι δυνατόν να εκτελεσθούν μόνο με την τεχνική συγκόλλησης με την τροφοδοσία πρόσθετου υλικού. Η συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων κατά βάση είναι **διαδικασία συγκόλλησης χωρίς πρόσθετο υλικό**. Η τεχνική συγκόλλησης με ένα πέρασμα μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα υπερβολικής ενίσχυσης και ανώμαλου μετώπου και ρίζας και σε ατελείς τήξεις στην περιοχή της ρίζας. Τα προβλήματα αυτά εξαλείφονται με την τεχνική συγκόλλησης πολλαπλών στρωμάτων με ή χωρίς πρόσθετο υλικό. Στην τεχνική συγκόλλησης με πολλαπλά στρώματα χωρίς πρόσθετο υλικό, η σύνδεση προετοιμάζεται με στενό αύλακα με μικρή γωνία λοξοτόμησης ή με παράλληλα τοιχώματα **σχήμα 20**, αξιοποιώντας τη θερμική συστολή της σύνδεσης, για την

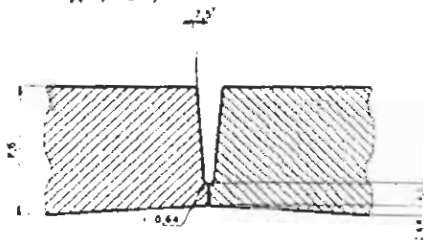
εκτέλεση υψηλής ποιότητας της σύνδεσης χωρίς τη χρήση πρόσθετου υλικού. Αλλά συχνά, εξαιτίας των μεταλλουργικών ή τεχνολογικών συνθηκών, προτείνεται ή ακόμη και επιβάλλεται η χρησιμοποίηση πρόσθετου υλικού, για την επίτευξη σύνδεσης με την απαιτούμενη ποιότητα. Εάν το πρόσθετο υλικό έχει ως καθήκον την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων ή την ανθεκτικότητα στη θραύση της σύνδεσης, επαρκεί η προσαγωγή στην περιοχή της επαφής επικαλύμματος από μέταλλο με ανάλογη χημική σύσταση. Στην περίπτωση που απαιτείται από τις τεχνολογικές συνθήκες πρόσθετο υλικό για την πλήρωση του αύλακα συγκόλλησης της σύνδεσης με μεγάλο πάχος προτείνεται τεχνική συγκόλλησης με πολλαπλά στρώματα, το πρόσθετο υλικό, συνήθως με μορφή σύρματος μικρής διαμέτρου, της τάξης των  $0.4[mm]-0.8[mm]$ , τροφοδοτείται στην επιφάνεια της σύνδεσης. Το τροφοδοτικό έχει παρόμοια κατασκευή, όπως και για τη μηχανοποιημένη συγκόλληση *GTA*.



Σχήμα 19 Παράδειγμα εκτέλεσης συγκροτήματος οδοντωτών τροχών με χρήση της ηλεκτρονιοδέσμης.



Σχήμα 20 Τρόπος προετοιμασίας μεταλλικών συνδέσεων, για τη συγκόλληση με ηλεκτρονιοδέσμες με πολλαπλά στρώματα σε υψηλό κενό, χωρίς πρόσθετο υλικό.

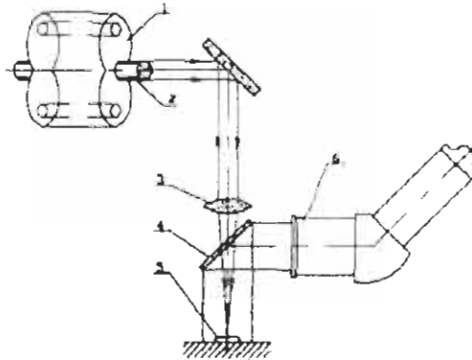


Σχήμα 21 Τρόπος προετοιμασίας μεταλλικών συνδέσεων για τη συγκόλληση, με ηλεκτρονιοδέσμη, με πολλαπλά στρώματα σε υψηλό κενό, χωρίς πρόσθετο υλικό.

### 10.3 Συγκόλληση με δέσμη των laser-Χαρακτηρισμός της μεθόδου

Η συγκόλληση με δέσμη των Laser διενεργείται με την αξιοποίηση της ροής των φωτονίων ως πηγής ενέργειας της θερμότητας, που επιτρέπει την εκτέλεση συνδέσεων. Αποδείχθηκε ότι μερικά σώματα και αέρια το ρουμπίνιο με περιεκτικότητα  $0.05\%Cr$ , ύαλος νεοδημίου,  $CO_2$ , μίγμα *He-Ne* με την επίδραση του φωτός απορροφούν φωτόνια, με αποτέλεσμα τα άτομα τους να έχουν

ικανότητα διαπέρασης σε υψηλότερο ενεργητικό επίπεδο. Εάν η εντατικότητα του φωτός της λυχνίας που φωτίζει το σώμα με τέτοιες ικανότητες υπερβεί κάποιο κρίσιμο επίπεδο, τότε από το ημιδιαφανές μέτωπο εκτοξεύεται εντατική ροή φωτονίου με ορισμένο χαρακτηριστικό μήκος ακτινοβολίας *σχήμα 22*. Η συγκόλληση με δέσμη των *Laser* είναι μια από τις πλέον σύγχρονες διαδικασίες σύνδεσης των μετάλλων και κραμάτων με θέρμανση, η οποία ανταγωνίζεται με τις τεχνολογικές και οικονομικές ιδιότητες της τη συγκόλληση με δέσμη ηλεκτρονίων. Η διαδικασία συγκόλλησης με *Laser* συνίσταται στην τήξη της περιοχής επαφής των συνδεόμενων αντικειμένων με θερμότητα που επιτυγχάνεται με το αποτέλεσμα προσαγόμενης σε αυτήν την περιοχή εστιασμένης δέσμης συνεχούς φωτός με πολύ μεγάλη πυκνότητα ισχύος. Η συγκόλληση μπορεί να επιτυγχάνεται με τη δημιουργία λουτρού συγκόλλησης, όπως με την κλασική μέθοδο, ή με πλήρη τήξη της σύνδεσης με ένα πέρασμα ή με πολλαπλά στρώματα, με ή χωρίς πρόσθετο υλικό. Οι πολύ μεγάλες πυκνότητες της ισχύος της δέσμης *Laser* εξασφαλίζονται με γραμμικές ενέργειες συγκόλλησης στο επίπεδο των ελάχιστων ενεργειών απαιτούμενων για την τήξη, ενώ η *ZEΘ* και η ζώνη σύντηξης έχουν πολύ μικρό εύρος. Συγχρόνως η παραμόρφωση της σύνδεσης είναι



*Σχήμα 22* Οπτική διάταξη του *Laser* ρουμπινιού: 1 σύστημα φωτισμού της ράβδου ρουμπινιού, 2 παλμογεννήτρια, 3 φακός σύγκλισης της δέσμης φωτονίων, 4 ημιδιαπερατό κάτοπτρο, 5 συγκολλούμενο αντικείμενο, 6 μικροσκόπιο παρατήρησης της θέσης συγκόλλησης.

τόσο μικρή, που τα συγκολλητά αντικείμενα δεν απαιτούν καμιά πρόσθετη μηχανική κατεργασία. Οι θεωρητικές βάσεις κατασκευής των *Laser* και *Maser* (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)

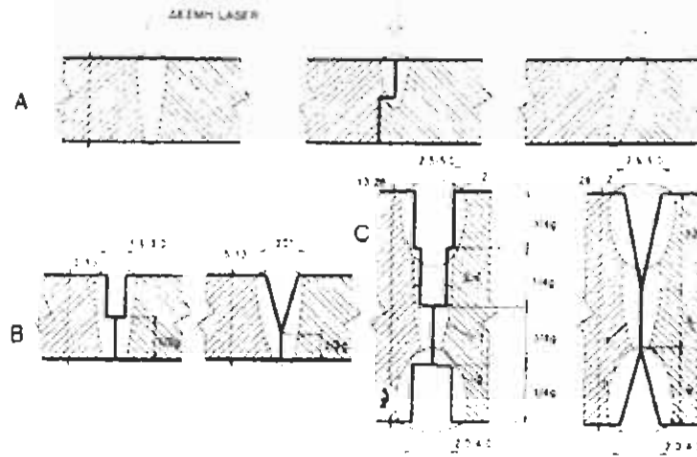
### 10.3.1 Συσκευές συγκόλλησης *Laser*

Οι υπάρχουσες συσκευές *Laser*, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κοπή και συγκόλληση των μετάλλων λειτουργούν με τη χρήση ενεργών μέσων, τα οποία βρίσκονται σε μορφή στερεή ή αερίου. Συνεπώς οι δύο αυτοί τύποι συσκευών συγκόλλησης *Laser* αναφέρονται ως *Laser* στερεής και αέριας κατάστασης. Οι συσκευές *Laser* στερεής κατάστασης διακρίνονται σε τρεις κύριους τύπους: ρουμπινιού-Rb, νεοδημίου ύαλου, Nd: Glass, και νεοδυμίου υτρίου αλουμινίου garnet φυσικός λίθος - Nd: YAG. Το Nd: YAG, το οποίο έχει

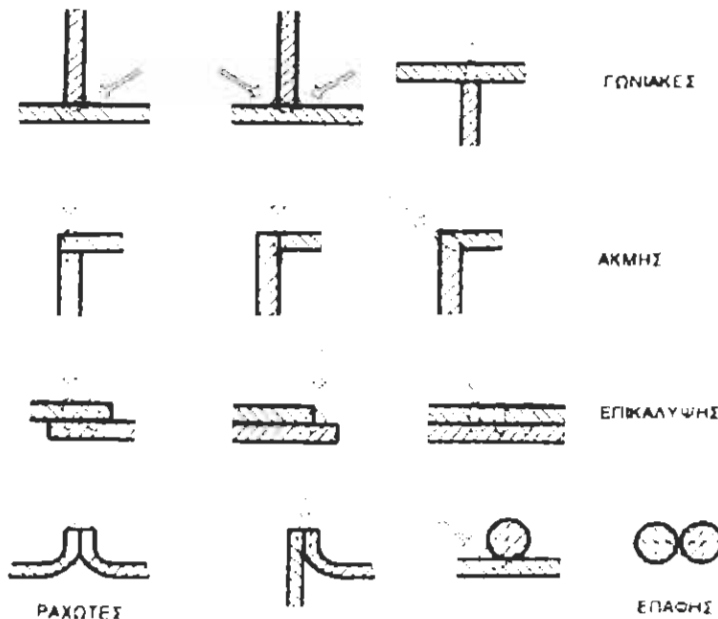
μήκος κύματος εξόδου  $1.06[\mu\text{m}]$ , ουσιαστικά έχει αντικαταστήσει τους υπόλοιπους δύο τύπους στερεής κατάστασης *Laser*, επειδή μπορεί να πετύχει υψηλότερες πυκνότητες ισχύος για μεγάλες περιόδους χωρίς να υπερθερμαίνεται. Τα αέρια  $[\text{CO}_2]$  *Laser*, τα οποία χρησιμοποιούνται τώρα στο χώρο των συγκολλήσεων, με μήκος κύματος  $10.6[\mu\text{m}]$ , έχουν αποδειχθεί πιο αποδοτικά και παράγουν υψηλότερες πυκνότητες ισχύος

### 10.3.2 Τεχνολογία και τεχνική συγκόλλησης

Η συγκόλληση με τις συσκευές *Laser* επιτρέπει την εκτέλεση σε ελεύθερη θέση όλων των τύπων και σχημάτων των συνδέσεων σε πολύ μεγάλη περιοχή παχών, μέχρι και τα πιο λεπτά παραγόμενα στη βιομηχανία φύλλα και σύρματα με πάχος ή διάμετρο από  $0.0025[\text{mm}]$  μέχρι  $25-32[\text{mm}]$  *σχήμα 23* και *σχήμα 24*.



*Σχήμα 23* Παραδείγματα μετωπικών συγκολλητών συνδέσεων με *Laser* *A* συγκολλητή σύνδεση με ένα κορδόνι χωρίς πρόσθετο υλικό, *B* συγκολλητή σύνδεση με ένα κορδόνι με πρόσθετο υλικό, *C* συγκολλητή δίπλευρη σύνδεση με πολλαπλά κορδόνια με τροφοδοτούμενο πρόσθετο υλικό



*Σχήμα 24* Παραδείγματα συνδέσεων ταυ, ακμής, επικάλυψης και ραχωτών συγκολλήσεων



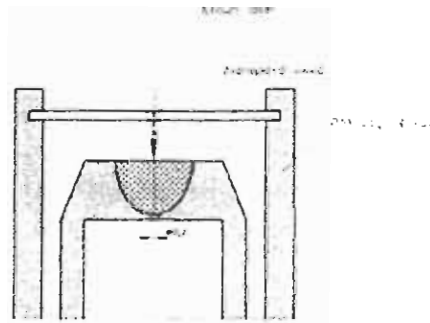
με Laser

Στη συγκόλληση Laser εφαρμόζονται δύο τεχνικές συγκόλλησης: συγκόλληση με το λουτρό και συγκόλληση με βαθιά διείσδυση, με την τεχνική του ματιού, όπως και στη συγκόλληση με ηλεκτρονοδέσμη. Και οι δύο τεχνικές συγκόλλησης διενεργούνται με ή χωρίς πρόσθετο υλικό, με ένα πέρασμα ή με πολλαπλά κορδόνια.

**Η συγκόλληση με την τεχνική του λουτρού** συνίσταται στη χρησιμοποίηση της δέσμης Laser με μικρή ή μέση ισχύ, η οποία θερμαίνει με επιφανειακή απορρόφηση της περιοχής συγκόλλησης, ενώ η υποεπιφανειακή περιοχή θερμαίνεται με αγωγιμότητα *σχήμα 41a*. Το βάθος διείσδυσης τότε εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του συγκολλούμενου μετάλλου, την κατάσταση της επιφάνειας του καθώς και από την πυκνότητα της ισχύος της δέσμης Laser. Σημαντική αύξηση της διείσδυσης εξασφαλίζεται με επικάλυψη της επιφάνειας της σύνδεσης με ουσία με μεγάλο συντελεστή απορρόφησης της ακτινοβολίας Laser. Η συγκόλληση με την τεχνική του λουτρού εφαρμόζεται κυρίως για την εκτέλεση συνδέσεων με πολύ μικρό πάχος.

**Η τεχνική συγκόλλησης του ματιού** απαιτεί συνήθως τη χρήση στερεών ή αερίων Laser, με μέση ή μεγάλη ισχύ. Στην προκειμένη περίπτωση οι φυσικές ιδιότητες του μετάλλου δεν παίζουν ουσιώδη ρόλο και δεν περιορίζουν το βάθος διείσδυσης *σχήμα 41b*, *σχήμα 42* και *σχήμα 43*. Η ενέργεια της δέσμης Laser είναι απορροφημένη σε όλο το βάθος της σύνδεσης και όχι μόνο στην επιφάνεια. Ο μηχανισμός σχηματισμού του ματιού είναι παρόμοιος μ' αυτόν που εμφανίζεται στη συγκόλληση με ηλεκτρονοδέσμη. Η τεχνική συγκόλλησης του ματιού εφαρμόζεται για τη συνεχή και σημειακή σύνδεση. Η εκτέλεση σημειακών κολλήσεων που αλληλοκαλύπτονται μεταξύ τους κατά 30%-50% επιτρέπει την εκτέλεση συνεχούς σύνδεσης και συγχρόνως τη ρύθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων, με τη μεταβολή του μεγέθους του κόκκου προς τη διεύθυνση κρυστάλλωσης. Η ΖΕΘ της σύνδεσης είναι πολύ στενή, ενώ οι τάσεις και παραμορφώσεις συγκόλλησης πρακτικά παραλείπονται. Η συγκόλληση με σημειακές κολλήσεις μπορεί να διενεργηθεί με στερεά Laser Nd:YAG ή Nd:ύαλου, ρουμπινιού όπως και με παλμικά Laser αερίου CO<sub>2</sub>. Τα αντικείμενα για συγκόλληση με Laser πρέπει να προετοιμάζονται όπως και για τη συγκόλληση με ηλεκτρονοδέσμη. Άρα είναι απαραίτητος ο ακριβής μηχανικός και χημικός καθαρισμός της περιοχής συγκόλλησης. Δεν είναι αναγκαίος ο καθαρισμός όλου του αντικείμενου, επειδή οι ακαθαρσίες που βρίσκονται εκτός της περιοχής συγκόλλησης δεν εμποδίζουν τη διαδικασία συγκόλλησης, όπως αυτό εμφανίζεται κατά τη συγκόλληση με ηλεκτρονοδέσμη στο κενό. Κατά τη συγκόλληση Laser συνήθως χρησιμοποιούνται συνδέσεις μετωπικές, επικάλυψης και ραχωτές *σχήμα 23* και *σχήμα 24*. Οι μετωπικές συγκολλητές συνδέσεις με ένα πέρασμα με πλήρη διείσδυση χωρίς πρόσθετο υλικό δεν απαιτούν λοξοτόμηση των άκρων, ενώ η εφαρμογή των άκρων πρέπει να είναι πολύ ακριβής. Υποδεικνύεται με ακρίβεια μεταλλική επαφή καθαρών επιφανειών. Εάν αυτό είναι δύσκολο να εκτελεστεί, εξαιτίας της μορφής και του πάχους της σύνδεσης, το διάκενο στη σύνδεση πρέπει να είναι κάτω από 3%-5% του πάχους της σύνδεσης, συνήθως κάτω από 0.1[mm]-0.3[mm]. Με υπερβολικό διάκενο της σύνδεσης μπορεί να εμφανισθεί κοίλωμα του μετώπου της κόλλησης ή, σε ακραίες περιπτώσεις,

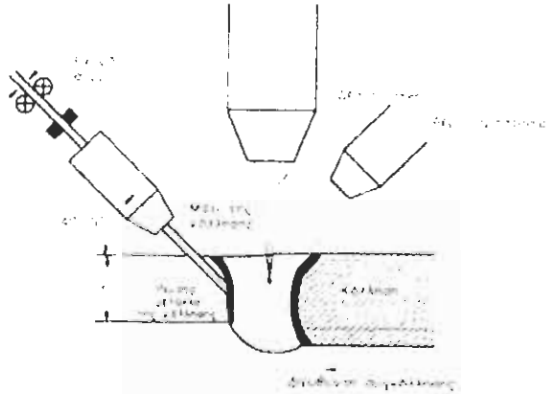
ατελής τήξη. Η δέσμη *Laser* μπορεί ακόμη να διαπεράσει σε όλο το πάχος της σύνδεσης, χωρίς την τήξη των άκρων της. Η μη εφαρμογή δεν πρέπει να ξεπερνά το 25% του πάχους, ενώ η σύνδεση πρέπει να είναι ελαφρά συμπιεσμένη. Πλήρης σύντηξη της σύνδεσης μπορεί να επιτευχθεί ακόμη και με μετατόπιση μέχρι 50% του πάχους της σύνδεσης. Για τη συγκόλληση *Laser* μπορεί να χρησιμοποιηθούν παρόμοια εργαλεία - ιδιοσυσκευές, όπως για τη συγκόλληση *GTA* χωρίς πρόσθετο υλικό. Σε περίπτωση ανάγκης, για την επίτευξη σύνδεσης υψηλής ποιότητας, πρέπει να εφαρμοσθούν οι ίδιες απαιτήσεις, όσον αφορά τα εργαλεία ιδιοσυσκευές, όπως κατά τη συγκόλληση με ηλεκτρονοδέσμη. Επίσης, η συγκόλληση με *Laser* δεν παρουσιάζει δυσκολίες κατά τη σύνδεση αντικειμένων με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Είναι επίσης δυνατή η διενέργεια διαδικασιών συγκόλλησης διαμέσου διαφανών διαφραγμάτων για το φως *Laser*, άρα συγκόλληση σε κενό, σε ειδικές ατμόσφαιρες προστασίας με ελεύθερη πίεση *σχήμα 25*.



*Σχήμα 25* Σημειακή κόλληση η οποία κλίνει οπή σε κάλυμμα ράβδου πυρηνικού καυσίμου. Το στερεό παλμικό *Laser Nd: YAG* εκτελεί σε κάλυμμα οπή με διάμετρο 0.2[mm], ενώ μετά από την άντληση τον αέρα από τη ράβδο και την πλήρωση της με ήλιο με υψηλή πίεση, εκτελεί τη σημειακή κόλληση με κατάλληλο εστιασμό της δέσμης.

Η συγκόλληση με *Laser* εφαρμόζεται επίσης για τη σύνδεση εξαρτημάτων οδοντωτών τροχών, μετωπικών συνδέσεων, επίπεδων και περιφερειακών διάφορων κατασκευών που φέρουν φορτία, για τη συγκόλληση διαμηκών σωλήνων, μορφοσιδήρων, σωλήνων με διάτρητα φύλλα, με πάχη των συνδέσεων που ανέρχονται μέχρι 32[mm]. Για συνδέσεις με μικρά πάχη καθώς και για συνδέσεις μετάλλων με πολύ καλή συγκολλητικότητα με δέσμη των *Laser*, υποδεικνύεται η συγκόλληση με ένα πέρασμα, χωρίς πρόσθετο υλικό. Η **συγκόλληση *Laser* με πρόσθετο υλικό** υποδεικνύεται με σκοπό: τη ρύθμιση της χημικής σύστασης στην κόλληση, για τη διόρθωση των μηχανικών ιδιοτήτων, και ιδιαίτερα τη δυσθραυστότητα ή την ανθεκτικότητα στην εν θερμώ ρηγμάτωση, τη διόρθωση της ποιότητας της κόλλησης και ιδιαίτερα την ελάττωση της ποσότητας των πόρων αερίων, τη μείωση της απαιτούμενης ακρίβειας προετοιμασίας της συγκολλούμενης σύνδεσης, την αξιοποίηση των *Laser* με μικρότερη ισχύ, για τη συγκόλληση πολλαπλών κορδονιών συνδέσεων με μεγαλύτερο πάχος. Για τις συνδέσεις με μεγαλύτερα πάχη προτείνεται η συγκόλληση με πολλαπλά κορδόνια με ή χωρίς πρόσθετο υλικό. Η συγκόλληση με πολλαπλά κορδόνια επιτρέπει την αύξηση της ποιότητας της σύνδεσης και ιδιαίτερα τη μείωση του πορώδους της κόλλησης, την ευαισθησία για την ατελή τήξη, καθώς και την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων της. Η συγκόλληση με την εναπόθεση πρόσθετου υλικού με

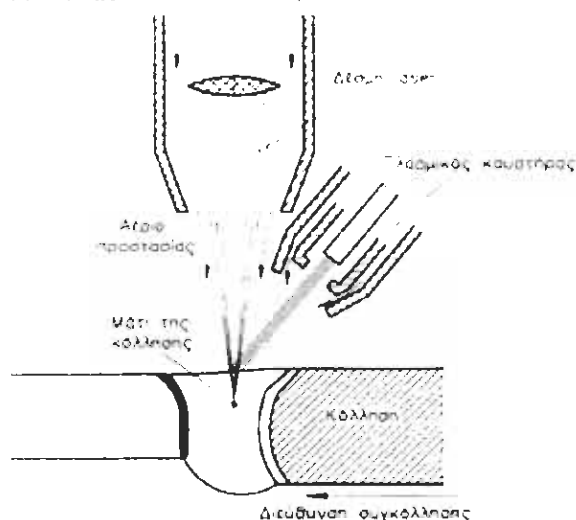
μορφή μεταλλικής σκόνης, όπως και κρύου ή θερμού σύρματος, διενεργείται με ένα κορδόνι ή με πολλαπλά, *σχήμα 23*. Η τροφοδότηση θερμού σύρματος προθερμαινόμενου με ηλεκτρική αντίσταση μέχρι τη θερμοκρασία περ. των  $600[^\circ\text{C}]-700[^\circ\text{C}]$  αυξάνει περίπου κατά 50% την ταχύτητα συγκόλλησης, σε σύγκριση με τη συγκόλληση με κρύο σύρμα, αλλά απαιτεί σημαντικά μεγαλύτερη ακρίβεια ελέγχου των παραμέτρων συγκόλλησης.



*Σχήμα 26 Σχηματική παράσταση της συγκόλλησης με τροφοδοσία σύρματος στο διάκενο της συγκολλούμενης σύνδεσης με ένα πέρασμα με την τεχνική του ματιού*

Η τροφοδότηση του πρόσθετου υλικού στην περιοχή της συγκόλλησης κατά τη συγκόλληση με *Laser* δε δημιουργεί τέτοιες δυσκολίες, όπως αυτές εμφανίζονται κατά τη συγκόλληση με ηλεκτρονοδέσμη. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστήματα τροφοδότησης του σύρματος ή της μεταλλικής σκόνης όπως και κατά τη συγκόλληση *GTA*, *σχήμα 26*. Για τη διεύρυνση των τεχνικών και τεχνολογικών δυνατοτήτων και ιδιαίτερα τη μείωση του κόστους προετοιμασίας των αντικειμένων, για τη συγκόλληση με επεξεργάστηκε η **τεχνική συγκόλληση Laser, ενισχυμένη με το πλασμικό τόξο GTA** *σχήμα 27*. Το πλασμικό τόξο με ισχύ  $0.5[\text{KW}]-15[\text{KW}]$  οδηγείται στην περιοχή της συγκόλλησης με *Laser* στο μάτι της κόλλησης και αυξάνει τη γραμμική ενέργεια συγκόλλησης. Μειώνεται επίσης σημαντικά η ανάκλαση της περιοχής συγκόλλησης και αυξάνεται η απορρόφηση της ακτινοβολίας *Laser*. Χάρη αυτού είναι δυνατόν η συγκόλληση να γίνεται με 100%-200% μεγαλύτερης ταχύτητας και μεγαλύτερης ενεργειακής απόδοσης της δέσμης των *Laser*. Τα αντικείμενα για συγκόλληση μπορούν να προετοιμάζονται με μικρότερη ακρίβεια απ' ό,τι απαιτείται για την κλασική συγκόλληση με *Laser*. Οι μετωπικές συνδέσεις μπορούν να έχουν διάκενο 25%-40% του πάχους των συνδεόμενων ελασμάτων, ενώ η μετατόπιση μεταξύ των ελασμάτων ακόμη και 80% του πάχους δεν χειροτερεύει την ποιότητα της σύνδεσης. Για τα ελάσματα των κραμάτων αλουμινίου δεν επιβάλλεται ακριβής καθαρισμός αμέσως πριν τη συγκόλληση επειδή το πλασμικό τόξο αφαιρεί σχεδόν εξολοκλήρου το στρώμα των οξειδίων από την επιφάνεια της περιοχής συγκόλλησης. Η μέχρι τώρα χρησιμοποίηση της τεχνικής συγκόλλησης *Laser* με ενισχυμένο πλασμικό τόξο *GTA* αφορά στις μετωπικές συνδέσεις και στην επικάλυψη ελασμάτων με μικρά πάχη, μέχρι  $3.5[\text{mm}]$ , από ανθρακοχάλυβες με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, χάλυβες με προστατευτική επικάλυψη, ελαφρά κραματωμένους, ανθεκτικούς στη διάβρωση καθώς και αλουμίνιο και τιτάνιο. Πολύ καλά αποτελέσματα επιτεύχθηκαν κατά τη συγκόλληση συνδέσεων

από κράματα αλουμινίου *AlSiMg* και *AlMg*, χρησιμοποιούμενων όλο και περισσότερο από τη βιομηχανία αυτοκινήτων.



