



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Η ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΜΑΤΖΙΝΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ



ΑΚΡΙΒΟΠΟΥΛΟΣ ΡΗΓΑΣ 07/0013

ΤΑΜΠΩΧ ΙΣΑΑΚ-ΝΤΑΝΙΕΛ 07/0079
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΜΑΙΟΣ 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	σελ.3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ	7
1.1 Γενικά	7
1.2 Ηλεκτροδιάβρωση σύρματος	10
1.3 Ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης	15
1.3.1 Περιγραφή της διάταξης και της αρχής λειτουργίας	15
1.3.2 Εργαλειομηχανή	17
1.3.3 Γεννήτρια τροφοδότησης	20
1.3.4 Διηλεκτρικό υγρό	22
1.3.5 Υλικό κατασκευής ηλεκτροδίου	22
1.3.6 Παράμετροι κατεργασίας	24
1.3.7 Μηχανισμός αποβολής υλικού	25
1.3.8 Πιστότητα κατεργασμένης επιφάνειας	27
1.3.9 Εφαρμογές	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ	33
2.1 Εισαγωγή	33
2.2 Ίνες άνθρακα	34
2.2.1 Δομή-Τρόπος κατασκευής	34
2.2.2 Ιδιότητες ινών άνθρακα	37
2.3 Μήτρες	42
2.3.1 Γενικά	42
2.3.2 Οργανικές μήτρες	43
2.3.3 Μήτρες άνθρακα	46
2.3.4 Παράμετροι σύνθετου υλικού	47
2.4 Ηλεκτροδιάβρωση και ανθρακονήματα	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΤΟ ΟΧΗΜΑ	52
3.1 Διαφορές στις ιδιότητες και στις χρήσεις	54
3.2 Άνθρακας η κέβλαρ	59

3.3 Εξαρτήματα αυτοκινήτου από ανθρακονήματα (carbon)	63
3.3.1 Ζάντες από carbon	63
3.3.2 Καμπίνα επιβατών από ανθρακόνημα	66
3.3.3 Εξατμίσεις	68
3.3.4 Σασί carbon της Ferrari F70	68
3.3.5 Καπό από carbon	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ CARBON FIBER	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΠΙΛΟΓΟΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ	86
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	87

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη και η ανάλυση της εφαρμογής της μη συμβατικής κατεργασίας της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM) και η εφαρμογή της σε σύνθετα υλικά με ενισχυτικές ίνες άνθρακα (CFRC), και πιο συγκεκριμένα για τη διάτρησή τους. Εξαρτήματα από τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται σε προηγμένες κατασκευές (π.χ. στο αυτοκίνητο, στην αεροναυπηγική), όπου η παραγόμενη ποιότητα κατεργασίας είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια και την ορθή λειτουργία. Η ψαθυρή φύση και η σκληρότητα των CFRC δημιουργούν αρκετά προβλήματα κατά τη επεξεργασία τους με συμβατικές κατεργασίες. Έτσι, εξετάζεται ως εναλλακτική μέθοδος κατεργασίας τους η ηλεκτροδιάβρωση, η αποτελεσματικότητα της οποίας αξιολογείται με βάση την ταχύτητα κατεργασίας, την παραγόμενη διαστατική ακρίβεια και την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Τέλος αναφέρεται η εφαρμογή και η σημαντικότητα των άνθρακα (carbon) σε διάφορα εξαρτήματα του οχήματος και ένας απλός τρόπος κατασκευής κομματιού carbon-fibre.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** περιγράφεται η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης. Γίνεται αναφορά στην εργαλειομηχανή που λαμβάνει χώρα η κατεργασία, στην αρχή λειτουργίας, στις τεχνολογικές παραμέτρους που επιδρούν στο αποτέλεσμα της κατεργασίας και στο μηχανισμό αποβολής υλικού.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στα σύνθετα υλικά με ενισχυτικές ίνες άνθρακα. Συγκεκριμένα, γίνεται περιγραφή της δομής τους, των υλικών κατασκευής της μήτρας (δίνεται έμφαση στις οργανικές μήτρες και τις μήτρες άνθρακα), των ιδιοτήτων τους (κυρίως ηλεκτρικές και θερμικές), καθώς και των παραμέτρων που τις επηρεάζουν. Επίσης επισημαίνονται κάποια στοιχεία της ηλεκτροδιάβρωσης σε σύνθετα υλικά με ενισχυτικές ίνες άνθρακα.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** εστιάζεται η εφαρμογή των σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα πάνω στο όχημα. Γίνεται αναφορά της αντικατάστασης με κέβλαρ

και carbon και τα πλεονεκτήματα που έχουν έναντι των κλασικών υλικών που χρησιμοποιούνται στα οχήματα για τα αντίστοιχα εξαρτήματα.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** περιγράφουμε πως μπορούμε να κατασκευάσουμε carbon fibre, όλη την διαδικασία τα υλικά τα και τα βήματα μέχρι το τελικό αποτέλεσμα.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** αναλύονται οι μέθοδοι μορφοποίησης συνθετών υλικών με ίνες και οι τρόποι παρασκευής αυτών.

1. ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης (EDM, electrical discharge machining) είναι μη-συμβατική κατεργασία αφαίρεσης υλικού, θερμικού/θερμοηλεκτρικού χαρακτήρα. Αν και η θεωρητική της βάση και οι τεχνολογικές της παράμετροι απαιτούν περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση, αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μη-συμβατική κατεργασία και εφαρμόζεται ευρύτατα λόγω των εξαιρετικών δυνατοτήτων που προσφέρει σε αγωγή υλικά μικρής κατεργασιμότητας. Χρησιμοποιείται κυρίως για την δημιουργία πολύπλοκων και ασυνήθιστων γεωμετρικών μορφών σε υλικά υψηλής σκληρότητας, οι οποίες θα ήταν υπερβολικά χρονοβόρο και δαπανηρό να δημιουργηθούν με χρήση συμβατικών κατεργασιών.

Η ιστορία της EDM ξεκινάει περίπου στο 1770, όταν παρατηρήθηκε από τον Άγγλο Joseph Priestly ότι κάθε φορά που πλησιάζουν μεταξύ τους τα άκρα δύο αγωγών συνδεδεμένων με τους πόλους ηλεκτρικής πηγής, προκαλείται ηλεκτρική εκκένωση, και από τον παραγόμενο σπινθήρα, την υψηλή θερμοκρασία και τη δράση ηλεκτρικών μοριακών δυνάμεων αποσπώνται ποσότητα υλικού και από τους δύο αγωγούς. Παρ' όλα αυτά δεν υπήρξε καμία εφαρμογή της ηλεκτροδιάβρωσης μέχρι το 1943, όταν δύο Σοβιετικοί επιστήμονες, οι B.R. και N.I. Lazarencο κατάφεραν να εκμεταλλευτούν το φαινόμενο για την κατεργασία υλικών. Αρχικά η μέθοδος παρουσίαζε αρκετά προβλήματα και δυσκολίες, καθώς οι πρώτες μηχανές ήταν απλοϊκές και η κίνηση του ηλεκτροδίου γινόταν χειροκίνητα, συνεπώς λίγοι πίστευαν στις δυνατότητές της ηλεκτροδιάβρωσης ως κατεργασίας.

Όμως με την ανάπτυξη από τους ίδιους επιστήμονες του πρώτου σερβομηχανισμού για EDM, αυξήθηκε τόσο ο βαθμός ελέγχου της κατεργασίας, όσο και η πίστη σε αυτήν. Με το πέρασμα των χρόνων, οι μηχανές βελτιώθηκαν πολύ, εξελισσόμενες από παροχή ισχύος RC (resistor capacitance) και λυχνίες, σε τρανζίστορ με δυνατότητα παλμών της τάξης του

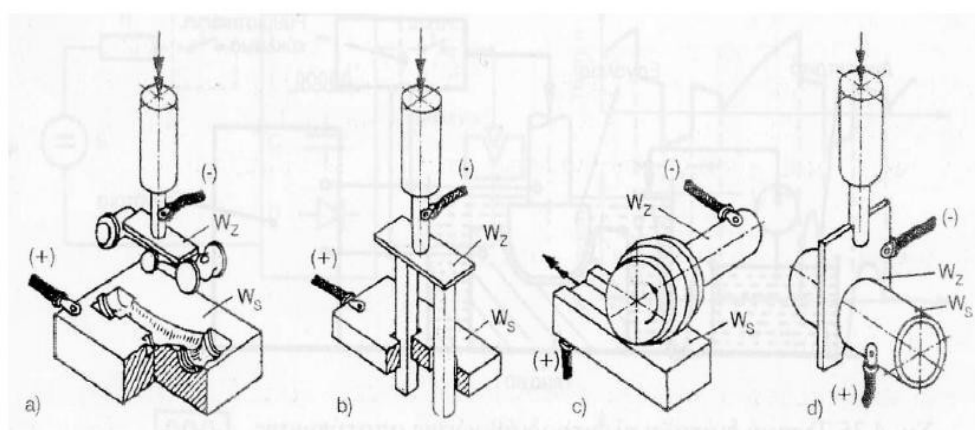
nanosecond, ενώ από το αρχικά χειροκίνητο ηλεκτρόδιο περάσαμε σε μοντέρνες CNC μηχανές με δυνατότητα ταυτόχρονης κατεργασίας έως και έξι αξόνων. Φτάνουμε έτσι στο σήμερα, όπου η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης έχει φέρει την επανάσταση σε αρκετούς τομείς της βιομηχανίας, ενώ σε πολλές περιπτώσεις έχει αντικαταστήσει κατεργασίες που δέσποζαν για πολλά χρόνια.

Η ηλεκτροδιάβρωση είναι κατεργασία κατά την οποία γίνεται αφαίρεση υλικού από κάποιο ηλεκτρικά αγώγιμο κατεργαζόμενο τεμάχιο με τη χρήση ηλεκτρισμού. Η έννοια ηλεκτρικά αγώγιμο υλικό όμως πρέπει να διευκρινιστεί. Με την ηλεκτροδιάβρωση μπορούμε να κατεργαστούμε και κάποια υλικά που δεν είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, αλλά υπάγονται στους ημιαγωγούς. Σύμφωνα με τους Koenig, Dauw, Levy & Panten [25], υπάρχει μια τιμή της ειδικής αντίστασης ρ του υλικού, κάτω από την οποία η ηλεκτροδιάβρωση είναι εφικτή. Αυτό το όριο μπορούμε να το ονομάσουμε και κατώφλι αγωγιμότητας, και η τιμή του είναι $\rho=100 \cdot \text{cm}$ (ειδική αγωγιμότητα $0,01 \text{S/cm}$). Ορθότερα, υπάρχει μια περιοχή τιμών της ειδικής αντίστασης ρ των υλικών, με κέντρο την τιμή $100 \cdot \text{cm}$, στην οποία 'μόλις' εμφανίζεται σπινθήρας. Είναι δηλαδή πιθανό κάποιο υλικό με λίγο μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από $100 \cdot \text{cm}$ να ηλεκτροδιαβρώνεται, ενώ ένα υλικό με μικρότερη ειδική αντίσταση να μην ηλεκτροδιαβρώνεται. Εννοείται ότι τα περισσότερα αγώγιμα υλικά εμφανίζουν τα λιγότερα προβλήματα ηλεκτροδιάβρωσης. Η κατεργασία επιτυγχάνεται με την εφαρμογή στο κατεργαζόμενο τεμάχιο παλμών συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος, υψηλής συχνότητας, μέσω ενός ηλεκτροδίου ή σύρματος. Το ηλεκτρόδιο-εργαλείο, τοποθετούμενο με υψηλή ακρίβεια πολύ κοντά στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, χωρίς όμως να έρχεται σε επαφή μαζί του, αποφορτίζει το δυναμικό του στο τεμάχιο (που συνήθως είναι το θετικό ηλεκτρόδιο), διαμέσου ενός μονωτικού διηλεκτρικού υγρού (ως διηλεκτρικά χρησιμοποιούνται συνήθως έλαια βασισμένα σε παραφινικές, ναφθενικές και αρωματικές ενώσεις), στο οποίο είναι εμβαπτισμένα και το ηλεκτρόδιο και το τεμάχιο.

Κατά την εκκένωση δημιουργούνται σπινθήρες στο πολύ μικρό διάκενο (σταθερό, από 25 έως 50 μm) μεταξύ των δύο επιφανειών. Η θερμοκρασία του σπινθήρα που παράγεται βρίσκεται συνήθως μέσα σε ένα εύρος από 8000 έως 12000°C, με αποτέλεσμα μετά από κάθε εκκένωση να έχουμε

επιφανειακή τήξη ή και εξάχνωση των υλικών - από την παραγόμενη κατά τη διάσπαση του διάκενου θερμική ενέργεια - και αφαίρεση υλικού και στο δύο ηλεκτρόδια.

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης είναι πλέον μια αρκετά καθιερωμένη κατεργασία, με πολλές εφαρμογές και πολύ μεγάλες δυνατότητες Η περαιτέρω ανάπτυξης. Χρησιμοποιείται κυρίως για την κατεργασία τεμαχίων από πολύ σκληρά υλικά και για την επίτευξη πολύπλοκων γεωμετριών, ενώ πολλές φορές μετά την περάτωσή της δεν απαιτείται επιπλέον λείανση της παραγόμενης επιφάνειας, καθώς δημιουργεί πολύ καλή επιφανειακή ποιότητα. Χρησιμοποιείται επίσης ευρέως στην κατασκευή πολύπλοκων καλουπιών. Η ανάπτυξή της έχει κάνει πολλές εργασίες ευκολότερες από ότι ήταν στο παρελθόν, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελεί το μοναδικό τρόπο κατεργασίας διαφόρων τεμαχίων. Στο **σχήμα 1.1** διακρίνονται κάποιες απλές δυνατότητές της ως κατεργασίας.



Σχήμα 1.1:
Κατεργασίες αποβολής υλικού με ηλεκτροδιάβρωση
a) Κοπή, b) Διάτρηση, c) Λείανση, d) Απότμηση
Ws: κατεργαζόμενο τεμάχιο, Wz: εργαλείο, → πρόωση

Με τον γενικό όρο ηλεκτροδιάβρωση αναφερόμαστε σε δύο διαφορετικές τεχνικές:

- Την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης (die sinking EDM), όπου με σταθερό εργαλείο γίνεται η πρόσδοση της μορφής του “εργαλείου-ηλεκτρόδιου” στο “κατεργαζόμενο τεμάχιο-ηλεκτρόδιο”,

- Την ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM), όπου το σταθερό ηλεκτρόδιο έχει αντικατασταθεί με μεταλλικό αγώγιμο σύρμα

1.2 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΣΥΡΜΑΤΟΣ

Στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος, για την επίτευξη της επιθυμητής γεωμετρίας στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, χρησιμοποιείται ως ηλεκτρόδιο-εργαλείο ειδικό λεπτό (διαμέτρου 0,025 – 0,3 mm) αγώγιμο σύρμα από χαλκό ή ορείχαλκο και για διαμέτρους μικρότερες από 0,15 mm μολυβδαίνιο, και όχι εργαλεία-ηλεκτρόδια ειδικά κατεργασμένα σε μορφή και μέγεθος. Οι συνήθεις εργαλειομηχανές ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος κατεργάζονται κομμάτια μορφής πλάκας, για περιμετρική κοπή ή για την διάνοιξη οπών με ορισμένο απλό ή πολύπλοκο σχήμα.

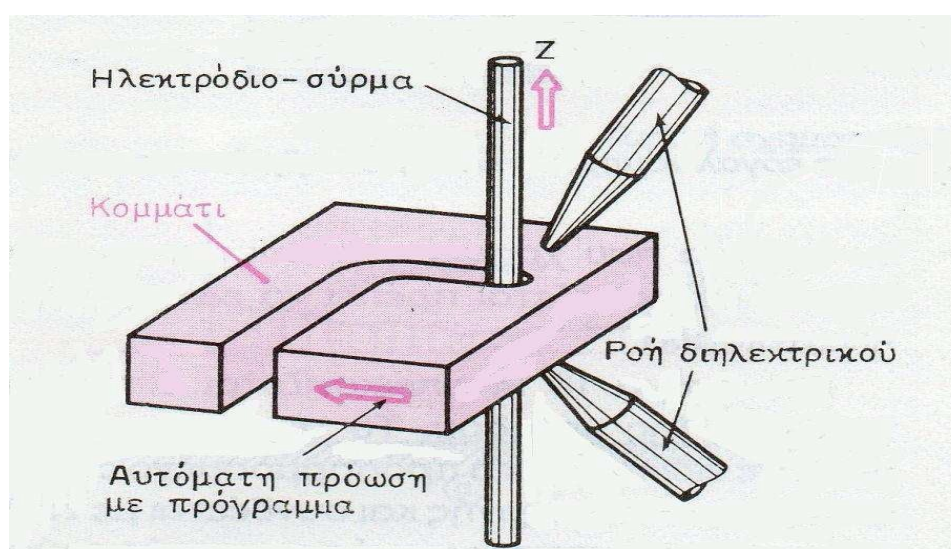
Η κατεργασία είναι ελεγχόμενη από Η/Υ, και η κίνηση του σύρματος καθορίζεται από σύστημα NC ή CNC. Το σύρμα, με τη βοήθεια ειδικής κατάλληλης διατάξεως εκτυλίξεως, τανύσεως και περιελίξεως (σχ. 10.12) διαπερνάει κάθετα, κατά τον άξονα “Z”, την κατεργαζόμενη μεταλλική πλάκα-κομμάτι συνεχώς με σταθερή ταχύτητα και φορά τέτοια, που εξασφαλίζει στο διάκενο κατεργασίας άφθαρτο πάντοτε εργαλείο.

Το τραπέζι της εργαλειομηχανής, πάνω στο οποίο είναι προσδεδεμένο το κομμάτι-πλάκα, κινείται ταυτόχρονα με το σύρμα κατά τους άξονες κατεργασίας “X” και “Y” του τραπεζιού, ενώ καθ’ όλη τη διάρκεια της κατεργασίας το κατεργαζόμενο τεμάχιο και το σύρμα βρίσκονται συνεχώς εμβαπτισμένα μέσα σε κατάλληλο δοχείο μη-αγώγιμου υγρού διηλεκτρικού. Οι ταυτόχρονες κινήσεις που περιγράφηκαν παραπάνω, και οι οποίες γίνονται βάσει του προγράμματος κατεργασίας CNC, είναι αυτές που προκαλούν την “κοπή” ή την “αποκοπή” του επιθυμητού επιπέδου σχήματος. Σε ορισμένους τύπους εργαλειομηχανών, η σχετική κίνηση μπορεί να γίνει και αντίθετα, δηλαδή το κομμάτι να παραμένει σταθερό και το κατακόρυφο σύρμα να κινείται κατά τους άξονες “X” και “Y”. Επίσης είναι

σύνηθες πολλές εργαλειομηχανές κοπής με σύρμα να διαθέτουν ειδική διάταξη για την διάνοιξη της “αρχικής οπής” (ελάχιστη διάμετρος 0,8 mm), απ’ όπου θα περάσει το σύρμα για να γίνει δυνατή η έναρξη της κατεργασίας. Στις περισσότερες εργαλειομηχανές του είδους, το διηλεκτρικό που

χρησιμοποιείται στις φάσεις εκχονδρίσεως είναι καθαρό νερό, συνεχώς ψεκαζόμενο στο διάκενο κατεργασίας, διότι δεν έχουμε ιδιαίτερες απαιτήσεις ακριβείας και θέλουμε να επιτυγχάνονται μεγάλοι ρυθμοί αφαιρέσεως υλικού. Ειδικά διηλεκτρικά χρησιμοποιούνται μόνο στις φάσεις αποπεράτωσης και γενικά όπου είναι επιθυμητή πολύ καλή ποιότητα της επιφάνειας κοπής, ενώ στη γρήγορη μεταφορά νέου διηλεκτρικού στο διάκενο κατεργασίας και στην ταχεία απομάκρυνση των προϊόντων των εκκενώσεων βοηθά η συνεχής κίνηση του σύρματος.

Στο **σχήμα 1.2** διακρίνεται η αρχή της μεθόδου της ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος.

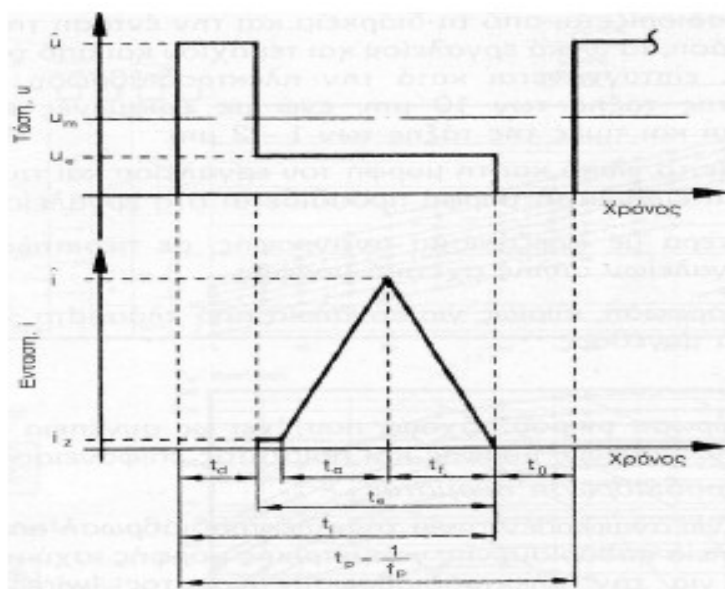


Σχήμα 1.2:
Αρχή της μεθόδου της ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος

Σε αντίθεση με την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης, που θα εξετάσουμε παρακάτω, και κατά την οποία το κατεργάσιμο τεμάχιο συνδέεται συνήθως στην κάθοδο, στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος συνδέεται συνήθως στην άνοδο και επιπλέον εφαρμόζονται παλμοί μικρότερης διάρκειας, αλλά πολύ μεγαλύτερης έντασης. Τυπικές μορφές παλμών τάσης και έντασης του ρεύματος δίνονται στο **σχήμα 1.3**.