**Σχήμα 27** Σχήμα συγκόλλησης Laser ενισχυμένη με πλασμικό τόξο

Η βιομηχανία αυτοκινήτων τώρα χρησιμοποιεί για τα αμαξώματα σχεδόν αποκλειστικά χαλύβδινα ελάσματα βαθιάς κοίλανσης με προστατευτική αντιδιαβρωτική επίστρωση. Η ρομποτική συγκόλληση Laser αυτών των ελασμάτων επιτρέπει την εκτέλεση με μεγάλες ταχύτητες υψηλής ποιότητας συνδέσεων μετωπικών επικαλύψεων, αφήνοντας μετά τη συγκόλληση στενή περιοχή κατά μήκος της γραμμής της σύνδεσης, χωρίς προστατευτικό επίστρωμα. Η συγκόλληση με Laser του χαλκού και των κραμάτων του περιορίζεται μόνο από τη μεγάλη ανάκλαση των επιφανειών συνδέσεων, όπως στην περίπτωση αλουμινίου καθώς και της μεγάλης θερμικής αγωγιμότητας.

#### **Πλεονεκτήματα της συγκόλλησης**

1. Βαθιές και στενές κολλήσεις. Το βάθος διείσδυσης της συγκόλλησης με ένα πέρασμα περιορίζεται μόνο από τη διαθέσιμη ισχύ του Laser.
2. Χαμηλή εισροή θερμότητας σε κάθε πλευρά του υλικού της συγκολλούμενης σύνδεσης πολύ χαμηλή θερμική παραμόρφωση δυνατότητα συγκόλλησης πολύ κοντά σε θερμικά ευαίσθητα στοιχεία, όπως ηλεκτρονικά κυκλώματα καλές μεταλλουργικές ιδιότητες, όπως σημαντική μείωση διόγκωσης των κόκκων.
3. Υψηλοί ρυθμοί παραγωγικότητας υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης, που μπορούν να φτάσουν μέχρι και μερικά μέτρα ανά λεπτό δυνατότητα αυτοματισμού και λειτουργίας με ρομπότ δυνατότητα λειτουργίας σε όλες τις πιθανές γωνίες.
4. Οι κολλήσεις μπορούν να επιτευχθούν μονόπλευρα και σε δύσκολες θέσεις δυνατότητα εναπόθεσης κόλλησης με ακρίβεια πολλαπλά στρώματα συγκόλλησης από μια πλευρά.
5. Αυξημένες σχεδιαστικές πιθανότητες μεγάλη ποικιλία συνδέσεων ακόμη και μεταξύ ανομοιομορφών παχών δεν απαιτείται περαιτέρω μηχανική κατεργασία, όπως λείανση.

#### **Μειονεκτήματα της συγκόλλησης**

1. Στενά εφαρμοσμένες οι συνδέσεις μικρό μέγεθος εστιασμένου σημείου.

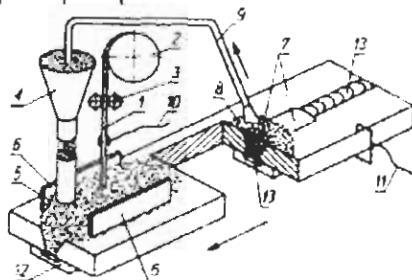
2. Πολύ ακριβής ευθυγράμμιση της δέσμης - συγκολλούμενου αντικειμένου.
3. Ακριβής χειρισμός της δέσμης ή του συγκολλούμενου αντικειμένου.
4. Οι μηχανές Laser λειτουργούν σε σταθερό χώρο εργασίας λόγοι ασφάλειας οπτική σταθερότητα ανάγκη πηγής νερού ψύξης, για την εύρυθμη λειτουργία των μηχανών.
5. Υψηλό κόστος αγοράς και λειτουργίας απαιτείται τακτική συντήρηση βοηθητικός εξοπλισμός και εργαλεία.

## Κεφάλαιο 11

### 11. Αυτόματη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο SAW Submerged Arc Welding

#### 11.1.1 SAW Submerged Arc Welding

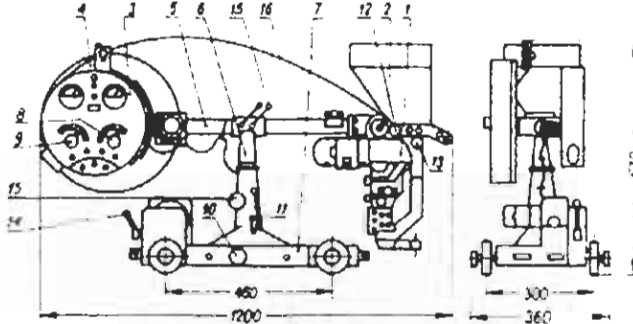
Η μηχανοποιημένη συγκόλληση τόξου με γυμνό σύρμα δεν προσφέρει στις συνδέσεις υψηλές ιδιότητες αντοχής, ενώ η μηχανοποιημένη συγκόλληση με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο, εξαιτίας των πολλών τεχνικών δυσκολιών και της χαμηλής απόδοσης δεν μπόρεσε να αναπτυχθεί. Μόνο με την προώθηση της μεθόδου συγκόλλησης με βυθιζόμενο τόξο (κάτω από συλλίπασμα) και γυμνό ηλεκτρόδιο επέτρεψε τη μηχανοποίηση της συγκόλλησης τόξου. Το γυμνό ηλεκτρόδιο 1 εκτυλίσσεται από το τύμπανο 2, ελκυόμενο από τα ράουλα 3, που περιστρέφονται διαμέσου ηλεκτρικού κινητήρα. Προ του ηλεκτροδίου εισρέει από το χωνί 4 το συλλίπασμα με μορφή σκόνης 5, το οποίο παίζει περίπου τον ίδιο ρόλο με την επένδυση στα ηλεκτρόδια. Τα καλύμματα από ελάσματα 6 προφυλάσσουν το διασκορπισμό της σκόνης προς τα πλάγια. Το αναμμένο τόξο, βυθισμένο στον αύλακα, κάτω από το συλλίπασμα, δε φαίνεται και ο χειριστής δεν είναι αναγκασμένος να προστατεύεται φορώντας μάσκα. Το τηκόμενο συλλίπασμα, που λαμβάνει χώρα στη διαδικασία συγκόλλησης, επιπλέει πάνω στην επιφάνεια της κόλλησης με μορφή σκουριάς, η οποία καλύπτει την κόλληση με το στρώμα 7. Το πλεόνασμα του συλλιπάσματος απορροφάται με τη βοήθεια του αγωγού 9 και προωθείται ξανά στο χωνί 4. Η κρούστα 7, κατά τη στερεοποίηση της, θραύεται από μόνη της και εύκολα αποσύρεται με μεταλλική βούρτσα. Οι αγωγοί 10 και 11 διωχτεύουν το ρεύμα στο ηλεκτρόδιο και στο συγκολλούμενο αντικείμενο. Το χάλκινο υποστήριγμα 12 προστατεύει το μέταλλο της κόλλησης 13 πριν από την εκροή του στην άλλη πλευρά. Το τύμπανο 2 με το ηλεκτρόδιο, το χωνί 4 με το συλλίπασμα, η συσκευή απορρόφησης του περισσεύματος του συλλιπάσματος καθώς και το κάλυμμα 6 είναι συναρμολογημένα στην κεφαλή, η οποία προωθείται κατά μήκος της κόλλησης. Μερικές φορές, η κεφαλή είναι μη κινούμενη, ενώ ωθείται το συγκολλούμενο αντικείμενο κάτω από την κεφαλή.



**Σχήμα 1** Συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο: 1 ηλεκτρόδιο (γυμνό σύρμα), 2 τύμπανο, 3 τροχοί έλξης του σύρματος, 4 χωνί, 5 συλλίπασμα (με μορφή σκόνης), 6 ελάσματα προστασίας, 7 σκουριά, 8 πλεόνασμα συλλιπάσματος, 9 αγωγός απορρόφησης, 10, 11 ηλεκτρικοί αγωγοί, 12 υποστήριγμα χαλκού, 13 κόλληση.

### 11.1.2 Αυτόματη μηχανή συγκολλήσεις με βυθιζόμενο τόξο

Στο *σχήμα 2* φαίνεται η διάταξη του αυτόματου συγκόλλησης τύπου *AS7-1200*, τροφοδοτούμενου με εναλλασσόμενο ρεύμα από μετασχηματιστή συγκόλλησης τύπου *ETb-1000*, με μέγιστη ένταση ρεύματος  $1000[A]$  και με συντελεστική διάρκεια φόρτισης  $P 60\%$ .



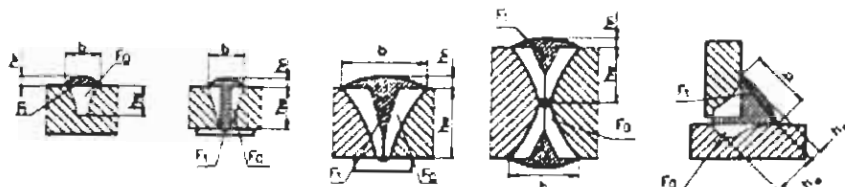
*Σχήμα 2* Αυτόματο τύπου *AS7-1200*: 1 κεφαλή, 2 χωνί με συλλιπάσμα, 3 πίνακας ελέγχου, 4 τόμπανο με περιτυλιγμένο το σύρμα ηλεκτροδίου, 5 δοκός, 6 κολώνα, 7 μεταφορικό μέσο, 8 ρύθμιση προώθησης τον σύρματος, 9 ρύθμιση προώθησης του μηχανοκίνητου φορείου, 10 ρύθμιση της εγκάρσιας θέσης της κολώνας, 11 ρύθμιση προώθησης της κολώνας, 12 διακόπτη: ρεύματος, 13 ρύθμιση ροής του συλλιπάσματος, 14 συμπλέκτης, 15 επαφές καθορισμού της θέσης της μηχανής συγκόλλησης, 16 σύρμα ηλεκτροδίου.

Το αυτόματο μπορεί να εργάζεται με ένταση ρεύματος από  $300[A]$ - $1000[A]$  και με σύρμα διαμέτρου  $3.25[mm]$ - $6[mm]$ . Η μέγιστη ταχύτητα προώθησης του σύρματος  $4[m/min]$ , ενώ η μέγιστη ταχύτητα του μηχανοκίνητου φορείου (ταχύτητα συγκόλλησης)  $70[m/h]$ . Ο ρυθμός προώθησης του ηλεκτροδίου ρυθμίζεται από την τάση του κυκλώματος εργασίας. Όταν η τάση αυξάνεται το τόξο επιμηκύνεται, ο ρυθμός προώθησης του ηλεκτροδίου προς τη διεύθυνση του τόξου γίνεται μεγαλύτερος, το τόξο σμικρύνεται και η τάση του ελαττώνεται. Με αυτόν τον τρόπο, η τάση και η ένταση του ρεύματος διατηρείται σε σταθερό επίπεδο. Τα αυτόματα με χαμηλότερη ισχύ εργάζονται σύμφωνα με την αρχή της σταθερής ταχύτητας προώθησης του σύρματος ηλεκτροδίου προς τη διεύθυνση του τόξου, όταν η ταχύτητα τήξης του ηλεκτροδίου είναι στιγμιαία, μεγαλύτερη απ' την ταχύτητα προώθησης, η απόσταση μεταξύ του άκρου του ηλεκτροδίου και του αντικειμένου αυξάνεται, το τόξο επιμηκύνεται και η τάση του αυξάνει, ενώ η ένταση του ρεύματος μειώνεται και, εξαιτίας αυτού, ελαττώνεται η ταχύτητα τήξης. Το αντίθετο φαινόμενο παρατηρείται, όταν η τήξη του ηλεκτροδίου αυτοδιατηρείται σε κάποιο μέσο επίπεδο, για το οποίο πρέπει να επιλέγεται σταθερή η ταχύτητα εκτύλιξης του σύρματος. Για τη συγκόλληση λεπτών ελασμάτων μέχρι  $5[mm]$  πάχους, χρησιμοποιούνται αυτόματα με συνεχές ρεύμα, στην περιοχή των  $100[A]$ - $500[A]$ . Η διάμετρος του σύρματος ηλεκτροδίου είναι  $1.6[mm]$ - $3.25[mm]$ , ο ρυθμός προώθησης του σύρματος  $50[m/h]$ - $250[m/h]$ . Το αυτόματο αυτού του τύπου, για τις προαναφερθείσες παραμέτρους συγκόλλησης, μπορεί να αντικατασταθεί από το αυτόματο μεγαλύτερης ισχύος, μέχρι  $600[A]$ , και προσαρμοσμένο για τη συγκόλληση με τη μέθοδο *GMA*, στην ατμόσφαιρα αδρανών αερίων. Χαρακτηρίζεται, επίσης, με μικρή μάζα, περίπου  $25[Kgr]$ , και σχετικά με μικρές διαστάσεις, χάρη αυτού συναρμολογείται εύκολα. Για την τροφοδοσία αυτού του αυτόματου, με σταθερή ταχύτητα προώθησης του

ηλεκτροδίου, έχουν χρησιμότητα οι πηγές συνεχούς ρεύματος, με ομαλή φθίνουσα ή σταθερά στατιστική χαρακτηριστική. Με τέτοιου είδους χαρακτηριστικές και ελάχιστη μεταβολή της τάσης του τόξου μήκος του τόξου προκύπτουν μικρότερες διαφορές της έντασης απ' ό,τι με τις χαρακτηριστικές με απότομη κλίση, που με τον τρόπο αυτής της ρύθμισης του ρεύματος είναι ουσιαστικά ωφελιμότερο.

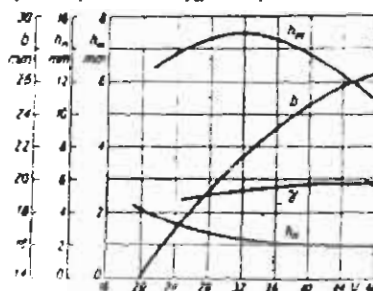
### 11.1.3 Επιλογή συνθηκών συγκόλλησης και μορφή των κολλήσεων

Επειδή η τροφοδοσία του ρεύματος γίνεται σε σχετικά μικρή απόσταση από το τόξο, η πυκνότητα του ρεύματος σε  $[A/mm^2]$  της διατομής του ηλεκτροδίου) μπορεί να αυξηθεί σημαντικά από ό,τι κατά τη χειρωνακτική συγκόλληση, όπου αυτή περιορίζεται από την υπερθέρμανση του ηλεκτροδίου. Χάρη στις υψηλότερες εντάσεις ρεύματος, το βάθος διείσδυσης είναι σημαντικά μεγαλύτερο, και γι' αυτό επιτρέπεται η μείωση της ποσότητας του εναποτιθέμενου υλικού στην κόλληση *σχήμα 3*. Άρα ακόμη περισσότερο μπορεί να αυξηθεί η ταχύτητα συγκόλλησης σε σχέση με τη χειρωνακτική συγκόλληση.



*Σχήμα 3* Μορφές κολλήσεων, εκτελούμενες με βυθιζόμενο τόξο: *a* αναγώμωση, *b* συγκόλληση I, *c* συγκόλληση V, *d* συγκόλληση X, *e* αυχενική συγκόλληση.

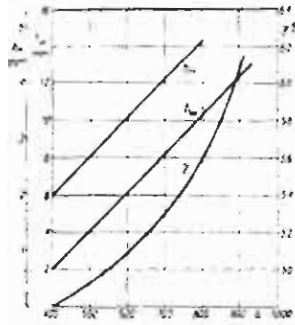
Η μορφή των κολλήσεων, που είναι το βάθος διείσδυσης  $h_w$ , το ύψος της ενίσχυσης  $h_n$ , το πλάτος του μετώπου  $b$  καθώς και η συμμετοχή του μητρικού μετάλλου  $F_o$  στο μέταλλο της κόλλησης  $F_o + F_1$  καθορίζεται από τον τύπο: και εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος και την τάση, τη διάμετρο του ηλεκτροδίου, την ταχύτητα συγκόλλησης, το είδος και την κοκκομετρία του συλλιπιάσματος καθώς και από τον τρόπο προετοιμασίας των άκρων. Συνήθως ο συντελεστής  $\gamma = 0.6-0.7$ . Το βάθος διείσδυσης είναι σχεδόν ανάλογο της έντασης του ρεύματος. Η τάση  $30[V]-40[V]$  μπορεί να είναι υψηλότερη απ' ό,τι στη χειρωνακτική συγκόλληση, επειδή το μακρύτερο τόξο προξενεί υπερβολικό διασκορπισμό και οξείδωση του μετάλλου. Στο αναμμένο τόξο κάτω από το συλλίπασμα, τα φαινόμενα αυτά δε συμβαίνουν. Η αύξηση της τάσης διευρύνει το πλάτος της κόλλησης  $b$ , με την ταυτόχρονη.



*Σχήμα 4* Επίδραση της τάσης του τόξου συγκόλλησης στη διαμόρφωση της κόλλησης και



της ποσότητας του τηκόμενου μητρικού υλικού.



Σχήμα 5 Επίδραση της έντασης του ρεύματος τον τόξου στη διαμόρφωση της κόλλησης και της ποσότητας του τηκόμενου μητρικού υλικού.

μείωση και της ενίσχυσης  $h_n$ , αλλά δεν έχει επίδραση στο βάθος διείσδυσης  $h_w$ , σχήμα 4. Η μεταβολή των διάφορων μεγεθών  $h_n$ ,  $h_w$  και  $b$ , ανάλογα με την ένταση του ρεύματος, φαίνεται στο σχήμα 5. Γίνεται αποδεκτό ότι, κατά τη συγκόλληση με ταχύτητα  $60[m/h]$ , η αύξηση της έντασης του ρεύματος για κάθε  $100[A]$  προξενεί την αύξηση του βάθους διείσδυσης, αρχικά κατά  $1.5[mm]$  κατά την αυχενική συγκόλληση και τη μετωπική με λοξοτόμηση των άκρων

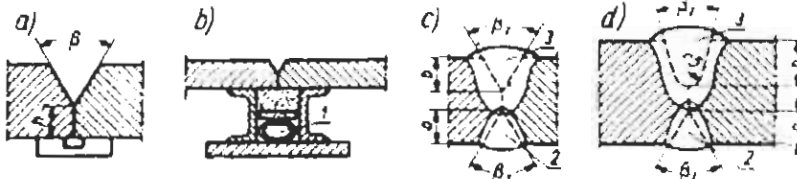
$h_w = K \cdot \frac{I}{100}$  όπου:  $K=1.5$  ή  $1.0$ . Για την επίτευξη βαθιάς διείσδυσης, πρέπει η

συγκόλληση να γίνεται με όσο το δυνατόν μικρότερη διάμετρο του σύρματος ηλεκτροδίου και με μεγαλύτερη ένταση ρεύματος. Με την αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος στο ηλεκτρόδιο, μειώνεται η κατανάλωση του σύρματος και της ηλεκτρικής ενέργειας και, έτσι, έχουμε αύξηση της απόδοσης συγκόλλησης.

## 11.2 Τεχνική εκτέλεσης των κολλήσεων

### 11.2.1 Τεχνική εκτέλεσης μετωπικών κολλήσεων

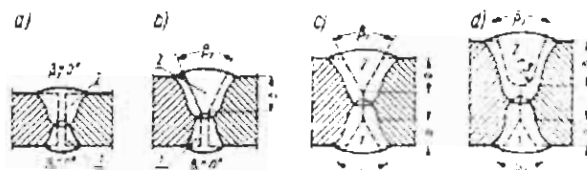
Οι μονόπλευρες μετωπικές κολλήσεις  $I$  χρησιμοποιούνται για πάχη ελασμάτων μέχρι  $10[mm]$ , εκτελούνται σε υποστηρίγματα από χαλκό ή χάλυβα, το οποίο παραμένει στο αντικείμενο. Το χαλύβδινο υποστήριγμα ισούται με  $0.2$  έως  $0.3$  του πάχους του συγκολλούμενου ελάσματος. Οι μονόπλευρες κολλήσεις V ή U εκτελούνται σε υποστηρίγματα από χαλκό σχήμα 6a ή σε υποστηρίγματα με συλλίπασμα σχήμα 6b. Το υποστήριγμα με συλλίπασμα πρέπει να συμπιεσθεί ισχυρά στο έλασμα, πράγμα που επιβάλλει την πίεση του μέσου του αγωγού  $I$ .



Σχήμα 6 Προετοιμασία των ελασμάτων για συγκόλληση: a συγκόλληση σε υποστήριγμα χαλκού, b συγκόλληση σε υποστήριγμα με συλλίπασμα, c συγκόλληση με χειρωνακτική υποσυγκόλληση, d κόλληση U, με χειρωνακτική υποσυγκόλληση.

Σε περίπτωση που υπάρχει δυσκολία στη χρησιμοποίηση υποστηριγμάτων ή

όταν δεν είναι δυνατή η δίπλευρη μηχανοποιημένη συγκόλληση, από το κάτω μέρος γίνεται χειρωνακτική υποσυγκόλληση, με μικρές κολλήσεις 2 *σχήμα 6c*, *σχήμα 6d* οι οποίες δημιουργούν υπόβαθρο για τις μηχανοποιημένες συγκολλήσεις 3. Η γωνία του αύλακα  $\beta_1=60^\circ-70^\circ$ , ενώ για τη μηχανοποιημένη συγκόλληση η  $\beta_2=30^\circ-60^\circ$ .



*Σχήμα 7 Προετοιμασία ελασμάτων για συγκόλληση, εκτελούμενων δίπλευρα, μηχανοποιημένα 1, 2 η διαδοχική σειρά συγκόλλησης.*

Όταν είναι δυνατή η μηχανοποιημένη εκτέλεση των δίπλευρων κολλήσεων και από τις δύο πλευρές, η ταχύτητα συγκόλλησης είναι ασφαλώς μεγαλύτερη από ό,τι στην προηγούμενη περίπτωση. Το μέρος της κόλλησης που εκτελείται πρώτα *σχήμα 7* έχει μικρότερο πάχος, επειδή χρησιμοποιείται χαμηλότερη ένταση ρεύματος, για να μην προκύψει εκροή από την επόμενη πλευρά του μετώπου της κόλλησης. Συμβολίζοντας με  $F_l$  την εγκάρσια διατομή της κόλλησης, που προκύπτει από το εναποτιθέμενο υλικό, με  $F_e$  τη διατομή του ηλεκτροδίου, με  $V_S$  την ταχύτητα συγκόλλησης και με  $V_e$  ταχύτητα τήξης του σύρματος *σχήμα 8*, η εξίσωση μπορεί να γραφεί:  $F_l V_S = F_e V_e$ . Λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος της ενίσχυσης  $h_m$ , που εκφράζεται με το συντελεστή  $K=1.1+1.2$  είναι δυνατό, με βάση την παρακάτω εξίσωση, να καθορισθεί η προηγούμενη διατομή του αύλακα

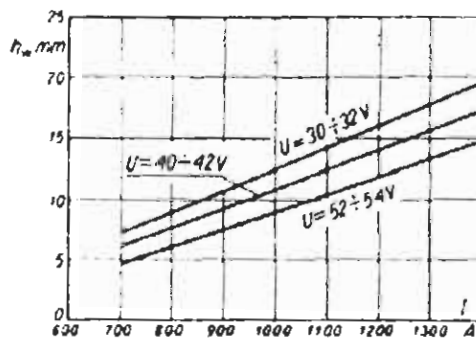
$F_a$  η οποία θα πρέπει να προκύψει από τη λοξοτόμηση των άκρων.  $F_a = \frac{F_l}{K}$



*Σχήμα 8 Η σχέση της εγκάρσιας διατομής της κόλλησης με το τηκόμενο εναποτιθέμενο υλικό.*

Αποδεχόμενοι το άνοιγμα του αύλακα  $50^\circ-70^\circ$ , μπορούμε να καθορίσουμε το βάθος του καθώς, επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους συγκόλλησης, και τη λοξοτόμηση των ελασμάτων. Άρα, όπως φαίνεται, οι συνθήκες για τη λοξοτόμηση των άκρων των ελασμάτων καθώς και τα μεγέθη και η μορφή του αύλακα, που προκύπτουν, είναι τελείως διαφορετικά με τη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο κάτω από το συλλίπασμα απ' ό,τι με τη χειρωνακτική συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο. Κατά τη χειρωνακτική συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο, η διατομή του αύλακα εξαρτάται από το πάχος των συγκολλούμενων ελασμάτων και, επιπλέον, από τις τεχνικές δυνατότητες εισχώρησης του ηλεκτροδίου σε ικανοποιητικό βάθος και με σωστή εκτέλεση της κόλλησης. Ενώ, κατά τη συγκόλληση με βυθιζόμενο τόξο, το μέγεθος της διατομής του αύλακα εξαρτάται από το πάχος των ελασμάτων και τις παραμέτρους συγκόλλησης και είναι δυνατόν να υπολογισθεί. Ο καθορισμός των παραμέτρων συγκόλλησης καθώς και του μεγέθους του

αύλακα, κατά την εκτέλεση μετωπικών συνδέσεων, έχει ως ακολούθως: Καθορίζεται το μέγεθος του βάθους διείσδυσης  $h_w$  το οποίο εξαρτάται από τον τρόπο συγκόλλησης και ισούται: για τις κολλήσεις εκτελούμενες σε υποστηρίγματα με συλλιπάσματα,  $h_w=0.8g$ ,  $g$  πάχος του ελάσματος, για τις κολλήσεις εκτελούμενες σε υποστηρίγματα χαλκού,  $h_w=g$ , για τις κολλήσεις εκτελούμενες με υποστηρίγματα, που αποτελούνται από τη χειρωνακτική εκτελούμενη κόλληση,  $h_w = 2/3g+(1.5[mm]-2[mm])$ , για τις κολλήσεις εκτελούμενες δίπλευρα,  $h_w=0.5g+(1.5[mm]-2[mm])$ . Το μέγεθος της έντασης και της τάσης του ρεύματος εξασφαλίζει το καθορισμένο βάθος διείσδυσης, με βάση του *σχήματος 9*, με την υπόθεση ότι η ταχύτητα συγκόλλησης είναι  $20[m/h]$  ενώ η διάμετρος του σύρματος  $5[mm]$ , ή με βάση την εξίσωση  $h_w = \frac{K}{100} \cdot I$  όπου  $K=1-1.5$

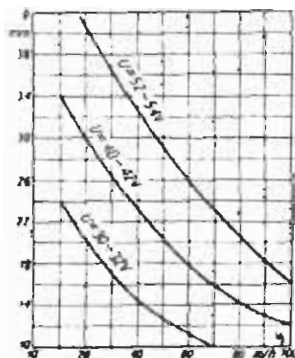


*Σχήμα 9* Η επίδραση της έντασης και της τάσης του ρεύματος συγκόλλησης στο βάθος διείσδυσης της κόλλησης, με ταχύτητα συγκόλλησης  $20[m/h]$  και διάμετρο ηλεκτροδίου  $5[mm]$ .