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος προσφέρουν πρακτικά μηδενική φθορά εργαλείου, άρα και μεγάλη διάρκεια ζωής, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγάλη εξοικονόμηση στην κατασκευή τους και μείωση του συνολικού κόστους της κατεργασίας για μαζικότερη παραγωγή. Επίσης

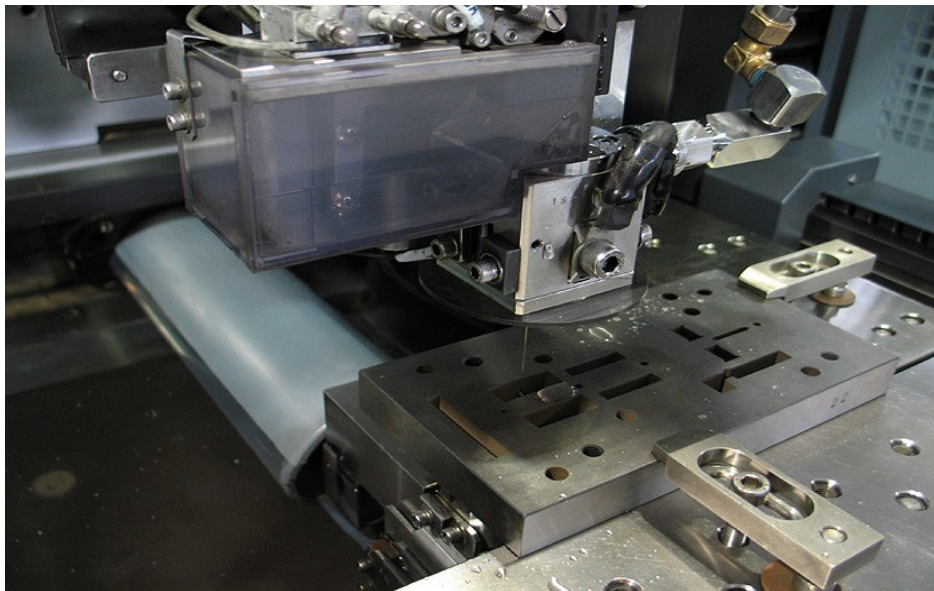
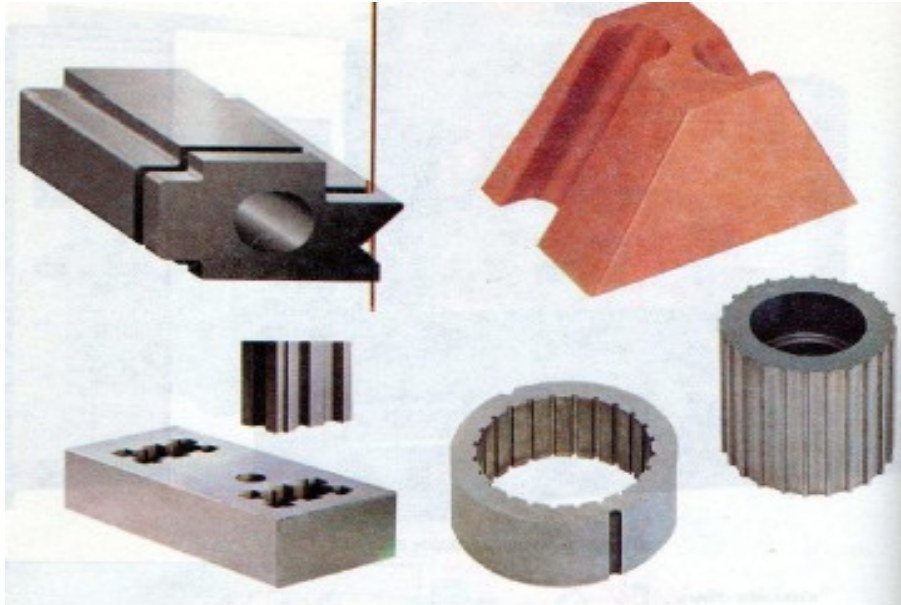
εξασφαλίζουν μικρούς χρόνους κατεργασίας (οι ρυθμοί αφαιρέσεως υλικού μπορούν να φτάσουν έως και 8500 mm³/min), μεγάλη διαστασιολογική ακρίβεια (της τάξεως 2 μm) και καλή επιφανειακή ποιότητα (τραχύτητα επιφάνειας ως και 1 μm). Με μικρές τροποποιήσεις το ίδιο βασικό πρόγραμμα CNC μπορεί επίσης να εκτελέσει τόσο την κοπή της μήτρας όσο και την κοπή του αντίστοιχου εμβόλου. Τέτοια παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου παρουσιάζονται στο **σχήμα 1.4**. Η μείωση του κόστους κατασκευής του καλουπιού στις περιπτώσεις αυτές, φτάνει και το 50% περίπου συγκριτικά με τις συμβατικές μεθόδους. Ο μοναδικός ίσως άμεσος περιορισμός στη χρήση της μεθόδου, έγκειται στο ότι χρησιμοποιείται για την κοπή επιπέδων σχημάτων μέχρι ένα μέγιστο πάχος 100 mm.



Σχήμα 1.3:

Παλμός τάσης και έντασης του ρεύματος σε ηλεκτροδιάβρωση σύρματος

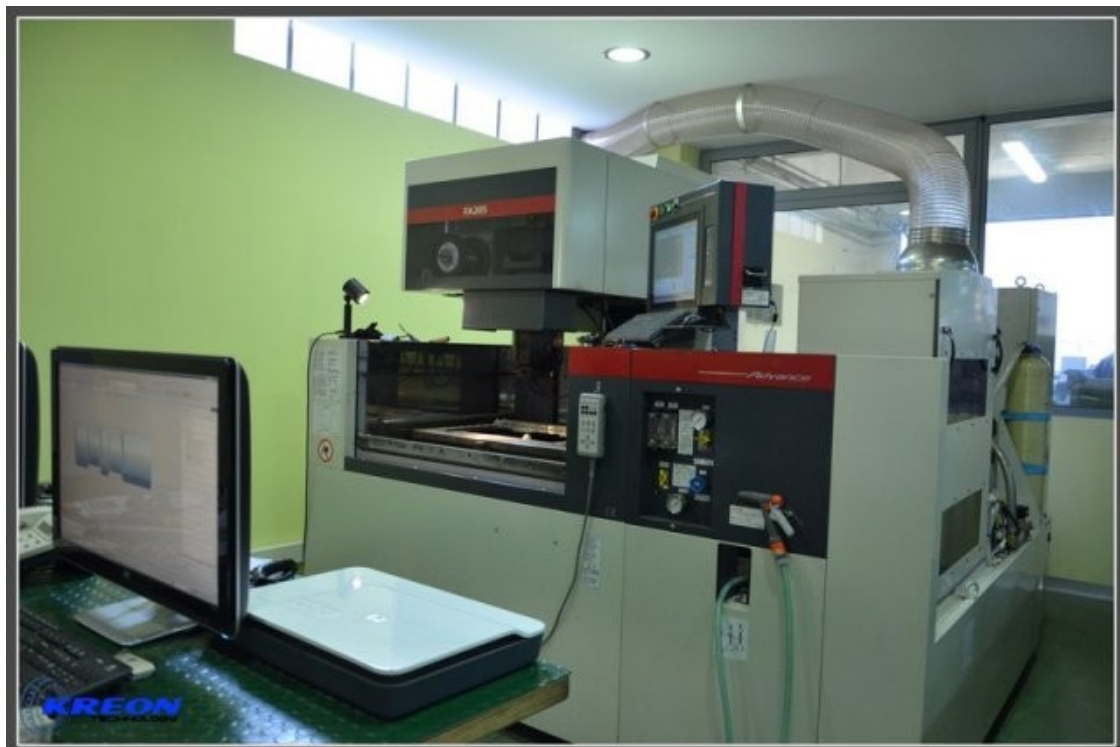
Η ηλεκτροδιάβρωση σύρματος χρησιμοποιήθηκε στις αρχές του 1970 ως εναλλακτική λύση στη μηχανική κοπή σωλήνων, κελυφών, κ.τ.λ.. Σήμερα, με την πρόοδο της τεχνολογίας CNC και τη χρήση επικαλυμμένων συρμάτων (coated wires), η μέθοδος βρίσκει ευρύτατες εφαρμογές στην κατασκευή μητρών, εξαρτημάτων και γενικά τρισδιάστατων γεωμετριών με μικροκοπή ακριβείας (precision micro-machining) στην αεροναυπηγική (κομμάτια βάρους έως και 40000 kp) και σε βιοτεχνολογικά εξαρτήματα.



Σχήμα 1.4:
Κομμάτια από μήτρες και έμβολα καταργασμένα σε εργαλειομηχανή ηλεκτροδιαβρώσεως με σύρμα



Σχήμα 1.5: Μηχανήματα Ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος στην εταιρία HARCO DIE & MOLD MANUFACTURE στη Θεσσαλονίκη



Σχήμα 1.6: Μηχανήματα Ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος στην εταιρία Kreon Technology

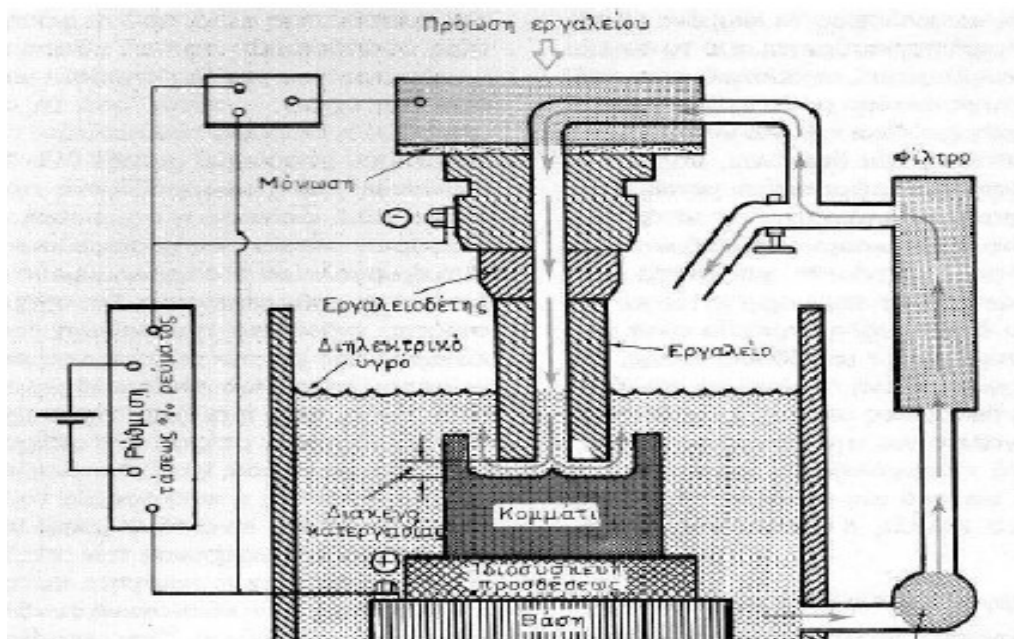
1.3 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΠΟΤΥΠΩΣΗΣ

1.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΡΧΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Στην ηλεκτροδιάβρωση, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, γίνεται αφαίρεση υλικού από κάποιο κατεργαζόμενο αγώγιμο τεμάχιο με τη βοήθεια ελεγχόμενων ηλεκτρικών εκκενώσεων. Η τυπική διάταξη της ηλεκτροδιάβρωσης δίνεται στο **σχήμα 1.7**, και όπως διακρίνουμε αποτελείται από τα ακόλουθα βασικά μέρη:

- 1) Την εργαλειομηχανή
- 2) Τη γεννήτρια τροφοδότησης
- 3) Το σύστημα παροχής διηλεκτρικού

Τόσο το κομμάτι όσο και το χρησιμοποιούμενο εργαλείο πρέπει να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Το εργαλείο, που συχνά είναι το αρνητικό ηλεκτρόδιο του συστήματος, πρέπει να μπορεί να κινείται για να πλησιάζει συνεχώς και να κρατά σταθερή μια μικρή απόσταση, το “διάκενο κατεργασίας”, από την επιφάνεια του κομματιού, από την οποία και αφαιρείται υλικό. Για το λόγο αυτό προσαρμόζεται σε ειδική υποδοχή του μηχανισμού προώσεως κατά τον άξονα “Z” της εργαλειομηχανής. Το κομμάτι, που ηλεκτρικά αποτελεί το θετικό ηλεκτρόδιο, προσδένεται πάνω στο τραπέζι της εργαλειομηχανής. Και τα δύο, κομμάτι και εργαλείο, είναι εμβαπτισμένα μέσα σε δοχείο γεμάτο με μονωτικό διηλεκτρικό υγρό (παραφινέλαιο, έλαιο μετασχηματιστών, ειδικά ορυκτέλαια, κηροζίνη) που ανακυκλοφορεί συνεχώς.



Σχήμα 1.7:
Τυπική διάταξη κατεργασίας ηλεκτροδιάβρωσης με αποτύπωση

Η διάταξη ανακυκλοφορίας του διηλεκτρικού υγρού, εκτός από την αντλία περιλαμβάνει φίλτρο καθαρισμού και ενδεχομένως, εναλλάκτη θερμότητας διηλεκτρικού, νερού- για την απαγωγή της εκλυόμενης από τις εκκενώσεις, θερμότητας. Κομμάτι και εργαλείο συνδέονται αντίστοιχα σε ειδική ηλεκτρική τροφοδοτική μονάδα (γεννήτρια), που παρέχει την αναγκαία τάση και ισχύ και καθορίζει ηλεκτρονικά την ένταση του ρεύματος, καθώς και τη διάρκεια και τη συχνότητα των εκκενώσεων. Το αυτόματο σύστημα ελέγχου του μηχανισμού προώσεως του εργαλείου, εξασφαλίζει συνεχώς κατά την διάρκεια τη κατεργασίας ένα σταθερό διάκενο 25 έως 50 μm μεταξύ των απέναντι επιφανειών εργαλείου - κομματιού.

Η ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων εργαλείο-κομμάτι γίνεται μόνο, όταν η εφαρμοζόμενη από την τροφοδοτική μονάδα τάση είναι ίση προς την “τάση διασπάσεως” του μεταξύ τους διακένου. Αρχικά δεν υπάρχει ροή ρεύματος ανάμεσα στα ηλεκτρόδια, γιατί στο διάκενο υπάρχει διηλεκτρικό το οποίο είναι μονωτής. στόσο, καθώς το διάκενο μειώνεται, μειώνεται και η αντίστασή του, με αποτέλεσμα μετά από ένα συγκεκριμένο διάκενο και κάτω να δημιουργείται ηλεκτρική εκκένωση και να έχουμε ροή ρεύματος, η οποία συντελεί στην ανάπτυξη θερμότητας. Η τάση διασπάσεως του διακένου εξαρτάται τόσο από το σχήμα και την απόσταση στην οποία βρίσκονται μεταξύ τους τα δύο ηλεκτρόδια, όσο και από τις μονωτικές ιδιότητες του χρησιμοποιούμενου διηλεκτρικού υγρού, και είναι της τάξεως των 15 έως 25 Volt.

Στην πραγματικότητα μετά από κάθε εκκένωση έχουμε επιφανειακή τήξη (ή ακόμα και εξάχνωση) - από την παραγόμενη κατά την διάσπαση του διακένου θερμότητα - και αφαίρεση υλικού και στα δύο ηλεκτρόδια. Στις αντίστοιχες θέσεις των εκκενώσεων δημιουργούνται πολύ μικροί αβαθείς κρατήρες. Στο τέλος κάθε εκκενώσεως, το λιωμένο υλικό σε σφαιροειδή μορφή παρασύρεται από το διηλεκτρικό υγρό που κυκλοφορεί, απομακρύνεται από τον κρατήρα και συγκρατείται μέσα στο φίλτρο.

Όπως αναφέρθηκε, εκτός από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, έχουμε αφαίρεση υλικού και από το εργαλείο, γεγονός ανεπιθύμητο, καθώς μειώνει τη

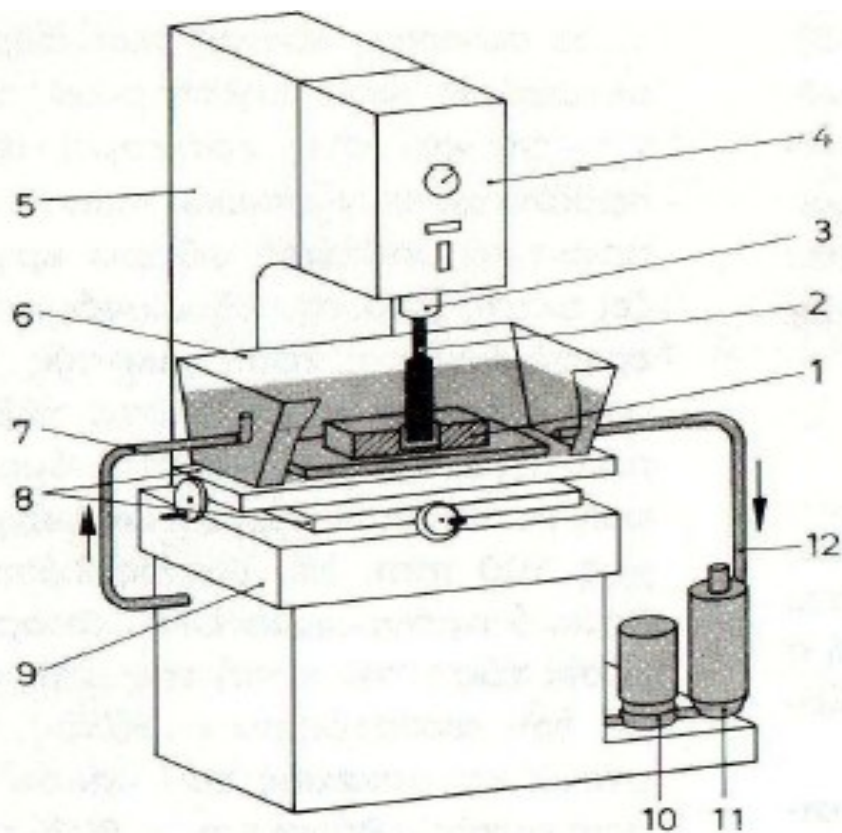
διάρκεια ζωής του και συντελεί στην αύξηση του κόστους της κατεργασίας. Το ζήτημα αυτό όμως λύνεται με τη σωστή επιλογή διαφόρων παραμέτρων, όπως είναι το κατάλληλο για την κατεργασία υλικό εργαλείου, η σωστή ρύθμιση της γεννήτριας τροφοδοτήσεως για την διάρκεια, την ένταση και τη συχνότητα των εκκενώσεων, και η πολικότητα των ηλεκτροδίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται στην πράξη πολύ σημαντική ασυμμετρία φθοράς, η οποία φτάνει στο επίπεδο 99,5% αφαίρεση υλικού από το ηλεκτρόδιο – κομμάτι και μόνο 0,5% αφαίρεση υλικού από το ηλεκτρόδιο – εργαλείο.

Από τα αναφερθέντα είναι εύκολο να συναχθεί ότι επειδή η διάσπαση του διακένου, δηλαδή η ηλεκτρική εκκένωση, πραγματοποιείται μεταξύ των στοιχειωδών επιφανειών ελάχιστης αποστάσεως εργαλείου - κομματιού, δημιουργείται βαθμιαία, με συνεχή και σταθερή πρόωση, κοιλότητα στο κομμάτι ακριβώς αντίστοιχη της μορφής του εργαλείου. Εκείνο που έχει μεγάλη σημασία είναι ότι, αντίθετα με τις συμβατικές μεθόδους κοπής, δε χρειάζεται στη συγκεκριμένη περίπτωση **καμιά απολύτως επιβολή μηχανικής δυνάμεως** από το εργαλείο προς το τεμάχιο για την αφαίρεση του υλικού. Έτσι, είναι δυνατό τα εργαλεία/ηλεκτρόδια να κατασκευάζονται από σχετικά μαλακά και ευκολοκατέργαστα υλικά, όπως είναι ο χαλκός, ο ορείχαλκος, ο γραφίτης και άλλα.

1.3.2 ΕΡΓΑΛΕΙΟΜΗΧΑΝΗ

Στο **σχήμα 1.8** παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια υποσυστήματα μιας εργαλειομηχανής ηλεκτροδιαβρώσεως, σύμφωνα με τη διάταξη του σχήματος 1.5.

Μια εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης πρέπει οπωσδήποτε να μπορεί να ελέγχει και να ρυθμίζει το διάκενο της κατεργασίας, ώστε αυτό να παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκειά της. Γι' αυτό και είναι εξοπλισμένη με μηχανισμό ακριβείας, για την αυτόματη πρόωση της κεφαλής προσδέσεως του εργαλείου – ηλεκτροδίου κατά τον άξονα “Z”. Ο ρόλος του είναι να ελέγχει το διάκενο, έτσι ώστε να γίνεται σωστά η αφαίρεση υλικού από το τεμάχιο και να προστατεύεται το εργαλείο. Επίσης, μέσω του ελέγχου του διακένου, ελέγχεται και η τάση διάσπασής του, και έτσι αποφεύγονται λανθασμένες εκκενώσεις και βραχυκυκλώματα.



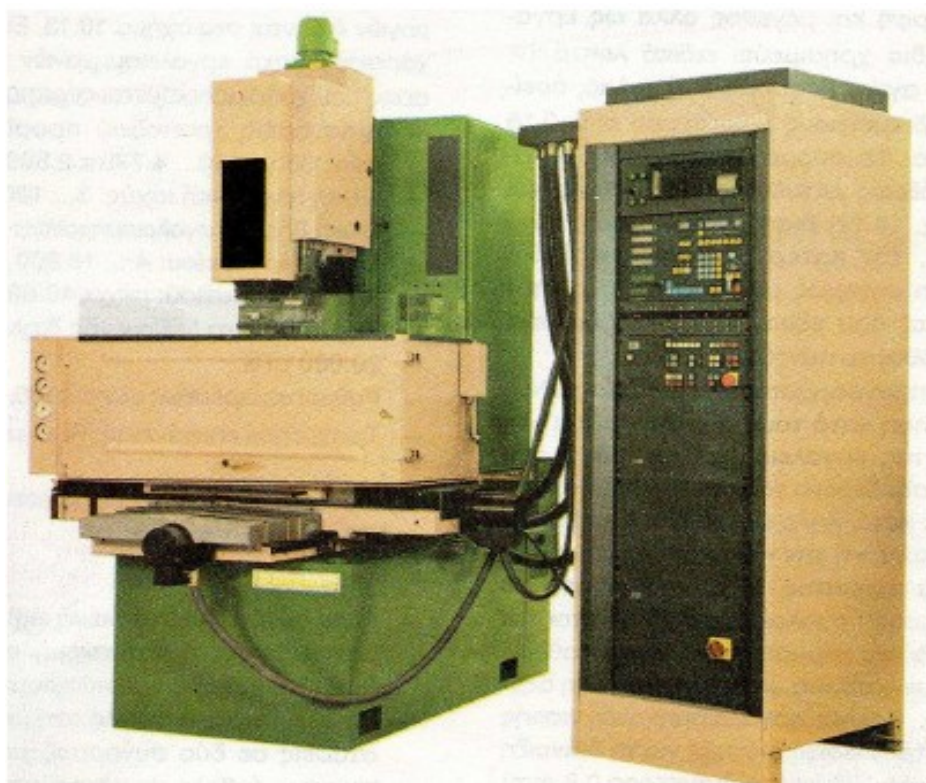
- 1) Κομμάτι για κατεργασία.
- 2) Εργαλείο - ηλεκτρόδιο.
- 3) Κεφαλή - φορέας του εργαλείου.
- 4) Κιβώτιο μηχανισμού προώσεως του εργαλείου.
- 5) Κορμός.
- 6) Λεκάνη.
- 7) Σωλήνας προσαγωγής του διηλεκτρικού υγρού.
- 8) Σεπόρτι για δύο κάθετες κινήσεις.
- 9) Τραπέζι.
- 10) Αντλία διηλεκτρικού.
- 11) Φίλτρο.
- 12) Σωλήνωση επιστροφής διηλεκτρικού.

Σχήμα 1.8:
Σχηματική αναπαράσταση εργαλειομηχανής ηλεκτροδιαβρώσεως
αποτύπωσης

Πολλές εργαλειομηχανές φέρουν κατάλληλη διάταξη εργαλειοθήκης και μηχανισμό που καθιστά δυνατή την αυτόματη εναλλαγή των εργαλείων – ηλεκτροδίων, προκειμένου να γίνονται ευκολότερα οι κατεργασίες που

απαιτούν τη χρήση πάνω του ενός εργαλείων, αλλά και να μειώνεται ο χρόνος για την περάτωσή τους.

Οι περισσότερες εργαλειομηχανές ηλεκτροδιάβρωσης σήμερα, είναι εξοπλισμένες με μονάδα CNC για τον προγραμματισμό της λειτουργίας τους, καθώς η χρήση τους έχει επεκταθεί σε τομείς που απαιτούν ποσότητα και μεγάλη ταχύτητα για μαζική παραγωγή, ακρίβεια στις διαστάσεις και χαρακτηριστικά υψηλής ποιότητας από κάθε άποψη. Τέτοιοι είναι ο τομέας της αεροναυπηγικής, όπου η EDM χρησιμοποιείται για την κατεργασία σκληρομετάλλων, για τη διάνοιξη οπών ακριβείας κ.α., και ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου χρησιμοποιείται στην κατεργασία μεγάλων καλουπιών διαμορφώσεως μερών αυτοκινήτων. Στο **σχήμα 1.9** παρουσιάζεται μια τυπική CNC εργαλειομηχανή ηλεκτροδιαβρώσεως αποτύπωσης.



Σχήμα 1.9

Εργαλειομηχανή ηλεκτροδιαβρώσεως αποτύπωσης CNC

1.3.3 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ

Στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης, κομμάτι και εργαλείο συνδέονται στη γεννήτρια τροφοδότησης, η οποία αποτελεί ειδική ηλεκτρική τροφοδοτική μονάδα που παρέχει την αναγκαία τάση και ισχύ και καθορίζει ηλεκτρονικά την ένταση του ρεύματος, καθώς και τη διάρκεια και τη συχνότητα των εκκενώσεων. Οι γεννήτριες τροφοδότησης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η παραγωγή των 21 παλμών:

- Περιστρεφόμενες παλμογεννήτριες, οι οποίες έχουν πολύ περιορισμένη εφαρμογή.
- Γεννήτριες αποφόρτισης ή αποθήκευσης, με κυκλώματα τροφοδοσίας μέσω πυκνωτών, πηνίων ή συνδυασμών τους.
- Στατικές παλμογεννήτριες, όπου το σύστημα τροφοδοσίας της τάσης συνδέεται μέσω συστοιχίας διακοπών με τον αγωγό εκκένωσης. Η διάρκεια και η σειρά των εκκενώσεων εξαρτάται κυρίως από την διαδοχή των φάσεων λειτουργίας των διακοπών.

Ο κύριος παράγοντας καθορισμού της μορφής των παλμών της τάσης και της έντασης του ρεύματος, είναι το διάκενο μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου. Είναι προφανές ότι κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, οι συνθήκες που επικρατούν στο διάκενο μεταβάλλονται συνεχώς, λόγω της αλλαγής των ιδιοτήτων του διηλεκτρικού και ανάλογα με τις συνθήκες αποβολής υλικού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζονται με μια στοχαστική σειρά διάφορες μορφές παλμών. Στο **σχήμα 1.10** παρουσιάζονται οι διάφορες μορφές παλμών που παράγονται από μια στατική παλμογεννήτρια.

Για τους παλμούς ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη:

- Η χρονική διάρκεια του παλμού, t

$$t_i = t_d + t_e$$

- Η χρονική διάρκεια κατά την πρώτη φάση της εκκένωσης, t_d
- Η χρονική απόσταση μεταξύ των παλμών, t_p
- Ο λόγος χρονικής επαφής, τ

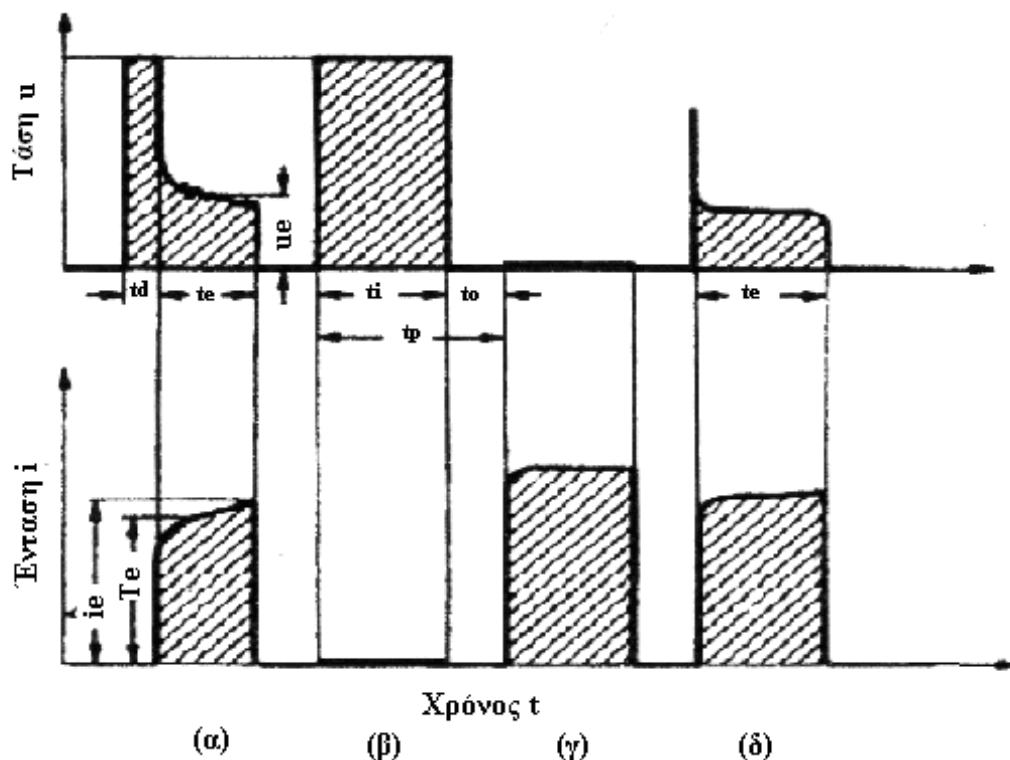
$$\tau = \frac{t_i}{t_p}$$

- Η συχνότητα εκκένωσης, f_e , ως ο αριθμός των πραγματοποιούμενων εκκενώσεων στον αγωγό εκκένωσης στη μονάδα του χρόνου,

$$f_e = \frac{1}{t_e}$$

- Η παλμική συχνότητα, f_p , ως ο αριθμός των τασικών παλμών στη μονάδα του χρόνου,

$$f_p = \frac{1}{t_p}$$



Σχήμα 1.10: Παλμοί τάσης και έντασης του ρεύματος σε μια στατική παλμογεννήτρια

- (α) Παλμός εκκένωσης (κανονικό διάκενο)
- (β) Παλμός εν κενώ (πολύ μεγάλο διάκενο)
- (γ) Βραχυκύκλωμα (μηδενικό διάκενο)
- (δ) Εσφαλμένη εκκένωση (πολύ μικρό διάκενο)

Στην πράξη, για να επιτευχθεί σχετική συντόμευση στο χρόνο κατεργασίας, η κατασκευή πολύπλοκων τεμαχίων ή η ταυτόχρονη κατεργασία περισσότερων τεμαχίων, χρησιμοποιούνται συχνά και πολλαπλού τύπου γεννήτριες, δηλαδή γεννήτριες που μπορεί να τροφοδοτούν συγχρόνως περισσότερα του ενός εργαλεία, είτε διαδοχικά, είτε και ταυτόχρονα.

1.3.4 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΥΓΡΟ

Η κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης γίνεται μέσα σε ένα μέσο κατεργασίας που συνήθως είναι διηλεκτρικό υγρό. Ο κύριος ρόλος του διηλεκτρικού αυτού είναι:

- η δημιουργία διακένου ορισμένης διηλεκτρικής σταθεράς,
- η απομάκρυνση από το διάκενο των αφαιρούμενων μεταλλικών τεμαχιδίων,
- η ψύξη της περιοχής κατεργασίας για την απαγωγή της αναπτυσσόμενης θερμότητας από τις αλλητάλληλες διασπάσεις.

Τα κατάλληλα διηλεκτρικά υγρά είναι, συνήθως, ενώσεις υδρογονανθράκων (βενζίνη, πετρέλαιο, έλαια μετασχηματιστών, ειδικά ορυκτέλαια, κηροζίνη κλπ). Τελευταία, για τη μικροκατεργασία και για την κοπή με ηλεκτροδιάβρωση με κινούμενο σύρμα - ηλεκτρόδιο, επιτυγχάνονται καλά αποτελέσματα και με απιονισμένο νερό ως μέσο κατεργασίας.

1.3.5 ΥΛΙΚΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟΥ

Γενικά, κάθε υλικό που είναι αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ηλεκτροδίων. Η πράξη όμως έχει αποδείξει ότι για να επιτευχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, επιβάλλεται να επιλέγονται υλικά ηλεκτροδίου λαμβάνοντας υπ' όψιν κάθε φορά:

- το υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου
- το είδος της κατεργασίας που πρόκειται να γίνει
- τον τύπο της γεννήτριας που διαθέτει η εργαλειομηχανή
- την αντίσταση του υλικού σε φθορά
- την επιθυμητή ποιότητα παραγόμενης επιφάνειας
- το κόστος πρώτων υλών και κατασκευής

Ως υλικά χρησιμοποιούνται κυρίως ο χαλκός, κράματά του με τελλούριο ή βολφράμιο, ο γραφίτης, και σε ειδικές περιπτώσεις ο ορείχαλκος, το καρβίδιο του βολφραμίου και κράματα αργύρου και βολφραμίου. Στο **σχήμα 1.11** διακρίνονται κάποια από τα υλικά ηλεκτροδίων, με την αντίστοιχη πολικότητα που τους εφαρμόζεται και το υλικό που κατεργάζονται.

ELECTRODE	POLARITY*	WORKPIECE	CORNER WEAR	CAPACITANCE
Copper	+	Steel	2 - 10%	No
Copper	+	Inconel	2 - 10%	No
Copper	+	Aluminum	< 3%	No
Copper	-	Titanium	20 - 40%	Yes
Copper	-	Carbide	35 - 60%	Yes
Copper	-	Copper	35 - 45%	Yes
Copper	-	Copper Tungsten	40 - 60%	Yes
Copper Tungsten	+	Steel	1 - 10%	No
Copper Tungsten	-	Copper	20 - 40%	Yes
Copper Tungsten	-	Copper Tungsten	30 - 50%	Yes
Copper Tungsten	-	Titanium	15 - 25%	Yes
Copper Tungsten	-	Carbide	35 - 50%	Yes
Graphite	+	Steel	< 1%	No
Graphite	-	Steel	30 - 40%	No
Graphite	+	Inconel	< 1%	No
Graphite	-	Inconel	30 - 40%	No
Graphite	+	Aluminum	< 1%	No
Graphite	-	Aluminum	10 - 20%	No
Graphite	-	Titanium	40 - 70%	Yes

* Denotes Electrode Polarity

Σχήμα 1.11: Υλικά ηλεκτροδίων

Τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται είτε με κατεργασία σε συνήθεις εργαλειομηχανές, είτε με χύτευση, είτε με ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (για την περίπτωση του χαλκού κυρίως). Για κατεργασία κομματιών πολύ μεγάλων διαστάσεων γίνεται ψυχρή διαμόρφωση ελασμάτων χαλκού, κατά την οποία το σχήμα που δίνεται στο χάλκινο έλασμα ενισχύεται εσωτερικά με μεταλλικές νευρώσεις, για να αντέχει στις μηχανικές και υδροδυναμικές (από την εξαναγκασμένη ροή του διηλεκτρικού στο διάκενο) καταπονήσεις. Για την καλύτερη κυκλοφορία διηλεκτρικού στα πολύπλοκα εργαλεία, συχνά

διανοίγονται αρκετές διαμπερείς οπές μικρής διαμέτρου (~ 0,35-0,5 mm) στο σώμα τους.

1.3.6 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην ηλεκτροδιάβρωση, μεταξύ άλλων, οι εξής παράμετροι παίζουν ρόλο στο αποτέλεσμα της κατεργασίας:

- Η τάση που εφαρμόζεται στο διάκενο
- Η ένταση του ρεύματος
- Η πολικότητα που επιλέγεται για το εργαλείο
- Η χρονική διάρκεια των παλμών
- Η χρονική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών
- Το υλικό κατασκευής του ηλεκτροδίου
- Η ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης W_e , η οποία δίνεται από τη σχέση

$$W_e = \int_{t_e} u_e(t) i_e(t) dt \approx \bar{u}_e \bar{i}_e t_e,$$

όπου \bar{u}_e και \bar{i}_e είναι η μέση τάση και η μέση ένταση της εκκένωσης αντίστοιχα και t_e η χρονική διάρκεια της. Η ενέργεια προφανώς μεταβάλλεται με τη μεταβολή οποιουδήποτε εκ των τριών μεγεθών.

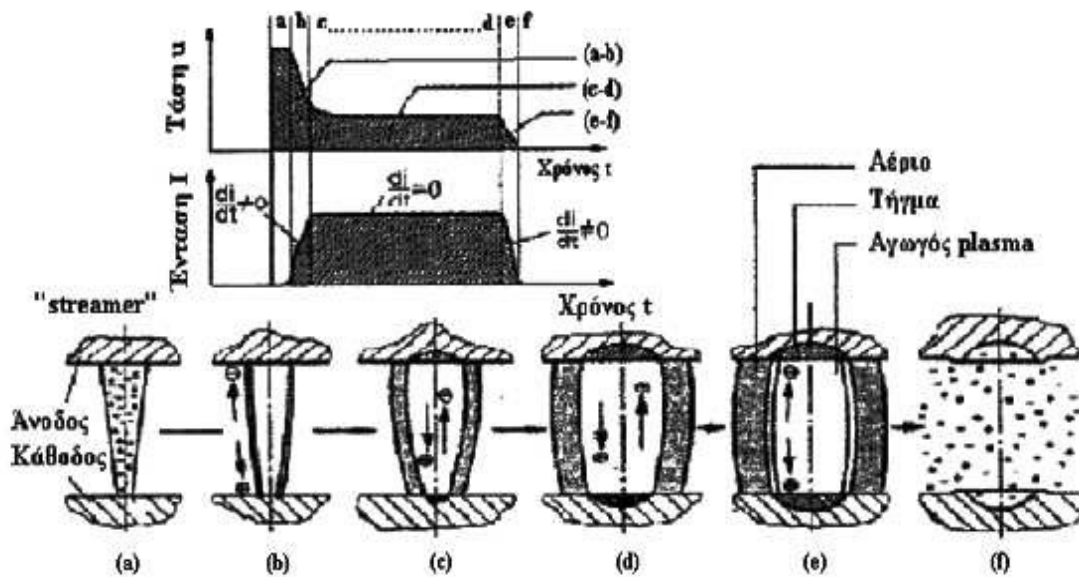
Στην ηλεκτροδιάβρωση ορίζονται τα ακόλουθα μεγέθη:

- Η αποβολή υλικού ανά εκκένωση, V_{we} , που είναι ο όγκος του υλικού που αποβάλλεται από το κατεργάσιμο τεμάχιο σε μία εκκένωση.
- Η φθορά ανά εκκένωση, V_{Ee} , που είναι ο όγκος του υλικού που αποβάλλεται από το ηλεκτρόδιο – εργαλείο ανά εκκένωση.
- Ο ρυθμός αποβολής υλικού, v_w , που είναι ο ανά μονάδα χρόνου όγκος αποβολής υλικού από το κατεργάσιμο τεμάχιο.
- Η ταχύτητα φθοράς, v_E , που είναι ο ανά μονάδα χρόνου όγκος αποβολής του υλικού από το ηλεκτρόδιο – εργαλείο.
- Η σχετική φθορά εργαλείου, θ , που είναι η σχέση της ταχύτητας φθοράς v_E με το ρυθμό αποβολής υλικού v_w .

$$\theta = v_E / v_{\text{II}}$$

1.3.7 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΑΠΟΒΟΛΗΣ ΥΛΙΚΟΥ

Ο ακριβής μηχανισμός με τον οποίο πραγματοποιείται η κατεργασία έχει αποτελέσει θέμα εκτεταμένης έρευνας και αρκετές θεωρίες έχουν προταθεί, χωρίς καμία ωστόσο να είναι πλήρης και να εξηγεί στο σύνολό της τα παρατηρούμενα φαινόμενα. Οι κυριότερες απ' αυτές είναι η ηλεκτρομηχανική, η θερμομηχανική και η θερμοηλεκτρική, η οποία και αποτελεί την πλέον παραδεκτή προσέγγιση. Οι διάφορες φάσεις που πραγματοποιείται η εκκένωση και η αποβολή υλικού με βάση τη θεωρία αυτή φαίνονται διαγραμματικά στο **σχήμα 1.12**, όπου παρουσιάζεται και η μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης και της έντασης του ρεύματος εκκένωσης σε σχέση με τη χρονική διάρκειά τους.



Σχήμα 1.12: Μηχανισμός αποβολής υλικού κατά την ηλεκτροδιάβρωση

Κατά την έναρξη της εκκένωσης υπάρχει μία χρονικά ταχεία μεταβολή της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και δημιουργείται ένας έντονα ιονισμένος αγωγός εκκένωσης από τη διάσπαση του διηλεκτρικού (**σχήμα 1.12-a**). Με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα του διηλεκτρικού κινούνται προς την κατεύθυνση της αντίθετης πολικότητας ηλεκτροδίων. Τα πολύ γρήγορα κινούμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με μόρια του διηλεκτρικού, επιταχύνονται, συγκρούονται και πάλι με μόρια και, από την

αλυσιδωτή αυτή αντίδραση, δημιουργείται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ο αγωγός εκκένωσης. Σύμφωνα με άλλες θεωρίες, ο μηχανισμός διάσπασης πραγματοποιείται από την αναπτυσσόμενη θερμότητα που έχει ως συνέπεια την εξάτμιση του διηλεκτρικού μέσου.

Ο έντονα ιονισμένος αγωγός εκκένωσης επιτρέπει τη δίοδο ηλεκτρικού ρεύματος μεγάλης έντασης. Η εκλυόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την εκκένωση μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, που έχει ως αποτέλεσμα να αρχίζει η τήξη και η ακαριαία εξάτμιση ορισμένου όγκου υλικού στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων (**σχήμα 1.12-b**). Η ένταση του ρεύματος εκκένωσης αποκτά τότε τη μέγιστη τιμή της. Δημιουργείται στον κλάδο της εκκένωσης ένας αγωγός πλάσματος (ιονισμένο αέριο μεγάλης θερμοκρασίας 8000-12000°C), που αποτελείται από θετικά φορτισμένα ιόντα μετάλλου και αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια από την εξάτμιση των υλικών των ηλεκτροδίων και από ουδέτερα μεταλλικά άτομα.

Στις επόμενες φάσεις, η ένταση του ρεύματος εκκένωσης παραμένει χρονικά σταθερή, στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ένας ορισμένος όγκος μετάλλου τήκεται ή εξατμίζεται ακαριαία σχηματίζοντας ένα νέφος αερίου υψηλής πίεσης (της τάξης αρκετών εκατοντάδων ατμοσφαιρών) και δημιουργείται ένας κρατήρας (**σχήμα 1.12-c και d**). Ο αγωγός πλάσματος και το νέφος του αερίου αυξάνονται σταθερά.

Με τη διακοπή της ηλεκτρικής τάσης (**σχήμα 1.12-e**), η πίεση του νέφους μειώνεται απότομα, ο αγωγός πλάσματος και το νέφος διασπώνται και το, εν μέρει ρευστό εν μέρει εξαερωμένο, υλικό απομακρύνεται υπό σφαιροειδή μορφή από τον κρατήρα μέσω του διηλεκτρικού υγρού (**σχήμα 1.12-f**).

Ο όγκος του υλικού που αφαιρείται από το εργαλείο και το κατεργάσιμο τεμάχιο σε μία εκκένωση δεν είναι ο ίδιος. Εξαρτάται κυρίως από την πολικότητα και τις ιδιότητες του υλικού των ηλεκτροδίων καθώς επίσης από τη διάρκεια και το ρεύμα της εκκένωσης. Με κατάλληλη εκλογή του υλικού του εργαλείου - ηλεκτροδίου και με αλλαγή των παραμέτρων εκκένωσης μπορεί να επιτευχθεί μία σημαντική ασυμμετρία, π.χ. 99,5 % αφαίρεση του υλικού στο τεμάχιο - ηλεκτρόδιο και 0,5 % στο εργαλείο – ηλεκτρόδιο. Ο ρυθμός αποβολής υλικού εξαρτάται σημαντικά και από τον τρόπο κυκλοφορίας του διηλεκτρικού υγρού. Η αναγκαστική ροή του διηλεκτρικού απομακρύνει τα σωματίδια φθοράς και η ταχύτητα της κατεργασίας βελτιώνεται.

Ο ρυθμός αποβολής υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, v_w , αυξάνεται στην αρχή με την αύξηση της χρονικής διάρκειας του παλμού, t_i , αποκτά μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια ελαττώνεται. Η ελάττωση αυτή του v_w οφείλεται στο ότι με την αύξηση της χρονικής διάρκειας του παλμού αυξάνεται το ποσό της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του υλικού και ο αγωγός εκκένωσης μεγαλώνει. Μετά την επίτευξη της βέλτιστης διαμέτρου του αγωγού, κατά τη χρονική στιγμή t_{opt} , αυξάνουν οι απώλειες ενέργειας λόγω απαγωγής στα ηλεκτρόδια και στο διηλεκτρικό μέσο και λόγω ακτινοβολίας και, συνεπώς, με την περαιτέρω αύξηση της διάρκειας του παλμού μειώνεται η ταχύτητα αποβολής υλικού. Επίσης, με την αύξηση του ρεύματος εκκένωσης, αυξάνεται γενικά η ταχύτητα αποβολής λόγω της αύξησης του ωφέλιμου ποσού της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του υλικού.

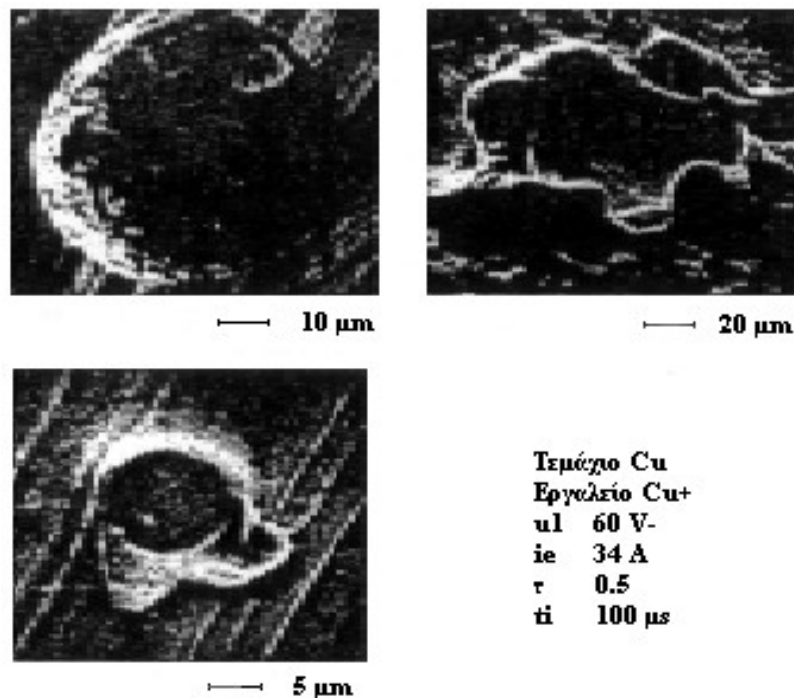
Όσον αφορά τη σχετική φθορά του εργαλείου, για το χαλκό αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος εκκένωσης, καθώς αυξάνεται το τηκόμενο υλικό του ηλεκτροδίου αλλά και το ποσό του υλικού που εξαερώνεται κατά την έναρξη της εκκένωσης. Αντίθετα, στο γραφίτη παρουσιάζεται μείωση της φθοράς με την αύξηση της μέσης έντασης της εκκένωσης (για θετική πολικότητα εργαλείου). Συνεπώς, ο γραφίτης είναι πλέον κατάλληλος για κατεργασίες εκχόνδρισης όπου χρησιμοποιούνται μεγάλες εντάσεις ρεύματος εκκένωσης, ενώ ο χαλκός είναι προτιμητέος στις τελικές κατεργασίες, όπου απαιτούνται μικρή διάρκεια εκκένωσης και μικρές εντάσεις ρεύματος εκκένωσης. Τέλος, με την αύξηση της διάρκειας του παλμού αυξάνεται η σχετική φθορά του εργαλείου.