Η τάση πρέπει να γίνεται αποδεκτή όσο το δυνατόν μικρότερη ενώ η ένταση όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, λαμβάνοντας υπόψη ότι για τα ηλεκτρόδια με διάμετρο  $4[mm]$ ,  $5[mm]$ ,  $6[mm]$  και  $8[mm]$  η μέγιστη ένταση ρεύματος ισούται με  $1100[A]$ ,  $1700[A]$ ,  $2400[A]$  και  $3600[A]$ . Η τάση του τόξου  $U_t$  καθορίζεται ανάλογα με την ένταση διέλευσης  $I$ :

$I$	$500-600[A]$	$600-700[A]$	$700-850[A]$	$850-1000[A]$	$1000-1200[A]$
$U_t$	$36-40[V]$	$38-40[V]$	$40-42[V]$	$40-43[V]$	$40-44[V]$

Στη συνέχεια, καθορίζεται η ταχύτητα συγκόλλησης. Για ελάσματα με πάχη από  $8[mm]-30[mm]$ , η ταχύτητα συγκόλλησης κυμαίνεται στα όρια από  $15[m/h]-45[m/h]$ . Μετά, καθορίζεται το πλάτος του μετώπου της κόλλησης  $b$ , με βάση το *σχήμα 10*, για την αποδεκτή ταχύτητα συγκόλλησης  $V_s$  και την τάση του τόξου καθώς και για την ένταση του ρεύματος συγκόλλησης  $900[A]$ . Εάν η ένταση του ρεύματος, για δεδομένη περίπτωση, είναι διαφορετική από  $900[A]$ , τότε, για κάθε  $100[A]$  διαφορά, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη  $\pm 0.5[mm]$ , προσθέτοντας ή αφαιρώντας από την τιμή που διαβάστηκε από το διάγραμμα του *σχήματος 10*. Πρέπει, επίσης, να λαμβάνεται υπόψη η διαφορά του πλάτους της κόλλησης, με τη μεταβολή της διαμέτρου του ηλεκτροδίου κατά τέτοιο τρόπο, που, για κάθε χιλιοστό  $[mm]$  μεταβολής της διαμέτρου, το πλάτος της κόλλησης μεταβάλλεται  $\pm 2[mm]$



Σχήμα 10 Η σχέση των πλάτους της κόλλησης με την ταχύτητα συγκόλλησης και την τάση του τόξου, με ένταση του ρεύματος συγκόλλησης  $I=900[A]$  και διάμετρο του ηλεκτροδίου  $5[mm]$

[+] κατά την αύξηση, [-] κατά τη μείωση. Με βάση το πλάτος της κόλλησης  $b$  και το βάθος διείσδυσης  $l_s$ , καθορίζεται ο συντελεστής μορφής της κόλλησης  $\Psi = \frac{b}{l_s}$

ο οποίος πρέπει να είναι στα όρια  $1.3+2.0$ . Εάν η υπολογιστική τιμή του είναι μικρότερη, τότε πρέπει να αλλαχθούν οι παράμετροι συγκόλλησης, αποδεχόμενοι μικρότερη ταχύτητα συγκόλλησης. Το μέγεθος του αύλακα που προκύπτει από τη λοξοτόμηση των άκρων των ελασμάτων μπορεί να καθορισθεί με βάση την εξίσωση:  $F_l = V_s = F_e = V_e$  Γνωρίζοντας την τιμή του συντελεστή τήξης  $a_i$ ,

υπολογίζεται η ταχύτητα τήξης του ηλεκτροδίου-σύρματος,  $V_e = \frac{a_i}{3600 \cdot G_s}$  όπου:

$I$  ένταση του ρεύματος συγκόλλησης,  $G_s$  βάρος  $1[cm]$  σύρματος,  $a_i = 11.6 \pm 0.4 [g/Ah]$ , κατά τη συγκόλληση με συνεχές ρεύμα ο πόλος [+] στο ηλεκτρόδιο,  $a_i = A + B \cdot \frac{I}{d_e} [g/A \cdot h]$ , κατά τη συγκόλληση με συνεχές ρεύμα ο

πόλος [-] στο ηλεκτρόδιο,  $d_e$  διάμετρος ηλεκτροδίου, σε  $[mm]$ . Οι τιμές  $A$  και  $B$  εξαρτώνται από το είδος του συλλιπιάσματος και του ρεύματος συγκόλλησης καθώς και από την πολικότητα του ηλεκτροδίου. Μετά τον υπολογισμό της

$F_l = \frac{F_e \cdot V_e}{V_s}$  υπολογίζεται η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του αύλακα

$F_a = \frac{F_l}{K}$  όπου:  $K=1.1+1.2$  Αποδεχόμενοι το άνοιγμα του αύλακα κατά  $50^\circ+70^\circ$ ,

είναι δυνατόν να καθορισθεί το βάθος του και η τελική μορφή. Ανεξάρτητα από τις δυνατότητες υπολογισμού των παραμέτρων συγκόλλησης και του τρόπου λοξοτόμησης των ελασμάτων, επεξεργάστηκαν πίνακες για τον καθορισμό αυτών των δεδομένων, κατά τη συγκόλληση διάφορων παχών των ελασμάτων. Η μονόπλευρη συγκόλληση των ελασμάτων περιορίζεται από τη μέγιστη ένταση του ρεύματος, που είναι δυνατόν να επιτευχθεί από την πηγή τροφοδοσίας ρεύματος. Για περισσότερα αυτόματα συγκόλλησης με βυθιζόμενο τόξο τροφοδοτούν μέγιστο ρεύμα συγκόλλησης  $1000[A]-1200[A]$ , που επιτρέπει μονόπλευρη συγκόλληση ελασμάτων με πάχος μέχρι  $15[mm]$ . Σε περίπτωση συγκόλλησης χοντρότερων ελασμάτων, προκύπτει η ανάγκη για την εφαρμογή

συγκόλλησης με μία ή πολλές στρώσεις ή δίπλευρης μορφής κόλλησης. Η τεχνική εκτέλεσης των μετωπικών, δίπλευρων συνδέσεων, με μία στρώση από κάθε πλευρά, δεν διαφέρει, κατά βάση, σε τίποτε από την τεχνική συγκόλλησης της μονόπλευρης κόλλησης. Ενώ, κατά την εναπόθεση μεγαλύτερου αριθμού στρώσεων, όπως κατά τη χειρωνακτική συγκόλληση τόξου με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο, απαιτείται λίγο διαφορετική τεχνική. Η λοξοτόμηση των ελασμάτων, στην προκειμένη περίπτωση, έχει ως σκοπό την επίτευξη διείσδυσης σε όλο το πάχος του ελάσματος, και όχι μόνο την εξασφάλιση της μορφής, όπως συμβαίνει κατά τη συγκόλληση της μονόπλευρης κόλλησης. Το πλάτος εδώ είναι σημαντικά μεγαλύτερο σε σχέση με το πλάτος της κόλλησης, η οποία πετυχαίνεται για δοσμένες παραμέτρους συγκόλλησης. Οι παράμετροι εκτέλεσης πολλαπλών στρώσεων μετωπικών κολλήσεων με βυθιζόμενο τόξο καθορίζονται με τον ακόλουθο τρόπο: **Καθορίζεται η μέγιστη ένταση ρεύματος**, η οποία μπορεί να τροφοδοτηθεί από δεδομένη πηγή ρεύματος. Με βάση το μέγεθος της έντασης ρεύματος, καθορίζεται **το μέγεθος της εγκάρσιας διατομής κάθε στρώσης**, η οποία μπορεί να εκτελεσθεί, βασιζόμενη στα ακόλουθα δεδομένα:

$$I \quad 400[A] \quad 500[A] \quad 700[A] \quad 800[A] \quad 900[A] \quad 1000[A]$$

η εγκάρσια διατομή μιας στρώσης, σε  $[mm^2]$

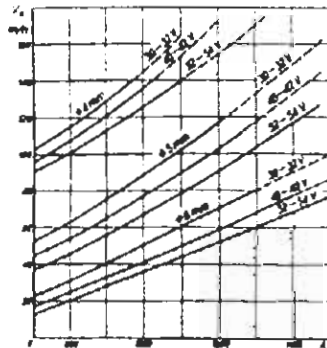
$$60[mm^2] \quad 75[mm^2] \quad 90[mm^2] \quad 120[mm^2] \quad 160[mm^2] \quad 200[mm^2]$$

Με βάση το αποδεκτό μέγεθος της έντασης του ρεύματος επιλέγεται **η τάση του τόξου** και η διάμετρος του ηλεκτροδίου και, στη συνέχεια, με το αποδεκτό πάχος του ηλεκτροδίου, καθορίζεται η ταχύτητα τήξης του (προώθηση), σύμφωνα με το **σχήμα 11**. Η ταχύτητα συγκόλλησης υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

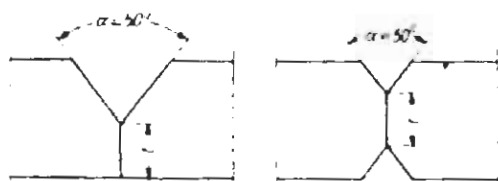
$$V_s = V_c \cdot \frac{F_c}{F_l}. \quad \text{Το σχήμα του αύλακα καθορίζεται με βάση τα αποδεκτά δεδομένα:}$$

$\alpha=50^\circ$ ,  $t=2-4[mm]$ , με  $I=600[A]$ ,  $t=4-8[mm]$ , με  $I=600-1000[A]$  **σχήμα 12**. Ο αριθμός των στρώσεων καθορίζεται με βάση τον τύπο:  $n = K \cdot \frac{F_a}{F_\sigma}$  όπου:  $F_a$

διατομή του αύλακα,  $[mm^2]$   $F_\sigma$  διατομή μιας στρώσης,  $[mm^2]$ ,  $K$  συντελεστής του πάχους της ενίσχυσης 1.1-1.2. Αναλογικά, όπως και για τη συγκόλληση μιας στρώσης επεξεργάστηκαν πίνακες που περιέχουν τις παραμέτρους και τεχνολογικά δεδομένα για τη συγκόλληση ελασμάτων διάφορων παχών, με πολλαπλές στρώσεις.



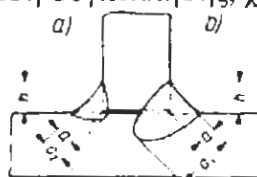
**Σχήμα 11** Η σχέση της ταχύτητας τήξης προώθησης του σύρματος προς την ένταση του ρεύματος, την τάση και τη διάμετρο του ηλεκτροδίου.



Σχήμα 12 Μονόπλευρη και δίπλευρη λοξοτόμηση ελασμάτων για μετωπική συγκόλληση.

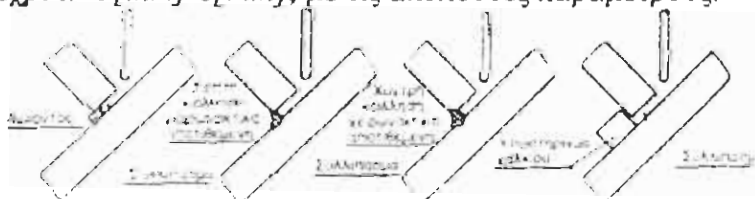
### 11.2.2 Τεχνική εκτέλεσης αυχενικών κολλήσεων

Οι αυχενικές κολλήσεις, εκτελούμενες με βυθιζόμενο τόξο, έχουν σημαντικά βαθύτερη διείσδυση, συγκρινόμενες με τους τρόπους εκτέλεσης με επενδεδυμένα ηλεκτρόδια *σχήμα 13* και αποτελούν ωφελιμότερες συνδέσεις από την άποψη αντοχής και κατανομής των τάσεων. Όσον αφορά το σημαντικό πάχος του μητρικού υλικού, δεν υφίσταται κίνδυνος διείσδυσης υλικών κατά διαμετρική τρόπο. Αλλά, όμως εμφανίζονται δυσκολίες, συνδεδεμένες με την εκροή ρευστού μετάλλου από τα δημιουργούμενα διάκενα, ως συνέπεια της μη επαρκούς εφαρμογής των ελασμάτων μεταξύ τους. Και, ως εκ τούτου, προκύπτει ανάγκη κατάλληλης στεγανοποίησης των διακένων και, ιδιαίτερα, κατά τη συγκόλληση σε επίπεδη θέση, επειδή το πλάτος του διακένου υπερβαίνει το  $1[mm]-1.5[mm]$ . Ανάλογα με το μέγεθος και τη μορφή του συγκολλούμενου αντικειμένου, όπως επίσης και του διακένου στη θέση συγκόλλησης, χρησιμοποιούνται διάφορα είδη



Σχήμα 13 Εγκάρσιες διατομές των αυχενικών κολλήσεων εκτελεσθέντων: α χειρωνακτικά με επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο, β με βυθιζόμενο τόξο.

υποστηριγμάτων και τρόποι στεγανοποίησης, που εξασφαλίζουν την μη εκροή του ρευστού μετάλλου *σχήμα 14*. Κατά την εκτέλεση αυχενικών κολλήσεων σε θέση τοίχου, δεν υπάρχει κίνδυνος εκροής του μετάλλου, αλλά αυτό έχει τάση για ανομοιόμορφη εναπόθεση, που είναι αποτέλεσμα της φυσιολογικής εκροής στην οριζόντια επιφάνεια. Επιπλέον, στο κατακόρυφο τοίχωμα, μπορεί να δημιουργηθούν υποκοπές *σχήμα 15*. Η εκτέλεση αυχενικών κολλήσεων μιας στρώσης, σε θέση τοίχου, περιορίζεται από το πάχος, το οποίο μπορεί να ανέρχεται μέχρι  $a=5[mm]-6[mm]$ , με τις ακόλουθες παραμέτρους:

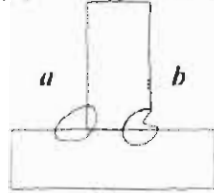


Σχήμα 14 Παραδείγματα διάφορων τρόπων στεγανοποίησης του διακένου, κατά την αυχενική συγκόλληση σε επίπεδη θέση.

ένταση ρεύματος  $600[A]-700[A]$ , τάση  $30[V]-32[V]$ , ταχύτητα συγκόλλησης  $25[m/h]-40[m/h]$ . Κατά τον καθορισμό των συνθηκών εκτέλεσης των αυχενικών

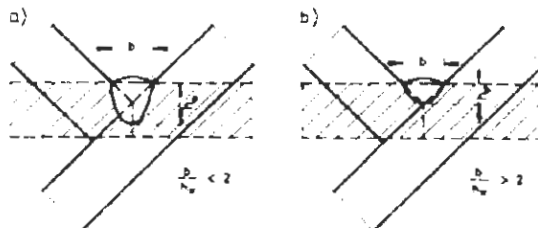
κολλήσεων, σε επίπεδη θέση, μπορεί να θεωρηθεί ως εκτέλεση μετωπικών κολλήσεων με γωνία  $90^\circ$ . Όλα αυτά αφορούσαν την επίδραση της λοξοτόμησης των άκρων των ελασμάτων για μορφή μετωπικής κόλλησης, που γίνεται αποδεκτό και για τις κολλήσεις σε επίπεδη θέση. Η αυχενική κόλληση μπορεί να θεωρηθεί ως μετωπική, στην οποία το πλάτος του αύλακα της λοξοτόμησης είναι ίσο με το πλάτος της κόλλησης **σχήμα 16**. Στις αυχενικές κολλήσεις, ο συντελεστής διαμόρφωσης, εκφραζόμενος με τη σχέση  $\frac{b}{h_*}$ , δεν μπορεί να

υπερβαίνει την τιμή του 2. Σε αντίθετη περίπτωση, προκύπτει κίνδυνος μη διεύθυνσης στη ρίζα καθώς και εμφάνισης υποκοπών, κατά μήκος των άκρων.



**Σχήμα 15** Ελαττωματική εναπόθεση της κόλλησης, κατά τη συγκόλληση σε θέση τοίχου: α) ανομοιόμορφη διεύθυνση, β) υποκοπές.

Με σκοπό την εξασφάλιση της σωστής εναπόθεσης της κόλλησης είναι απαραίτητο, για δεδομένο πλάτος της κόλλησης, η ποσότητα του λιωμένου εναποτιθέμενου υλικού να φτάσει για το γέμισμα της διατομής του αυχενικού αύλακα. Η βασική δυσκολία εκτέλεσης των αυχενικών κολλήσεων σε επίπεδη θέση συνίσταται στην ανάγκη διατήρησης της μορφής της κόλλησης, δηλαδή η σχέση  $\frac{b}{h_*} < 2$ .



**Σχήμα 16** Μορφές εγκάρσιων αυχενικών κολλήσεων, εκτελεσθέντων σε επίπεδη θέση α, β δύο τρόποι.

### 11.3 Τεχνολογία συγκόλλησης με βυθιζόμενο τόξο

#### 11.3.1 Κατασκευαστικοί ανθρακοχάλυβες και ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες λεπτά ελάσματα

Κατά τη συγκόλληση ελασμάτων κάτω από  $4[mm]$  παρουσιάζονται δυσκολίες. Τα λεπτά ελάσματα οπωσδήποτε επιβάλλεται να συγκαλούνται με προστατευτικά υποστηρίγματα. Οι παράμετροι συγκόλλησης επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο που η ένταση και η τάση του ρεύματος να έχουν μικρές τιμές. Η συγκόλληση διενεργείται με μεγάλη ταχύτητα χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια με μέγιστο πάχος  $2.0[mm]$ . Η συγκόλληση γίνεται με συνεχές ρεύμα, δίνοντας  $[+]$  στο ηλεκτρόδιο, χρησιμοποιείται συλλίπασμα με χοντρή κοκκομετρία.

### 11.3.2 Κατασκευαστικοί ανθρακοχάλυβες και ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες χοντρά ελάσματα

Η δυσκολία κατά τη συγκόλληση χάλυβων με μεγάλο πάχος καθιστά την ανομοιογένεια, ιδιαίτερα στην περίπτωση συγκόλλησης μη καθησυχασμένων και ημικαθησυχασμένων χάλυβων. Επιπλέον αυτού, υπάρχει και μεγάλη ευαισθησία για την εμφάνιση ρηγματώσεων, οι οποίες προξενούνται κατά τη συγκόλληση ελασμάτων μεγάλου πάχους που προκύπτει μεγάλο λουτρό ρευστού μετάλλου και αναλογικά μεγάλη συμμετοχή του μητρικού υλικού στο σχηματισμό της ρίζας. Για αυτό, ιδιαίτερα κατά την εναπόθεση κολλήσεων ρίζας πρέπει η συγκόλληση να γίνεται με υψηλότερη τάση  $U_s=38[V]-40[V]$  και με ένταση  $I_s<900[A]$  για ηλεκτρόδιο με διάμετρο  $5[mm]$  καθώς και για  $I_s<1000[A]$  για ηλεκτρόδιο με διάμετρο  $6[mm]$ . Το χρησιμοποιούμενο συλλίπασμα με κανονική κοκκομετρία.

### 11.3.3 Κραματωμένοι χάλυβες

Κατά τη συγκόλληση κραματωμένων χάλυβων με υψηλή αντοχή εμφανίζονται συχνά δυσκολίες, επειδή παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία για ρηγματώσεις στη ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά και στην κόλληση. Αυτό προκαλείται από τη μεγάλη περιεκτικότητα των κραματικών στοιχείων. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται η προθέρμανση ή ανόπτηση μετά τη συγκόλληση. Πρέπει επίσης να γίνεται προσπάθεια μείωσης της συμμετοχής του μητρικού μετάλλου στην κόλληση και επιπροσθέτως προσαγωγή κραματικών στοιχείων με μορφή *Mn* ή *Mo*. Οι κραματικές προσθήκες εισάγονται με ανάλογη επιλογή του σύρματος για τη συγκόλληση, ή με κατάλληλο συλλίπασμα.

### 11.3.4 Συγκόλληση χάλυβων ισχυρά κραματωμένων, ανοξειδωτων και οξύμαχων

Για τη συγκόλληση των χάλυβων ανοξειδωτων ή των οξύμαχων δεν απαιτείται μόνο η κατάλληλη μεγάλη αντοχή, αλλά επίσης η κόλληση να είναι απαλλαγμένη από ρηγματώσεις και πόρους. Απαιτούνται αυτές οι κολλήσεις να είναι ανθεκτικές στην περικρυσταλλική και στη γενική διάβρωση. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σύρματα με σταθεροποιητές *Nb* και *Ti*. Επιβάλλεται επίσης η χρησιμοποίηση συλλιπάσματος με χαμηλή περιεκτικότητα  $SiO_2$  και *MnO*. Κατά αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ανθεκτικότητα στην περικρυσταλλική διάβρωση, ενώ η οξείδωση του χρωμίου με τα ευρισκόμενα στο συλλίπασμα οξείδια μαγγανίου και πυριτίου καθώς και ο ακαθαρσίες στο λουτρό σημαντικά περιορίζονται. Η συγκόλληση αυτών των χάλυβων διενεργείται με συνεχές ρεύμα και με χαμηλότερη ένταση περίπου 80% της έντασης που χρησιμοποιείται για τους ανθρακοχάλυβες, χρησιμοποιώντας μικρό ελεύθερο άκρο του ηλεκτροδίου και μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης.

### 11.3.5 Αναγόμευση με βυθιζόμενο τόξο

Μεγάλη εφαρμογή στην πρακτική της συγκόλλησης βρήκε η αναγόμευση με βυθιζόμενο τόξο. Κατά κύριο λόγο εφαρμόζεται η αναγόμευση χάλυβων για



εξαρτήματα μηχανών και συσκευών που εκτίθενται σε μεγάλη εντατική φθορά. Τα εξαρτήματα αυτά μπορούν να εργάζονται σε κανονικές ή σε υψηλές θερμοκρασίες. Για την αναγόμευση χρησιμοποιούνται σύρματα από χάλυβες ελαφρά ή ισχυρά κραματωμένους. Σημαντικά επεκτείνεται η χρησιμοποίηση συρμάτων με πυρήνα σκόνης με ειδική σύσταση. Εισάγονται επίσης και μερικές προσθήκες κραμάτωσης στο συλλίπασμα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ταινίες ηλεκτροδίου, που αυξάνουν σημαντικά την απόδοση συγκόλλησης. Η αναγόμευση με βυθιζόμενο τόξο βρήκε πλατιά χρησιμοποίηση από την άποψη των ακολούθων πλεονεκτημάτων πολύ μεγάλη απόδοση της διαδικασίας μέχρι  $40[Kgr/h]$ , καλή ποιότητα της κόλλησης αναπλήρωσης, ομαλή και ομοιόμορφη η κόλληση αναπλήρωσης, συνεχόμενη η διαδικασία αναγόμευσης, δυνατότητα μηχανοποίησης και αυτοματισμού. Από την άποψη ότι για την αναγόμευση σχεδόν πάντοτε χρησιμοποιείται ισχυρά κραματωμένο υλικό και συλλίπασμα σε κραματικές προσθήκες, υπάρχει το ενδιαφέρον, για τη συμμετοχή του μητρικού υλικού στην κόλληση αναπλήρωσης να είναι το δυνατόν μικρή. Για το λόγο αυτό η αναγόμευση διενεργείται κατά το δυνατόν με χαμηλή ένταση και με υψηλή τάση. Χρησιμοποιούνται σύρματα ηλεκτροδίου με μεγάλη διάμετρο, με σχετικά χαμηλή ταχύτητα συγκόλλησης και με κατάλληλη κλίση του ηλεκτροδίου. Τα συλλιπάσματα πρέπει να έχουν χαρακτήρα αδρανή ή βασικό. Υπάρχουν επίσης δυνατότητες αύξησης της απόδοσης με τη χρησιμοποίηση αυτόματων πολλαπλών κεφαλών ή η αναγόμευση με ταινίες ηλεκτροδίου.

## Κεφάλαιο 12

### 12. Μη καταστρεπτικοί έλεγχοι συγκολλητών συνδέσεων

#### 12.1.1 Γενικός χαρακτηρισμός των μη καταστρεπτικών ελέγχων

Οι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι είναι έλεγχοι με τους οποίους επιτυγχάνονται πληροφορίες για τη φυσική κατάσταση των ελαττωμάτων και ιδιοτήτων του αντικειμένου υλικού, προϊόντος κατασκευής χωρίς την προξένηση μεταβολών στις ιδιότητες της χρήσης του. Οι έλεγχοι που έχουν ως σκοπό την ανίχνευση σφαλμάτων τύπου ασυνεχειών του υλικού ονομάζονται έλεγχοι ανίχνευσης ελαττωμάτων. Οι μη καταστρεπτικοί έλεγχοι διενεργούνται κυρίως με τις ακόλουθες μεθόδους: *ραδιογραφικές, ακουστικές, ηλεκτρομαγνητικές, διεισδυτικές*. Οι *ραδιογραφικές μέθοδοι* είναι μέθοδοι στις οποίες γίνεται η χρήση του φαινομένου που συνοδεύεται από την ιονίζουσα ακτινοβολία, κυρίως με *ακτινοβολία-Χ* και *γάμμα-γ*. Στις *ακουστικές μεθόδους* γίνεται η χρήση του φαινομένου που συνοδεύεται από τη διέγερση και τη διάδοση των μηχανικών ταλαντώσεων στα ελεγχόμενα αντικείμενα. Μεταξύ των ακουστικών μεθόδων διακρίνονται οι εξής μέθοδοι: *υπερηχητικοί, ακουστικής απορρόφησης, συντονισμού ταλαντώσεων*. Οι *υπερηχητικές μέθοδοι* είναι οι σημαντικότερες. Σ' αυτές γίνεται η χρήση του φαινομένου που συνοδεύεται από τη διάδοση των κυμάτων, με συχνότητα της τάξης των εκατοντάδων χιλιάδων και άνω [Hz]. Αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως για την ανίχνευση εσωτερικών ελαττωμάτων εξίσου σε μεταλλικά και μη μεταλλικά αντικείμενα. Με τις *ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους* γίνεται χρήση του φαινομένου συνοδευόμενου από τη διέγερση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο ελεγχόμενο αντικείμενο. Μεταξύ αυτών διακρίνονται οι *μαγνητικές* και οι *επαγωγικές (δινορρευμάτων)* μέθοδοι. Στις *μαγνητικές μεθόδους* γίνεται χρήση του φαινομένου διατάραξης του διεγερμένου μαγνητικού πεδίου με τις ασυνέχειες του υλικού. Στην περιοχή αυτών των ασυνεχειών δημιουργείται το λεγόμενο μαγνητικό πεδίο σκέδασης, ανιχνευόμενο με τη συγκέντρωση της μαγνητικής σκόνης - μέθοδος μαγνητικών σωματιδίων, με τη βοήθεια της μαγνητικής ταινίας ή με τη βοήθεια μετρητών μαγνητικών πεδίων. Με τις μαγνητικές μεθόδους ανιχνεύονται επιφανειακά και υποεπιφανειακά-εσωτερικά ελαττώματα σε αντικείμενα χαλύβδινα και μαγνητικών κραμάτων. Στις επαγωγικές μεθόδους γίνεται χρήση του φαινομένου συνοδευόμενου από την παρουσία των δινορρευμάτων-στρεφόμενων ρευμάτων, διεγερμένων στο ελεγχόμενο αντικείμενο με εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία. Τα ελαττώματα του υλικού επιδρούν στην ένταση και στη διανομή αυτών των ρευμάτων. Με κατάλληλη μέτρηση του δημιουργούμενου μαγνητικού πεδίου απ' αυτά επιτυγχάνονται πληροφορίες για την παρουσία, το μέγεθος και τη θέση των ελαττωμάτων καθώς και τη δομή του ελεγχόμενου υλικού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για τον εντοπισμό των επιφανειακών ρηγμάτων. Στις *διεισδυτικές (Penetrate)* γίνεται χρήση του φαινομένου διείσδυσης ιγρού σε ανοιχτά επιφανειακά διάκενα. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ανοιχτών επιφανειακών ελαττωμάτων σε αντικείμενα μεταλλικά, κεραμικά.

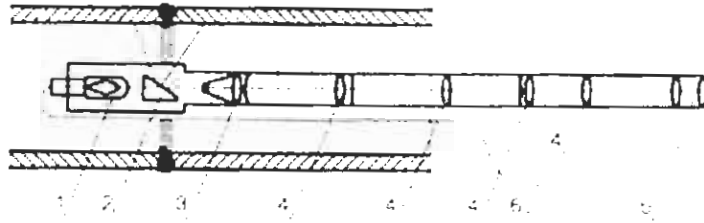
### 12.1.2 Οπτικός έλεγχος (Visual testing)

Ο οπτικός έλεγχος των εξωτερικών ατελειών και ελαττωμάτων των συγκολλήσεων είναι βασικός τρόπος ελέγχου, υποχρεωτικά εφαρμοζόμενος σε κάθε είδος κατασκευών. Ο έλεγχος αυτός συνίσταται στην παρατήρηση με πρότυπα και μετρήσεις των συγκολλήσεων, με σκοπό την εξακρίβωση εάν οι μορφές τους και οι διαστάσεις συμφωνούν με τις τεχνικές προδιαγραφές εκτέλεσης ή μήπως περιέχουν αυτές επιφανειακά σφάλματα. Πριν τον έλεγχο, η ραφή και το μητρικό υλικό που εφάπτεται σε αυτήν  $10[mm]-20[mm]$  από κάθε πλευρά καθαρίζονται με ακρίβεια από σκουριές, πιτσιλίσματα, χρώματα και άλλες ακαθαρσίες που δυσχεραίνουν τη διενέργεια της παρατήρησης και των μετρήσεων. Με τον οπτικό έλεγχο είναι δυνατόν να εξακριβωθούν οι ακόλουθες αστοχίες:

1. Οι παραμορφώσεις της κατασκευής στρέβλωση διαμήκης, εγκάρσια και ελικοειδής, η αλλαγή των ονομαστικών διαστάσεων της κατασκευής.
2. Οι λανθασμένες διαστάσεις των αυχενικών συγκολλήσεων: το πάχος, το μήκος του τμήματος της συγκόλλησης και του βήματος.
3. Το μη ορθό σχήμα της αυχενικής συγκόλλησης όπως η αρκετά μεγάλη κυρτότητα ή το μη ίσιο μέτωπο και το κρέμασμα του μετώπου καθώς και το ανόμοιο μήκος των πλευρών της κόλλησης (ανομοιομορφία).
4. Η κοιλότητα του μετώπου των μετωπικών συγκολλήσεων, η αρκετά μεγάλη ενίσχυση του μετώπου, το άπλωμα του μετώπου, οι υποκοπές του μετώπου, η μετατόπιση των άκρων [ψηλό-χαμηλό ( $F_0$ )].
5. Η έλλειψη διεisdύσης, η κοιλότητα στη ρίζα, οι υποκοπές της ρίζας και το κρέμασμα στις μονόπλευρες μετωπικές συγκολλήσεις.
6. Οι μη συγκολλημένοι κρατήρες, τα καψίματα, το πορώδες του μετώπου, τα ίχνη ανάμματος τόξου στο μητρικό υλικό και άλλες μηχανικές βλάβες στις μετωπικές και γωνιακές συνδέσεις.
7. Οι ρωγμές στην κόλληση ή στη ΖΕΘ τα σφάλματα αυτά είναι πολύ επικίνδυνα και γι' αυτό η βεβαιότητα για την ύπαρξη τους και η πορεία (το μήκος) πρέπει να καθορισθούν με ακρίβεια μ' έναν από τους ακόλουθους τρόπους: α) η οπτική αναγνώριση του ελαττωματικού τμήματος με μεγεθυντικό φακό, β) η λείανση και η προσβολή του ελαττωματικού τμήματος με 10% υδατικού διαλύματος αζωτούχου οξέος ή με αντιδραστήριο για το μακροσκοπικό έλεγχο, γ) με διεισδυτικούς ελέγχους, με πετρέλαιο ή με χρωματικό διεισδυτικό ή φθορικό.

Για τον έλεγχο των διαστάσεων των συγκολλήσεων χρησιμοποιούνται ειδικά όργανα μετρήσεων των κολλήσεων με τη μορφή προτύπου. Με το πρότυπο ελέγχεται μόνο το πάχος των αυχενικών κολλήσεων, ενώ το παχύμετρο χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του μεγέθους των κοιλωμάτων, των ενισχύσεων του ψηλού-χαμηλού, των μετωπικών κολλήσεων, του πάχους των αυχενικών κολλήσεων, τον έλεγχο των γωνιών λοξοτόμησης του αύλακα, τον έλεγχο του μεγέθους του διακένου του αυχένα του αύλακα. Για την αναγνώριση των εσωτερικών επιφανειών των σωλήνων και μικρών δοχείων με σκοπό την παρατήρηση της διεισδυτικής ποιότητας της ακμής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ενδοσκόπιο *σχήμα 1*. Τα μη επιτρεπτά ελαττώματα πρέπει να αφαιρούνται και οι κολλήσεις να επιδιορθώνονται πριν την παραλαβή ή πριν άλλων ελέγχων στη

συνέχεια ραδιογραφικοί, υπερηχητικοί.



*Σχήμα 1 Κατασκευή και χρησιμοποίηση του ενδοσκοπίου για την παρατήρηση της ρίζας περιφερειακής συγκόλλησης σωλήνα: 1 λυχνία φωτισμού, 2 πρίσμα, 3 κωνικός φακός, 4 ενδιάμεσοι φακοί, 5 ενδοσκόπιο, 6 ηλεκτραγωγός.*

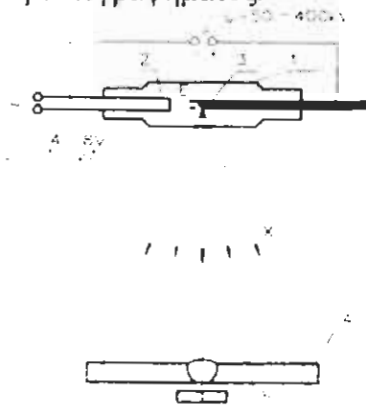
### 12.1.3 Ραδιογραφικός έλεγχος (Radiography testing) Φυσικές ιδιότητες-χαρακτηριστικά ραδιογραφικού ελέγχου

Ο ραδιογραφικός έλεγχος είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος ελέγχου: έγκειται στην εκτέλεση ραδιογραφμάτων-ακτινογραφιών ελεγχόμενων συγκολλητών συνδέσεων ή άλλων συμπαγών υλικών με ακτίνες-Χ (Röntgen) ή γάμμα-γ. Στη συνέχεια η περιγραφή των εντοπισμένων σφαλμάτων στα ραδιογραφήματα και η αξιολόγηση της ποιότητας της ελεγχόμενης συγκόλλησης. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην ικανότητα που διαθέτουν οι ακτίνες Χ και γ να διεισδύσουν σε μέταλλα και συμπαγή υλικά να δημιουργούν είδωλο του αντικειμένου πάνω στην επιφάνεια ενός ευαίσθητου φιλμ ή στην επιφάνεια μιας φθορίζουσας οθόνης. Η ολική διαμόρφωση της έντασης της ακτινοβολίας στην επιφάνεια μέτρησης σχηματίζει τη ραδιομετρική εικόνα (είδωλο) του ελεγχόμενου αντικειμένου. Η εικόνα αυτή εξαρτάται από την ενέργεια και την σκεδασμένη ένταση της ακτινοβολίας καθώς και τη σύνθεση του αντικειμένου. Η διαφορά της έντασης ακτινοβολίας στις γειτονικές περιοχές της ραδιομετρικής εικόνας ονομάζεται ραδιομετρική αντίθεση αντικειμένου. Η αντίθεση του αντικειμένου δεν επηρεάζεται από την έκθεση του φιλμ (χρόνος, *milliamper*, ισχύς πηγής), απόσταση έκθεσης και από την κατεργασία του φιλμ. Η αντίθεση του αντικειμένου της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Όσο αυξάνεται η τάση ή χρησιμοποιείται ισότοπο υψηλότερης ενέργειας, μειώνεται ο λόγος των εντάσεων των ακτινοβολιών που διαπερνούν διαφορετικές περιοχές του αντικειμένου. Με την έκθεση του φιλμ σε ακτινοβολία ομοιόμορφης έντασης παράγεται ραδιογραφία με ομοιόμορφη αμαύρωση. Η πρακτική της ανίχνευσης για το ραδιογραφικό έλεγχο έγκειται στο να: α) χρησιμοποιηθεί ακτινοβολία που να παρέχει μεγάλη ραδιομετρική αντίθεση των σφαλμάτων ως προς το υπόβαθρο, β) να ανιχνευθεί αυτή η αντίθεση κατά ευαίσθητο δυνατό τρόπο με κατάλληλο ανιχνευτή (*detector*). Ανάλογα με τον τρόπο ανίχνευσης της ακτινομετρικής αντίθεσης, διακρίνονται οι μέθοδοι: ραδιογραφική, φθοροσκοπική.

Η ραδιογραφική μέθοδος (ραδιογραφία) έγκειται στον τρόπο ανίχνευσης της ραδιομετρικής εικόνας ελεγχόμενου αντικειμένου με τη χρησιμοποίηση φιλμ κατάλληλης ευαισθησίας. Το αποτέλεσμα του ραδιογραφικού ελέγχου είναι το ραδιογράφημα, που αποτελεί την εμφανισμένο φιλμ το οποίο είναι ευαίσθητο στην ακτινοβολία και περιέχει τη ραδιογραφική εικόνα (ή ραδιογράφημα) του ελεγχόμενου αντικειμένου. Το πλεονέκτημα της ραδιογραφικής μεθόδου είναι ότι δίνει αποδεικτικό διαρκείας με τη μορφή του ραδιογραφήματος. Το μειονέκτημα

αυτής της μεθόδου είναι η αργοπορία. Η φθοροσκοπική μέθοδος συνίσταται στην ανίχνευση της ραδιομετρικής εικόνας σε φθορίζουσα οθόνη. Το πλεονέκτημα της φθοροσκοπίας είναι η δυνατότητα της τρέχουσας παρατήρησης της εικόνας του ελεγχόμενου αντικειμένου, ακόμη και κατά την κίνηση του. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί η κατώτερη ανιχνευσιμότητα των σφαλμάτων σε σύγκριση με τη ραδιογραφία.

**Γενικές αρχές ραδιογραφικού ελέγχου.** Κατά το ραδιογραφικό έλεγχο, το ελεγχόμενο αντικείμενο τοποθετείται ανάμεσα στην πηγή των **ακτινών-Χ** ή των **γάμμα-γ** και στο φιλμ **σχήμα 2**. Οι ακτίνες που διαπερνούν το αντικείμενο προξενούν την έκθεση του φιλμ σε βαθμό ο οποίος εξαρτάται από το μήκος της διαδρομής τους από το ελεγχόμενο υλικό. Στο εμφανισμένο φιλμ, τμήμα του αντικειμένου με μικρότερο πάχος αντιπροσωπεύεται με περιοχές μεγαλύτερης αμαύρωσης, ενώ τμήματα με μεγαλύτερα πάχη με περιοχές μικρότερης αμαύρωσης. Τα σφάλματα (ασυνέχειες υλικού) εμφανίζονται ως κηλίδες με μεγαλύτερη αμαύρωση από το τοπικό υπόβαθρο. Για να σμικρυνθεί ο χρόνος έκθεσης και έτσι να αυξηθεί η απόδοση του ελέγχου, χρησιμοποιούνται ενισχυτικές πλάκες. Αλατούχες (φθορισμού), οι οποίες με την επίδραση των **ακτινών-Χ** προκαλούν φθορισμό με ισχυρότερη έκθεση του φιλμ (σμικρύνουν το χρόνο ακτινοβολίας μέχρι 100 φορές), μεταλλικές και συγχρόνως την προφυλάσσουν από τη σκεδασμένη ακτινοβολία. Η χρήση ενισχυτικών πλακών καθώς και φιλμ υψηλής ευαισθησίας από μια άποψη είναι ωφέλιμη, για το λόγο ότι μειώνει το χρόνο ακτινοβολίας, από την άλλη όμως είναι επιβλαβές επειδή προξενείται μεγαλύτερη ενυπάρχουσα δυσκρίνεια-εσωτερική, που χειροτερεύει την ποιότητα-ανάγνωση του ραδιογραφήματος.

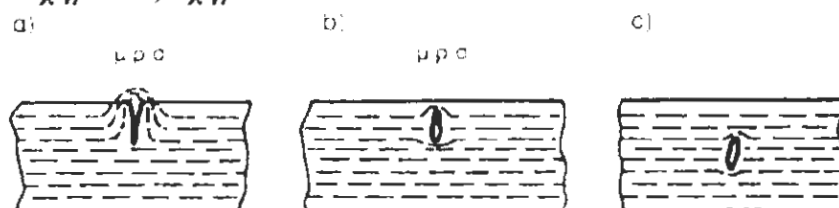


**Σχήμα 2** Λυχνία Röntgen και έλεγχος συγκολλητής σύνδεσης με ακτίνες-Χ: 1 περίβλημα της λυχνίας, 2 πυρωμένη κάθοδος (σπείρα από σύρμα βολφραμίου), 3 άνοδος (εστία λυχνίας), 4 ελεγχόμενη συγκολλητή σύνδεση, 5 κασέτα με φιλμ και ενισχυτική πλάκα.

#### 12.1.4 Ηλεκτρομαγνητικοί έλεγχοι (Electromagnetic testing)

Η βάση ανίχνευσης ελαττωμάτων με τους ηλεκτρομαγνητικούς ελέγχους είναι η δημιουργία μαγνητικού πεδίου στο ελεγχόμενο εξάρτημα καθώς και η ένδειξη των διαταραχών αυτού του πεδίου, ως συνέπεια των τοπικών μεταβολών διεισδυτικότητας στις θέσεις των ασυνεχειών και των ελαττωμάτων. Παρατηρώντας την πορεία των γραμμών των δυνάμεων του μαγνητικού πεδίου στο μαγνητισμένο αντικείμενο **σχήμα 3**, το οποίο έχει το ελάττωμα,

συμπεραίνεται ότι, το μεγαλύτερο τμήμα της γραμμής των δυνάμεων παρακάμπτει τα ελαττώματα και επιλέγει δρόμο από την υπόλοιπη τομή του αντικειμένου για αυτό στα άκρα του ελαττώματος συμβαίνει η συμπύκνωση των γραμμών των δυνάμεων. Ένα τμήμα γραμμών των δυνάμεων έχει τη δική του αρχική πορεία, επίσης δια του ελαττώματος, οι υπόλοιπες γραμμές των δυνάμεων συνήθως όχι πολλές παραμένουν σε κάποια απόσταση μπροστά από το ελάττωμα, με απόκλιση από την αρχική διεύθυνση και εξέρχονται στην επιφάνεια του αντικειμένου πλησίον του ελαττώματος, δημιουργώντας ζεύγος μαγνητικών πόλων. Το φαινόμενο αυτό ορίζεται ως μαγνητική ροή σκέδασης (μ.ρ.σ.) και μπορεί να παρατηρηθεί σε επιφανειακές ρηγματώσεις. Για να είναι ανιχνεύσιμη η ροή σκέδασης, το ελάττωμα πρέπει να βρίσκεται στην επιφάνεια ή κοντά στην επιφάνεια *σχήμα 3a*, *σχήμα 3b*.



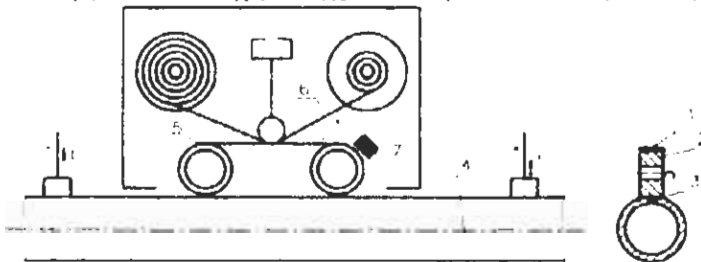
*Σχήμα 3* Μαγνητική ροή σκέδασης (μ.ρ.σ.) σε υλικό με επιφανειακό ελάττωμα *a*, και με υποεπιφανειακό ελάττωμα *b* και *c*.

Εάν το ελάττωμα βρίσκεται βαθιά, η σκευασμένη ροή δεν ανιχνεύεται *σχήμα 3c*. Η μαγνητική ροή σκέδασης είναι ανιχνεύσιμη, όταν το ελάττωμα σχηματίζει με τη διεύθυνση των γραμμών των δυνάμεων γωνία από  $45^\circ$  μέχρι  $90^\circ$ . Η ανίχνευση της σκεδασμένης ροής, άρα των ελαττωμάτων, διενεργείται, με τη μέθοδο των μαγνητικών σωματιδίων, με τη μαγνητογραφική μέθοδο.

**Μέθοδος με μαγνητικά σωματίδια (Magnetic particles).** Ο έλεγχος με μαγνητικά σωματίδια ανήκει στις πιο χρησιμοποιούμενες μεθόδους στην πρακτική των μη καταστρεπτικών μεθόδων ελέγχου. Η αρχή της μεθόδου είναι η ακόλουθη: στο μαγνητισμένο αντικείμενο εναποθέτουμε τη μαγνητική σκόνη, η οποία είναι ελκόμενη στις περιοχές των σκεδασμένων γραμμών των δυνάμεων του μαγνητικού πεδίου. Τα σωματίδια αυτής της σκόνης σχηματίζουν συγκεντρώσεις, ανάλογα με τις συνθήκες ελέγχου, τη γεωμετρία του ελαττώματος και τη σκέδαση της καθώς και με τη διεύθυνση της πορείας των γραμμών των δυνάμεων του μαγνητικού πεδίου. Η μέθοδος αυτή μπορεί να υλοποιηθεί με δύο τρόπους, με υγρό τρόπο, που συνίσταται στον ψεκάσμό (ή στη βύθιση) του αντικειμένου (στο οποίο διεγέρθηκε μαγνητικό πεδίο) με κατάλληλο

επιλεγμένο υγρό με φερρομαγνητική σκόνη, με ξηρό τρόπο, που συνίσταται στην άμεση εναπόθεση φερρομαγνητικής σκόνης στην επιφάνεια του ελεγχόμενου αντικειμένου. Ως φερρομαγνητική σκόνη κυρίως χρησιμοποιείται ο μαγνητίτης  $Fe_3O_4$  και  $Fe_2O_3$ , με μέγεθος κόκκων που δεν υπερβαίνει τα  $0.06[mm]$ . Συνήθως, για τους ελέγχους χρησιμοποιείται αραιοποιημένη σκόνη σε ορυκτέλαια ή σε πετρέλαιο. Με σκοπό την αύξηση της καθαρότητας της σύστασης των σωματιδίων της σκόνης, στις επιφάνειες των αντικειμένων με διάφορο χρωματισμό χρησιμοποιούνται χρωματιστές σκόνες. Όταν η σκόνη επικαλύπτεται με ειδική χρωματισμένη φθορίζουσα ουσία σε υπεριώδη φωτισμό, δίνει την καλύτερη ανιχνευσιμότητα των ελαττωμάτων. Στην περίπτωση χρησιμοποίησης σκονών που λίγο διαφέρουν από το χρώμα της ελεγχόμενης επιφάνειας, πρέπει αυτή προηγουμένως να καλυφθεί με λεπτό στρώμα που γρήγορα στεγνώνει, καλύτερα με λευκό χρώμα. Κατά την ξηρή μέθοδο η φερρομαγνητική σκόνη ψεκάζεται στην ελεγχόμενη επιφάνεια. Η ευαισθησία αυτής της μεθόδου είναι μικρότερη, αλλά το αντικείμενο δε λερώνεται. Αυτό είναι σημαντικό, ιδιαίτερα για την παραπέρα κατεργασία των αντικειμένων.

**Μαγνητογραφική μέθοδος.** Η μαγνητογραφική μέθοδος συνίσταται στη στερέωση του σκεδασμένου μαγνητικού πεδίου από το ελάττωμα στη μαγνητική ταινία (μαγνητοφωνική). Η εγγραφή της μαγνητικής ταινίας μεταφέρεται συνήθως με καθοδικό παλμογράφο, στον οποίο φαίνονται αντίστοιχοι φωτεινοί παλμοί. Η μέθοδος αυτή είναι αισθητά πιο ευαίσθητη από τη μέθοδο της μαγνητικής σκόνης. Εφαρμόζεται για το συνεχή αυτόματο έλεγχο της ποιότητας ράβδων, συγκολλητών με πίεση σωληνώσεων και άλλων συνδέσεων. Στο **σχήμα 4** φαίνεται συσκευή για το συνεχή έλεγχο κολλήσεων σε συγκολλητή σωλήνα.



**Σχήμα 4** Μαγνητογραφικός έλεγχος συγκολλήσεων: 1 ταινία, 2 ελαστικό, 3 κόλληση, 4 συγκολλητός σωλήνας, 5 στιγμιαίο αντίτυπο του πεδίου σκέδασης, 6 στερεό αντίτυπο του πεδίου σκέδασης, 7 κεφαλή εγγραφής.

## 12.2 Καταστρεπτικές μέθοδοι ελέγχου συγκολλητών συνδέσεων

### 12.2.1 Έλεγχος μηχανικών ιδιοτήτων

Οι δοκιμασίες διερεύνησης των μηχανικών ιδιοτήτων εφαρμόζονται για τον έλεγχο:

- των βασικών υλικών
- των πρόσθετων υλικών
- για την πιστοποίηση των χειριστών (συγκολλητών)
- των δοκιμαστικών συνδέσεων, πειραματικών, εκτελούμενων στα πλαίσια

σχεδιασμού επεξεργασίας νέων μεθόδων συγκόλλησης ειδικών τεχνολογιών, χρησιμοποίησης νέων υλικών της τελικής σύνδεσης συγκολλητών κατασκευών εκτελούμενων με: α) δοκίμια κομμένα άμεσα από την κατασκευή, που σπάνια διενεργείται, επειδή απαιτείται μερική καταστροφή της κατασκευής. β) δοκίμια επιλεγμένα από τις δοκιμαστικές συνδέσεις, συγκολλούμενες με τις ίδιες συνθήκες με τις οποίες ελέγχεται η κατασκευή. Οι τύποι των δοκιμαστικών συνδέσεων, οι διαστάσεις τους καθώς και τα είδη και ο επιλεγμένος απ' αυτές αριθμός δοκιμίων αντοχής καθορίζονται με αντίστοιχες προδιαγραφές ή κανονισμούς. Πριν την κοπή των δοκιμίων, επιβάλλεται οι συνδέσεις για δοκιμή να χαραχθούν και να σηματοδοθούν αντίστοιχα σ' αυτές ο αριθμός της κόλλησης, η σήμανση της κατασκευής, ο αριθμός του συγκολλητή (χειριστή), το σύμβολο της θέσης συγκόλλησης, ο αριθμός του ελεγκτή, όπως και στις διάφορες επίπεδες ζώνες τα απαραίτητα σύμβολα των τύπων των δοκιμίων **σχήμα 59**. Τα δοκίμια μπορούν να κόβονται με πριόνι ή με καυστήρα οξυγόνου - ασετιλίνης στην τελευταία περίπτωση μόνο οι μαλακοί ανθρακοχάλυβες που δε βράφονται. Τα κομμένα δοκίμια, στη συνέχεια, επεξεργάζονται μηχανικά κι έτσι, επιδέχονται τη δοκιμασία τους. Το σχήμα των δοκιμίων και οι τρόποι διενέργειας των δοκιμίων δίνονται σε αντίστοιχους κανονισμούς, οι οποίοι περιέχουν τους ακόλουθους τύπους δοκιμών: εφελκυσμό, κάμψη, κρουστική-δυσθραυστότητας, σπάσιμο-θραύση, σκληρότητα.