1.3.8 ΠΙΣΤΟΤΗΤΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

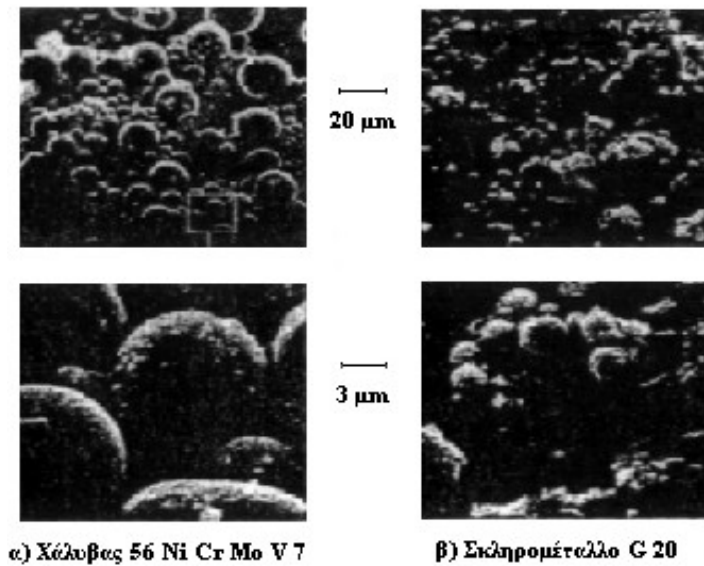
Στις εφαρμογές της ηλεκτροδιάβρωσης δίνεται μεγάλη έμφαση στις μεταλλουργικές αλλαγές, στη δημιουργία ζωνών θερμικής επίδρασης της παραγόμενης επιφάνειας, καθώς και στο συσχετισμό παραμέτρων της ηλεκτροδιάβρωσης με τις μηχανικές ιδιότητες της προκύπτουσας επιφάνειας. Ο συσχετισμός αυτός επιτυγχάνεται με τη συστηματική προσέγγιση της ομοιομορφίας (πιστότητας) της κατεργάσιμης επιφάνειας (surface integrity).

Ο κύριος μηχανισμός της ηλεκτροδιάβρωσης είναι το θερμικό φαινόμενο, πλην όμως υπεισέρχονται και μηχανικά φαινόμενα. Η δημιουργία κρατήρα στο κατεργάσιμο τεμάχιο (**σχήμα 1.13**), η σφαιροειδής μορφή των

αποβαλλομένων τεμαχίων του υλικού κατά την κατεργασία χάλυβα (σχήμα 1.14-α), η αλλαγή της δομής των υλικών των ηλεκτροδίων, οι παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις και οι εμφανιζόμενες μικρορωγμές στην επιφάνεια του κατεργάσιμου τεμαχίου είναι σαφή δείγματα του θερμικού φαινομένου που λαμβάνει χώρα. Επιπλέον, η μορφή του κρατήρα (σχήμα 1.14-α), είναι συνέπεια όχι μόνο του θερμικού φαινομένου, αλλά και μηχανικών κρουστικών φορτίσεων. Γενικά, στην ηλεκτροδιάβρωση ψαθυρών υλικών τα οποία έχουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες τήξης και εξαέρωσης (σχήμα 1.14-β), η συμβολή του μηχανικού φαινομένου στην κατεργασία είναι μεγαλύτερη σε σχέση με υλικά με μικρότερο σημείο τήξης.



Σχήμα 1.13: Διάφορες μορφές κρατήρα στο κατεργάσιμο τεμάχιο κατά την ηλεκτροδιάβρωση χαλκού με εργαλείο από χαλκό



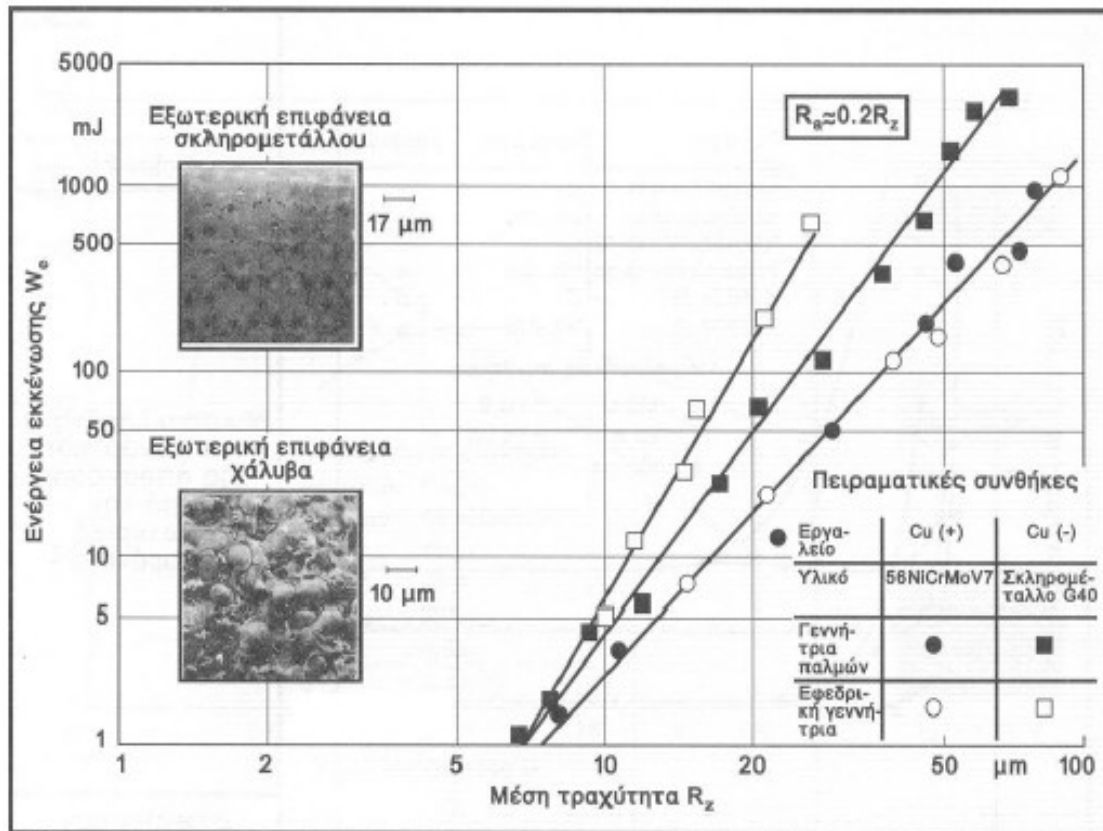
Εργαλείο γραφίτης	Δηλεκτροσό Shell - Sol - T
ie 28 A	τ 0.5
ti 100 μs	u1 150 V

Σχήμα 1.14: Μορφές αφαιρούμενων μεταλλικών τεμαχίων κατά την ηλεκτροδιάβρωση με εργαλείο από γραφίτη για υλικό: α)χάλυβα, β)σκληρομέταλλο

Τα προηγούμενα έχουν ως αποτέλεσμα η τοπογραφία της ηλεκτροδιαβρωμένης επιφάνειας να μπορεί να περιγραφεί ως μια γεωμετρία επαλληλίας κρατήρων. Η μορφή αυτή της επιφάνειας ανταποκρίνεται στη στοχαστική μορφή της κατεργασίας, που σε συνδυασμό με το θερμικό φαινόμενο, δημιουργεί επάλληλους κρατήρες με επιφανειακές σταγόνες επανατηγμένου υλικού, επιφανειακές κηλίδες και μικρορωγμές. Κατά συνέπεια, η ηλεκτροδιαβρωμένη επιφάνεια παρουσιάζει μια αρκετά τραχεία (μη στιλπνή) εμφάνιση, ενώ η επιφανειακή τραχύτητα γίνεται αντιληπτή και με την αφή.

Η μέση αριθμητική τραχύτητα R_a εξαρτάται από το μέγεθος του κρατήρα εκκένωσης. Για την επίτευξη μεγάλων ταχυτήτων αποβολής υλικού, v_w απαιτούνται μεγάλες ενέργειες εκκένωσης, όπου η προκύπτουσα τραχύτητα επιφάνειας είναι μεγάλη. Για την επίτευξη μικρής τραχύτητας επακολουθεί κατεργασία με μικρότερη ενέργεια και συνεπώς επιτυγχάνεται μικρή μέση αριθμητική τραχύτητα R_a . Η καλύτερη μέση τραχύτητα επιφάνειας που επιτυγχάνεται στην κατεργασία των σκληρομετάλλων έναντι αυτής των χαλύβων, οφείλεται στη μικρότερη αποβολή υλικού ανά εκκένωση. Γενικά, η επιφανειακή τραχύτητα αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας του παλμού

εκκένωσης (σχήμα 1.15). Σήμερα, με υβριδικές τεχνικές ηλεκτροδιάβρωσης μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν απόλυτα λεία επιφάνεια, ωστόσο το κόστος της μεθόδου αυτής είναι πολύ υψηλό για κοινή εμπορική χρήση.



Σχήμα 1.15: Επίδραση ενέργειας εκκένωσης στην επιφανειακή τραχύτητα

Η θερμική επίδραση πάνω σε μια επιφάνεια έχει και μια άλλη σημαντική συνέπεια, τη δημιουργία ζώνης πλαστικής παραμόρφωσης καθώς και την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων, σε αντίθεση προς τις μηχανικές κατεργασίες. Το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων και το βάθος διείσδυσης της λεπτής ζώνης πλαστικής παραμόρφωσης στα επιφανειακά στρώματα κατά την ηλεκτροδιάβρωση εξαρτώνται από την ενέργεια εκκένωσης. Μεγάλο ποσό εκλυόμενης ενέργειας είναι δυνατό να οδηγήσει σε χαλάρωση των τάσεων, πράγμα που οφείλεται κυρίως στη δημιουργία μικρών ρωγμών στην κατεργασμένη επιφάνεια.

Η ζώνη παραμόρφωσης στην ηλεκτροδιάβρωση, αν και εκτιμάται ότι εμπεριέχει και δευτερεύοντα ίχνη μηχανικής φόρτισης, χαρακτηρίζεται κυρίως από θερμικά φαινόμενα αλλαγής της μικροδομής και τη δημιουργία ενός

επιφανειακού λευκού ψαθυρού στρώματος (white layer) που αποκαλύπτεται με μεταλλογραφική προσβολή με κατάλληλο αντιδραστήριο (Nital). Στη ζώνη θερμικής επίδρασης αναγνωρίζονται σχηματικά τρία διακριτά στρώματα:

- το εξωτερικό επανατηγμένο λευκό στρώμα (white layer),
- ένα ενδιάμεσο (μεταβατικό) στρώμα,
- το αρχικό υλικό που αποτελεί τη βάση.

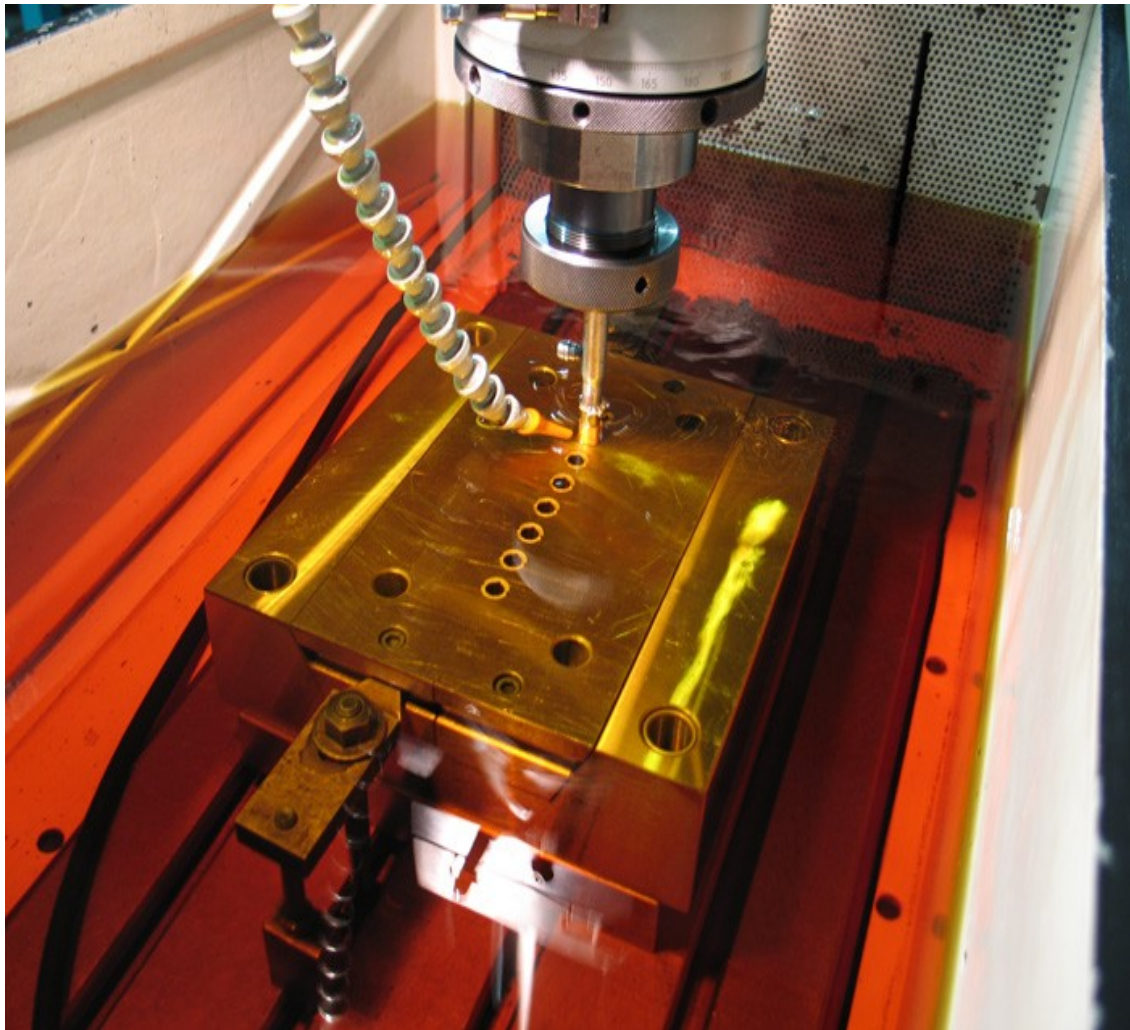
Το πάχος του εξωτερικού στρώματος και η ύπαρξη και το πάχος των άλλων ζωνών εξαρτώνται από το είδος του κατεργάσιμου υλικού και τα χαρακτηριστικά των παλμών. Διαπιστώνεται ότι η επιφάνεια του λευκού στρώματος χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη σκληρότητα (τριπλάσια και πλέον) σε σχέση με το αρχικό υλικό, οι τιμές όμως μειώνονται εκθετικά συναρτήσει του βάθους από την κατεργασμένη επιφάνεια και προσεγγίζουν την αρχική σκληρότητα σε βάθος μικρότερο των 500μm.

Η πιστότητα επιφάνειας του κατεργαζόμενου τεμαχίου εξαρτάται από το υλικό του τεμαχίου, την τραχύτητα επιφάνειας του εργαλείου, τον τρόπο κυκλοφορίας του διηλεκτρικού μέσου στο διάκενο, από την ένταση του ρεύματος και από τη διάρκεια παλμού. Οι εργαλειομηχανές ηλεκτροδιάβρωσης συνοδεύονται από νομογραφήματα κατεργασιμότητας, για την επιλογή των βελτίστων συνθηκών για δεδομένη κατεργασία. Ωστόσο λόγω της στοχαστικής φύσης της ηλεκτροδιάβρωσης, στην πράξη η σημασία τους είναι σχετική.

1.3.9 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η ηλεκτροδιάβρωση χρησιμοποιείται κυρίως για την κατεργασία εξαρτημάτων με πολύπλοκη γεωμετρία, η οποία θα ήταν δύσκολο και οικονομικά ασύμφορο να παραχθεί με συνδυασμό συμβατικών κατεργασιών. Χρησιμοποιείται επίσης για την κατεργασία πολύ σκληρών υλικών, που κατεργάζονται δύσκολα με συμβατικές μεθόδους, καθώς και για τη μικροκατεργασία (micro-EDM) εύθραυστων υλικών. Παρά τη δυσκολία ανάπτυξης ενός ικανοποιητικού θεωρητικού μοντέλου, ή Η/Δ βρίσκει αρκετές εφαρμογές σε μεγάλη κλίμακα στη βιομηχανική παραγωγή. Με την ανάπτυξη νέων προηγμένων υλικών, την ανάγκη για δημιουργία ολοένα και πιο πολύπλοκων γεωμετριών με οικονομικό τρόπο, την οριακή βελτίωση, πλέον, των δυνατοτήτων των συμβατικών εργαλειομηχανών και την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας,

υπάρχουν σημαντικές προοπτικές για την ανάπτυξη της τεχνολογίας της ηλεκτροδιάβρωσης και την ακόμα ευρύτερη χρήση της.



Σχήμα 1.16: Μηχάνημα Ηλεκτροδιάβρωσης αποτύπωσης-βύθισης της Exeron

2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως σύνθετο υλικό (composite material) μπορεί να χαρακτηριστεί ένα υλικό αποτελούμενο από δύο τουλάχιστον μακροσκοπικά διακρινόμενα συστατικά, συνδυασμένα για να επιτευχθούν ειδικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Δεν είναι δηλαδή πολυφασικά υλικά στα οποία οι διαφορετικές φάσεις σχηματίζονται φυσικά από αντιδράσεις, μετασχηματισμούς φάσεων ή άλλα φαινόμενα. Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του.

Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, θα πρέπει να έχει προκύψει ως συνδυασμός συστατικών μερών, για τα οποία οι ιδιότητες του ενός είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός δεν είναι πολύ μικρή (πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 10%). Με άλλα λόγια, σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη, τα οποία έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Το ένα από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: 1)Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών, 2)Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων και 3)Στρωματικά σύνθετα υλικά. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών, συγκεκριμένα άνθρακα.

Το μικρό βάρος, η υψηλή αντοχή, η εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση, η πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και στη διάδοση ρωγμών, οι σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους παράγοντες εκείνους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών για μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών άνθρακα, ειδικά αυτά με μήτρα πολυμερούς, έχουν γίνει το κυρίαρχο εξελιγμένο σύνθετο υλικό που χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες αεροσκαφών, αυτοκινήτων, αθλητικών κ.α.

Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην υψηλή τους αντοχή, στην χαμηλή τους πυκνότητα και στο προσιτό τους κόστος. Επίσης, αυτά με μήτρα άνθρακα, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή θερμοκρασιακή αντοχή (π.χ. διαστημόπλοια). Γενικότερα, η αυξανόμενη ερευνητική δραστηριότητα που παρατηρείται στον κλάδο των σύνθετων υλικών, μας δίνει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα για ολοένα και μεγαλύτερες εφαρμογές τους.

2.2 ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

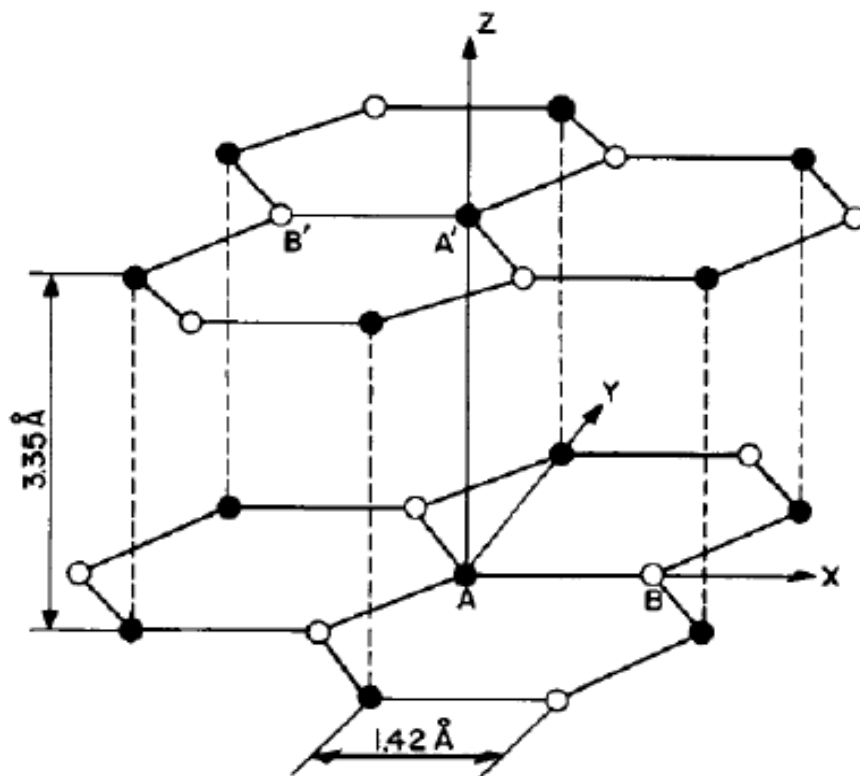
2.2.1 ΔΟΜΗ-ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Ο όρος ίνες άνθρακα αναφέρεται στις ίνες που αποτελούνται από άνθρακα σε ποσοστό τουλάχιστον 92%. Οι ίνες μπορεί να είναι κοντές ή μακριές, ενώ η δομή τους μπορεί να είναι κρυσταλλική, εν μέρει κρυσταλλική ή τελείως άμορφη. Η κρυσταλλική τους μορφή, ακολουθεί την κρυσταλλική δομή του γραφίτη, ο οποίος αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων ο βαθμός ανισοτροπίας εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους. Το ποσοστό του γραφίτη σε μια ίνα μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως 100%. Όταν αυτό είναι υψηλό, τότε η ίνα ονομάζεται γραφιτική.

Αυτή η εκδοχή, δηλαδή οι ίνες γραφίτη, είναι και η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή υψηλών επιδόσεων και ελαττωμένου βάρους σύνθετων υλικών ρητινικής μήτρας. Επίσης, οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή ενός υλικού πρέπει να συγκρατηθεί σε χαμηλό επίπεδο ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών.

Η υπεροχή αυτή των ανθρακονημάτων οφείλεται στη φύση του άνθρακα (ως στοιχείου) και στους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με άλλα άτομα άνθρακα. Αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων είναι η υψηλή στιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και ο χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή. Στη γραφιτική δομή τα άτομα C διατάσσονται πολύ πυκνά με τη μορφή εξαγωνικών επιπέδων, βλ. **σχήμα 2.1**. Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων C στις επίπεδες αυτές εξαγωνικές στρώσεις οδηγεί σε εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα, ο

ασθενής τύπου Van der Waals δεσμός που υφίσταται μεταξύ γειτονικών στρώσεων, έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερης τιμής μέτρο ελαστικότητας σε αυτή τη διεύθυνση.

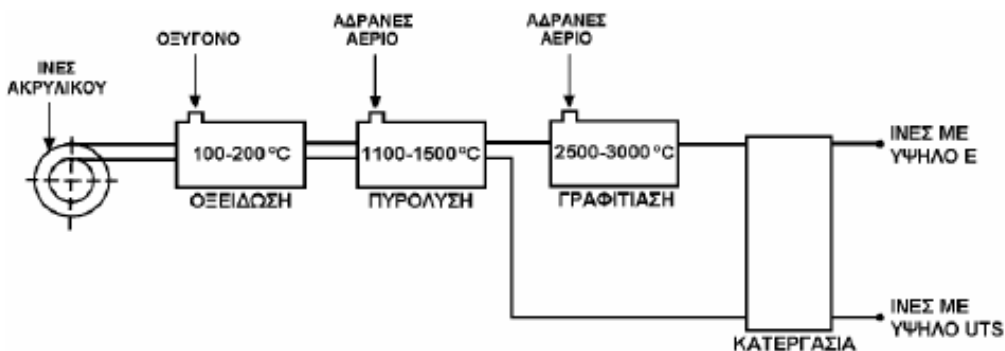


Σχήμα 2.1: Η κρυσταλλική δομή του γραφίτη

Στην παραγωγή των ανθρακονημάτων, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο ίνες του πολυμερούς πολυακρυλονιτρίλιου (PAN). Η παραγωγή ινών άνθρακα από ίνες PAN πραγματοποιείται σε τρία στάδια (σχήμα 2.2):

- Οξείδωση των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία (100-200°C), με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης, η οποία είναι απαραίτητη για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.
- Πυρόλυση, υπό τάση, σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100-1500°C. Οι παραγόμενες ίνες στο στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής (high strength carbon fibers) και η αντοχή τους φτάνει τα 3000MPa.

- Η θέρμανση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα συνεχίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες (2500-3000°C), οπότε πραγματοποιείται γραφίτιωση, με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση, που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλινών. Οι παραγόμενες ίνες σε αυτό το στάδιο χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus carbon fibers) και έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 400GPa, η δε διάμετρός τους είναι περίπου 10μm.



Σχήμα 2.2: Παραγωγή ενισχυτικών ινών άνθρακα

Στο **σχήμα 2.3** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ανθρακονημάτων που έχουν παραχθεί σε δύο στάδια (ίνες υψηλής αντοχής-HT ίνες) και σε τρία στάδια (ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας-HM ίνες).

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	HT-ΙΝΕΣ	HM-ΙΝΕΣ
Μέτρο ελαστικότητας (Gpa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (Mpa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα σε άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm ³)	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500

Σχήμα 2.3: Χαρακτηριστικά ινών άνθρακα

Σε οξειδωτική ατμόσφαιρα, η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης των ανθρακονημάτων περιορίζεται στους 500°C και για τους δύο τύπους ινών. Κατά το σχεδιασμό του συνθέτου πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπόψη και η μέγιστη θερμοκρασία χρήσης της μήτρας.

Οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων ανθρακονημάτων εξαρτώνται σημαντικά από την αρχιτεκτονική των ινών του PAN (μονοδιευθυντικές ίνες,

δισδιάστατο πλέγμα, τρισδιάστατο πλέγμα). Ο τρόπος διευθέτησης των ινών αυτών καθορίζει και το βαθμό ανισοτροπίας των ανθρακονημάτων που προκύπτουν και μπορεί να ποικίλλει από την πλήρη ισοτροπία ως την πλήρη ανισοτροπία. Η δυνατότητα επιλογής, από ένα μεγάλο εύρος τιμών της θερμοκρασίας κάθε σταδίου παραγωγής ανθρακονημάτων, δίνει την ευχέρεια παραγωγής ανθρακονημάτων διαφορετικού βαθμού γραφίτισης και διαφορετικών ιδιοτήτων (οι μηχανικές και οι φυσικές ιδιότητες, όπως η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα, εξαρτώνται από το βαθμό γραφίτισης και το βαθμό ανισοτροπίας). Γενικά, όσο καλύτερα προσανατολισμένες είναι οι ίνες και όσο υψηλότερη περιεκτικότητα σε γραφίτη διαθέτουν τόσο καλύτερες μηχανικές ιδιότητες επιδεικνύουν.

2.2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΓΕΝΙΚΑ

Οι ιδιότητες των ανθρακονημάτων μπορεί να ποικίλουν σε μεγάλο βαθμό, ανάλογα με τη δομή τους. Στα **πλεονεκτήματά** τους περιλαμβάνονται:

- χαμηλή πυκνότητα
- υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό
- χαμηλός συντελεστής θερμικής διαστολής
- θερμική σταθερότητα σε περιβάλλον χωρίς οξυγόνο, πέραν των 3000°C
- εξαίρετη αντίσταση σε ερπυσμό
- χημική σταθερότητα, ιδιαίτερα απέναντι σε ισχυρά οξέα
- βιοσυμβατότητα
- υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση
- φθίνον κόστος σε σχέση με το χρόνο

Στα **μειονεκτήματά** τους περιλαμβάνονται:

- ανισοτροπία (στο διαμήκη σε σχέση με τον εγκάρσιο άξονα)
- χαμηλή παραμόρφωση έως τη θραύση
- μικρή αντοχή σε θλίψη σε σχέση με τον εφελκυσμό

- τάση οξειδωσης και μετατροπής σε αέριο (π.χ. CO) όταν θερμαίνονται με αέρα άνω των 400°C
- τα αλκαλικά περιβάλλοντα δρουν καταλυτικά στην τάση οξειδωσής τους

Εφ' όσον οι ιδιότητες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή, οι διαφορετικές ιδιότητες είναι αλληλοσχετιζόμενες. **Τα παρακάτω συνήθως συνοδεύουν το ένα το άλλο:**

- αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό
- μείωση της παραμόρφωσης ως την αστοχία
- μείωση της αντοχής σε θλίψη
- αύξηση της αντοχής σε διάτμηση
- αύξηση του βαθμού ανισοτροπίας
- μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης
- αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας
- μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής
- αύξηση πυκνότητας
- αύξηση της αντοχής σε οξειδωση
- αύξηση της χημικής σταθερότητας
- αύξηση του κόστους

Στα παρακάτω εδάφια θα δοθεί μεγαλύτερη βαρύτητα στις ηλεκτρικές και στις θερμικές ιδιότητες, απ' ότι στις αντίστοιχες μηχανικές, καθώς αυτές είναι που μας απασχολούν κυρίως στην κατεργασία της ηλεκτροδιάβρωσης (όπου δεν έχουμε επαφή εργαλείου-τεμαχίου).

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή σε εφελκυσμό των ανθρακονημάτων, είναι αισθητά χαμηλότερα από αυτά ενός κρυστάλλου γραφίτη. Το μέτρο ελαστικότητας των ΗΜ ινών προσεγγίζει το μέτρο του κρυστάλλου γραφίτη, σε αντίθεση με αυτό των ΗΤ ινών που είναι πολύ χαμηλότερο. Η αντοχή σε εφελκυσμό και των δύο τύπων ινών είναι πολύ χαμηλότερο από του γραφίτη,

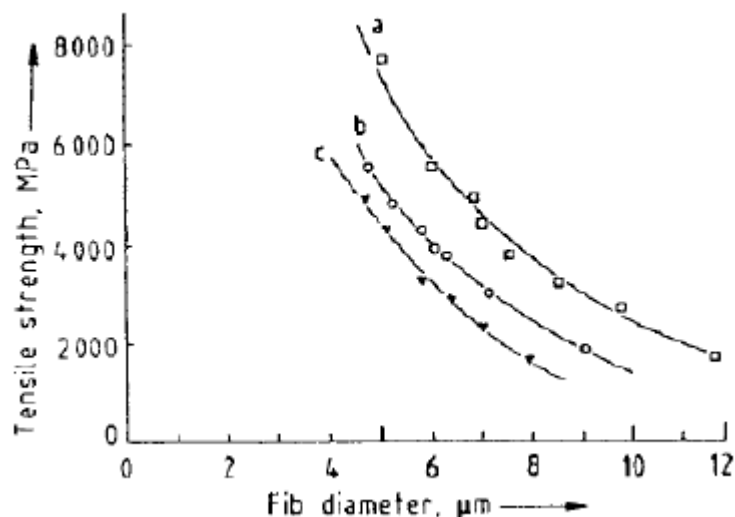
με τις HT ίνες προφανώς να έχουν μεγαλύτερη αντοχή από τις HM. Υπάρχουν πολλές προοπτικές για βελτίωση της αντοχής σε εφελκυσμό των ανθρακονημάτων, σε αντίθεση με το μέτρο ελαστικότητας που έχει φτάσει στα όρια ανάπτυξής του. Στο **σχήμα 2.4** διακρίνονται οι εφελκυστικές ιδιότητες κάποιων ανθρακονημάτων του εμπορίου.

<i>Manufacturer</i>	<i>Fiber</i>	<i>Modulus (GPa)</i>	<i>Strength (GPa)</i>	<i>Strain to failure (%)</i>
<i>PAN-based, high modulus (low strain to failure)</i>				
Celanese	Celion GY-70	517	1.86	0.4
Hercules	HM-S Magnamite	345	2.21	0.6
Hysol Grafil	Grafil HM	370	2.75	0.7
Toray	M50	500	2.50	0.5
<i>PAN-based, intermediate modulus (intermediate strain to failure)</i>				
Celanese	Celion 1000	234	3.24	1.4
Hercules	IM-6	276	4.40	1.4
Hysol Grafil	Apollo IM 43-600	300	4.00	1.3
Toho Beslon	Sta-grade Besfight	240	3.73	1.6
Amoco	Thornel 300	230	3.10	1.3
<i>PAN-based, high strain to failure</i>				
Celanese	Celion ST	235	4.34	1.8
Hercules	AS-6	241	4.14	1.7
Hysol Grafil	Apollo HS 38-750	260	5.00	1.9
Toray	T 800	300	5.70	1.9

Σχήμα 2.4: Εφελκυστικές ιδιότητες ινών άνθρακα

Γενικά, η αντοχή σε εφελκυσμό επηρεάζεται πολύ από τυχόν ατέλειες στην κατασκευή (επιφανειακές ή εσωτερικές ατέλειες). Επίσης μεγαλώνει με τη μείωση του μήκους και τη μείωση της διαμέτρου της ίνας. Στο **σχήμα 2.5** διακρίνεται η εξάρτηση της αντοχής από την διάμετρο της ίνας, για τρεις τύπους ινών από PAN.

Η αντοχή σε θλίψη είναι αρκετά μικρότερη από αυτή σε εφελκυσμό, ενώ μειώνεται σε συνάρτηση με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Επίσης, ο λόγος της αντοχής θλίψης προς την αντοχή εφελκυσμού είναι μικρότερος στις γραφιτικές ίνες απ' ότι στις ανθρακικές ίνες. Τυχόν πτώση της αντοχής σε θλίψη συνοδεύεται από μείωση και της αντοχής σε διάτμηση. Τέλος, όσον αφορά την αντοχή σε κάμψη, αυτή των ινών από PAN είναι αρκετά μεγάλη, σε αντίθεση με αυτή των ινών από πίσσα.

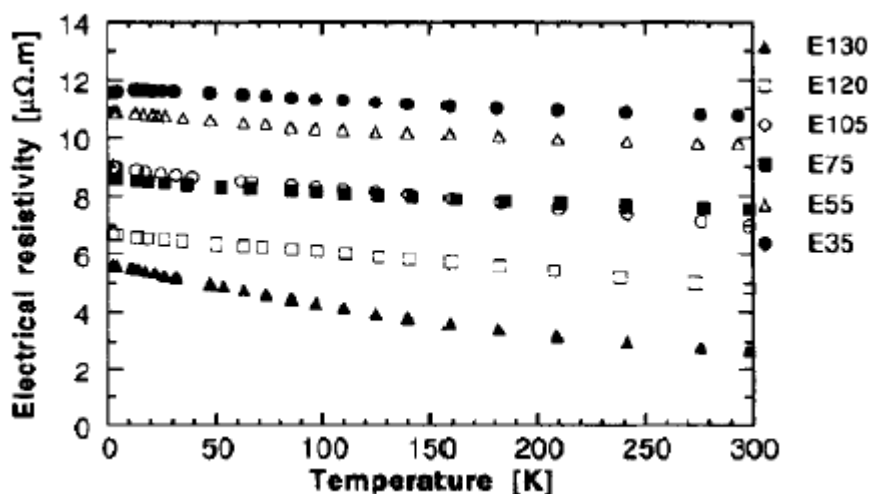


Σχήμα 2.5: Εξάρτηση αντοχής σε εφελκυσμό από τη διάμετρο ίνας (a)Hercules AS-4 (HT) (b)Torayca T-300 (HT) (c)Torayca M40 (HM)

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Η ηλεκτρική αντίσταση για τους περισσότερους τύπους των ανθρακονημάτων, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στο **σχήμα 2.6** διακρίνεται αυτού του είδους η εξάρτηση. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της πυκνότητάς τους με αύξηση της θερμοκρασίας, όπως συμβαίνει και με τον άνθρακα και το γραφίτη. Επίσης, σε μια δοσμένη θερμοκρασία, η αντίσταση μειώνεται με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας.

Ένας αποτελεσματικός τρόπος για να μειώσουμε την αντίσταση των ανθρακονημάτων έως και 10 φορές, είναι η **παρεμβολή**. Παρεμβολή είναι η διαδικασία κατά την οποία ξένα άτομα (παρεμβολείς), εισέρχονται ανάμεσα στα στρώματα του άνθρακα. Οι παρεμβολείς δρουν είτε ως αποδέκτες, είτε ως δότες ηλεκτρονίων, «ντοπάροντας» έτσι τα ανθρακονήματα. Η διαδικασία αυτή συντελεί στην αύξηση της συγκέντρωσης του φορέα και συνεπώς σε πτώση της ηλεκτρικής του αντίστασης. Η παρεμβολή είναι δυνατή μόνο στις γραφιτικές ίνες και μπορεί να οδηγήσει σε πτώση της αντίστασης έως και 80%. Η αντίστοιχη αύξηση του βάρους των ινών μπορεί να φτάσει το 20% σε κάποιες περιπτώσεις. Ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η πιθανή πρόκληση φυσικών καταστροφών στις ίνες, τέτοιων που επηρεάζουν αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες και την αντίσταση σε οξείδωση.



Σχήμα 2.6: Εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης ινών άνθρακα από τη Θερμοκρασία

Ένας άλλος τρόπος για να μειώσουμε την ηλεκτρική αντίσταση και να αυξήσουμε τη θερμική αγωγιμότητα των ανθρακονημάτων, είναι η εξωτερική επένδυσή τους με κάποιο μέταλλο περισσότερο αγώγιμο από τις ίνες. Όλοι οι τύποι ινών άνθρακα έχουν μεγαλύτερη αντίσταση από τα μέταλλα, κι έτσι όλα τα επενδυμένα με μέταλλο ανθρακονήματα είναι περισσότερο ηλεκτρικά αγώγιμα από τα αντίστοιχα «γυμνά». Ωστόσο, επειδή η θερμική αγωγιμότητα των γραφικών ινών είναι μεγαλύτερη ακόμη και από του χαλκού, η μεταλλική επένδυση αποδίδει τα αναμενόμενα μόνο στην περίπτωση ινών με χαμηλό ποσοστό γραφίτη (οι οποίες αποτελούν και τη συντριπτική πλειοψηφία των χρησιμοποιούμενων ινών). Άλλα αποτελέσματα που συνοδεύουν τη μεταλλική επένδυση, είναι αύξηση της πυκνότητας, αύξηση του συντελεστή θερμικής διαστολής και μείωση του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής σε εφελκυσμό.

ΛΟΙΠΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Η ειδική θερμική αγωγιμότητα των ινών άνθρακα είναι εξαιρετικά μεγάλη, πολλές φορές μεγαλύτερη από αυτή του χαλκού. Γενικά, ο συντελεστής θερμικής διαστολής τους μειώνεται με αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Ειπώθηκε ότι οι ίνες άνθρακα έχουν εξαιρετική ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Αυτό τις καθιστά εκτός από μέσο ενίσχυσης και μέσο βελτίωσης

της ηλεκτρικής και θερμικής αγωγιμότητας του σύνθετου υλικού, όταν χρησιμοποιούνται σε μήτρες μη-αγώγιμης φύσεως, όπως οι οργανικές και οι κεραμικές. Όσον αφορά την αντίσταση σε οξειδωση, αυτή μεγαλώνει όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του γραφίτη μέσα στην ίνα. Τέλος, επειδή ο άνθρακας είναι περισσότερο βιοσυμβατός ακόμη κι από το χρυσό ή το λευκόχρυσο, όλο και συχνότερα χρησιμοποιούνται ίνες άνθρακα στη βιοϊατρική τεχνολογία ως εμφυτεύματα.

2.3 ΜΗΤΡΕΣ

2.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Αν οι ίνες συνεισφέρουν στην υψηλή μηχανική αντοχή του σύνθετου υλικού, η μήτρα την εξασφαλίζει. Ο ρόλος της μήτρας συνίσταται στη συγκράτηση των ινών μεταξύ τους, στην προστασία τους από φθορές και εξωτερικές προσβολές, στη μεταφορά των μηχανικών τάσεων που ασκούνται στο σύνθετο υλικό προς τις ίνες και στην ανακοπή της διάδοσης των ρωγμών που ξεκινούν από σπασμένες ίνες.

Για να ικανοποιεί το ρόλο της, πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα και σχετική ευκαμψία, ενώ το σημείο τήξης της πρέπει προφανώς να είναι υψηλότερο της μέγιστης θερμοκρασίας λειτουργίας του σύνθετου υλικού. Για τη σωστή λειτουργία του σύνθετου υλικού, οι ιδιότητες της μήτρας θα πρέπει να είναι συμβατές με τις αντίστοιχες των ινών, ενώ η πρόσφυση ίνας-μήτρας πρέπει να είναι καλή, ιδιαίτερα αν οι ίνες είναι κοντές. Όσον αφορά τις ιδιότητες της μήτρας, αυτή συνήθως παρουσιάζει χαμηλότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες.

Διακρίνουμε τις ακόλουθες ομάδες υλικών μήτρας για σύνθετα υλικά:

- Οργανικές
- Μεταλλικές
- Από άνθρακα
- Κεραμικές

Τέλος, ειδική περίπτωση κεραμικής μήτρας αποτελεί το τσιμέντο, καθώς στις οικοδομικές κατασκευές συχνά ενισχύεται με χάλυβα, ίνες αμιάντου, και

ίνες γυαλιού. Η επιλογή του υλικού της μήτρας γίνεται με βάση τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του σύνθετου, με το γενικό κανόνα να υπαγορεύει οργανικές μήτρες στις χαμηλές θερμοκρασίες και κεραμικές μήτρες στις υψηλότερες.

Στο παρόν κεφάλαιο, θα ασχοληθούμε μόνο με τις οργανικές μήτρες και τις μήτρες άνθρακα, καθώς αυτές χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα υλικά που εξετάστηκαν στην εργασία.

2.3.2 ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΜΗΤΡΕΣ

ΕΙΔΗ ΟΡΓΑΝΙΚΩΝ ΜΗΤΡΩΝ

Οι οργανικές μήτρες είναι πολύ πιο εύκολο να κατασκευαστούν από οποιαδήποτε άλλο είδος μήτρας. Αυτό οφείλεται κυρίως στις χαμηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για την επεξεργασία τους. Διακρίνονται σε:

(α) **Θερμοπλαστικές.** Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές μοριακές αλυσίδες, οι οποίες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω του χαμηλού τους κόστους, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αποτελούν οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Σ ενισχυτικά υλικά θερμοπλαστικών μητρών χρησιμοποιούνται φθηνά υλικά (αμίαντος, μαρμαρυγίες, κ.α.), ώστε και το τελικό προϊόν να είναι χαμηλής τιμής. Διακρίνονται από μεγαλύτερη ολκιμότητα και ταχύτητα επεξεργασίας σε σχέση με τα θερμοσκληρυνόμενα, ενώ τελευταία έχουν αναπτυχθεί θερμοπλαστικά που αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Η έρευνα στον τομέα των θερμοπλαστικών εξελίσσεται διαρκώς και υπάρχει ραγδαία ανάπτυξη.

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

- (i) **Πολυεστερικές ρητίνες**, που ενισχύονται με ίνες γυαλιού.
- (ii) **Φαινολικές ρητίνες**, οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους φτάνει τους 400°C.
- (iii) **Εποξυδικές ρητίνες**, με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200°C, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις προηγούμενες και χρήση στη αεροναυπηγική. Αποτελούν τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες οργανικές μήτρες για ίνες άνθρακα. Κάποιες από τις εμπορικές ονομασίες είναι οι Epon, Epi-Rez και Araldite. Οι εποξυδικές ρητίνες συνδυάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και αντίσταση σε διάβρωση, είναι σταθερά όσον αφορά τις διαστάσεις τους, επιδεικνύουν καλή πρόσφυση και είναι σχετικά φθηνές.

Τα θερμοπλαστικά συγκεντρώνουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τα θερμοσκληρυνόμενα, όπως πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής, δυνατότητα ανακύκλωσης και ευκολότερη διαμόρφωση του σχήματός τους κατά την επεξεργασία. Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται οι περιορισμοί στις μεθόδους παραγωγής και οι υψηλές θερμοκρασίες επεξεργασίας τους.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα και οργανική μήτρα συγκεντρώνουν τις εξής ελκυστικές ιδιότητες:

- χαμηλή πυκνότητα (40% μικρότερη από του αλουμινίου)
- υψηλή αντοχή (όση και των χαλύβων υψηλής αντοχής)
- υψηλή δυσκαμψία (όση και του τιτανίου, αλλά με χαμηλότερη πυκνότητα)
- πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς συμπτώματα κόπωσης
- καλή αντίσταση σε ερπυσμό
- είναι σκληρά και ανθεκτικά
- ανθεκτικότητα στη διάβρωση
- σταθερότητα διαστάσεων (μπορούν να σχεδιαστούν για μηδενική τιμή του συντελεστή θερμικής διαστολής)
- χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση
- υψηλή θερμική αγωγιμότητα

Στο **σχήμα 2.7** διακρίνονται οι μηχανικές ιδιότητες σύνθετων υλικών μήτρας εποξειδικής ρητίνης σε σύγκριση με αυτές άλλων υλικών.

<i>Material</i>	<i>Strength^a (MPa)</i>		<i>Tensile modulus (GPa)</i>	<i>Density (g/cm³)</i>
	<i>Tension</i>	<i>Compression</i>		
Epoxy/carbon fibers AS-4	1 482	1 227	145	1.55
Epoxy/carbon fibers HMS	1 276	1 020	207	1.63
Epoxy/S-2 glass fibers	1 751	496	59	1.99
Epoxy/E-glass fibers	1 103	490	52	1.99
Epoxy/Aramid Kevlar 49	1 310	290	83	1.39
Aluminum (7075-T6)	572	–	69	2.76
Titanium (6Al-4V)	1 103	–	114	4.43
Steel (4130)	1 241–1 379	–	207	8.01

^aUnidirectional.