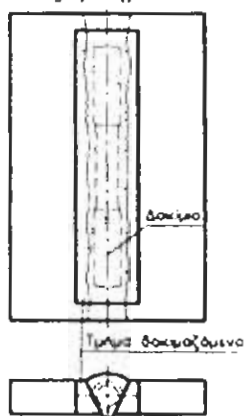
**Δοκιμή εφελκυσμού.** Στις συγκολλήσεις εφαρμόζονται τα ακόλουθα είδη στατικών δοκιμών εφελκυσμού: μετωπική επίπεδη δοκιμή ή σωλήνας, μετωπική σύνδεση ράβδων, κολλήσεων, εναποτιθέμενου υλικού-πρόσθετου υλικού, αυχενικών-γωνιακών συνδέσεων. Δοκιμή εφελκυσμού επίπεδης μετωπικής σύνδεσης. Για τη δοκιμή αυτή, προβλέπονται δύο τύποι δοκιμών: *δοκίμιο Α* για τον καθορισμό της αντοχής της σύνδεσης και *δοκίμιο Β* για τον καθορισμό της αντοχής της κόλλησης στη σύνδεση ως συνέπεια της στένωσης του δοκιμίου έχουμε τον εξαναγκασμό της θραύσης στην κόλληση. Το σχήμα και οι διαστάσεις αμφοτέρων των δοκιμών φαίνονται στο **σχήμα 60**. Κατά τη δοκιμή εφελκυσμού της σύνδεσης καθορίζεται μόνο η αντοχή στον εφελκυσμό, σύμφωνα με τον τύπο:

$$R_m = \frac{F_m}{k \cdot S_0} [MPa]$$

όπου:  $F_m$  μέγιστη δύναμη εφελκυσμού κατά τη δοκιμή [ $daN$ ],  $S_0$  αρχική διατομή του δοκιμίου [ $mm^2$ ], ( $S_0 = a_0 \cdot b_0$ ):  $k=1.0$  για τα δοκίμια τύπου Α, ανεξάρτητα από τον τύπο του μετάλλου,  $k=1.08$  για τα δοκίμια τύπου Β από κατασκευαστικό ανθρακοχάλυβα ή ελαφρά κραματωμένο χάλυβα. Δοκιμή εφελκυσμού περιφερειακής σύνδεσης σωλήνα ή στρογγυλών ράβδων. Για ράβδους, όπως και

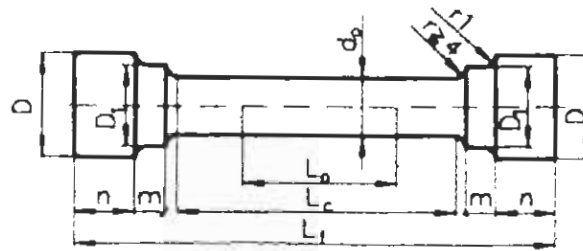


για σωλήνες, με διάμετρο εξωτερική  $D_{εξ} < 51[mm]$ , εκτελείται εφελκυσμός της σύνδεσης στην ολότητα, αφαιρώντας προηγουμένως την ενίσχυση του μετώπου σε όλη την περιφέρεια μέχρι το πάχος του υλικού. Για τις σωλήνες με εξωτερική διάμετρο  $D_{εξ} > 51[mm]$ , κόβεται από τη σύνδεση δοκίμιο ζώνης σύμφωνα με το **σχήμα 60**. Για ράβδους με διάμετρο  $D_{εξ} > 25[mm]$ , επιτρέπεται η εκτέλεση δοκιμίου με διάμετρο μέτρησης  $d_o < 25[mm]$  και μήκος στένωσης  $L_e = L_s + 2d_o > 40[mm]$ . Για τα παραπάνω δοκίμια δεν επιτρέπεται η αφαίρεση. Στην περίπτωση μετατόπισης των άκρων των συνδεόμενων ελασμάτων, με μέγεθος που δεν υπερβαίνει την επιτρεπόμενη αντοχή σύμφωνα με αντίστοιχες προδιαγραφές το δοκίμιο πρέπει να κατεργασθεί και από τις δύο πλευρές για το ίσιωμα και των δυο συνδεόμενων εξαρτημάτων.

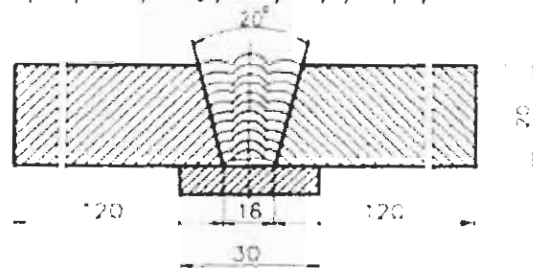


**Σχήμα 5** Επιλογή στρογγυλού δοκιμίου για τον έλεγχο της κόλλησης

**Δοκιμή εφελκυσμού της κόλλησης** όπως και όλες οι δοκιμές, διενεργείται σύμφωνα με τις κρατούσες προδιαγραφές (για τη χώρα μας *ASTM, DIN, ISO, IIW* και *ΕΛΟΤ*) σε δοκίμια κομμένα από μετωπικές ή αυχενικές συγκολλήσεις, με πάχος όχι μικρότερο από  $10[mm]$ . Ο τρόπος επιλογής του τμήματος δοκιμής από μετωπική συγκόλληση φαίνεται στο **σχήμα 5**. Από το τμήμα δοκιμής εκτελείται στρογγυλό δοκίμιο με πενταπλάσιο  $L_o = 5 \cdot d_o$ , διάμετρο  $d_o = 5[mm]$ ,  $d_o = 8[mm]$  ή  $d_o = 10[mm]$ . Η διάμετρος πρέπει να επιλεγεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, έτσι, όμως, ώστε το περίγραμμα της επιφάνειας της διατομής του τμήματος μέτρησης του δοκιμίου να μην εξέχει του περιγράμματος της κόλλησης. Τα ανωτέρω δοκίμια μπορούν να εκτελεσθούν ως δοκίμια με κεφαλές για τη συγκράτησή τους: με σιαγώνες, δακτυλίους, ή με σπείρωμα. Οι διαστάσεις των δοκιμίων με κεφαλές για τη συγκράτησή τους με δακτυλίους φαίνονται στο **σχήμα 6**. Η δοκιμή εφελκυσμού διενεργείται σε δύο τουλάχιστον δοκίμια, καθορίζοντας την  $R_m$ ,  $R_{e, A_5}$  και  $Z$ . **Δοκιμές εφελκυσμού εναποτιθέμενου υλικού** το εναποτιθέμενο υλικό προκύπτει από την αναγώμωση ή τη μετωπική συγκόλληση δοκιμαστικών πλακών, με τη συμμόρφωση προς τις συνθήκες συγκόλλησης, για δεδομένο είδος εναποτιθέμενου υλικού. Στο **σχήμα 7** φαίνεται ένας από τους τρόπους που προτείνεται από τους κανονισμούς *ISO*. Η δοκιμή εφελκυσμού του εναποτιθέμενου υλικού (η κόλληση) διενεργείται σε τρία τουλάχιστον στρογγυλά δοκίμια με διάμετρο  $d_o = 6[mm]$  ή σε δύο δοκίμια με διάμετρο  $d_o = 10[mm]$ , καθορίζοντας την  $R_m$ ,  $R_e$ , ή  $R_{0.2}$ ,  $A_5$  και  $Z$ .

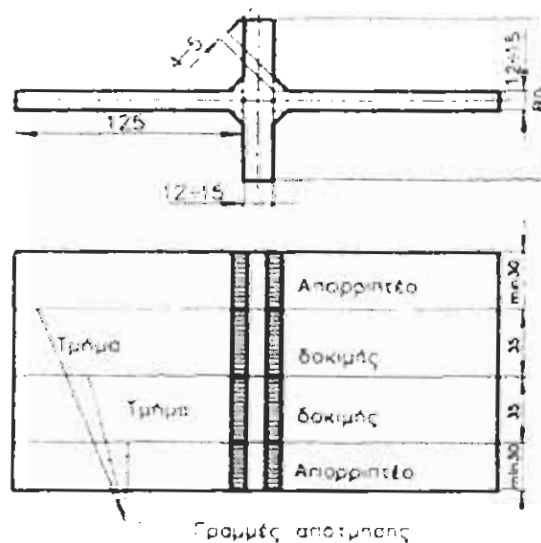


Σχήμα 6 Στρογγυλό δοκίμιο με κεφαλές για τη συγκράτηση των σε δακτυλίου

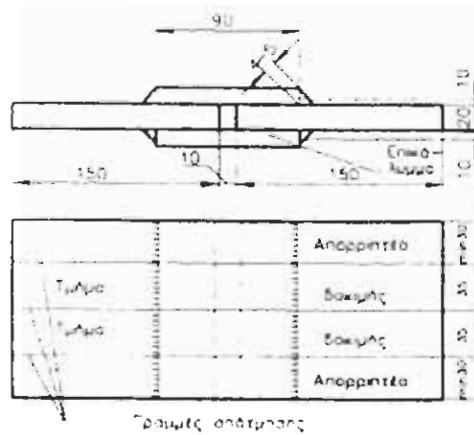


Σχήμα 7 Εγκάρσια διατομή πλάκας δοκιμής για τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων του εναποτιθέμενου υλικού

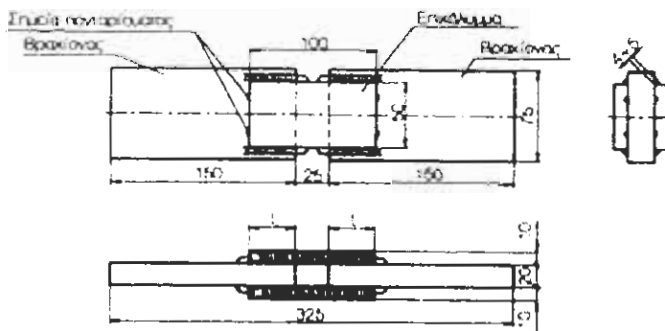
**Δοκιμές εφελκυσμού αυχενικών συγκολλήσεων:** α δοκιμή εφελκυσμού σταυρωτής σύνδεσης, β δοκιμή εφελκυσμού σύνδεσης επικάλυψης με εγκάρσιες κολλήσεις, γ δοκιμή εφελκυσμού σύνδεσης επικάλυψης με διαμήκεις κολλήσεις. Η μορφή και οι διαστάσεις των δοκιμαστικών συνδέσεων δίνονται στο *σχήμα 8*, *Σχήμα 9*, *Σχήμα 10*.



Σχήμα 8 Σταυρωτή σύνδεση δοκιμής



Σχήμα 9 Σύνδεση επικάλυψης δοκιμής με εγκάρσιες κολλήσεις



Σχήμα 10 Σύνδεση επικάλυψης δοκιμής με διαμήκεις κολλήσεις.

Για τα δοκίμια η αντοχή των κολλήσεων της σύνδεσης υπολογίζεται από τον

τύπο:  $R = \frac{2F_m}{\Sigma(a \cdot h)} [MPa]$  όπου:  $\Sigma(a \cdot h)$  άθροισμα των επιφανειών των διαμηκών

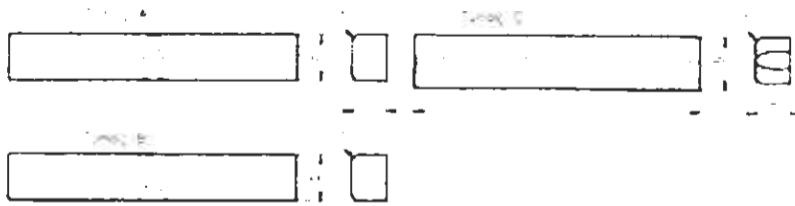
διατομών και των τεσσάρων κολλήσεων,  $[mm^2]$ . Για τα δοκίμια σύμφωνα με γ), η

αντοχή των κολλήσεων της σύνδεσης υπολογίζεται από τον τύπο:

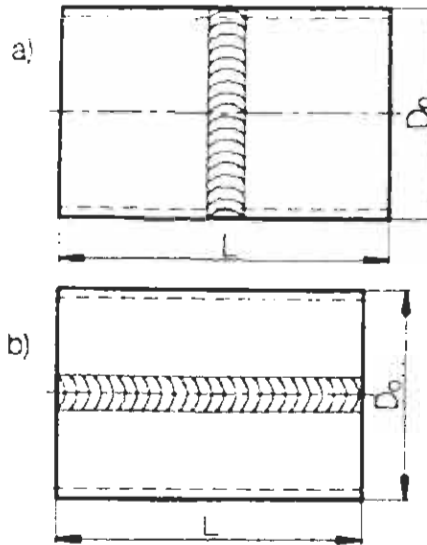
$R_m = \frac{F_m}{\frac{\Sigma a}{4} \cdot \frac{\Sigma l}{4}} [MPa]$  Όπου  $\Sigma a$  - άθροισμα όλων των παχών των κολλήσεων  $[mm]$ ,

$\Sigma l$  άθροισμα όλων των μηκών των 8 κολλήσεων,  $[mm]$

**Δοκιμή κάμψης.** Η δοκιμή κάμψης αποτελεί το μοναδικό τρόπο καθορισμού της ολκιμότητας της σύνδεσης στην ολόκληρη, από την άποψη ότι κατά τη δοκιμή εφελκυσμού της σύνδεσης δεν υπολογίζεται η επιμήκυνση  $A$ . Κατά τη δοκιμή κάμψης, τμήμα ινών του υλικού, ευρισκομένων στην αντίθετη πλευρά του εμβολέα κάμψης, έγκειται σε εφελκυσμό. Άρα στις συγκολλητές συνδέσεις, ανάλογα με τον τρόπο τοποθέτησης του δοκιμίου, η κάμψη μπορεί να διενεργείται με εφελκυσμό του μετώπου της κόλλησης ή αντίστροφα με εφελκυσμό της ρίζας. Οποιαδήποτε ελαττώματα συγκόλλησης, ιδιαίτερα τα ευρισκόμενα στην περιοχή του μετώπου και της ρίζας της κόλλησης, όπως υποκοπές,



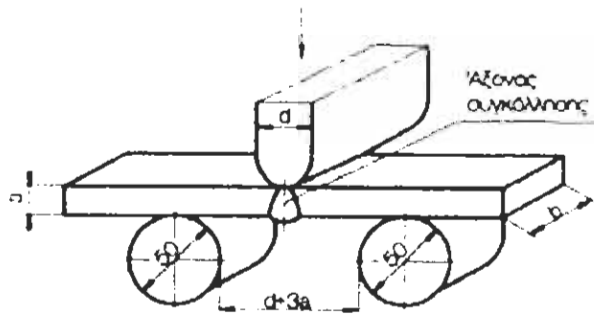
Σχήμα 11 Δοκίμια κάμψης μετωπικής επίπεδης σύνδεσης ή σωλήνα: ο τύπος A και B εγκάρσιοι, ο τύπος C διαμήκης



Σχήμα 12 Δοκίμιο κάμψης μετωπικής σύνδεσης ράβδου



Σχήμα 13 Δοκίμια πλάτυνσης μετωπικών συνδέσεων σωλήνων: α περιφερειακή συγκόλληση, β διαμήκης συγκόλληση.



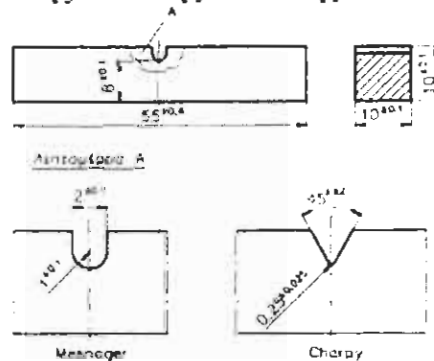
Σχήμα 14 Σχήμα κάμψης επίπεδου εγκάρσιου δοκιμίου.

ατελείς τήξεις και διεισδύσεις, λειτουργούν ως εγχοπές, προξενώντας την ταχεία θραύση των δοκιμίων. Γι' αυτό, η δοκιμή κάμψης δεν είναι δοκιμή μόνο της πλαστικότητας της σύνδεσης αλλά και της ποιότητας της εκτέλεσης. Οι δοκιμές κάμψης των μετωπικών επίπεδων συνδέσεων, σωλήνων και ράβδων με στρογγυλές διατομές διενεργούνται σε δοκίμια των οποίων οι τύποι και οι διαστάσεις φαίνονται στα σχήματα 67, σχήματα 68, σχήματα 69. Οι ενισχύσεις των κολλήσεων κατεργάζονται, όμως δεν πρέπει να αφαιρούνται εξωτερικά ελαττώματα τα οποία ελαττώνουν τη διατομή της κόλλησης. Τα διαμήκη άκρα

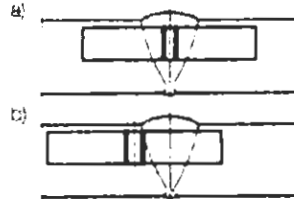
των δοκιμίων *A*, *B* και *C* από την εφελκόμενη πλευρά πρέπει να στρογγυλεύουν με ακτίνα  $r \sim 0.1$  του πάχους του δοκιμίου αλλά όχι μικρότερα από  $1[mm]$ . Η κάμψη του δοκιμίου αλλά όχι μικρότερη από  $1[mm]$ . Η κάμψη των δοκιμίων *A*, *B*, *C*, Ο διενεργείται στη συσκευή του **σχήματος 70**, για την επίτευξη της επιθυμητής γωνίας κάμψης ή την εμφάνιση ρηγματώσης στην επιφάνεια.

**Δοκιμή κρούσης –δυσθραυστότητας.** Στις συγκολλήσεις η δοκιμή κρούσης εφαρμόζεται για τον έλεγχο της δυσθραυστότητας των μετωπικών συνδέσεων και του εναποτιθέμενου υλικού.

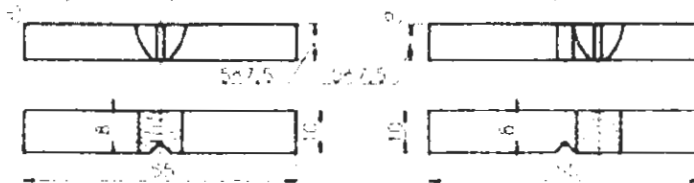
**Δοκιμή κρούσης μετωπικής επίπεδης σύνδεσης.** Για συνδέσεις με πάχος άνω



**Σχήμα 15** Μορφή και διαστάσεις δοκιμίου δυσθραυστότητας με εγκοπή



**Σχήμα 16** Επιλογή δοκιμίων δυσθραυστότητας από συνδέσεις με πάχος άνω των  $10[mm]$ , α για τον έλεγχο δυσθραυστότητας της κόλλησης, β για τον έλεγχο της μεταβατικής ζώνης

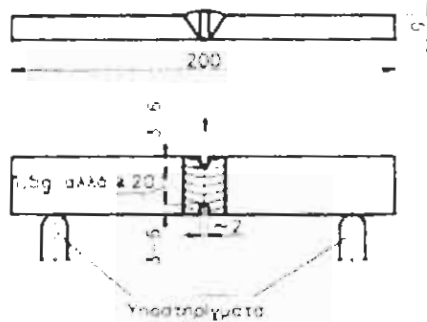


**Σχήμα 17** Δοκίμια δυσθραυστότητας συνδέσεων με πάχος  $5[mm]-10[mm]$  α)για τον έλεγχο της δυσθραυστότητας της κόλλησης, β) για τον έλεγχο της δυσθραυστότητας της μεταβατικής ζώνης

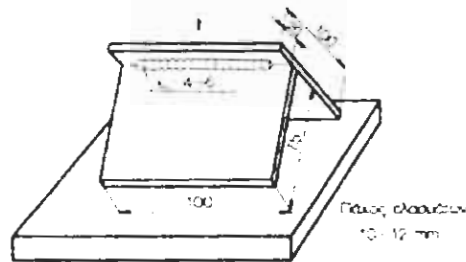
των  $10[mm]$ , οι διαστάσεις του δοκιμίου γίνονται αποδεκτές σύμφωνα με το **σχήμα 71**, ενώ οι θέσεις επιλογής σύμφωνα με το **Σχήμα 16**. Δοκιμή σε κρούση του εναποτιθέμενου υλικού. Αυτή διενεργείται σε δοκίμια με διαστάσεις όπως αυτές του **σχήματος 71**, επιλεγμένα από κολλήσεις αναγόμωσης ή από δοκιμαστικές συνδέσεις, εκτελεσμένες σύμφωνα με τα **σχήματα 73**.

**Δοκιμή σπασίματος-θραύσης.** Η δοκιμή σπασίματος είναι απλή τεχνολογική δοκιμή και συνίσταται στο σπάσιμο του δοκιμίου στην κόλληση, με σκοπό τον έλεγχο του θραύσματος. Η οπτική παρατήρηση του θραύσματος της κόλλησης γίνεται με γυμνό οφθαλμό ή με φακό μεγέθυνσης. Με βάση την παρατήρηση μπορεί να διαπιστωθεί η παρουσία εσωτερικών ελαττωμάτων, όπως ατελείς διεισδύσεις, πόροι, σκουριές, ρωγμές, ατελείς τήξεις, καψίματα και

υπερθερμάνσεις. Επί πλέον, μπορούν να προσκομισθούν και κατατοπιστικές πληροφορίες για τις πλαστικές ιδιότητες της κόλλησης.

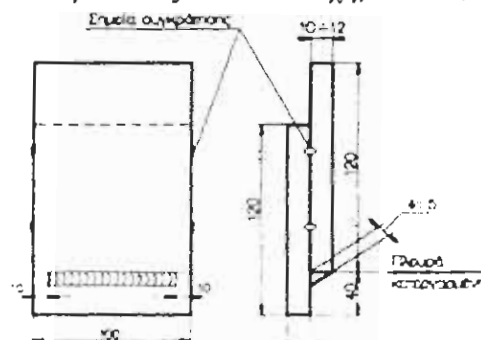


Σχήμα 18 Δοκιμασία σπασίματος (θραύσης) μετωπικής σύνδεσης



Σχήμα 19 Δοκιμασία σπασίματος (θραύσης) γωνιακής σύνδεσης

Όταν το σπάσιμο του δοκιμίου γίνει χωρίς ορατές παραμορφώσεις, ενώ η επιφάνεια του θραύσματος έχει γυαλιστερή όψη, κρυσταλλική, με χοντρούς κόκκους, αυτό φανερώνει ψαθυρότητα του υλικού, ενώ, εάν το θραύσμα είναι θαμπό, ινώδες, λεπτόκοκκο, τότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η κόλληση είναι όλκιμη. Οι δοκιμές σπασίματος διενεργούνται σε τρεις τύπους συνδέσεων: μετωπική επίπεδη με πάχος άνω των  $4\text{[mm]}$ , γωνιακή με αυχενική κόλληση και επικάλυψη με αυχενική κόλληση. Οι διαστάσεις και οι τρόποι σπασίματος των αναφερθέντων δοκιμίων παρουσιάζονται στα σχήματα 74, 75, 76.

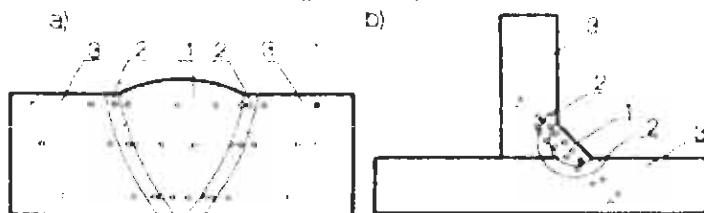


Σχήμα 20 Δοκιμασία σπασίματος / θραύσης σύνδεσης

**Δοκιμή σκληρότητας.** Οι συνηθέστερες χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ελέγχου σκληρότητας είναι: οι *Brinell (HB)*, *Vickers (HV)* και *Rockwell (HR)*. Στις συγκολλήσεις τη μεγαλύτερη εφαρμογή έχει η μέθοδος Vickers, επειδή μπορεί αυτή να εφαρμοσθεί σε στενές ζώνες και με πολύ διαφοροποιημένη σκληρότητα και, επίσης, για μικρές φορτίσεις κατά τον έλεγχο της λεγόμενης μικροσκληρότητας φορτίσεις της τάξης μερικών γραμμαρίων, ενώ συνήθως

εφαρμόζονται 10 και 30[gr]. Ο έλεγχος της σκληρότητας διεξάγεται στο εναποτιθέμενο υλικό και στη ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά.

**Δοκιμή σκληρότητας εναποτιθέμενου υλικού.** Αυτή διενεργείται σε δοκιμαστική πλάκα υποσυγκολλούμενη με αναγόμευση. Η αναγόμευση εκτελείται με το υπό έλεγχο εναποτιθέμενο υλικό και αποτελείται από τρεις τουλάχιστον στρώσεις. Στη συνέχεια, η επιφάνεια λειαίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το ελεγχόμενο επίπεδο να είναι παράλληλο προς τη δοκιμαστική πλάκα. Μετά ακολουθεί η εκτέλεση πέντε τουλάχιστον μετρήσεων, με έναν από τους παραπάνω τρόπους (HB, HV, ή HR). Δοκιμή σκληρότητας της σύνδεσης. Αυτή εκτελείται, με σκοπό τη μέτρηση των μεταβολών της σκληρότητας σε διάφορες θέσεις της σύνδεσης: στην κόλληση, στη ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά και στο μητρικό υλικό. Η δοκιμή της σκληρότητας διενεργείται σε εγκάρσια διατομή της σύνδεσης προσβεβλημένης προηγουμένως, για την αναγνώριση των συνόρων της κόλλησης και της ζώνης επηρεαζόμενης θερμικά για το σκοπό αυτό συνήθως γίνεται χρήση δοκιμίου προοριζομένου για το μεταλλογραφικό έλεγχο. Στην επιφάνεια του δοκιμίου που προσβλήθηκε κάθετα στην αξονική γραμμή συμμετρίας της εγκάρσιας διατομής της κόλλησης μεταφέρονται τουλάχιστον: τρεις γραμμές μέτρησης δύο κοντά στα άκρα του δοκιμίου και μία μεταξύ αυτών, για τις συνδέσεις με πάχος άνω των 15[mm], δύο γραμμές μέτρησης στο άκρο και στο κέντρο, για τις συνδέσεις με πάχος από 5-15[mm], μια γραμμή μέτρησης στο κέντρο, για τις συνδέσεις με πάχος μέχρι 5[mm]. Τα σημεία που τέμνονται από τις γραμμές μέτρησης και τις γραμμές σύντηξης σχηματίζουν τα αρχικά σημεία μετρήσεων έτσι, ώστε τουλάχιστον από κάθε δύο σημεία να βρίσκονται σε κάθε ζώνη της σύνδεσης, δηλαδή στην κόλληση 1, στις δύο ζώνες επηρεαζόμενες θερμικά 2 και στο μητρικό υλικό και από τις δύο πλευρές της σύνδεσης 3 **Σχήμα 21**. Οι μετρήσεις της σκληρότητας διεξάγονται με τη μέθοδο HB, HV, ή HR. Τα αποτελέσματα με μορφή πίνακα ή διαγράμματος, όπως και το σκίτσο των σημείων μέτρησης, αποτελούν τεκμήριο ελέγχου.



**Σχήμα 21** Σημεία μέτρησης σκληρότητας α) μετωπικής σύνδεσης  $g > 15[mm]$ , β) γωνιακής σύνδεσης  $g=5-15[mm]$

### 12.2.2 Μεταλλογραφικός έλεγχος

Στις συγκολλήσεις ο μεταλλογραφικός έλεγχος εφαρμόζεται για: τον έλεγχο των συνδέσεων πιστοποίησης των συγκολλητών-χειριστών, τον έλεγχο των δοκιμαστικών συνδέσεων, πειραματικών, που έχουν ως σκοπό τον καθορισμό, της τεχνολογίας και των παραμέτρων εκτέλεσης τους, την ανάλυση των ελαττωμάτων συγκόλλησης και των αιτιών δημιουργίας τους, τον καθορισμό των αιτιών της αβαρίας της κατασκευής, τον τελικό έλεγχο των συνδέσεων συγκολλητών κατασκευών σε δοκίμια οι οποίες εκτελέστηκαν κάτω από τις ίδιες συνθήκες που ελέγχεται η κατασκευή ή σε δοκίμια επιλεγμένα άμεσα από την ελεγχόμενη

κατασκευή (σπάνια εφαρμόζεται). Οι μεταλλογραφικοί έλεγχοι διαίρουνται σε: μακροσκοπικοί και μικροσκοπικοί.

**Μακροσκοπικός έλεγχος.** Ο μακροσκοπικός έλεγχος συνίσταται στην παρατήρηση με γυμνό οφθαλμό ή με φακό με μεγέθυνση μέχρι 20 φορές των καταλλήλως προετοιμασμένων δοκιμίων ή αντικειμένων. Προετοιμασία των δοκιμίων. Η επιφάνεια του δοκιμίου που κόβεται, προορισμένη για έλεγχο, επεξεργάζεται μηχανικά σε πλάνη ή σε φρέζομηχανή σε τέτοιο βάθος, ώστε να αφαιρεθούν οι ανωμαλίες που προέκυψαν από τη μηχανική κοπή ή να αφαιρεθεί το στρώμα αλλαγμένης δομής, εξαιτίας της επίδρασης της θερμότητας από τη θερμική κοπή με καυστήρα οξυγόνου - ασετιλίνης. Στη συνέχεια, το δοκίμιο λειαινείται σε δίσκο τριβής, προσέχοντας να μην υπερθερμανθεί η επιφάνεια και διαδοχικά με σμυριδόπανα ελαττωμένης κοκκομετρίας *nr 3, 2, 1, 0* ή *120, 240*. Η μακροσκοπική παρατήρηση περιλαμβάνει όλη τη συγκολλητή σύνδεση κόλληση, ζώνη σύντηξης, ζώνη επηρεαζόμενη θερμικά, μητρικό υλικό και επιτρέπει τον καθορισμό: του αρχικού χαρακτήρα κρυστάλλωσης, την ποιότητα σύντηξης του μετάλλου την κόλληση, το πλάτος της ζώνης επηρεαζόμενης θερμικά, τη δομή του μητρικού υλικού και τα μακρό ελαττώματα της. Ως αποδεικτικό της μακροσκοπικής παρατήρησης που διενεργείται είναι η εκτέλεση φωτογραφιών του δοκιμίου με ειδική φωτογραφική μηχανή, προσαρμοσμένη στο μεταλλογραφικό μικροσκόπιο μεγέθυνσης μέχρι 20 φορές

**Μικροσκοπικός έλεγχος.** Ο μικροσκοπικός έλεγχος συνίσταται στην παρατήρηση με το μεταλλογραφικό μικροσκόπιο καταλλήλως προετοιμασμένων δοκιμίων, με μεγέθυνση 50 φορές-2000 φορές ή μεγαλύτερη. **Προετοιμασία δοκιμίων.** Στην πρώτη φάση γίνεται όπως για τους μακροσκοπικούς ελέγχους. Μετά τη λείανση σε σμυριδόπανα με κοκκομετρία *3, 2, 1, 0* το δοκίμιο λειαινείται με όλο και με πιο ψιλά σμυριδόπανα με κοκκομετρία *2/0, 3/0, 4/0* και, ενδεχομένως, με *5/0* (άλλες αντιστοιχίες: *320, 400, 600* και *800*). Στη συνέχεια, το δοκίμιο στίλβνεται. Εφαρμόζονται τρία είδη στίλβωσης: μηχανική, ηλεκτρολυτική, χημική. Για τη φανέρωση της δομής προσβάλλεται το δοκίμιο με κατάλληλα αντιδραστήρια. Η μικροσκοπική παρατήρηση της συγκολλητής σύνδεσης επιτρέπει τον καθορισμό: του τύπου της δομής της κόλλησης, της ζώνης επηρεαζόμενης θερμικά και του μητρικού υλικού, του είδους εμφανιζόμενων δομικών στοιχείων, της διάταξης και του μεγέθους, όπως και των εμφανιζόμενων ελαττωμάτων στη συγκολλητή σύνδεση. Η αναγνώριση της δομής επιτρέπει τον καθορισμό μεταξύ άλλων: της προσεγγιστικής περιεκτικότητας του άνθρακα στο μητρικό υλικό και στα διάφορα τμήματα της χαλύβδινης συγκόλλησης (κόλλησης), των προσανατολιστικών μηχανικών ιδιοτήτων της κόλλησης, της ζώνης επηρεαζόμενης θερμικά και του μητρικού υλικού, τις προσεγγιστικές συνθήκες συγκόλλησης και την ταχύτητα στερεοποίησης της κόλλησης και της *ZEΘ*, του είδους θερμικής κατεργασίας που εφαρμόστηκε μετά τη συγκόλληση. Εμφανιζόμενα ελαττώματα στη συγκολλητή σύνδεση: μη μεταλλικά εγκλείσματα (καθορίζονται σε μη προσβεβλημένο δοκίμιο), οξειδία, αζίδια, θειικά, πυριτικά, μικροπόροι μικρορηγματώσεις (ενδοκρυσταλλικές ή περικρυσταλλικές), ατελείς τήξεις, καψίματα, χονδρόκοκκοι χαρακτηριστική κατάσταση του υπερθερμενόμενου χάλυβα, ανθρακοχάλυβες χαμηλού άνθρακα, με ψιλό περλίτη και βελονοειδή φερρίτη, που χαρακτηρίζει την κατάσταση χαλύβων ταχείας ψύξης, υποβαφή της κόλλησης και της ζώνης επηρεαζόμενης



θερμικά στους χάλυβες αυξημένης ποσότητας άνθρακα και στους κραματωμένους χάλυβες, γήρανση της κόλλησης και του μητρικού υλικού στους ανθρακοχάλυβες με χαμηλό άνθρακα, τους ημικαθησυχασμένους καθίζηση οξειδίων, αζιδίων και τριτογενούς σεμεντίτη, διαφορισμός δομικών στοιχείων τοπική εξανθράκωση ή ενανθράκωση, κάψιμο μερικών στοιχείων, καθίζηση επιβλαβών φάσεων, μείωση της ανθεκτικότητας στη διάβρωση των ωστενιτικών χαλύβων, εξαιτίας καθίζησης των καρβιδίων του χρωμίου στα σύνορα των κόκκων (ιδιαίτερα στη ΖΕΘ).

### 12.3 Χημικός έλεγχος

Ο χημικός έλεγχος περιλαμβάνει την εκτέλεση χημικών αναλύσεων του μητρικού υλικού ή της κόλλησης για ποσοστιαία περιεκτικότητα στοιχείων όπως: *C, Mn, Si, P, S* (για τους ανθρακοχάλυβες) και επιπροσθέτως: *Cr, Ni, Ti, Cn, V, W, Co* για τους κραματωμένους χάλυβες. Οι έλεγχοι αυτοί διενεργούνται κατά την παραλαβή ή τον έλεγχο χαλύβων για συγκολλητές κατασκευές (μεταξύ άλλων για τον καθορισμό της συγκολλητότητας καθώς και για την παραλαβή ή τον έλεγχο πρόσθετων υλικών ανάλυση του εναποτιθέμενου υλικού. Τα δοκίμια για τη χημική ανάλυση επιλέγονται με μορφή αποβλήτων (γρεζιών), συνήθως με διάτρηση του ελεγχόμενου εξαρτήματος της σύνδεσης (σπανιότερα με πλάνισμα ή τórνευση). Πριν τη διάτρηση η δεδομένη θέση πρέπει να καθαριστεί καλά από τις διάφορες ακαθαρσίες. Η ποσότητα των επιλεγμένων αποβλήτων για τους ανθρακοχάλυβες είναι τουλάχιστον 15 G ενώ για τους κραματωμένους 30 G. Οι αναλύσεις εκτελούνται από ειδικά χημικά εργαστήρια, σύμφωνα με τις μεθόδους που προβλέπονται από ανάλογες προδιαγραφές.

### 12.4 Έλεγχος στη διάβρωση

Οι έλεγχοι στη διάβρωση διενεργούνται για την εξακρίβωση της ανθεκτικότητας στην επιφανειακή διάβρωση ή στην περικρυσταλλική των συγκολλητών συνδέσεων, εκτελεσμένων συνήθως από ανοξειδωτους ή οξύμαχους χάλυβες. Ο έλεγχος στην επιφανειακή διάβρωση διενεργείται συνήθως με την τοποθέτηση δοκιμίων σε κατάλληλο αντιδραστήριο επιλεγμένο ανάλογα με το είδος του διαβρωτικού μέσου που έρχεται σε επαφή με τη δεδομένη κατασκευή σε καθορισμένη θερμοκρασία και σε σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα γενικά από 7-32 ημέρες. Από την απώλεια της μάζας των δοκιμίων μετά τη δοκιμασία, σε σχέση με τη μάζα τους πριν τη δοκιμασία ή με βάση την ελάττωση της εγκάρσιας διάστασης των δοκιμίων, είναι δυνατόν να προκύψει συμπέρασμα για την εντατικότητα της διάβρωσης, η οποία καθορίζεται ως μέση ταχύτητα διάβρωσης  $V$  εκφραζόμενη σε:

$$\left( \frac{G}{m^2 (24h)} \right), \left( \frac{mm}{\text{έτος}} \right)$$

Ο έλεγχος στην περικρυσταλλική διάβρωση διενεργείται συνήθως ως επιταχυνόμενος: α) σε διάλυμα θεικού οξέως σε κατάσταση βρασμού, με προσθήκη θεικού χαλκού 24-72[h] β) σε αζωτούχο συμπυκνωμένο διάλυμα σε κατάσταση βρασμού 24[h]. Η εκτίμηση για το βαθμό της περικρυσταλλικής διάβρωσης των ελεγχόμενων δοκιμίων σύμφωνα με τον τρόπο α) γίνεται με βάση τις δοκιμασίες σε κάμψη καθώς και με μικροσκοπικό έλεγχο στην εγκάρσια διατομή, ενώ η εκτίμηση

για το βαθμό διάβρωσης των ελεγχόμενων δοκιμίων στο διάλυμα β) γίνεται με βάση τη μέση ταχύτητα διάβρωσης  $V$  ή με βάση τη δοκιμασία κάμψης εάν η  $V > 36[\text{gr}/\text{m}^2]$  24ώρου ή τα δοκίμια θραύονται με γωνίες μικρότερες απ' ό,τι τα αρχικά δοκίμια, τότε ο χάλυβας θεωρείται μη ανθεκτικός στην περικρυσταλλική διάβρωση.

Μέρος δεύτερο

Εκπαιδευτική διδακτική  
εφαρμογή

## **Javascript**

Η Javascript είναι μια γλώσσα προγραμματισμού που προσφέρει αυξημένες δυνατότητες στους δημιουργούς των σελίδων του διαδικτύου. Τα περισσότερα κόμβο χρησιμοποιούν τη Javascript μόνον για αισθητικούς λόγους, αλλά το 'Προς την Επανάσταση' απαιτεί την Javascript και για την πλοήγηση, άρα πρέπει οπωσδήποτε να την ενεργοποιήσετε. Στον Netscape 4, πηγαίνετε στο μενού Edit, επιλέξτε Preferences, μετά Advanced, και βεβαιωθείτε ότι η επιλογή Enable Javascript είναι τσεκαρισμένη. (Και επί τη ευκαιρία τσεκάρτε και το Enable style sheets). Στον Internet Explorer 4 or 5, ανοίξτε το παράθυρο Internet options (από το μενού Tools στον IE5, ή από το μενού View στον IE4). Επιλέξτε Security και στη συνέχεια Custom. Κινηθείτε μέσα στη λίστα με τις επιλογές έως ότου βρείτε την επιλογή Scripting και την υποεπιλογή Active Scripting. Επιλέξτε Enable.

### **Τι είναι η Javascript**

Με τη Javascript, μπορούμε εύκολα να σχεδιάσουμε αμφίδρομες ή δυναμικές κατ' άλλους σελίδες για το WEB. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να σχεδιάσουμε σελίδες που ο χρήστης είναι σε θέση να επενεργεί ή και να πληροφορείται με βάση κάποιες παραμέτρους. Τις παραμέτρους αυτές συνήθως, τις βάζει ο σχεδιαστής της σελίδας. Αλλά η ανάδραση του χρήστη δε σημαίνει ότι έχουμε πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία. Το βασικότερο πλεονέκτημα της Javascript είναι η ευκολία παρουσίασης σελίδων προς το χρήστη, ο εμπλουτισμός των σελίδων με νέα στοιχεία κίνηση Από το, πρόσφατο, στατικό παρελθόν, τα πράγματα είναι πολύ καλύτερα. Μέσα από τα μαθήματα που παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες, θα δείτε τι - και κυρίως πως- δημιουργούμε αμφίδρομες σελίδες με τη Javascript.

### **Η Javascript δεν είναι Java**

Πολλοί πιστεύουν λανθασμένα ότι η Javascript είναι το ίδιο πράγμα με τη JAVA. Λάθος. Η JAVA είναι γλώσσα προγραμματισμού, που έχει τις ρίζες της στη C++ που όταν εκτελείται δημιουργεί εκτελέσιμα προγράμματα. Δηλαδή, με τη JAVA φτιάχνουμε προγράμματα, όπως αυτά που αγοράζουμε, τα οποία εκτελούνται στον υπολογιστή μας (όσοι έχετε φυλλομετρητή με δυνατότητα εκτέλεσης εφαρμογών Java, θα έχετε δει ότι γράφει στο κάτω μέρος του παραθύρου του «Running Java»). Αντίθετα, η Javascript είναι γλώσσα περιγραφής, κάτι παρόμοιο δηλαδή με την HTML, αλλά πολύ πιο δυνατή. Είναι επικίνδυνη η Javascript; Σαφώς κι η Javascript είναι επικίνδυνη, αλλά όχι τόσο όσο η Java. Εξάλλου οι κατασκευαστές της είχαν υπόψη τους και τον τομέα της ασφάλειας. Σίγουρα, αυτά που σας λέω εδώ δεν είναι μια πλήρης περιγραφή των διαφορών τους, αλλά νομίζω ότι είναι αρκετά. Εξάλλου μιλάμε απλώς για το γεγονός ότι είναι διαφορετικά πράγματα.

## Τρέχοντας τη Javascript

Αυτό που χρειάζεται για να τρέξουμε τη Javascript είναι ένας φυλλομετρητής (Browser) που να έχει τη δυνατότητα εκτέλεσης Javascripts. Δηλαδή, Netscape Navigator 2.x ή Internet Explorer 3.x και άνω. Οι εκδόσεις αυτών των φυλλομετρητών καλύπτουν πάνω από το 99% των χρηστών παγκοσμίως. Συνεπώς (θεωρητικά πάντα) όλοι μπορούν να δουν τις σελίδες μας που περιλαμβάνουν κώδικά Javascript. Βέβαια, είναι απαραίτητη η γνώση (έστω και τα βασικά) της HTML. Βέβαια, για να μπορέσετε να δείτε όλα τα νέα χαρακτηριστικά της Javascript, καλό είναι να έχετε τις νεώτερες εκδόσεις αυτών των φυλλομετρητών.

## Ενσωματώνοντας τη Javascript σε HTML αρχεία

Ο κώδικας της Javascript είτε ενσωματώνεται απευθείας στο αρχείο HTML, είτε τον έχουμε σε ξεχωριστό αρχείο και συνδέουμε το αρχείο Html με το αρχείο Javascript. Ας δούμε πρώτα πως ενσωματώνεται ο κώδικας στο αρχείο Html.

```
<HTML>  
<BODY>  
<BR>Αυτό είναι ένα κανονικό έγγραφο HTML  
<BR><Script Language="JavaScript">  
  document.write("This is JavaScript!")  
</Script>  
<BR>  
Ξανά στην HTML!  
<BR>  
</BODY>  
</HTML>
```

Δείτε το παράδειγμα σε εφαρμογή

Το παραπάνω μικρό αρχείο HTML θα μπορούσε να είναι ένα κανονικό αρχείο HTML. Η διαφορά του από τα αρχεία που ξέρετε, είναι το μπλε τμήμα. Αυτό είναι ένα μικρό κομμάτι από Javascript. Πρέπει να παραδεχτώ ότι, σε πρώτη ματιά αυτό το "πρόγραμμα" δεν είναι και πολύ χρήσιμο. Εξάλλου το ίδιο αποτέλεσμα θα είχαμε, αν απλώς γράφαμε HTML. Αυτό που είδαμε, ήταν ο τρόπος με τον οποίο ενημερώνουμε το φυλλομετρητή μας ότι ξεκινάει κώδικας Javascript. Πως το κάνουμε αυτό; Απλά γράφοντας <Script> Όπως φυσικά μαντέψατε με το </Script>, ενημερώνουμε το φυλλομετρητή μας ότι τελείωσε ο κώδικας Javascript. Στο ίδιο παράδειγμα βλέπουμε και μία πολύ χρήσιμη εντολή της Javascript, την: «document.write()». Την εντολή αυτή τη χρησιμοποιούμε για να ενημερώσουμε το «πρόγραμμα» ότι έχουμε να γράψουμε κάτι στο πραγματικό έγγραφο (στην προκειμένη περίπτωση, το HTML έγγραφο). Πως το γράφει; Είναι απλό, εκεί ακριβώς που βρίσκεται η εντολή. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να δημιουργήσουμε ολόκληρα έγγραφα από το μηδέν, όπως θα δούμε κι αργότερα. ΠΡΟΣΟΧΗ! ΔΕΝ είναι ίδιο το Document.Write() με το document.write(). Η Javascript ΕΙΝΑΙ case sensitive.

## Η Javascript σε ξεχωριστό αρχείο

Είναι απόλυτα λογικό να έχουμε τον κώδικα Javascript σε ένα ξεχωριστό αρχείο και να τον διαβάζουμε από εκεί. Σκεφτείτε μόνο αν θέλετε να ενσωματώσετε τον ίδιο κώδικα σε 50 σελίδες. Είναι λίγο κουραστικό να τον γράφετε τόσες φορές. Αλλά για να δούμε πως. Δεν είναι και πολύ δύσκολο. Απλά γράφουμε:

```
<Script Language="Javascript" Src="όνομα_αρχείου"></Script>
```

κάπου μέσα στο <Head>

Προσοχή μην ξεχάσετε το </Script>!!!

## Οι συναρτήσεις της Javascript

Οι συναρτήσεις χρησιμοποιούνται στα περισσότερα προγράμματα Javascript. Εντάξει, το ξέρω ότι δεν έχουμε χρησιμοποιήσει ακόμα συναρτήσεις, αλλά θα το κάνουμε σε λίγο. Οι συναρτήσεις είναι ένας τρόπος για να «χτίσουμε» πολλές εντολές μαζί. Ας δούμε ένα μικρό παράδειγμα: Θέλουμε, ας πούμε, να δούμε τι γίνεται όταν έχουμε να εκτελέσουμε πολλές εντολές μαζί. Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να υπολογίσουμε το άθροισμα 5 ακεραίων. Έχουμε δύο επιλογές. Ή θα γράψουμε 5 εντολές, ή θα γράψουμε μια συνάρτηση.

```
var int1=0;
```

```
var int2=0;
```

```
var int3=0;
```

```
var int4=0;
```

```
var int5=0;
```

```
var sum=0;
```

```
sum +=int1+int2+int3+int4+int5;
```

Ας δούμε όμως και τη δεύτερη επιλογή:

```
var int1=int2=int3=int4=int5=sum=0;
```

```
function adding()
```

```
{
```

```
for (i=0; i++; i<6)
```

```
sum += eval('int'+i)
```

```
}
```

Οι συναρτήσεις μοιάζουν πολύ με τις συναρτήσεις που έχουμε στη C/C++. Αυτό είναι μάλλον καλό. Δεν έχουμε να πούμε και πολλά ή όχι; Λοιπόν, για όσους δεν ξέρουν, οι συναρτήσεις στη C ορίζονται από τις αγκύλες αρχής: "{" και τέλους: "}". Οτιδήποτε γράφουμε μέσα στις αγκύλες είναι ο κώδικας της συνάρτησης. Μπορούμε να ορίσουμε μεταβλητές που θα χρησιμοποιεί η συνάρτηση και μόνο, να καλέσουμε άλλες συναρτήσεις κ.ο.κ. η ίδια η συνάρτηση ορίζεται από την απλή λέξη "function" και το όνομα της συνάρτησης (στο παράδειγμά μας adding). Μία απλή συνάρτηση που δεν έχει παραμέτρους πρέπει να έχει τις δύο παρενθέσεις: "()". Αν έχει παραμέτρους γράφουμε το όνομα των παραμέτρων. Προσοχή χρειάζεται ώστε να μην χρησιμοποιήσουμε δεσμευμένες λέξεις. **Οτιδήποτε** υπάρχει ανάμεσα στις αγκύλες εκτελείται κάθε φορά που καλούμε τη συνάρτηση. Αυτό είναι ένα πάρα πολύ απλό παράδειγμα συνάρτησης. Οι συναρτήσεις της Javascript είναι δυνατό να γίνουν εξαιρετικά πολύπλοκες. Το μόνο που μας

περιορίζει είναι η εμπειρία μας. Για να έχουμε καλά αποτέλεσμα, δεν αρκεί να έχουμε διαβάσει πέντε πράγματα για τη γλώσσα. Πρέπει να εξασκηθούμε καλά. Που σημαίνει πολλές ώρες δουλειάς.