Σχήμα 2.7: Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα και οργανική μήτρα χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία αεροδιαστημικής, όμως η πτωτική τάση στις τιμές διευρύνει τις εφαρμογές τους στην αυτοκινητοβιομηχανία για ελάττωση του βάρους των οχημάτων, στη βιοϊατρική τεχνολογία ως εμφυτεύματα, στις κατασκευές, στα ηλεκτρονικά λόγω των καλών τους θερμικών ιδιοτήτων, σε κινητήρες αεροσκαφών κ.α.

48

2.3.3 ΜΗΤΡΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

ΓΕΝΙΚΑ

Τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα σε μήτρα άνθρακα (carbon-carbon composites), είναι από τις πιο αναπτυσσόμενες μορφές άνθρακα, αφού οι ενισχυτικές ίνες τα κάνουν ισχυρότερα, σκληρότερα και ανθεκτικότερα στη θερμική καταπόνηση απ' ό,τι ο συμβατικός γραφίτης. Λόγω της χαμηλής πυκνότητας του άνθρακα, η ειδική αντοχή (αντοχή/ πυκνότητα), το ειδικό μέτρο ελαστικότητας (μέτρο ελαστικότητας/ πυκνότητα) και η ειδική θερμική αγωγιμότητα (θερμική αγωγιμότητα/ πυκνότητα) αυτών των υλικών, είναι τα

υψηλότερα μεταξύ των σύνθετων υλικών. Επίσης, ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι σχεδόν μηδενικός.

Οι ανθρακικές μήτρες παρασκευάζονται από πίσσα ή από ανθρακούχα αέρια. Ανάλογα με τη θερμοκρασία παρασκευής τους, η δομή τους μπορεί να ποικίλει από άμορφη ως γραφίτική, ενώ όσο πιο μεγάλο είναι το ποσοστό του γραφίτη, τόσο πιο μεγάλη είναι η αντίσταση σε οξειδωση και η θερμική αγωγιμότητα, αλλά και πιο ψαθυρό το υλικό.

Τα κυριότερα μειονεκτήματα των ανθρακικών μητρών, είναι το υψηλό κόστος παρασκευής, η χαμηλή αντίσταση σε οξειδωση και η ανεπαρκής ανάπτυξη της έρευνας στο πεδίο αυτό.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες, τα σύνθετα υλικά με μήτρα άνθρακα υπερέχουν του συμβατικού γραφίτη στο μέτρο ελαστικότητας, στην αντοχή σε κάμψη, στην αντοχή σε εφελκυσμό, στην αντοχή σε θερμική καταπόνηση και στην ανακοπή της διάδοσης ρωγμών.

Τα υλικά αυτά, λόγω της υψηλής τους θερμικής αγωγιμότητας, χρησιμοποιούνται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες, υπερηχητικά αεροσκάφη, διαστημόπλοια και ηλεκτρονικές συσκευές. Η θερμική τους αγωγιμότητα αυξάνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία επεξεργασίας τους, ειδικά όταν αυτή είναι μεγαλύτερη από 2800°C, διότι έχουμε μεγαλύτερα ποσοστά γραφίτη. Η θερμική αγωγιμότητα και η ηλεκτρική αντίσταση, σε διεύθυνση παράλληλη και κάθετη στη διεύθυνση των ινών, διακρίνεται στο **σχήμα 2.8**. Παρατηρούμε πως στην παράλληλη διεύθυνση η θερμική αγωγιμότητα είναι υψηλή και η ηλεκτρική αντίσταση χαμηλή, ενώ στην κάθετη διεύθυνση συμβαίνει το αντίθετο. Επίσης, όπως στην περίπτωση του γραφίτη, τα υλικά αυτά έχουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα σε θερμοκρασίες μικρότερες των 10K.

Heat treatment temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m/K)		Electrical resistivity (μΩ.m)	
		⊥		⊥
1 200	36-43	4-7	33-37	98-114
2 800	127-134	39-46	8-12	68-81

Σχήμα 2.8: Θερμική αγωγιμότητα και ηλεκτρική αντίσταση σύνθετων υλικών με μήτρα άνθρακα

Τέλος, λόγω της χαμηλής πυκνότητας του άνθρακα, η ειδική θερμική αγωγιμότητα των σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα σε ανθρακική μήτρα είναι εξαιρετικά υψηλή σε σύγκριση με άλλα υλικά.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα σε μήτρα άνθρακα περιλαμβάνουν φρένα αεροσκαφών, σωλήνες θέρμανσης, βιοϊατρικά εμφυτεύματα, εργαλεία, καλούπια και πιστόνια σε μηχανές.

2.3.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΙΝΩΝ

Βασική παράμετρος είναι ο συντελεστής σχήματος της ίνας (s – aspect ratio) που είναι ο λόγος του μήκους (l) προς την ακτίνα (r) των ινών και αποτελεί κριτήριο για το χαρακτηρισμό των ινών ως μακριών-συνεχών ή κοντών-ασυνεχών. Οι πρώτες προσδίδουν στο σύνθετο μεγαλύτερη αντοχή από τις δεύτερες.

Γενικά, η αντοχή των ινών αυξάνεται με αύξηση του μήκους και μείωση της διαμέτρου τους. Στις ασυνεχείς ίνες υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος (l_c), για δεδομένη διάμετρο ίνας (d), που ορίζεται από τη σχέση

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_i},$$

όπου σ_f η αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό και τ_i η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας. Αν το μήκος της ίνας είναι μικρότερο του κρίσιμου

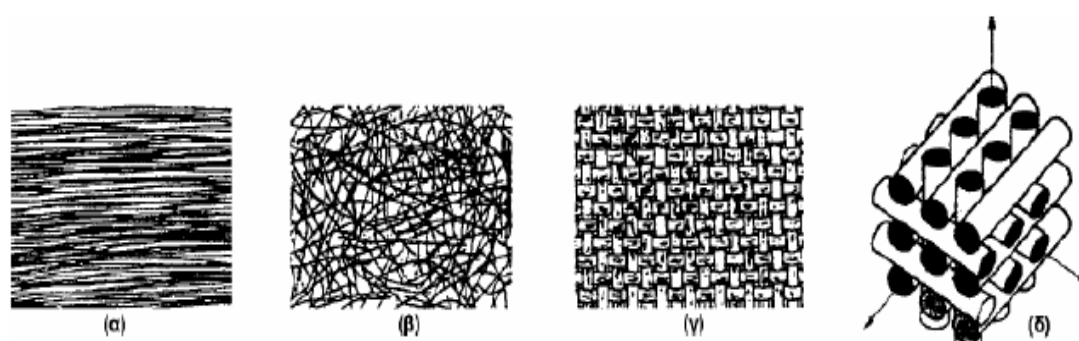
μήκους l_c , η ενίσχυση που προσφέρει στο σύνθετο είναι πολύ μικρή. Αν είναι μεγαλύτερο από $15l_c$, η ίνα συμπεριφέρεται ως συνεχής.

ΠΟΣΟΣΤΟ ΙΝΩΝ

Η αντοχή και η στιβαρότητα ενός σύνθετου υλικού, αυξάνονται, με την αύξηση της κατ' όγκον αναλογίας των περιεχόμενων ινών. Για ποσοστά υψηλότερα του 80%, τίθενται προβλήματα στην κατασκευή του σύνθετου, αφού οι ίνες δεν μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας.

ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΙΝΩΝ

Οι συνεχείς, μονοδιευθυντικές ίνες παρουσιάζουν ισχυρή ανισοτροπία και η μηχανική τους αντοχή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Ίνες διαφόρων προσανατολισμών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν, ώστε η προσφερόμενη ενίσχυση του σύνθετου να είναι όσο το δυνατόν ισότροπη.



Σχήμα 2.9: Τύποι διάταξης των ινών: (α)μονοδιευθυντικές ίνες, (β)ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ)ίνες με πλέξη ύφανσης, (δ)ίνες σε τρισσορθογώνια πλέξη.

Για σύνθετο υλικό με μονοδιευθυντικές ίνες, η βέλτιστη στιβαρότητα (μέτρο της οποίας είναι το μέτρο ελαστικότητας, E) και η βέλτιστη αντοχή, επιτυγχάνονται εάν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πάντοτε παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών.

Συνήθως, ένα σύνθετο υλικό δεν είναι μονοστρωματικό, αλλά πολυστρωματικό. Όταν οι ίνες κάθε στρώσης έχουν τον ίδιο προσανατολισμό, το σύνθετο συμπεριφέρεται ως ανισότροπο, ενώ, όταν η ενίσχυση μονοδιευθυντικών ινών βρίσκεται υπό τη μορφή διαδοχικών στρώσεων διαφορετικού προσανατολισμού, το σύνθετο αποκτά ισότροπη συμπεριφορά.

Στην ονομασία πολυστρωματικού υλικού θα πρέπει να αναφέρεται η διαδοχή προσανατολισμών. Για παράδειγμα, ένα σύνθετο [30/90₂/0/-45]_T αποτελείται από 5 στρώσεις, καθεμιά από τις οποίες σχηματίζει γωνία με τον διαμήκη άξονα του σύνθετου ίση με τον αριθμό που αναγράφεται στην αγκύλη.

ΣΥΝΑΦΕΙΑ ΙΝΩΝ-ΜΗΤΡΑΣ

Η καλή συνάφεια ινών-μήτρας είναι πολύ σημαντική για την καλή λειτουργία του συνθέτου. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί στη διεπιφάνεια ίνας-μήτρας πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών του σύνθετου. Ως διεπιφάνεια ίνας-μήτρας, ορίζεται η κοινή επιφάνεια μεταξύ των δύο συστατικών υλικών, καθώς και η περιοχή στα σύνορα αυτής της επιφάνειας. Η κακή συνάφεια έχει ως αποτέλεσμα την εκρίζωση (pull-out) των ινών από τη μήτρα, που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία του υλικού. Γι' αυτό το λόγο, κατά το σχεδιασμό του σύνθετου, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι συντελεστές θερμικής διαστολής μήτρας και ίνας και η αναγκαιότητα επικάλυψης των ινών με κάποιο συνδετικό υλικό. Οι ίνες άνθρακα επικαλύπτονται με οργανικές ουσίες, για αύξηση της συνάφειάς τους με τη μήτρα, ή με Ni, όταν χρησιμοποιούνται με μεταλλικές μήτρες (Ag, Al).

2.4 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ

Όπως ειπώθηκε στα προηγούμενα εδάφια, λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους, τα σύνθετα υλικά με ενισχυτικές μήτρες άνθρακα βρίσκουν ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή σε βιομηχανίες και τεχνολογίες αιχμής, όπως η αεροδιαστημική, οι πυρηνικές εφαρμογές κ.α. Φυσικά, ο τρόπος κατεργασίας τους είναι από τους πιο σπουδαίους παράγοντες για την ποιότητα κατασκευής των εξαρτημάτων που απαιτούνται. Η κατεργασία προφανώς πρέπει να οδηγεί σε προϊόντα ποιοτικά και αξιόπιστα, τα οποία παρασκευάζονται με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Γενικά, τα υλικά αυτά, λόγω της σκληρότητάς και της ψαθυρής φύσης τους, είναι αρκετά ευαίσθητα στις μεθόδους συμβατικών κατεργασιών και στις μηχανικές μεθόδους κοπής. Αυτό δε που είναι ιδιαίτερα δύσκολο είναι η διάνοιξη διαμπερών αλλά και τυφλών οπών. Τα πιο συχνά ελαττώματα που αναπτύσσονται περιλαμβάνουν αποκολλήσεις στρωμάτων, ρωγμές στη μήτρα

και κατεστραμμένες ίνες που προεξέχουν, ενώ η διάρκεια ζωής του εργαλείου είναι πολύ μικρή.

Γι' αυτό το λόγο έχει διερευνηθεί η δυνατότητα κατεργασίας των σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες άνθρακα με μη-συμβατικές μεθόδους. Η έρευνα που βρίσκεται σε εξέλιξη έχει δώσει αποτελέσματα που υπόσχονται πολλά, όμως βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Έτσι πρέπει να υπάρξει αρκετή εξέλιξη ακόμη σε αυτόν τον τομέα. Μεταξύ άλλων έχουν δοκιμαστεί η κοπή με δέσμη laser, η υδροκοπή και η ηλεκτροδιάβρωση. Ειδικά η ηλεκτροδιάβρωση, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο αυτής της εργασίας, αποτελεί μια κατεργασία αρκετά κατάλληλη για εφαρμογή σε σκληρά υλικά που είναι δύσκολο να κατεργαστούν (όπως θερμικά επεξεργασμένοι χάλυβες, καρβίδια σκληρομετάλλων και διάφορα κεραμικά), και είναι απολύτως εφαρμόσιμη στα σύνθετα υλικά με ενισχυτικές ίνες άνθρακα.

Εκτός από τη δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων γεωμετριών, κατά την ηλεκτροδιάβρωση έχουμε ανάπτυξη αμελητέων μηχανικών δυνάμεων. Αυτό θεωρητικά επιτρέπει τη δημιουργία κατεργασμένων επιφανειών με ακρίβεια, χωρίς πολλές παραμορφώσεις και παραμένουσες τάσεις. Επίσης δεν έχουμε προβλήματα κραδασμών και μπορούμε να κατεργαστούμε μικρά και περίπλοκα αντικείμενα.

Αν και μέχρι στιγμής έχουν γίνει κάποιες μελέτες πάνω στο αντικείμενο, δεν έχουμε ολοκληρωμένα συμπεράσματα, ούτε σαφή εικόνα της εξάρτησης των αποτελεσμάτων της ηλεκτροδιάβρωσης των σύνθετων υλικών από τις παραμέτρους της κατεργασίας. Από τα συμπεράσματα αυτών των μελετών προκύπτει ότι:

- Η θετική πολικότητα εργαλείου αποδίδει καλύτερα από την αρνητική, όσον αφορά τη σχετική φθορά του εργαλείου και το ρυθμό αποβολής υλικού από το κατεργαζόμενο τεμάχιο, κάτω από τις ίδιες συνθήκες.
- Τα χάλκινα ηλεκτρόδια πετυχαίνουν καλύτερες τιμές για την τραχύτητα της παραγόμενης επιφάνειας και τη σχετική φθορά εργαλείου απ' ότι τα ηλεκτρόδια από γραφίτη.
- Πρέπει να χρησιμοποιούνται μικρές εντάσεις ρεύματος για να αποφύγουμε αυξημένα επίπεδα τήξης στην επιφάνεια του σύνθετου

υλικού. Σε μεγάλες εντάσεις ρεύματος, έχουμε σημαντικές καταστροφές του υλικού, οι οποίες περιλαμβάνουν τήξη της επιφάνειας, θερμική διαστολή των ινών, αποκολλήσεις στρωμάτων και αποσύνδεση των ινών από τη μήτρα. Οι λεπτομέρειες του μηχανισμού καταστροφής του υλικού, καθώς και των συνεπειών που έχουν στην απόδοσή του κατά τη χρήση του δεν έχουν διερευνηθεί λεπτομερώς.

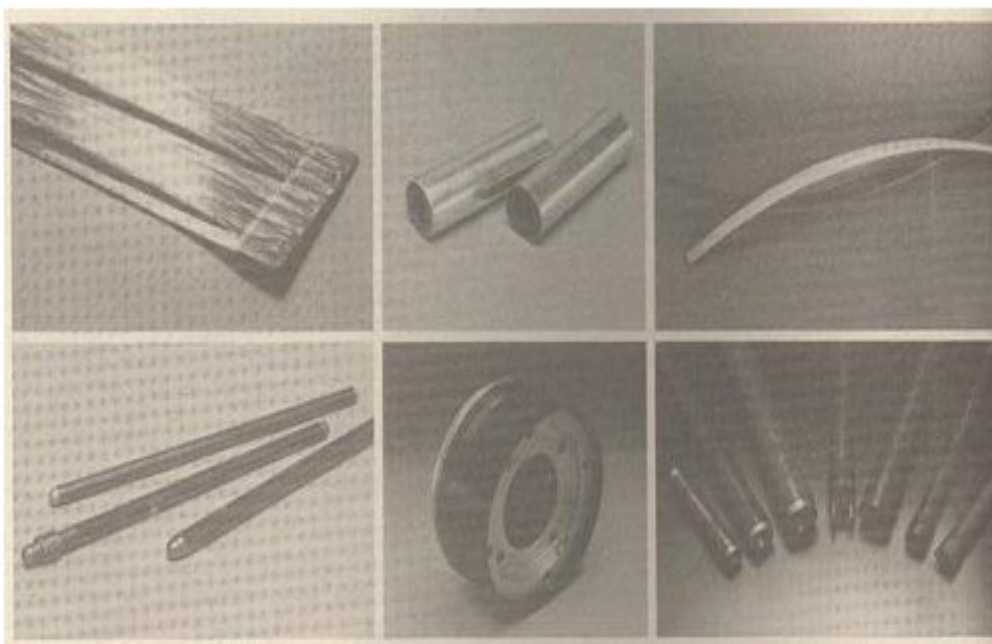
- Μεταξύ των διαφόρων ερευνητών, υπάρχουν διαφωνίες όσον αφορά τις τιμές που προκύπτουν για τις παραμέτρους που ελέγχονται. Για παράδειγμα, οι Lau, Wang & Lee [20] στα πειράματά τους υπολογίζουν τραχύτητα R_a που κυμαίνεται από 10 έως 40 μm , ενώ οι Hocheng, Guu, Tai & Liu [21] υπολογίζουν ότι κυμαίνεται από 3 έως 8 μm . Παρόμοια διαφωνία παρατηρείται και στο ρυθμό αποβολής υλικού, όπου οι μεν υπολογίζουν τιμές που κυμαίνονται από 2 έως 12 mm^3/min , ενώ οι δε από 0,1 έως 0,9 mm^3/min . Προφανώς οι διαφορές αυτές έχουν να κάνουν και με τη φύση των διαφορετικών υλικών, αλλά και με ένα πλήθος παραμέτρων των οποίων η επίδραση στην κατεργασία δεν έχει διερευνηθεί ακόμη. Παρ' όλα αυτά, καταδεικνύουν πως πρέπει να διανυθεί αρκετός δρόμος ακόμη, για να έχουμε λεπτομερέστερη εικόνα των συνεπειών της κατεργασίας στα σύνθετα υλικά με ενισχυτικές ίνες άνθρακα και για να υπάρξει πρακτική εφαρμογή της σε βιομηχανικούς χώρους.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ ΣΤΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ

ΣΕ ΚΑΘΕ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ στατική, ή δυναμική, σημαντικότερο ρόλο για την αποτελεσματική και αποδοτική λειτουργία της παίζουν τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν. Κι αν για χιλιάδες χρόνια ο άνθρωπος χρησιμοποιούσε υλικά που έβρισκε έτοιμα ή σχεδόν έτοιμα στη φύση, κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων αιώνων γνώρισαν μεγάλη ανάπτυξη τα «τεχνητά» υλικά. Αυτά δηλαδή που δημιούργησε ο ίδιος, με την επεξεργασία ή το συνδυασμό

πρώτων υλών που υπάρχουν στη φύση, μετά από ανάπτυξη της ανάλογης κατασκευαστικής τεχνολογίας.

Τα υλικά αυτά αποκτούσαν με τον καιρό όλο και μεγαλύτερη σπουδαιότητα στη βιομηχανία και τις κατασκευές, δημιουργώντας σιγά-σιγά έναν ολόκληρο επιστημονικό κλάδο, αυτόν της δημιουργίας, κατασκευής και βελτίωσης των υλικών. Η συνεργασία με τον κλάδο αυτόν έχει ιδιαίτερη σημασία για ορισμένους τομείς της βιομηχανίας, όπου χρησιμοποιούνται σήμερα σχεδόν αποκλειστικά «τεχνητά» υλικά.



Σχήμα 3.1: Εξαρτήματα από σύνθετο υλικό ενισχυμένα με ίνες άνθρακα

Εξαρτήματα αυτοκινήτου κατασκευασμένα από συνθετικό υλικό, ενισχυμένο με ίνες άνθρακα. Οι άριστες μηχανικές ιδιότητες των ινών άνθρακα, επιτρέπουν τη χρησιμοποίησή τους, όχι μόνο σε δευτερεύοντα μέρη του αμαξώματος για την εξοικονόμηση βάρους, αλλά και για την κατασκευή ακόμη και μηχανικών μερών, όπως άξονες, ελατήρια κ.λπ. Πολύ χρήσιμη μπορεί επίσης να είναι η χρησιμοποίησή τους για την ενίσχυση των προφυλακτήρων, λόγω της υψηλής ικανότητας απορρόφησης ενέργειας κρούσης που διαθέτουν.

Στην κατηγορία αυτή ανήκει κι η αυτοκινητοβιομηχανία. Από τα πρώτα χρόνια της ζωής του αυτοκινήτου, τον κυρίαρχο ρόλο στην κατασκευή του έπαιξε ο χάλυβας, το σπουδαιότερο και πιο διαδεδομένο «τεχνητό» υλικό στις

μηχανικές κατασκευές. Σήμερα, η κατασκευή των αυτοκινήτων γίνεται πλέον εξ ολοκλήρου από «τεχνητά» υλικά, αφού ακόμα και στο εσωτερικό τους, το ξύλο και το δέρμα έχουν από χρόνια αντικατασταθεί από τα πλαστικά. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών όμως, έχει αρχίσει να συντελείται μια μεγάλη αλλαγή στη βιομηχανία του αυτοκινήτου και των μέσων μεταφοράς γενικότερα, με τη χρησιμοποίηση των λεγόμενων «νέων» υλικών. Οι όλο και αυστηρότερες απαιτήσεις αντοχής, σε συνδυασμό με την ανάγκη για μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και τη συνεπαγόμενη ανάγκη για μείωση του βάρους οδήγησαν στη χρησιμοποίηση μιας σειράς νέων «τεχνητών» υλικών, με μεγάλη αντοχή και μικρό βάρος. Υλικών, που η τεχνολογία κατασκευής και διαμόρφωσής τους ήταν στις περισσότερες περιπτώσεις αρκετά πιο πολύπλοκη (και συχνά πιο ενεργοβόρα) από του χάλυβα. Για την εξέλιξη της τεχνολογίας αυτής χρειάστηκαν αρκετά χρόνια και τεράστιες επενδύσεις. Τα νέα αυτά υλικά είναι τα κράματα αλουμινίου και τιτανίου, καθώς και τα συνθετικά υλικά. Η χρησιμοποίησή τους είχε σαν αποτέλεσμα μια αλυσιδωτή σειρά αλλαγών στην τεχνολογία και τις μεθόδους κατασκευής των μεταφορικών μέσων. Πρωτοπόρος στη χρησιμοποίηση των υλικών αυτών ήταν βέβαια ο τομέας της αεροδιαστημικής βιομηχανίας, όπου οι απαιτήσεις αντοχής και ποιότητας κατασκευής είναι αυστηρότερες και με μικρότερα περιθώρια ανοχών και σφαλμάτων. Έτσι, είναι συχνά προτιμότερη η χρησιμοποίηση κάποιου ακριβότερου υλικού, όταν οδηγεί στην απαιτούμενη αύξηση των επιδόσεων και της ασφάλειας. Το γεγονός αυτό επέτρεψε την ανάπτυξη των νέων υλικών και έδωσε τα χρονικά περιθώρια για την εξέλιξη των μεθόδων και τη μείωση του κόστους παραγωγής τους.