## Η Ιεραρχία της Javascript

Η Javascript οργανώνει όλα τα στοιχεία σε μία σελίδα του WEB με βάση μία **ιεραρχία**. Κάθε στοιχείο εκλαμβάνεται ως αντικείμενο (με την έννοια του αντικειμένου, όπως στις αντικειμενοστραφείς γλώσσες προγραμματισμού). Δηλαδή, κάθε αντικείμενο έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και μεθόδους. Με τη βοήθεια της Javascript μπορούμε πολύ εύκολα να χειριστούμε τα αντικείμενα. Είναι πολύ σημαντικό να κατανοήσουμε πλήρως την ιεραρχία των αντικειμένων HTML. Ας δούμε ένα μικρό παράδειγμα:

```
<HTML>
<HEAD>
</HEAD>
<BODY BGCOLOR=#FFFFFF>
<CENTER>
<IMG SRC="home.gif" NAME="pic1" WIDTH=200 HEIGHT=100>
</CENTER>
</HEAD>
<FORM NAME="myForm">
NAME:
<INPUT TYPE="text" NAME="name" VALUE=""><BR>
e-Mail:
<INPUT TYPE="text" NAME="email" VALUE=""><BR><BR>
<INPUT TYPE="button" VALUE="Push me" name="myButton" onClick =
"alert('Yo')">
</FORM>
<IMG SRC="ruler.gif" NAME="pic4" WIDTH=300 HEIGHT=15>
<P>
<A HREF="../../index.htm">My homepage</A>
</CENTER>
</BODY>
</HTML>
```

Ας δούμε πως εμφανίζονται τα παραπάνω σε μία σελίδα του WEB:

Έχουμε 2 εικόνες, ένα δεσμό και μία φόρμα που περιλαμβάνει δύο πεδία κειμένου και ένα κουμπί. Για τη Javascript ένα παράθυρο του φυλλομετρητή είναι ένα **αντικείμενο παραθύρου** (window object). Ένα αντικείμενο παραθύρου περιλαμβάνει πολλά στοιχεία, όπως για παράδειγμα, τη μπάρα κατάστασης. Μέσα στο παράθυρο μπορούμε να εμφανίσουμε ένα έγγραφο HTML. Η σελίδα που είδαμε είναι ένα αντικείμενο παραθύρου. Αυτό σημαίνει ότι το αντικείμενο **document** (έγγραφο), αναπαριστά το αρχείο HTML το οποίο είναι φορτωμένο μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Το αντικείμενο *document* είναι ένα πολύ σημαντικό αντικείμενο στη Javascript. Ουσιαστικά, το χρησιμοποιούμε συνέχεια. **Ιδιότητες** ενός εγγράφου HTML είναι όλα τα χαρακτηριστικά του, όπως, για

παράδειγμα, το χρώμα του κειμένου. Αλλά πιο σημαντικό, είναι το γεγονός ότι **όλα τα αντικείμενα HTML είναι ιδιότητες του αντικειμένου document**. Ένα αντικείμενο HTML είναι, για παράδειγμα, ένας δεσμός, ή μία φόρμα. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να βρούμε πληροφορίες για τα διαφορετικά αντικείμενα και να τα χειριστούμε. Για να το καταφέρουμε αυτό πρέπει να ξέρουμε πως μπορούμε να αποκτήσουμε πρόσβαση στα δεδομένα των διαφορετικών αντικειμένων. Ας υποθέσουμε λοιπόν ότι θέλουμε να μάθουμε πως μπορούμε να καθορίσουμε τη διεύθυνση (να της δώσουμε ένα νούμερο) της πρώτης εικόνας που υπάρχει σε ένα έγγραφο. Ξεκινάμε από την κορυφή, που είναι, πάντα, το έγγραφο HTML. Το αντικείμενο αυτό λέγεται **document**. Η πρώτη εικόνα είναι η **images[0]**. Δηλαδή, η Javascript μπορεί να δει την πρώτη εικόνα ως το αντικείμενο **images[0]** του **document**. Άρα, (όπως και σε κάθε αντικειμενοστραφή γλώσσα) η προσπέλαση του αντικειμένου από τη Javascript θα γίνει με τη χρήση του **document.images[0]**. Ομοίως γίνεται η προσπέλαση και των υπολοίπων στοιχείων του εγγράφου. Για παράδειγμα, η προσπέλαση του πρώτου πεδίου κειμένου γίνεται με τη χρήση του **document.forms[0].element[0]**, της δεύτερης εικόνας με το **document.images[1]** κοκ. Η προσπέλαση του στοιχείου **element[0]** της φόρμας **form[0]**, απαιτεί πρώτα την προσπέλαση της αντίστοιχης φόρμας. Μέχρι στιγμής δεν έχουμε αναφέρει τις ιδιότητες των αντικειμένων. Αυτό μπορείτε να το δείτε από τις αναφορές της ίδιας της Netscape. Αν για παράδειγμα εμείς θέλουμε να δούμε τι έχει γράψει ο χρήστης στο πρώτο πεδίο κειμένου, μπορούμε να αποθηκεύσουμε το κείμενο σε μία μεταβλητή, έστω **value**. Δηλαδή θα έχουμε: **value = document.forms[0].elements[0].value;** Οπότε, όταν πλέον χρειαζόμαστε το κείμενο που έγραψε ο χρήστης στο πρώτο πεδίο κειμένου, θα χρησιμοποιούμε τη μεταβλητή **value**. Τα νούμερα είναι ελάχιστα βολικά, ακόμα και για μικρές σελίδες. Πόσο μάλλον για σελίδες που περιέχουν μεγάλο αριθμό αντικειμένων. Για να μη χανόμαστε, μπορούμε να δώσουμε **μοναδικά** ονόματα για κάθε διαφορετικό αντικείμενο. Πρέπει να δώσετε μεγάλη προσοχή στη μοναδικότητα του ονόματος. Αν υπάρχουν δύο αντικείμενα με το ίδιο όνομα, στην καλύτερη των περιπτώσεων δεν θα γίνει η προσπέλαση. Στη χειρότερη θα "κρεμάσει" το σύστημά σας. Στο παράδειγμά μας έχουμε γράψει:

```
<FORM NAME="myForm">
```

Name:

```
<INPUT TYPE="text" NAME="myname" VALUE=""><BR>
```

Δηλαδή, η **form[0]** έχει ονομαστεί **myForm**. Κι αντί για το **elements[0]**, μπορούμε πλέον να χρησιμοποιούμε το **myname**.

Δηλαδή, αντί να γράψουμε:

```
name=document.form[0].elements[0].value;
```

(ολόκληρο μακρινάρι!), μπορούμε να γράψουμε:

```
name= document.myForm.name.value;
```

Αρκετά πιο εύκολο, από όποια πλευρά κι αν το δούμε κι ειδικά σε μεγάλες σελίδες, ή σε σελίδες με πολλά αντικείμενα. Επαναλαμβάνω, ότι η Javascript είναι **CASE SENSITIVE**. Που σημαίνει ότι είναι διαφορετικό το **myform** από το **myForm**. Πολλά αντικείμενα της Javascript δεν μας απαγορεύουν να τους δώσουμε εμείς νέες τιμές. Για παράδειγμα μπορούμε να καθορίσουμε εμείς μια τιμή για το δεύτερο πεδίο κειμένου. Αρκεί να γράψουμε το εξής:



```

<input> tag:
<form name="myForm">
<input type="text" name="input" value="Anastasiou">
<input type="button" value="Write"
  onClick="document.myForm.input.value= 'YES'; ">
Ας δούμε όμως ένα μικρό παράδειγμα:
<html>
<head>
<title>Objects</title>
<script language="JavaScript">
<!-- hide
function first() {
// creates a popup window with the
// text which was entered into the text element
alert("The value of the textelement is: " +document.myForm.myText.value);
}
function second() {
// this function checks the state of the checkbox
var myString= "The checkbox is ";
// is checkbox checked or not?
if (document.myForm.myCheckbox.checked) myString+= "checked"
  else myString+= "not checked"
// output string
alert(myString);
}
// -->
</script>
</head>
<body bgcolor=lightblue>
<form name="myForm">
<input type="text" name="myText" value="bla bla bla">
<input type="button" name="button1" value="Button1"
  onClick="first()">
<br>
<input type="checkbox" name="myCheckbox" CHECKED>
<input type="button" name="button2" value="Button2"
  onClick="second()">
</form>
<p><br><br>
<script language="JavaScript">
<!-- hide
document.write("The background color is: ");
document.write(document.bgColor + "<br>");
document.write("The text on the second button is: ");
document.write(document.myForm.button2.value);
// --> </script>
</body> </html>

```

## Ένα τμήμα από την Άσκηση συγκόλλησης 1

```
<SCRIPT language=javascript>
function Back()
{
window.open('index.html','JavaScriptIt','top=100,left=100,width=400,height=300,
buttons=Yes,scrollbars=Yes,location=Yes,menubar=Yes,resizable=Yes,status=Yes
s,directories=Yes,toolbar=Yes,copyhistory=Yes,fullscreen')
}
function Help()
{
window.open('help.htm','JavaScriptIt','top=100,left=100,width=400,height=300,b
uttons=Yes,scrollbars=Yes,location=Yes,menubar=Yes,resizable=Yes,status=Yes
,directories=Yes,toolbar=Yes,copyhistory=Yes,fullscreen')
}
function Ergebnistran()
{
document.berechnung.anzeige19.value =
document.berechnung.anzeige19.value.replace(/,/,".");
var einheit = document.berechnung.anzeige20.selectedIndex;
var eingabe = document.berechnung.anzeige19.value;
var cm;
if (einheit=="")alert('Επιλέξτε μονάδα μέτρησης');
if (einheit==01)cm=0.1*eingabe;
if (cinheit==02)cm=1*eingabe;
if (einheit==03)cm=100*eingabe;
document.berechnung.anzeige1.value="" +cm +"";
if (einheit=="")Loeschentran();
}
function Loeschentran()
{
document.berechnung.anzeige19.value = "";
document.berechnung.anzeige20.selectedIndex = "";
document.berechnung.anzeige1.value = "";
}
function Ergebnistran1()
{
document.berechnung.anzeige21.value =
document.berechnung.anzeige21.value.replace(/,/,".");
var einheit = document.berechnung.anzeige22.selectedIndex;
var eingabe = document.berechnung.anzeige21.value;
var cm;
if (einheit=="")alert('Επιλέξτε μονάδα μέτρησης');
if (einheit==01)cm=0.1*eingabe;
if (einheit==02)cm=1*eingabe;
if (einheit==03)cm=100*eingabe;
document.berechnung.anzeige2.value="" +cm +"";
```

```

if (einheit=="")Loeschentran1();
}
function Loeschentran1()
{
document.berechnung.anzeige21.value = "";
document.berechnung.anzeige22.selectedIndex = "";
document.berechnung.anzeige2.value = "";
}
function Ergebnistran2()
{
document.berechnung.anzeige23.value =
document.berechnung.anzeige23.value.replace(/,/,".");
var einheit = document.berechnung.anzeige24.selectedIndex;
var eingabe = document.berechnung.anzeige23.value;
var cm;
if (einheit=="")alert('Επιλέξτε μονάδα μέτρησης');
if (einheit==01)cm=0.1*eingabe;
if (einheit==02)cm=1*eingabe;
if (einheit==03)cm=100*eingabe;
document.berechnung.anzeige3.value="" +cm+"";
if (einheit=="")Loeschentran2();
}
function Loeschentran2()
{
document.berechnung.anzeige23.value = "";
document.berechnung.anzeige24.selectedIndex = "";
document.berechnung.anzeige3.value = "";
}
function Ergebnistran3()
{
document.berechnung.anzeige25.value =
document.berechnung.anzeige25.value.replace(/,/,".");
var einheit = document.berechnung.anzeige26.selectedIndex;
var eingabe = document.berechnung.anzeige25.value;
var n;
if (einheit=="")alert('Επιλέξτε μονάδα μέτρησης');
if (einheit==1)n=eingabe;
if (einheit==2)n=eingabe*1000;
if (einheit==3)n=eingabe*0.00001;
if (einheit==4)n=eingabe*0.00980665;
if (einheit==5)n=eingabe*9.80665;
if (einheit==6)n=eingabe*9806.65;
if (einheit==7)n=eingabe*9806.65;
document.berechnung.anzeige4.value="" +n/9.80665+"";
if (einheit=="")Loeschen();
}
function Loeschentran3()

```

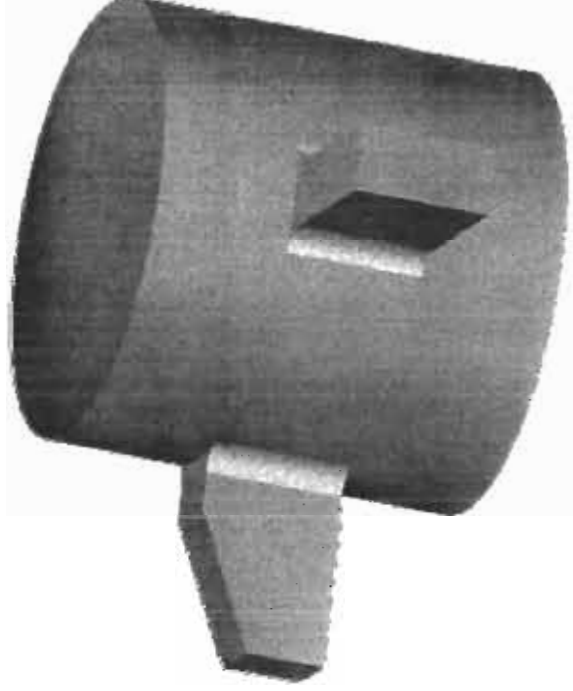
```

{
document.berechnung.anzeige25.value = "";
document.berechnung.anzeige26.selectedIndex = "";
document.berechnung.anzeige4.value = "";
}
function Ergebnis()
{
document.berechnung.anzeige1.value =
document.berechnung.anzeige1.value.replace(/,/,".");
var l= document.berechnung.anzeige1.value;
var d= document.berechnung.anzeige2.value;
var b= document.berechnung.anzeige3.value;
var Q= document.berechnung.anzeige4.value;
var S= document.berechnung.anzeige5.value;
var NN= document.berechnung.anzeige17.value;
if(S<=0)
{alert("Πρέπει Ssy>0");
Loeschen();
}
var s1=d/2;
var s3=2*b*(-d);
var s2=(b*b)/s3;
var s4=b*(-d);
var e=(l*(-b)-s2);
var T=e*Q;
var J1=((s3*s3*s3)/12)-((b*b*s4*s4)/s3);
var s5=b-s2;
var r1=(s1*s1)-((s5*s5));
var r2=Math.sqrt(r1);
var F=(T/J1)*r2;
var F1=(s5/r2)*F;
var F2=(s1/r2)*F1;
var F3=Q/(-(-b-b-d));
var F4=(F1)-(-F3);
var F5=F4*F4;
var F6=Math.sqrt((F2*F2)-(-F5));
var F7=(NN*F5)/(S*Math.sqrt(2));
document.berechnung.anzeige6.value = s2;
document.berechnung.anzeige7.value = s1;
document.berechnung.anzeige8.value = e;
document.berechnung.anzeige9.value = T;
document.berechnung.anzeige10.value = F3;
document.berechnung.anzeige11.value = J1;
document.berechnung.anzeige12.value = F;
document.berechnung.anzeige13.value = F1;
document.berechnung.anzeige14.value = F2;
document.berechnung.anzeige15.value = F5;

```

```
document.berechnung.anzeige18.value = F7;
```

```
if(s3<=0)
{alert("Πρέπει(2b+d)<0");
Loeschen();
}
}
function Loeschen()
{
document.berechnung.anzeige1.value = "";
document.berechnung.anzeige2.value = "";
document.berechnung.anzeige3.value = "";
document.berechnung.anzeige4.value = "";
document.berechnung.anzeige5.value = "";
document.berechnung.anzeige6.value = "";
document.berechnung.anzeige7.value = "";
document.berechnung.anzeige8.value = "";
document.berechnung.anzeige9.value = "";
document.berechnung.anzeige10.value = "";
document.berechnung.anzeige11.value = "";
document.berechnung.anzeige12.value = "";
document.berechnung.anzeige13.value = "";
document.berechnung.anzeige14.value = "";
document.berechnung.anzeige15.value = "";
document.berechnung.anzeige18.value = "";
}
</SCRIPT>
```



Εισαγωγή

Μήκος συγκόλλησης [ d ]	Μετατροπή	Άκυρο		100	Μονάδες ▾
					[ cm ]
Διατμητικό φορτίο [ P ]	Μετατροπή	Άκυρο		3	Μονάδες ▾
					[ Kp ]
Επιτρεπόμενη διατμητική τάση [ $\tau_{επ}$ ]	Μετατροπή	Άκυρο		990	[ Kp/cm <sup>2</sup> ]
Μεταβαλλόμενο διατμητικό φορτίο [ P <sub>1</sub> ]	Μετατροπή	Άκυρο		200	Μονάδες ▾
					Μονάδες ▾
[ P <sub>2</sub> ]	Μετατροπή	Άκυρο		1500	Μονάδες ▾
					Μονάδες ▾
[ S <sub>sy</sub> / N ]	Μετατροπή	Άκυρο		990	[ Kp/cm <sup>2</sup> ]
[ S <sub>se</sub> / N ]	Μετατροπή	Άκυρο		440	[ Kp/cm <sup>2</sup> ]

[ v ]

[ v<sub>1</sub> ]

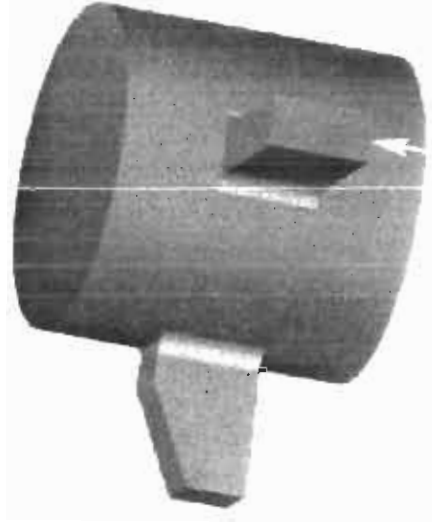
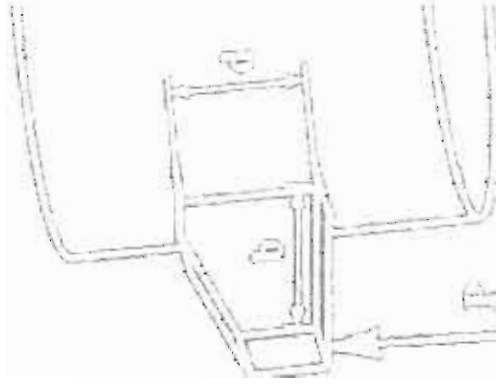
[ v<sub>2</sub> ]

0.8

0.35

0.5

Επίλυση	Άκυρο
---------	-------



Ο υπολογισμός θα γίνει σε διατήρηση  
(παραλείπουμε την κόμψη)

$$[ r' = P / (t \cdot d) ]$$

$$[ t = r' / v \cdot v_1 ]$$

Είναι [  $\tau_{επ} = \tau$  ]

$$[ t = P / (\tau_{επ} \cdot v \cdot v_1 \cdot d) ]$$

Πάχος συγκόλλησης [ t ]

$$[ P_m = (P_2 + P_1) / 2 ]$$

\_\_\_\_\_ [ Kp·cm<sup>2</sup> ]  
 \_\_\_\_\_ [ Kp/cm<sup>2</sup> ]

\_\_\_\_\_ [ cm ]  
 \_\_\_\_\_ [ mm ]  
 \_\_\_\_\_ [ Kp ]

$$[ \tau'_m = P_m / (t \cdot d) ]$$

$$[ \tau_m = \tau'_m / (v_1 \cdot v_2) ]$$

$$[ \tau'_r = P_r / (t \cdot d) ]$$

$$[ \tau_r = \tau'_r / (v_1 \cdot v_2) ]$$

Εφαρμόζοντας το κριτήριο Soderberg:

$$[ \tau_{eq} = \tau_m + \tau_r (S_{sy}/S_{se}) = (S_{sy}/N) ] \text{ όπου}$$

$$[ (S_{sy}/S_{se}) = (S_{sy}/N) / (S_{se}/N) ]$$

$$[ (S_{sy}/S_{se}) = (S_{sy}/N) / (S_{se}/N) ]$$

Πάχος συγκόλλησης [ t ]

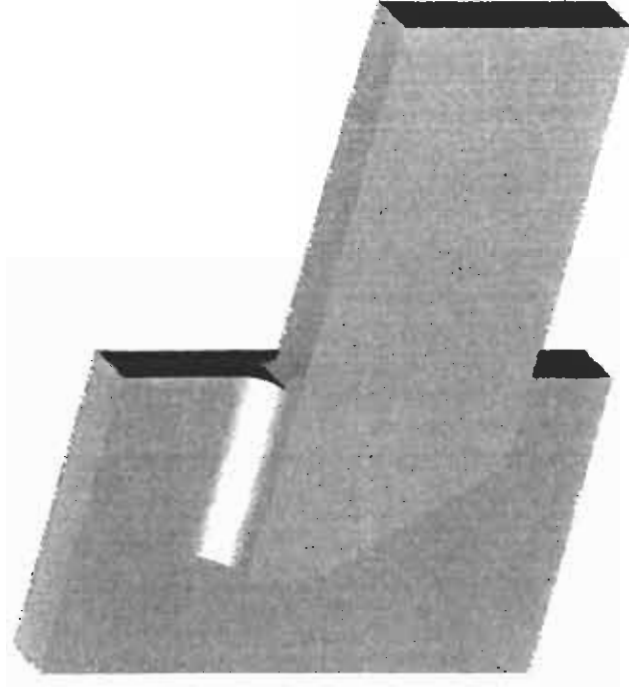
Μετατροπή

Πάχος συγκόλλησης [ t ]

- [ 1/1 ] [ Kp/cm<sup>2</sup> ]
- [ 1/1 ] [ Kp·cm<sup>2</sup> ]
- [ 1/1 ] [ Kp·cm<sup>2</sup> ]
- [ 1/1 ] [ Kp/cm<sup>2</sup> ]


	[ cm ]
	[ Μονάδες ]
	[ mm ]





Εισαγωγή

Μήκος προεξοχής [ e ]

Μονάδες ▾

100

Μετατροπή

Άκυρο

[ cm ]

Ύψος κόλλησης [ d ]

Μονάδες ▾

100

Μετατροπή

Άκυρο

[ cm ]

Μήκος κόλλησης [ b ]

Μονάδες ▾

120

Μετατροπή

Άκυρο

[ cm ]

Διατμητικό φορτίο [ P ]

Μονάδες ▾

5000

Μετατροπή

Άκυρο

[ Kp ]

Επιτρεπόμενη διατμητική τάση [  $\tau_{\text{επ}} = S_{sy} / N$  ][ Kp/cm<sup>2</sup> ]

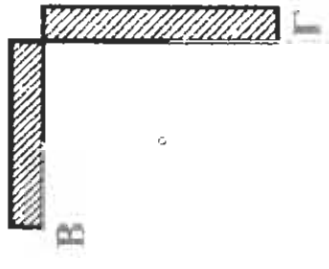
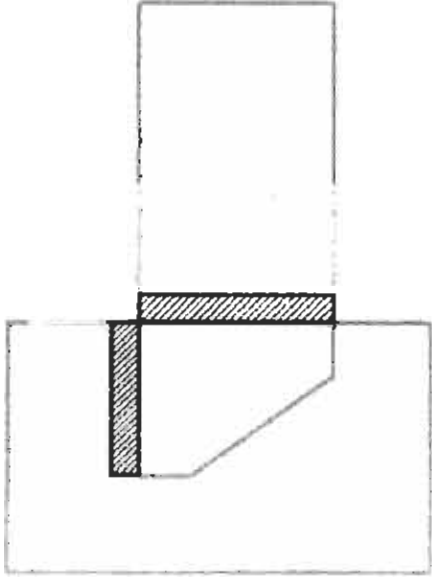
1100

Μετατροπή Άκυρο [ mm ]

[ v ]  
[ v<sub>1</sub> ]

0.8  
0.22

Επίλυση Άκυρο

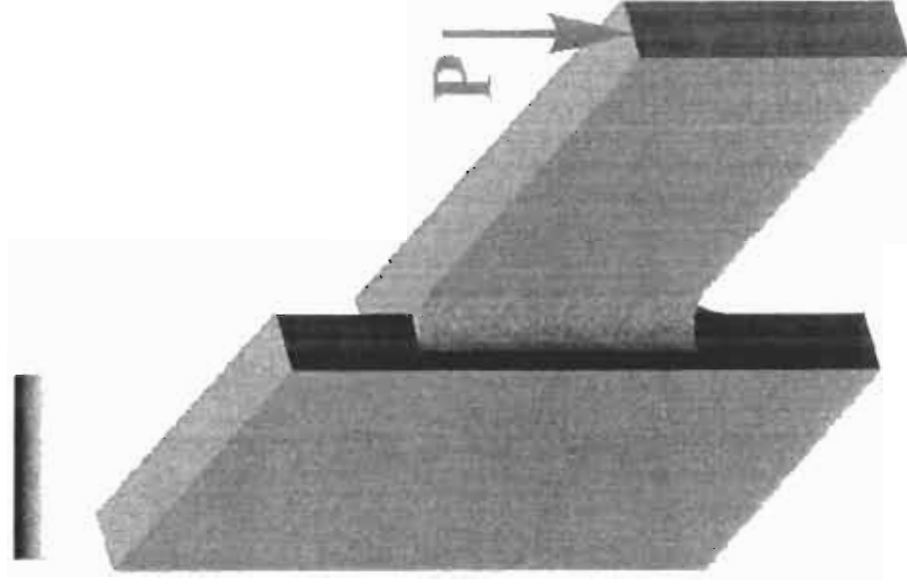


Αποτέλεσμα

[ cm ]  
[ cm ]  
[ cm ]  
[ cm ]  
[ cm ]  
[ cm ]

[  $x_1 = b/2$  ]  
[  $y_1 = b$  ]  
[  $x_2 = b$  ]  
[  $y_2 = d/2$  ]

Τεταγμένη κέντρου βάρους [  $G_x = (x_1 \cdot b + x_2 \cdot d) / (b + d)$  ]  
Τεταγμένη κέντρου βάρους [  $G_y = (y_1 \cdot b + y_2 \cdot d) / (b + d)$  ]



$$J_x = [l_1 \cdot t^3/12 + (l_1 \cdot t)(G_y + t/2)^2] + [t \cdot l_2^3/12 + (l_2 \cdot t)(l_2/2 - G_y)^2]$$

[ cm<sup>4</sup> ]

$$J_y = [l_2 \cdot t^3/12 + (l_2 \cdot t)(G_x + t/2)^2] + [t \cdot l_1^3/12 + (l_1 \cdot t)(l_1/2 - G_x)^2]$$

[ cm<sup>4</sup> ]

Στα σημεία Β και Γ υφίσταται η άρση ενάντια κατά την αξία

Η διαμορφωτική τάση στο Β έχει δύο συνιστώσες  $I_{yB}$ ,  $I_{xB}$

Η διαμορφωτική τάση στο Γ έχει δύο συνιστώσες  $I_{yG}$ ,  $I_{xG}$

Πολική ροπή αδράνειας [  $J_p = J'_x + J'_y$  ]

[ cm<sup>4</sup> ]

[  $v \cdot v_1$  ]

Για το σημείο B

$$[ \tau_{xB} = (T/Jp) \cdot G_v ]$$

$$[ \tau_{yB} = (Q/(b+d) \cdot t) - ((T/Jp) \cdot (b-G_x)) ]$$

$$[ \tau_B = (1/v \cdot v) \cdot \text{Sqrt}(\tau_{yB}^2 + \tau_{xB}^2) ]$$

Για το σημείο Γ

$$[ \tau_{x\Gamma} = (T/Jp) \cdot (d-G_y) ]$$

$$[ \tau_{y\Gamma} = (T/Jp) \cdot G_x + (P/((d+b) \cdot t)) ]$$

$$[ \tau_{\Gamma} = (1/v \cdot v) \cdot \text{Sqrt}(\tau_{y\Gamma}^2 + \tau_{x\Gamma}^2) ]$$

Το ονομαστικό μέγεθος της συγκόλλησης [  $S=t \cdot \text{Sqrt}(2)$  ]

[ Kp/cm<sup>2</sup> ]  
[ Kp/cm<sup>2</sup> ]  
[ Kp/cm<sup>2</sup> ]

[ Kp/cm<sup>2</sup> ]  
[ Kp/cm<sup>2</sup> ]  
[ Kp/cm<sup>2</sup> ]  
[ mm ]



## Εισαγωγή

Απόσταση [ e ]	Μετριοπή	Άκυρο	200	Μονάδες ▾ [ cm ]
Πάχος ραφής της συγκόλλησης [ a ]	Μετριοπή	Άκυρο	3	Μονάδες ▾ [ cm ]
Διάμετρος [ d ]	Μετριοπή	Άκυρο	40	Μονάδες ▾
[ S <sub>y</sub> ]	Μετριοπή	Άκυρο	2100	[ Kp/cm <sup>2</sup> ]
N			2	



### Αποτέλεσμα

Η συγκόλληση φορτίζεται εκκέντρα από την δύναμη  $[F]$ . Μεταφέρουμε τη δύναμη στο κέντρο βάρους της συγκόλλησης - το φορτίο μοιράζεται, αφού έχουμε δύο διατομές.