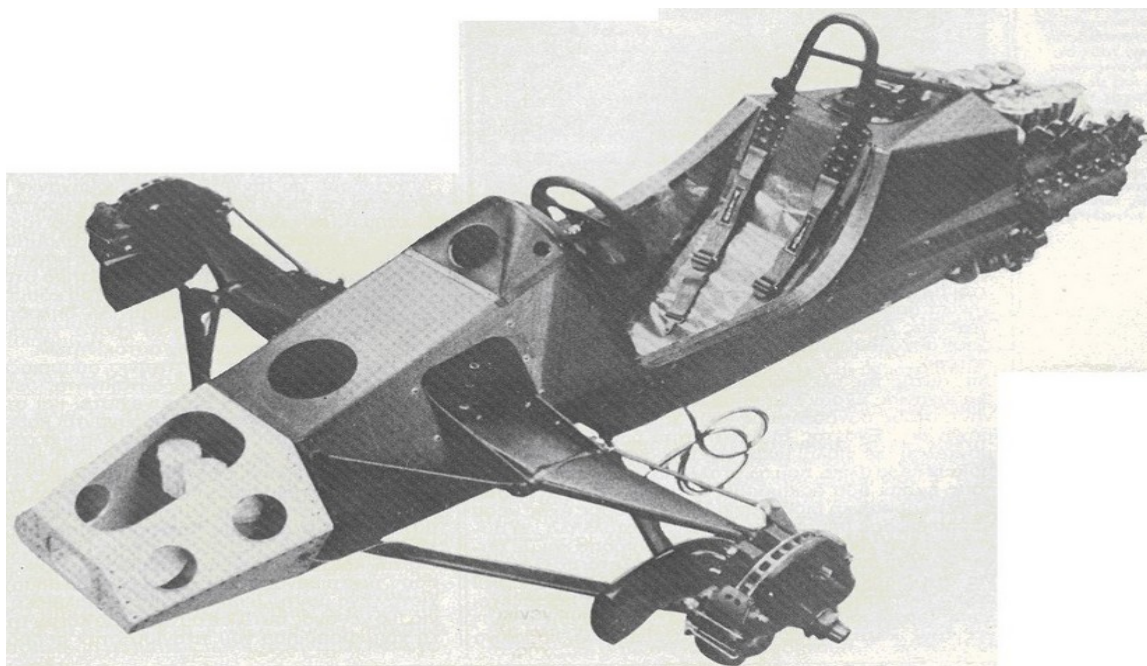
Έτσι, έγινε δυνατό να χρησιμοποιηθούν αργότερα και σ' άλλους τομείς, όπου το κόστος είναι εξίσου σημαντικό με την απόδοση της κατασκευής. Με τον καιρό η χρησιμοποίηση των περισσότερων νέων υλικών πέρασε και στην αυτοκινητοβιομηχανία, με τη γνωστή διαδικασία: πρώτα δηλαδή στους αγώνες και βαθμιαία και σ' αυτοκίνητα παραγωγής.

Η διαδικασία αυτή δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί, αφού υπάρχουν υλικά, όπως τα κράματα τιτανίου, που η χρησιμοποίησή τους στο αυτοκίνητο ακόμα και στους αγώνες είναι ασήμαντη, καθώς και άλλα, όπως τα συνθετικά υλικά υψηλής αντοχής, που δεν έχουν περάσει ακόμα σ' αυτοκίνητα παραγωγής. Αυτό όμως δεν είναι παρά θέμα χρόνου, αφού η πορεία για την καθιέρωση

των νέων υλικών και στην αυτοκινητοβιομηχανία θεωρείται πλέον ανεπίστρεπτη. Μετά από ένα σχεδόν αιώνα απόλυτης κυριαρχίας, ο χάλυβας αρχίζει βαθμιαία να εκτοπίζεται από τ' αυτοκίνητο, όπως εκτοπίστηκε κι από τ' αεροπλάνο.

3.1 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΧΡΗΣΕΙΣ

Παρά το γεγονός ότι αναφέρονται γενικά σαν υλικά μηχανοκατασκευής τα νέα υλικά έχουν μεγάλες διαφορές στις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες. Κατά συνέπεια διαφέρουν και οι τομείς όπου συμφέρει ή επιβάλλεται η χρησιμοποίηση του καθενός, χωρίς βέβαια αυτό να σημαίνει πως δεν είναι κάποτε ανταγωνιστικά, οπότε το κόστος γίνεται ο σημαντικότερος παράγοντας για την επιλογή.



Σχήμα 3.2: Σασί F1 MCLAREN MERCEDES

Οι αγώνες αποτέλεσαν σχεδόν πάντα το «εισαγωγικό σημείο» κάθε νέας τεχνολογίας και κάθε νέου υλικού στον κόσμο του αυτοκινήτου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα των πλεονεκτημάτων, που μπορεί να προσφέρει στα αυτοκίνητα η , χρησιμοποίηση των συνθετικών, είναι το, πολύ

πετυχημένο, σασί της FORMULA 1 MCLAREN, κατασκευασμένο από ίνες άνθρακα και κυψελωτό αλουμίνιο.

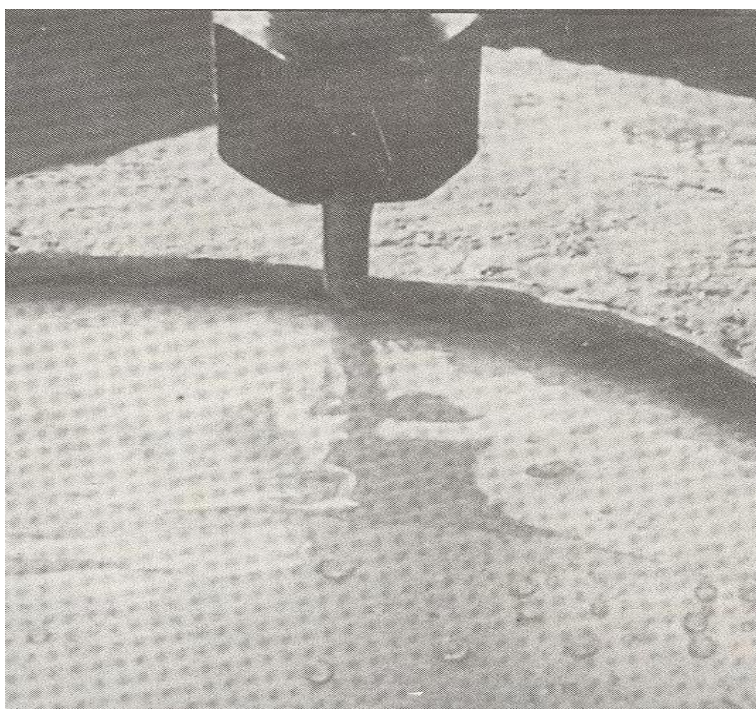
Το αλουμίνιο και το τιτάνιο, σ' αντίθεση με τ' άλλα μέταλλα, δεν βρίσκονται ποτέ σε καθαρή κατάσταση στη φύση, αλλά με τη μορφή χημικών ενώσεων, συνήθως με οξυγόνο. Για τη μετατροπή των οξειδίων αυτών σε καθαρό μέταλλο και κατόπιν σε κράμα, απαιτούνται αρκετά μεγάλα ποσά ενέργειας κι αυτός είναι ο λόγος που η χρησιμοποίησή τους στάθηκε αδύνατη επί αιώνες. Από την άλλη πλευρά, η κατασκευή των συνθετικών υλικών έγινε κατορθωτή μόνο μετά από μια σειρά σημαντικών ανακαλύψεων κι εξελίξεων στην οργανική χημεία και τη χημεία των πολυμερών. Η αντοχή των υλικών αυτών σ' εφελκυσμό είναι μεγάλη, αν και δεν είναι πάντα μεγάλη η ελαστικότητά τους, σε σχέση με το χάλυβα. Ειδικά για τις ίνες υψηλής αντοχής, όπως οι ίνες άνθρακα και Κέβλαρ, οι ιδιότητες αυτές μπορούν να μεταβάλλονται σημαντικά, ανάλογα με τη μέθοδο κατασκευής τους. Επιπλέον, οι ίνες αυτές χρησιμοποιούνται με τελείως διαφορετικό τρόπο από τα μέταλλα, διασκορπισμένες μέσα σε μια «μήτρα» από άλλο υλικό για την ενίσχυσή της. Γι' αυτό άλλωστε χρησιμοποιείται και ο όρος «συνθετικά υλικά», υπονοώντας μείγματα από δύο τουλάχιστον διαφορετικά συστατικά, καθένα από τα οποία διατηρεί τις ιδιότητές του και μετά την ανάμειξή τους. Τη μεγαλύτερη ελαστικότητα πάντως, παρουσιάζουν οι ίνες άνθρακα, η θραύση των οποίων μετά από εφελκυσμό, επέρχεται χωρίς πλαστική παραμόρφωση, σ' αντίθεση με τους χάλυβες. Σημαντικές διαφορές υπάρχουν επίσης μεταξύ των «νέων» υλικών, όσον αφορά τη θερμική διαστολή τους. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό και πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψη σε κάθε κατασκευή, γιατί η συναρμολόγηση από διαφορετικά υλικά, κομματιών που υφίστανται θερμοκρασιακές διαφορές, μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων μηχανικών τάσεων και τη μείωση της αντοχής της κατασκευής. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του τιτανίου είναι αρκετά χαμηλός, ο συντελεστής του σιδήρου είναι 1,5 φορά μεγαλύτερος και ο συντελεστής του αλουμινίου 2 φορές μεγαλύτερος από του σιδήρου! Από την πλευρά τους, οι ίνες άνθρακα και Κέβλαρ δεν υφίστανται γενικά μεταβολή των διαστάσεών τους με τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

Για να φανεί πόσο σημαντικός είναι ο ρόλος των θερμικών διαστολών σε μια κατασκευή, αρκεί ν' αναφέρουμε ότι το μήκος των 30 περίπου μέτρων του υπερηχητικού αναγνωριστικού αεροσκάφους της Λόκχιντ, [SR-71](#), που είναι κατασκευασμένο σε μεγάλο βαθμό από τιτάνιο, μπορεί ν' αυξηθεί κατά 15-30 εκατοστά όταν το αεροσκάφος κινείται με πολύ μεγάλη ταχύτητα, λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, η χρησιμοποίηση των ινών άνθρακα ή Κέβλαρ, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα μέρη εκείνα της κατασκευής που μας ενδιαφέρει να μην παρουσιάζουν μεταβολές των διαστάσεών τους με τη θερμοκρασία, κάτι που συμβαίνει με κάθε μεταλλική κατασκευή.



Σχήμα 3.2: Αεροσκάφος SR-71

Ο ρόλος των θερμικών διαστολών σε μια κατασκευή είναι πολύ σημαντικός. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το υπερηχητικό αναγνωριστικό αεροσκάφος SR-71 της Λόκχιντ, κατασκευασμένο σε μεγάλο βαθμό από τιτάνιο. Αν και το μέταλλο αυτό έχει χαμηλό συντελεστή διαστολής, σε σχέση με το χάλυβα και το αλουμίνιο, το μήκος του αεροσκάφους (30 περίπου μέτρα) μπορεί να αυξηθεί κατά 15-30 εκατοστά όταν κινείται με πολύ μεγάλη ταχύτητα, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται από την τριβή με τον αέρα. Η χρησιμοποίηση συνθετικών υλικών με ίνες άνθρακα και Κέβλαρ μπορεί να δώσει μια πολύ καλή λύση στο πρόβλημα των θερμικών διαστολών μιας κατασκευής, αφού τα δύο αυτά υλικά έχουν σχεδόν μηδενικό συντελεστή διαστολής.



Σχήμα 3.3: Σύνθετο υλικό

Τελική επεξεργασία συνθετικού υλικού από εποξική ρητίνη και ίνες Κέβλαρ, με εκτόξευση νερού με μεγάλη πίεση. Παρά το μικρό βάρος τους και την άριστη αντοχή τους σ εφελκυσμό, οι ίνες Κέβλαρ δεν μπορούν να

χρησιμοποιηθούν για κατασκευή εξαρτημάτων που υφίστανται ισχυρές σύνθετες καταπονήσεις, γιατί η αντοχή τους σε τάσεις συμπίεσης είναι πολύ μικρή, ίση με μόλις 20% της αντοχής τους σ' εφελκυσμό. Έτσι το Κέβλαρ, παρά την αρκετά χαμηλότερη τιμή του, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί για τις ίνες άνθρακα σ' όλες τις εφαρμογές των συνθετικών υλικών στο αυτοκίνητο.

Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, όπως και τις διαφορές που υπάρχουν στο θέμα της αντοχής των διαφόρων υλικών, ανάλογα μάλιστα και με τον τρόπο κατασκευής και χρησιμοποίησής τους, γίνεται φανερό πως δεν υπάρχουν απόλυτες αρχές για την υπεροχή εκείνου ή του άλλου υλικού. Για κάθε συγκεκριμένη κατασκευή πρέπει να επιλέγεται το καταλληλότερο υλικό, που δεν είναι πάντα το ίδιο και γι' αυτόν ακριβώς το λόγο είναι πολύ σημαντικός ο ρόλος των μηχανικών που ασχολούνται με τις εφαρμογές των υλικών. Αυτό είναι σήμερα γενικά αποδεκτό στους κύκλους της αυτοκινητοβιομηχανίας, όπου το κύρος της επιστήμης των υλικών και όσων ασχολούνται μ' αυτήν, αυξάνει ολοένα και περισσότερο.

Απ' αυτής της πλευράς, οι μηχανικοί της αυτοκινητοβιομηχανίας έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα, απέναντι στους συναδέλφους τους της αεροπορικής βιομηχανίας. Έχοντας τη δυνατότητα δημιουργίας ενός μοντέλου σε πολύ μικρότερο χρόνο, δεν χρησιμοποιούν παρά υλικά, που η καταλληλότητα και η απόδοσή τους έχουν ήδη δοκιμασθεί κι αποδειχθεί. Αντίθετα, στην αεροπορική βιομηχανία, ο σχεδιασμός ενός νέου αεροσκάφους (που πρέπει να είναι κατάλληλο για συγκεκριμένη χρήση, με συγκεκριμένο τρόπο και με συγκεκριμένη αντοχή κι επιδόσεις) χρειάζεται πολλά χρόνια στη διάρκεια των οποίων μπορεί να συντελεστεί σημαντική πρόοδος στον τομέα των υλικών. Χρειάζεται λοιπόν να μπορούν οι μηχανικοί να αλλάζουν τις επιλογές τους κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες εξελίξεις, κάτι που κάνει τη δουλειά τους δυσκολότερη απ' αυτή των μηχανικών της αυτοκινητοβιομηχανίας.

Εκείνο που είναι σίγουρο προς το παρόν στην αυτοκινητοβιομηχανία, είναι ότι ο ρόλος του χάλυβα δεν πρόκειται σύντομα να μηδενιστεί, παρ' όλη την ανάγκη για μείωση του βάρους και την αυξανόμενη χρησιμοποίηση των νέων

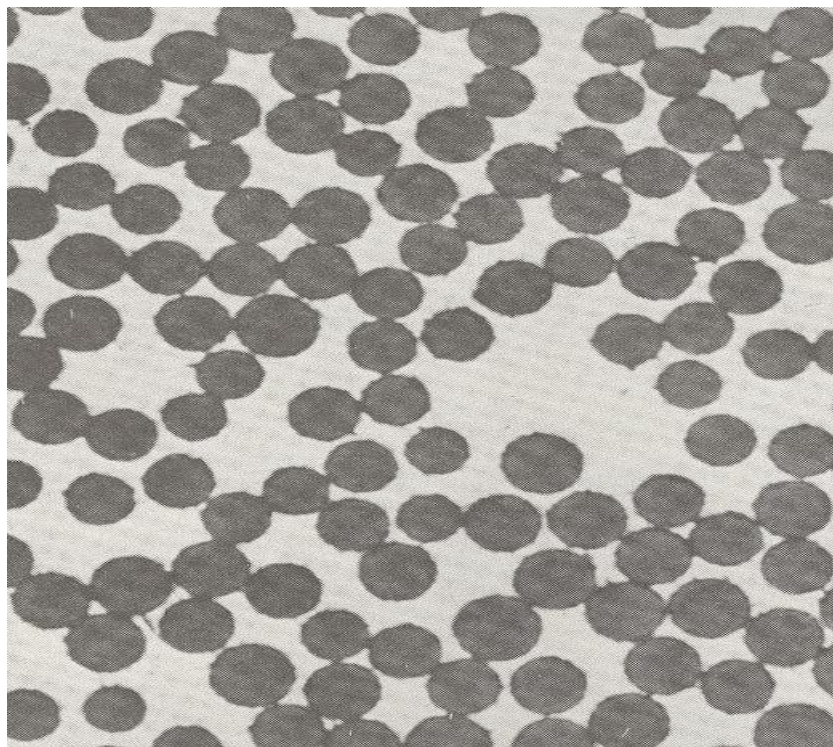
υλικών. Το κόστος παραγωγής του σε συνδυασμό με τις ιδιότητές του και τις πρόσφατες εξελίξεις, (όπως π.χ. η χρησιμοποίηση χαλύβων υψηλής αντοχής, το γαλβάνισμα κ.λπ.) του εξασφαλίζουν αρκετά ακόμα χρόνια χρησιμοποίησης στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε συνύπαρξη όμως με τα νέα υλικά, των οποίων ο ρόλος θα γίνεται όλο και πιο σημαντικός. Από τα υλικά αυτά, εκείνα που ήδη χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι τα κράματα αλουμινίου. Υπάρχουν σήμερα μοντέλα παραγωγής με κινητήρες σχεδόν ολόκληρους από αλουμίνιο, ενώ η αλουμινένια κυλινδροκεφαλή αποτελεί πλέον μια κοινοτυπία για τη μεγάλη πλειοψηφία των αυτοκινήτων. Τα κράματα αλουμινίου αντικαθιστούν επίσης συχνά το χάλυβα στις ζάντες (αν και συνήθως όχι στον στάνταρ εξοπλισμό), ενώ κατά καιρούς χρησιμοποιούνται και σε ορισμένα άλλα μηχανικά μέρη, όχι όμως στα αμαξώματα.

Στον αντίποδα βρίσκεται το τιτάνιο, που απουσιάζει τελείως από τ' αυτοκίνητα παραγωγής. Όπως γίνεται συνήθως στην αυτοκινητοβιομηχανία, οι πρώτες εμφανίσεις των κραμάτων τιτανίου έγιναν στους αγώνες, με τη χρησιμοποίησή τους σε στοιχεία αναρτήσεων και συστημάτων μετάδοσης, με τη μορφή ράβδων ή σωλήνων, όπως επίσης και στην κατασκευή βαλβίδων και των ελατηρίων τους. Οι ειδικοί προβλέπουν ότι στα επόμενα 20 χρόνια είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί το τιτάνιο για την κατασκευή βαλβίδων κι ελατηρίων και στους κινητήρες παραγωγής. Τα εξαρτήματα αυτά θα έχουν το 60% του βάρους των αντίστοιχων χαλύβδινων κι επομένως μικρότερη αδράνεια, μειώνοντας και την επίδραση των φαινομένων που οφείλονται σ' αυτή, όπως και την καταπόνηση των εκκεντροφόρων. Οι ίνες άνθρακα έχουν χρησιμοποιηθεί ευρύτατα στους αγώνες για την κατασκευή αμαξωμάτων, συχνά σε συνδυασμό με κυψελωτό αλουμίνιο. Εκτός όμως από τ' αμαξώματα, έχουν χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή μηχανικών μερών, ενώ έχει μελετηθεί μέχρι και η κατασκευή ολόκληρου κινητήρα από άνθρακα! Τέλος το Κέβλαρ έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στην αυτοκινητοβιομηχανία και κυρίως στους αγώνες, ενώ είναι πιθανή η χρησιμοποίησή του στην κατασκευή ελαστικών (για την ενίσχυση τους, αντί των χαλύβδινων συρμάτων) και στην κατασκευή υλικών τριβής για τα φρένα, αντικαθιστώντας τον αμίαντο.

3.2 ΑΝΘΡΑΚΑΣ Η ΚΕΒΛΑΡ

Μετά από χιλιάδες χρόνια χρησιμοποίησης φυσικών υλικών, συντελέστηκε τα τελευταία χρόνια το μεγάλο τεχνολογικό άλμα της κατασκευής τεχνητών υλικών. Τα υλικά που δεν υπάρχουν στη φύση, άλλα κατασκευάζονται από τον άνθρωπο αποτελούν τη νεότερη κατηγορία υλικών για κατασκευές, και την περισσότερο υποσχόμενη. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία απ' αυτά, που ανάλογα με τη σύνθεση και τη μέθοδο κατασκευής του καθενός, μπορούν να καλύψουν τελείως διαφορετικές ανάγκες.

Τα συνθετικά υλικά είναι ήδη γνωστά στην αυτοκινητοβιομηχανία, που από χρόνια χρησιμοποιεί τα απλουστέρα απ' αυτά, τα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού πλαστικό, για την κατασκευή τμημάτων των αυτοκίνητων παραγωγής αντικαθιστώντας τα μέταλλα. Προς το παρόν όμως, αυτό δεν γίνεται παρά για τμήματα του αυτοκίνητου που δεν υφίστανται ισχυρές μηχανικές καταπονήσεις, αφού τα υλικά αυτά δεν έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή. Έτσι, τα μέταλλα και κυρίως ο χάλυβας, εξακολουθούν ακόμα να παίζουν τον κυρίαρχο ρόλο στην αυτοκινητοβιομηχανία, κάτι που δεν ευνοεί βέβαια την επιτυχία του στόχου της όσο το δυνατόν μεγαλύτερης μείωσης του βάρους.



Σχήμα 3.4: Διατομή σύνθετου υλικού

Άποψη της διατομής συνθετικού υλικού σε μεγέθυνση, όπου φαίνεται καθαρά η κατανομή των ινών ενίσχυσης. Η «μήτρα» είναι από κράμα αλουμινίου με περιεκτικότητα 2% και η ενίσχυση από ίνες FP. Πρόκειται για μια ανόργανη ίνα από οξείδιο του αλουμινίου, που εξελίχθηκε από την αμερικανική Ντιπόν (Du Pont), στην προσπάθεια να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα του Κέβλαρ. Αν και η εξέλιξή της έγινε για χρησιμοποίηση με μεταλλικές «μήτρες», υπάρχει μεγάλη πιθανότητα χρησιμοποίησής της με «μήτρες» από ρητίνες, σε συνδυασμό με ίνες Κέβλαρ.

Η κατάσταση αυτή αναμένεται ν' αλλάξει στο μέλλον, καθώς η μείωση του κόστους και η βελτίωση των μεθόδων παραγωγής, αναμένεται ότι θα κάνουν δυνατή τη χρησιμοποίηση στ' αυτοκίνητα μαζικής παραγωγής, μιας κατηγορίας υλικών που έχουν ήδη αποδείξει την αξία τους στην αεροδιαστημική βιομηχανία και στα αγωνιστικά αυτοκίνητα. Πρόκειται για τα συνθετικά υλικά υψηλής αντοχής, δηλαδή τα ενισχυμένα με ίνες άνθρακα ή Κέβλαρ.