- Διαμητικό φορτίο  $[Q=F/2]$
- Στρεπτικό φορτίο  $[T=e \cdot F/2]$

Στρεπτικό φορτίο  $[T=e \cdot F/2]$

Βρίσκουμε τις ειδικές φορτίσεις  $[f_\delta]$  και  $[f_\sigma]$

Διαμητικό φορτίο  $[f_\delta = Q/\pi \cdot d]$

Στρεπτικό φορτίο  $[f_\sigma = (T/J_1) \cdot r]$

Αφαιρούμε τις  $[f_\delta]$  και  $[f_\sigma]$

$$[f_{total} = (f_\delta + f_\sigma)]$$

$$[S_{sy} = S_y / 2]$$

Για την αντοχή της συγκόλλησης έχουμε

$$[f_{total} = \tau \cdot \alpha \cdot \text{Sqrt}(2)] \text{ και } [f_{total} / (\alpha \cdot \text{Sqrt}(2)) < S_y / 2 \cdot N]$$

$$[f_{total} / (\alpha \cdot \text{Sqrt}(2)) = S_y / 2 \cdot N]$$



$$\underline{\hspace{2cm}} \quad [P] \quad [Kp \cdot cm]$$

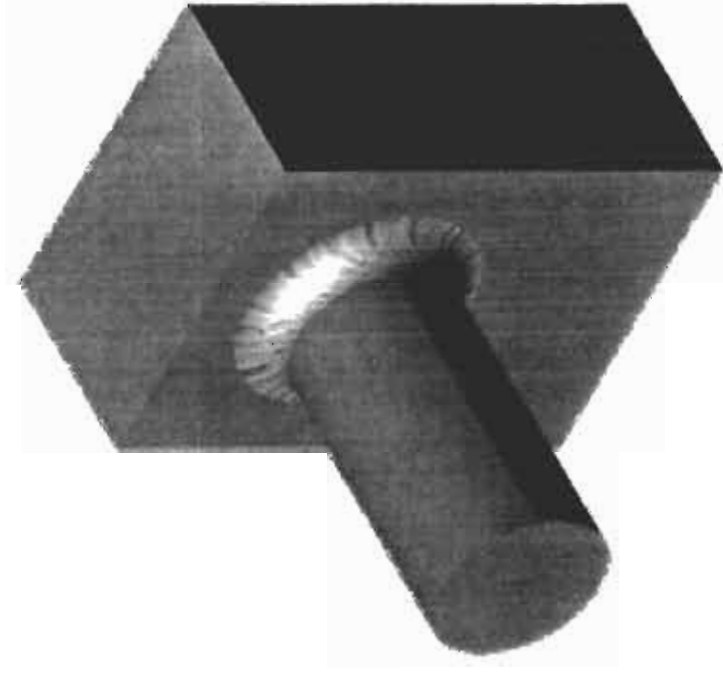
$$\underline{\hspace{2cm}} \quad [P] \quad [Kp/cm]$$

$$\underline{\hspace{2cm}} \quad [P] \quad [Kp/cm]$$

$$\underline{\hspace{2cm}} \quad [P] \quad [Kp/cm]$$

$$\underline{\hspace{2cm}} \quad [Kp/cm^2]$$

$$\underline{\hspace{2cm}} \quad [Kp]$$



## Εισαγωγή

Απόσταση [ e ]

200

Μονάδες ▾

Μετατροπή

Άκυρο

[ cm ]

Δύναμη [ Q ]

1000

Μονάδες ▾

Μετατροπή

Άκυρο

[ Kp ]

Διάμετρος [ d ]

60

Μονάδες ▾

Μετατροπή

Άκυρο

[ cm ]

[  $S_y$  ]

1100

[ Kp/cm<sup>2</sup> ]

$K_T / \nu \nu_1$

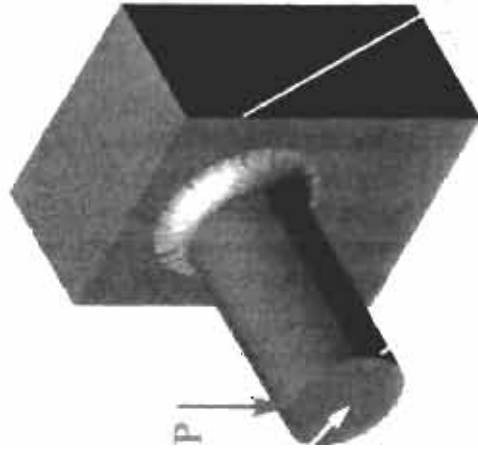
N

1.0

1.5

Επίλυση

Άκυρο



Αποτέλεσμα

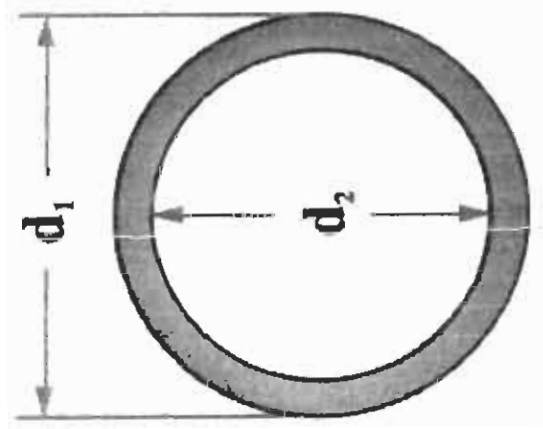
Η δύναμη  $[P]$  επιδρά έξω από το επίπεδο της ραφής συγκόλλησης. Μεταφέρουμε την δύναμη  $[P]$  στο επίπεδο της συγκόλλησης σαν διατμητική δύναμη  $[Q=P]$ .

**Καμπτική ροπή  $[M=e \cdot P]$**

Θεωρούμε την συγκόλληση σαν γραμμή οπότε από πίνακες βρίσκουμε την αναιμνη ροπή αντίστασης της διατομής της συγκόλλησης

[  $Kp \cdot cm$  ]





Επιφάνεια ραφής συγκόλλησης [  $A = \pi \cdot d^2/4$  ]

[  $\text{cm}^2$  ]

Βρίσκουμε τις ειδικές φορτίσεις που καταπονούν την συγκόλληση στο δυσμενέστερο σημείο (κορυφή ή βάση).

Ειδική φόρτιση λόγω διάτμησης [  $f_\delta = Q/\Sigma_{ij} = Q/\pi \cdot d$  ]

[  $\text{Kp/cm}$  ]

Ειδική φόρτιση λόγω κάμψης [  $f_y = M/A$  ]

[  $\text{Kp/cm}$  ]

Αφαιρίζοντας [  $f_\delta$  ] κα: [  $f_y$  ] διανυσματικά

Συνιστάμεντων [  $f_\delta$  ] κα: [  $f_y$  ] [  $f_{\text{total}} = \text{Sqrt}(f_\delta^2 + f_y^2)$  ]

[  $\text{Kp/cm}$  ]

[  $S_{sy} = S_y / 2$  ]

Για την αντοχή της συγκόλλησης

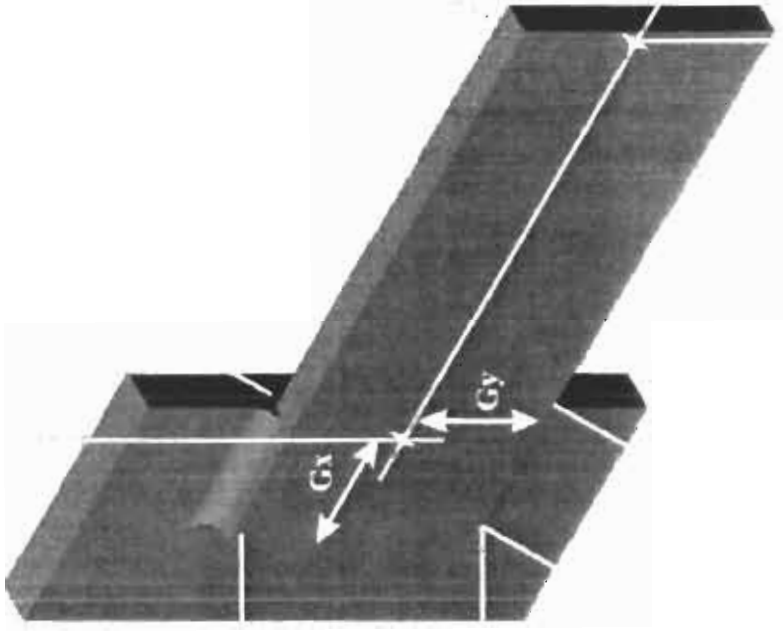
[  $f_{\text{total}} = \tau \cdot \alpha \cdot \text{Sqrt}(2)$  ] και [  $\tau = f_{\text{total}} \cdot \alpha \cdot \text{Sqrt}(2) < S_{sy} \cdot N$  ]

Πάχος συγκόλλησης [  $\alpha > f_{\text{total}} \cdot N / \text{Sqrt}(2) \cdot S_{sy}$  ]

[  $\text{cm}$  ]

Πάχος συγκόλλησης [  $\alpha > f_{\text{total}} \cdot N / \text{Sqrt}(2) \cdot S_{sy}$  ]

[  $\text{mm}$  ]



Εισαγωγή

Μήκος προεξοχής [ l ]

48

Μονάδες ▾

Μετατροπή

Άκυρο

[ cm ]

Ύψος κόλλησης [ d ]

24

Μονάδες ▾

Μετατροπή	Άκυρο	[ cm ]
Μετατροπή	Άκυρο	12 [Μονάδες ▾]
Μετατροπή	Άκυρο	5000 [ cm ]
Μετατροπή	Άκυρο	5000 [Μονάδες ▾]
Μετατροπή	Άκυρο	[ Kp ]
Μετατροπή	Άκυρο	1100 [ Kp/cm <sup>2</sup> ]
		1.0
		1.5
	Επίλυση	Άκυρο

Μήκος κόλλησης [ b ]

Διατμητικό φορτίο [ Q ]

Όριο ροής σε διάτμηση [  $S_{sy}$  ]

$K_f / v v_1$

N

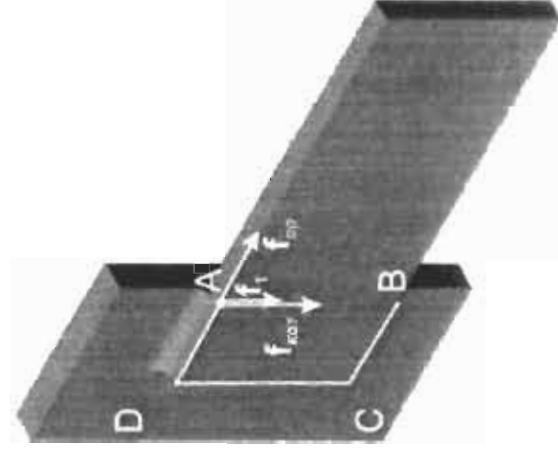
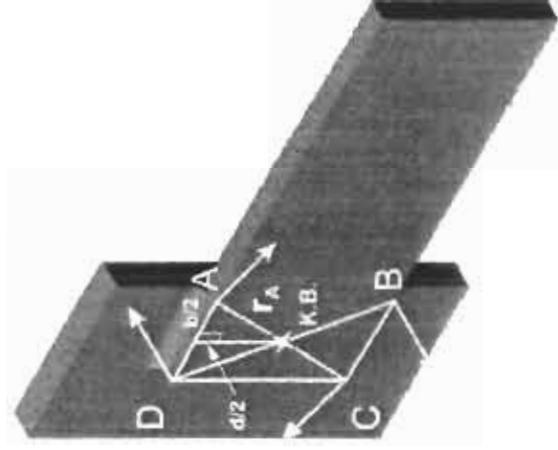
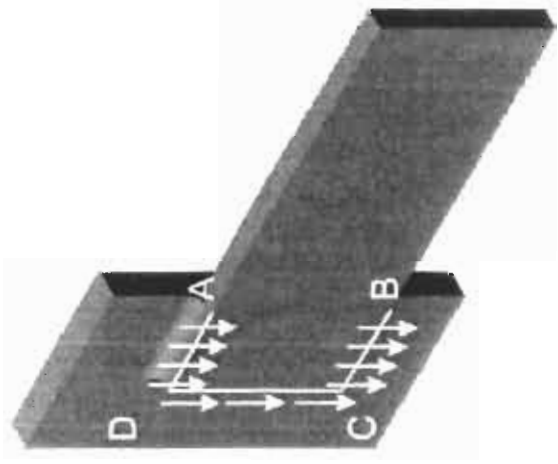
Αποτελέσματα

Βρίσκουμε το κέντρο βάρους της συγκόλλησης θεωρώντας την ως γράμμη λόγω συμμετρίας

Τεταγμένη κέντρου βάρους [ Gx ] =  $b^2 / (2b + d)$

Τετμημένη κέντρου βάρους [ Gy ] =  $d/2$

[ cm ]
[ cm ]



Μεταφέρουμε το φορτίο  $[Q]$  στο κέντρο βαρών της συγκολλητικής αψίδας, αναλυτικά σε:

Διαμητικό φορτίο  $[Q] = [P]$

- Στρέπτικο φορτίο  $[T]$

Οριζόντια απόσταση του κ.β. από τη εξέχουσα άκρη  $[e] = [b + l - Gx]$

Στρέπτικο φορτίο  $[T = e P]$

Ειδική φόρτιση λόγω διαμητικού φορτίου  $[f_1 = Q / \Sigma I_x]$

Ειδική φόρτιση λόγω στρέψης  $[J_1]$

Από το παραπάνω σχήμα συμπεραίνουμε ότι το μέγιστο φορτίο λόγω

στρέψης εμφανίζεται στο σημείο A  $\therefore [r = r_{max}]$

$[f = T/J_1 \cdot r_A]$

Αναλυσαμε την δύναμη  $[f]$  σε δύο συνιστώσες  $[f_x]$  και  $[f_y]$

\_\_\_\_\_ [ cm ]

\_\_\_\_\_ [Kp·cm]

\_\_\_\_\_ [ Kp/cm ]

\_\_\_\_\_ [ cm<sup>3</sup> ]

\_\_\_\_\_ [Kp·cm]

[Kp·cm]

$$[ f_y = f_1 \cdot (b - G_x) / \text{Sqrt}(b^2 + (b - G_x)^2) ]$$

$$[ f_x = f_1 \cdot (b) / \text{Sqrt}(b^2 + (b - G_x)^2) ]$$

Η συνιστάμενη ειδική φόρτιση για το σημείο A

$$[ f_{\text{total}} = \text{Sqrt}(f_x^2 + (f_y + f_1)^2)$$

Για την αντοχή της συγκόλλησης

$$\text{Sqrt}(2) \cdot \tau = f_{\text{total}} \quad \text{ή} \quad \text{Sqrt}(2) \cdot S_{xy} \cdot N$$

Πάχος συγκόλλησης [  $a > (N \cdot f_{\text{total}}) / (S_{xy} \cdot \text{Sqrt}(2))$  ]

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

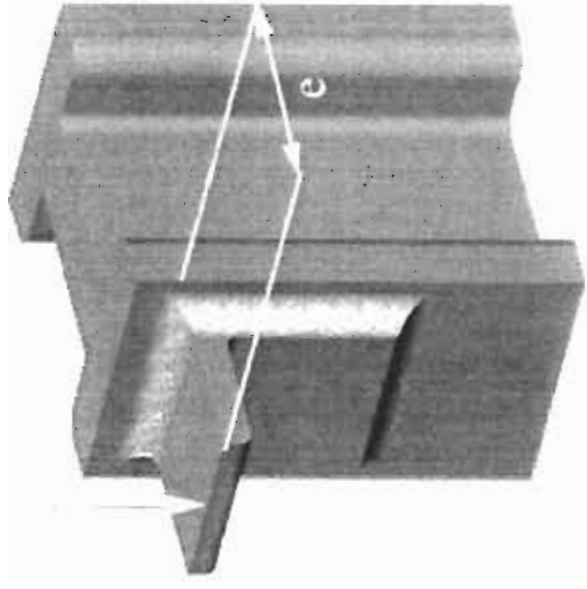
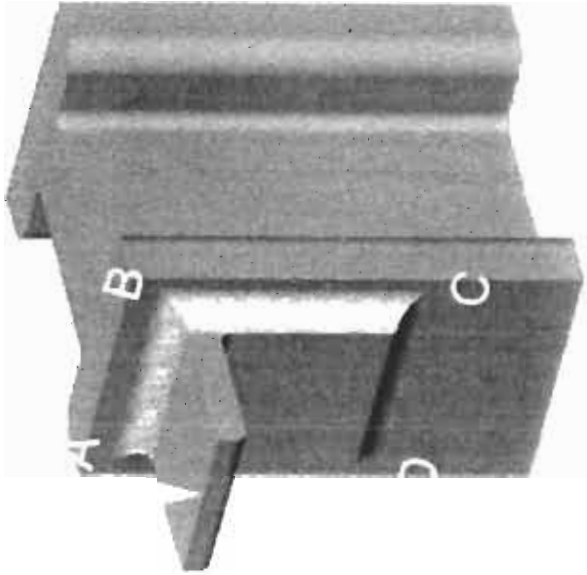
[ f<sub>total</sub> ]

\_\_\_\_\_

[Kp cm]

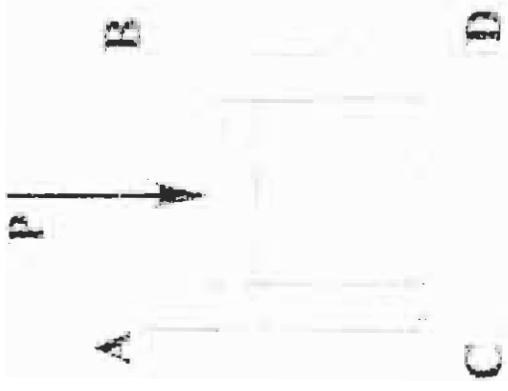
[Kp cm]

[ cm ]



Εισαγωγή

Μήκος ραφής συγκόλλησης [ b ] = [ AB ]	Μετατροπή	Άκυρο	<input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="Μονάδες"/>
				[ cm ]
Ύψος ραφής συγκόλλησης [ d ] = [ BC ]	Μετατροπή	Άκυρο	<input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="Μονάδες"/>
				[ cm ]
Μήκος προεξοχής [ e ]	Μετατροπή	Άκυρο	<input type="text" value="120"/>	<input type="text" value="Μονάδες"/>
				[ cm ]
Πάχος συγκόλλησης [ a ]	Μετατροπή	Άκυρο	<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="Μονάδες"/>
				[ cm ]
[ S <sub>y</sub> ]	Μετατροπή	Άκυρο	<input type="text" value="2400"/>	<input type="text" value="Κρ/cm&lt;sup&gt;2&lt;/sup&gt;"/>
[ ν ]				<input type="text" value="0.1"/>
[ ν <sub>1</sub> ]				<input type="text" value="0.32"/>
[ N ]				



## Αποτελεσμα

Το φορτίο επιδρά έξω από το επίπεδο της συγκόλλησης. Η διατμητική τάση εξαιτίας της μέγιστης δύναμης.

Άθροισμα εμβαδών συγκόλλησης [A]

Διατμητική τάση  $[\tau'] = Q / A$

$[\tau = \tau' / (v \cdot v_1)]$

Θρβή τάση  $[\sigma']$  λόγω της και ιπτικής ροπής  $[M]$

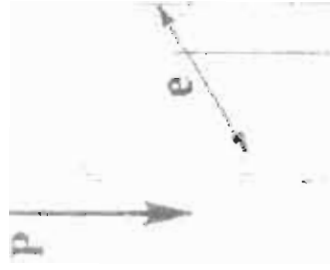
Καμπτική ροπή  $[M = e \cdot P]$

\_\_\_\_\_ [ cm<sup>2</sup> ]

\_\_\_\_\_ [ P ] [ Kp/cm<sup>2</sup> ]

\_\_\_\_\_ [ Kp/cm<sup>2</sup> ]

\_\_\_\_\_ [ Kp·cm ]



Ροπή αδράνειας της διατομής της ραφής [  $\text{cm}^4$  ]

Ροπή αδράνειας συμπαγούς διατομής

$$[J_w = B \cdot H^3 / 12]$$

Ροπή αδράνειας του κενού [  $J_w = (b \cdot h^3) / 12$  ]

Ροπή αδράνειας [  $J_x = (B \cdot H^3 - b \cdot h^3) / 12$  ]

Ορθή τάση [  $\sigma' = (M / J_x) \cdot \gamma_{\max}$  ]

Λόγω συγκόλλησης

$$[ \sigma = \sigma' / (v \cdot v_1) ]$$

Αρα η ισοδύναμη τάση σύμφωνα με το κριτήριο οστώχιας κατά I.S.O

$$\sigma_{\text{eq}} = \text{Sqrt}(\sigma^2 + 1.8 \cdot \tau^2) [ \text{Kp/cm}^2 ]$$

$$[ \sigma_{\text{eq}} = S_y / N ]$$

$$[ P_{\text{max}} ]$$

$$[ \text{cm}^4 ]$$

$$[ \text{cm}^4 ]$$

$$[ \text{cm}^4 ]$$

$$[ P ] [ \text{Kp/cm}^2 ]$$

$$[ \text{Kp/cm}^2 ]$$

$$[ P ] [ \text{Kp/cm}^2 ]$$

$$[ \text{Kp/cm}^2 ]$$

$$[ \text{Kp} ]$$



<http://www.cloos.de/>  
<http://www.dpma.de/>  
[http://www.ifs.ing.tu-bs.de/downloads/downloads\\_berichte.html](http://www.ifs.ing.tu-bs.de/downloads/downloads_berichte.html)  
<http://www.motoman.com/products/products.htm>  
[http://www.nil.nl/index\\_e.htm](http://www.nil.nl/index_e.htm)  
<http://www.sk-hameln.de/st0.htm>  
<http://www.arcmatic.com/>  
[http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band\\_3/ksokg001.html](http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/ksokg001.html)  
[http://iti.acns.nwu.edu/research/a\\_projects/esw.html](http://iti.acns.nwu.edu/research/a_projects/esw.html)  
<http://www.welding-direct.com/>  
<http://www.fanucrobotics.com/Products/PaintProducts.asp>  
<http://www.tungstenproducts.com/>  
<http://www.slv-duisburg.de/>  
<http://www.plasma-laser.com/>  
<http://www.plasmateam.com/ptaworld.htm>

Συγκολλήσεις Μετάλλων ISBN 9609123600

Στοιχεία Μηχανών Δ. Β. Κ. Βλαττας, Λυμένες ασκήσεις, Μεθοδολογία, Τυπολόγιο-Φούντας

**Άλλες Βιβλιογραφίες σχετικά με της συγκολλήσεις μετάλλων**

Συγκολλήσεις και Κοπές Μετάλλων  
*Science and Practice of Welding* ISBN 052143565  
*Science and Practice of Welding* ISBN 0521435668  
*Electroslag welding & surfacing*  
*Practical Welding* Gibson, S. ISBN 0333609573  
*Arc & gas welding*  
*Welding engineer's handbook* OATES  
*Welding and welding technology/ind* LITTLE  
*Welding theory and practice/ind/88* ISBN 0074515853  
*Modern Welding Technology* Cary, Howard B. ISBN 0132418037  
*Basic Welding and Fabrication* Kenyon, W. ISBN 0582005361  
*Handbook of welding/85* ISBN 0534010741  
*Welding Fundamentals* Jellison, Roger W. ISBN 0131071785  
*Principles of welding technology 2/ed/86* GOURD ISBN 0713136022  
*Principles of Welding Technology* Gourd, L. M. ISBN 0340613998  
*Welding: Principles and Applications* Jeffus, Larry etc. ISBN 0827350481  
*Art of Welding* Vause, W. A. ISBN 0852428464  
*Welding engineering/ind* AGARWAL  
*The Metals Blue Book Vol. 3: Welding Filler Metals, 2/ed./97* ISBN 0969642822  
*Automotive Welding Manual* Storer, Jay ISBN 1859602010  
*Welding: Skills and Technology* Smith, Dave ISBN 0070007578  
*Welding Codes, Standards and Specifications* Mouser, Jeffrey D. ISBN 0070435502  
*Advanced Welding* Gibson, Stuart W. ISBN 033365384X  
*Automating the Welding Process: Successful Implementation of Automated Welding Systems*  
 Berge, James M. ISBN 0831130512  
*Welding & Cutting: A Guide to Fusion Welding & Associated Cutting Processes*  
 Houldcroft, Peter T. ISBN 0831111844  
*Practical Welding Technology* Mohler, R. ISBN 0831111437  
*Laser Welding/99* DULEY ISBN 0471246794  
*Welding Fundamentals* Gellerman, Michael J. ISBN 0827359373  
*Handbook of Structural Welding/97* LANCASTER ISBN 1855733439  
*Welding the Right Way/PB/99* GEARY ISBN 0071342451  
*Procedure Handbook of Arc Welding* ISBN 9993897302

*Welding: Theory and Practice* ISBN 0444874275

*Arc Welding Automation* Cary, Howard B. ISBN 0824796454

*Welding Principles & Practices* Sacks, Raymond ISBN 0026661403

*Essentials of Welding* Sacks, Raymond ISBN 0026636204