Στη συνηθέστερη μορφή τους, τα υλικά αυτά αποτελούνται από μια «μήτρα» από εποξική ή πολυεστερική ρητίνη ενισχυμένη με τις ίνες άνθρακα ή Κέβλαρ, χωρίς βέβαια ν' αποκλείονται και άλλες, πιο

προωθημένες λύσεις, σαν το σασί της formula 1 της MCLAREN, που είναι κατασκευασμένο από κυψελωτό αλουμίνιο και ίνες άνθρακα. Το σημαντικότερο πλεονεκτημάτων συνθετικών υλικών απέναντι στα μέταλλα, είναι ίσως η δυνατότητα των κατασκευαστών τους να τους δίνουν συγκεκριμένες ιδιότητες, ανάλογα με την τοποθέτηση και τον προσανατολισμό των ινών ενίσχυσης. Έτσι είναι δυνατή η κατασκευή υλικών που να παρουσιάζουν αυξημένη μηχανική αντοχή προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτό εξηγεί και την επιτυχία της χρησιμοποίησής τους στα αεροσκάφη και τα αυτοκίνητα σε πολλά τμήματα των οποίων, αναπτύσσονται μηχανικές τάσεις προσανατολισμένες προς μια κατεύθυνση Αυτό φυσικά δεν σημαίνει πως δεν είναι δυνατή η κατασκευή συνθετικών υλικών, με «πολυκατευθυντικές» ιδιότητες, κάτι που επιτυγχάνεται με τη διασταυρωμένη τοποθέτηση των ινών ενίσχυσης, προς διάφορες κατευθύνσεις.

Με τη χρησιμοποίηση ινών άνθρακα, είναι δυνατή η κατασκευή υλικών, με τεράστια αντοχή σ εφελκυσμό και πυκνότητα ίση με το μισό του αλουμινίου η το ένα έκτο του χάλυβα. Τα πιο προηγμένα συνθετικά υλικά με ίνες άνθρακα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή τμημάτων που απαιτείται να έχουν μεγάλη ακαμψία ή αντοχή σε δυνάμεις συμπίεσης. Εδώ βρίσκεται και μια μεγάλη διαφορά τους με το Κέβλαρ, που έχει μια εξαιρετική αντοχή στις τάσεις εφελκυσμού, αλλά και πολύ ελαττωμένη αντοχή στις τάσεις, συμπίεσης. Με την εφαρμογή ενός φορτίου συμπίεσης, ίσου με το 20% μόλις της αντοχής του Κέβλαρ σ εφελκυσμό, αρχίζει να εμφανίζεται πλαστική παραμόρφωση. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, το Κέβλαρ δεν χρησιμοποιείται π.χ. στην κατασκευή συστημάτων προσγείωσης αεροσκαφών, όπου αναπτύσσονται ισχυρότατες τάσεις συμπίεσης. Το κόστος εφαρμογής των συνθετικών υλικών υψηλής αντοχής στο αυτοκίνητο είναι προς το παρόν μεγάλο, γι' αυτό και η χρησιμοποίησή τους θα είναι σταδιακή. Θεωρείται πάντως πολύ πιθανό ότι στο μέλλον θα κατασκευάζονται από συνθετικά υλικά όχι μόνο μέρη του αμαξώματος, αλλά ακόμα και μηχανικά μέρη κι εξαρτήματα του κινητήρα.

Έτσι, δεν είναι απίθανο π.χ. να δούμε σύντομα ελατήρια αναρτήσεων από ίνες άνθρακα, ενώ από την πλευρά του το Κέβλαρ παρουσιάζει όπως προαναφέραμε, αρκετά πλεονεκτήματα, στη χρησιμοποίησή του σαν υλικό τριβής των φρένων. Και τα δύο υλικά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν, στην κατασκευή προφυλακτήρων, για την απορρόφηση ενέργειας στις συγκρούσεις, γιατί οι ίνες τους μπορεί να παραμορφώνονται, αλλά καταστρέφονται δυσκολότερα από τη δομή του χάλυβα. Γιατί όμως θα σκεφτόταν κανείς να χρησιμοποιήσει το Κέβλαρ, τη στιγμή που παρουσιάζει το μειονέκτημα της μικρής αντοχής σε συμπίεση, ενώ μπορεί σε κάθε περίπτωση να καλύψει τις ανάγκες του με τις ίνες άνθρακα; Απλούστατα, είναι θέμα κόστους. Αν το Κέβλαρ είναι 4-5 φορές ακριβότερο από το «φάιμπερ γκλας», στη βάση της τιμής ανά κιλό, οι ίνες άνθρακα είναι 20-40 φορές ακριβότερες. Κι επειδή τα συνθετικά υλικά είναι ήδη ακριβά, σε σχέση με τα μέταλλα, είναι ευνόητο ότι η χρησιμοποίηση των ακριβότερων απ' αυτά δημιουργεί ακόμα μεγαλύτερο πρόβλημα κόστους. Επίσης, το Κέβλαρ έχει μικρότερη πυκνότητα από τις ίνες άνθρακα, γεγονός που σημαίνει ότι η χρησιμοποίησή του μπορεί να οδηγήσει σε ακόμα σημαντικότερη μείωση του βάρους.

Το μικρότερο λοιπόν κόστος και πυκνότητά του, όπως και η πετυχημένη καριέρα του στην αεροπορία, ενισχύουν την άποψη ότι το Κέβλαρ θα χρησιμοποιηθεί αρκετά από την αυτοκινητοβιομηχανία στο μέλλον. Χαρακτηριστικό είναι ότι οι κατασκευαστές του στην Αμερική, θεωρούν σαν ρεαλιστικό στόχο την ύπαρξη 27 περίπου κιλών Κέβλαρ σε κάθε (αμερικάνικο) αυτοκίνητο, στα χρόνια που έρχονται. Από την άλλη πλευρά, η πολύ καλύτερη αντοχή των ινών άνθρακα στα φορτία συμπίεσης, θα έχει σαν αποτέλεσμα τη χρησιμοποίησή τους αντί του Κέβλαρ, σε σημεία του αυτοκινήτου με περισσότερο σύνθετες καταπονήσεις, όπως και στην κατασκευή μηχανικών μερών.

Και σ' αυτήν την περίπτωση μπορούμε να πούμε λοιπόν, πως, αν και υπάρχουν χρήσεις όπου το Κέβλαρ και οι ίνες άνθρακα παρουσιάζονται σαν ανταγωνιστικά, στην πράξη το κάθε υλικό παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε συγκεκριμένες χρήσεις, λαμβάνοντας υπ' όψη όλες τις παραμέτρους που ενδιαφέρουν την

αυτοκινητοβιομηχανία. Είναι πολύ πιθανό λοιπόν να συνυπάρξουν και τα δύο μελλοντικά στο αυτοκίνητο, μαζί με τα μέταλλα και τα απλά κι ενισχυμένα πλαστικά. Το τελικό συμπέρασμα που βγαίνει απ' όλα αυτά, είναι ότι δεν υπάρχει υλικό που ν' αποτελεί πανάκεια για την αυτοκινητοβιομηχανία. Κι όσο εξελίσσεται η τεχνολογία, τα πράγματα δεν γίνονται ευκολότερα αλλά πιο πολύπλοκα, αφού από μια μεγάλη ποικιλία υλικών, πρέπει να διαλέγει κανείς το καλύτερο για κάθε χρήση. Άλλωστε τα προϊόντα της αυτοκινητοβιομηχανίας γίνονται όλο και πιο πολύπλοκα κι αυτό δικαιολογεί τη διαφοροποίηση στην επιλογή των υλικών για κάθε τμήμα τους. Το αποτέλεσμα είναι φυσικά η κατασκευή όλο και καλύτερων αυτοκινήτων, αφού η επιλογή της καλύτερης λύσης για κάθε κομμάτι, σημαίνει σημαντική βελτίωση του συνόλου. Προς όφελος πάντα του καταναλωτή, που η ικανοποίηση των αναγκών του, κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο, κάνει όλο και πιο δύσκολη τη ζωή των μηχανικών.

3.3 ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ (CARBON)

3.3.1 ΖΑΝΤΕΣ ΑΠΟ CARBON

Το γρηγορότερο αυτοκίνητο στον κόσμο διαθέτει τροχούς από ανθρακονήματα. Ο λόγος για το γρηγορότερο αυτοκίνητο στο κόσμο, το **Ultimate Aero**, της **SSC** (Shelby Supercars). Με κινητήρα **V8, 6.8λίτρων** twin-turbocharged κάτω από το καπό του, ο οποίος παράγει **1.350 άλογα** και τελικές ταχύτητες που αγγίζουν τα 275 μίλια την ώρα. Ωστόσο το βάρος του δεν ξεπερνά τα 2,600 κιλά χάρη στα **ανθρακονήματα που κατασκευάζονται οι τροχοί** (πρώτοι τροχοί παγκοσμίως με ανθρακονήματα) αλλά και μέρη του αυτοκινήτου ενώ υπάρχουν και σημεία από αλουμίνιο που εξασφαλίζουν την ασφάλεια σε περίπτωση σύγκρουσης.



Σχήμα 3.5: Ultimate Aero, της SSC

Η ZANTA CR-9 ΕΞΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΑΠΟΝ CARBON

Μία από τις πιο πρόσφατες εφαρμογές των ινών άνθρακα είναι η πλήρης ανθρακονήματινη Carbon κατασκευή τροχών αυτοκινήτων. Ένα κομμάτι τροχού Carbon στην επανάσταση των ινών άνθρακα, που ονομάστηκε CR-9, εισήχθη για πρώτη φορά πριν από ένα χρόνο στο Ντουμπάι το 2010 στο Διεθνές Σαλόνι Αυτοκινήτου.



Σχήμα 3.6: Ζάντα CR-9 από carbon

LAMPORGINI AVENTADOR J

Οι ζάντες έχουν ένα κεντρικό σύστημα κλειδώματος και ένα επιπλέον ένθετο ανθρακονήματα που λειτουργεί σαν ένα μικρό ανεμιστήρα για βέλτιστο αερισμό του φρένου.



Σχήμα 3.7: Ζάντα LAMPORGINI AVENTADOR J

3.3.2 ΚΑΜΠΙΝΑ ΕΠΙΒΑΤΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑ

Το BMW Group ανοίγει για ακόμα μια φορά νέους ορίζοντες με το Megacity Vehicle (MCV), το οποίο αναμένεται στην αγορά το 2013.

Το Megacity Vehicle είναι ένα καινοτομικό αυτοκίνητο. Θα είναι το πρώτο στον κόσμο όχημα μαζικής παραγωγής με καμπίνα επιβατών κατασκευασμένη από ανθρακονήματα. Με την αρχιτεκτονική LifeDrive ανοίγουμε ένα νέο κεφάλαιο στη σχεδίαση ελαφρού βάρους. Πράγματι, αυτή η φιλοσοφία μας επιτρέπει ουσιαστικά να αντισταθμίσουμε τα πρόσθετα 250 - 350 κιλά που κατά κανόνα βαραίνουν τα ηλεκτρικά οχήματα. Για το σκοπό αυτό, το BMW Group εστιάζει στο

πρωτοποριακό high-tech υλικό CFRP - πλαστικό ενισχυμένο με ανθρακονήματα.





Σχήμα 3.7: Καρπίνα BMW Megacity Vehicle:

3.3.3 ΕΞΑΤΜΙΣΕΙΣ

Τελικό σιλανσιέ με κύλινδρο κατασκευασμένο από ανθρακονήματα για εφαρμογές που απαιτούν μειωμένο βάρος.



Σχήμα 3.7: Τελικό καζανάκι από carbon

3.3.4 ΣΑΣΙ CARBON ΤΗΣ FERRARI F70

Η τεχνολογία του σασί, προέρχεται απευθείας από τον κόσμο της F1. Η Ferrari επέλεξε την έκθεση του Παρισιού ώστε να μας παρουσιάσει το σασί της F70. Δηλώνει ότι απέρριψε την ιδέα να το κατασκευάσει σύμφωνα με τις εμπορικές τεχνικές κατασκευής, όπως η RTM (Resin Transfer Moulding), αφού καμία δεν πληροί την ποιότητα και τα λειτουργικά πρότυπα που έχει θέσει η Ferrari για την F70. Επικεφαλής του σασί είναι ο Rory Byrne, πρώην επικεφαλής σχεδίασης της Scuderia Ferrari. Το σασί χρησιμοποιεί τέσσερις διαφορετικούς τύπους ανθρακονήματος με πολλαπλές στρώσεις, όλες στο χέρι, που στη συνέχεια ενώνονται μέσω μιας πολύπλοκης διαδικασίας. Η μπροστά ανάρτηση της F70 θα ενσωματωθεί πάνω στο σασί, όπως επίσης η προστασία του ντεπόζιτου, η τραβέρσα, ο χώρος της μπαταρίας και η δομή των καθισμάτων. Η κύρια δομή του είναι κατασκευασμένη από carbon T800 ενώ σε σημαντικά σημεία έχει χρησιμοποιηθεί Carbon T800UD. Για να διατηρηθεί το βάρος όσο πιο χαμηλά γίνεται, το κάτω και το εγκάρσιο μέρος είναι κατασκευασμένα από carbon M46J, ένας τύπος carbon με ιδιαίτερα

υψηλή αντοχή. Στις κρίσιμες περιοχές όπως οι πόρτες, έχει επιλεγθεί η χρήση του πολύ σκληρού T100 που συν της άλλης, είναι ιδιαίτερα απορροφητικό σε περίπτωση σύγκρουσης. Το ίδιο carbon, χρησιμοποιείται και στη μύτη των μονοθέσιων της F1. Το σασί ζυγίζει κοντά στα 70 κιλά, 20% λιγότερο από όσο ζυγίζει το σασί της Enzo με την στρεπτική ακαμψία να έχει αυξηθεί κατά 27%, ενώ η συνολική ακαμψία κατά 22%. Η F70 δεν θα ξεπερνά συνολικά τα 1.100 κιλά.



Σχήμα 3.8: Σασί carbon της Ferrari F70

3.3.5 ΚΑΠΟ ΑΠΟ CARBON

ΚΑΠΟ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ ΣΕ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ FORD FOCUS

Ένα βήμα προς τον εκδημοκρατισμό των ανθρακονημάτων φαίνεται να κάνει η Ford, δημιουργώντας ένα πρωτότυπο Focus με καπό από το συγκεκριμένο υλικό που, προς το παρόν, αποτελεί προνόμιο πιο εξεζητημένων προτάσεων λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής του.

Παρ' όλα αυτά, όπως επισημαίνει η "μπλε οβάλ" φίρμα η καινοτομία δεν έγκειται στο ανθρακονημάτινο καπό του Focus αλλά στην πρόοδο που έχει

σημειωθεί όσον αφορά τη διαδικασία παραγωγής του συγκεκριμένου υλικού που, πλέον είναι σε θέση να αντεπεξέλθει, από πλευράς ταχύτητας, στις ανάγκες μιας φίρμας με τους ρυθμούς παραγωγής της Ford.

Παράλληλα με την αύξηση της ταχύτητας παραγωγής ανθρακονημάτων στοιχείων, η προσπάθεια της Ford σε σχέση με το συγκεκριμένο υλικό στοχεύει στη μείωση του κόστους παραγωγής του.

Ωστόσο, τα σχέδια της φίρμας δεν προβλέπουν σύντομα την υιοθέτηση του συγκεκριμένου υλικού για την κατασκευή μερών των αυτοκινήτων της στο άμεσο μέλλον. Για την ακρίβεια, ο στόχος της Ford είναι πριν το τέλος της δεκαετίας, να μειώσει το βάρος των αυτοκινήτων της κατά 340 κιλά με τη χρήση αυτού του υλικού το οποίο είναι κατά 1/3 ελαφρύτερο, και δύο φορές πιο ανθεκτικό σε σχέση με τα αντίστοιχα μέταλλα που χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Έτσι, όπως επισημαίνει και η ίδια η Ford, το συγκεκριμένο υλικό στο καπό του Focus πληροί τις προδιαγραφές της σε επίπεδο ασφάλειας και δοκιμών πρόσκρουσης ενώ, χάρη σε μία νέα τεχνική η οποία έγκειται στην τοποθέτηση αφρού ανάμεσα σε δύο φύλλα ανθρακονημάτων που αποτελούν το καπό, παρουσιάζει καλά αποτελέσματα και στην περίπτωση ατυχήματος με πεζούς.



Σχήμα 3.9: Καπό από ανθρακονήματα σε πρωτότυπο Ford Focus ΚΑΠΟ ΣΕ PEUGEOT 106 RALLYE

Αλλαγή καπό carbon εμπρός και πίσω σε 106 rallye με μείωση του βάρους πάνω από το μισό και βάσεις φτιαγμένες από ανθρακονήματα και αυτές. Το

καπό εμπρός ζυγίζει περίπου 14,5 κιλά, ενώ το carbon 3με5 κιλά ανάλογα με τις στρώσεις ανθρακονήματος που θα χρησιμοποιηθούν.





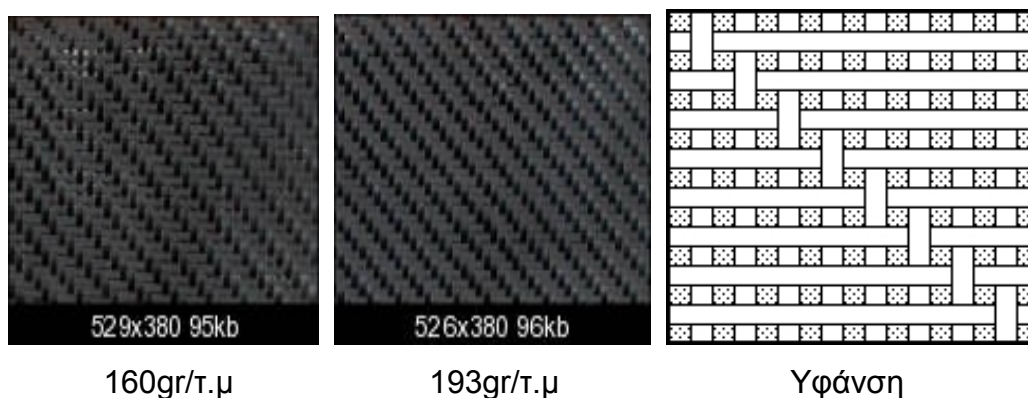
Σχήμα 3.10: Καπό carbon σε 106 rallye

Έχει δηλαδή το carbon περίπου 4 φορές μικρότερο βάρος από το κανονικό και είναι πολύ πιο ανθεκτικό.

4.ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ CARBON FIBRE

Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν είναι τα εξής:

1.Φύλλα ανθρακουφάσματος (carbon fibre) ανάλογης επιφάνειας με την κατασκευή μας. Για κατασκευές εσωτερικών κομματιών αυτοκίνητου το φύλλο δεν χρειάζεται να είναι ισχυρής πυκνότητας-βάρους 160gr/τ.μ ύφανσης μιας κατεύθυνσης η 193gr/τ.μ ύφανσηςTwill 2 X 2 είναι μια πολύ καλή επιλογή-για όσους θέλουν υπάρχει το 400gr/τ.μ ύφανση απλή το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως για καπό-φτερά και πόρτες. φυσικά υπάρχουν πολλών ειδών(σε βάρος ανα τ.μ και πλέξη) φύλλα ανθρακουφάσματος που μπορείτε να επιλέξετε ανάλογα με τις ανάγκες τις εκάστοτε κατασκευής.



Σχήμα 4.1

2.Φύλλα υαλουφάσματος (fiberglass) 160gr/τ.μ ύφανσης Twill 2 X 2.και σε αυτή τη περίπτωση υπάρχουν πολλών ειδών φύλλα υαλουφάσματα (σε βάρος ανά τ.μ και πλέξη) και εδώ επιλεγούμε εμπειρικά κυρίως αναλόγως κατασκευής.

3.Εποξικό Σύστημα (Ρητίνη και Σκληρυντής) εδώ πρέπει να γίνει ένας διαχωρισμός η έποξικη ρητίνη είναι αυτή που θα μας δώσει τη ισχυρή συνοχή των μορίων του ανθρακουφάσματος κάτω από συγκεκριμένες προϋποθέσεις κατά την «επούλωση» των υλικών αλλά και τη χρήση της κατασκευής (έκθεση σε υγρασία, ξηρό κλίμα, υψηλές θερμοκρασίες, κλπ). Η «επούλωση» η HEALING γίνεται με 2 τρόπους(τους οποίους θα αναλύσω παρακάτω) και για αυτό πρέπει να επιλέξουμε την ανάλογη ρητίνη σε συνδυασμό με σκληρυντή. Εποξική ρητίνη E 481 (Σκλήρυνση σε θερμοκρασία δωματίου ή σε φούρνο-μας καλύπτει για τις 2 εφαρμογές «Επούλωσης») είναι μια πολύ καλή λύση ειδικά για «οικιακές» κατασκευές σε συνδυασμό με Σκληρυντή H 20-40-18.

4. Αποκολλητικό κερί (wax) για καλούπια σε στέρεα μορφή ή σε υγρή μορφή-κατά προτίμηση το υγρό κερί διότι δουλεύεται πιο εύκολα με πινέλο.

5. Gel coat για το φινίρισμα-γυάλισμα

6. Βερνίκι PVA σε μορφή φιλμ ή σε υγρή μορφή.

7. Φιλμ κενού (ΜΟΝΟ αν χρησιμοποιήσουμε vacuum bags και κομπρεσέρ κενού αέρα για το healing της κατασκευής)

8. 3-4 γυάλινα μπολ μικρά για τις μίξεις των συστατικών

9. 2 Πινέλα όσο γίνεται καλύτερης ποιότητας

Τα παρακάτω επιπλέον αξεσουάρ είναι για περισσότερο επαγγελματική χρήση παρά οικιακή.

10. Κομπρεσέρ κενού αέρα (αναρρόφησης) υπάρχει και μια άλλη λύση αλλά ιδιαίτερα καλή για τους «οικιακούς» επίδοξους κατασκευαστές η ηλεκτρική σκούπα το μόνο θέμα είναι πως η ηλεκτρική σκούπα πρέπει να έχει αρκετά watt στο «ρούφηγμα».

11. Σακουλές κενού αέρα (vacuum bag) πολύ καλή λύση είναι και οι σακουλές κενού αέρα

12. Φούρνος

Στην πράξη:

η καρβονική ίνα (carbon fibre) παράγεται από ένα άλλο πολυμερές το πολυακρυλονιτρίλιο (polyacrylonitrile). Από το πολυακρυλονιτρίλιο με κατάλληλη επεξεργασία περνούμε και τα επίσης γνωστά SAN και ABS πλαστικά.

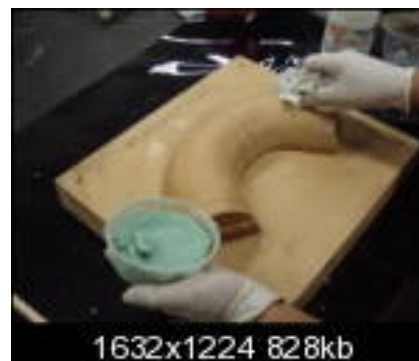
Ο τρόπος κατασκευής παρακάτω που θα αναλυθεί μπορεί να γίνει σε απλό δωμάτιο χωρίς να μπούμε στη διαδικασία ανάλυσης μεθόδων όπως το vacuum healing και «ψησίματος» τις οποίες μεθόδους θα αναφέρω στο τέλος εγκυκλοπαιδικά. Η κατασκευή μας πρέπει να γίνει σε δωμάτιο ξηρό με όχι πάνω από 15% -20% υγρασία και θερμοκρασία περίπου στους 23-27 βαθμούς.

Βήμα 1^ο: καθάρισμα η επιφάνεια στη οποία θα γίνει η κατασκευή πρέπει να καθαριστεί πολύ καλά να μην έχει σκόνες και γενικότερα ξένα σώματα αυτό μπορούμε να το επιτύχουμε χρησιμοποιώντας νίτρο επίσης η επιφάνειες να είναι λείες.



Σχήμα 4.2

Βήμα 2° wax: περνούμε το καλούπι μας και το αλείφουμε όλο από την πλευρά που θα εφαρμόσουμε τη κατασκευή με κερί (wax) το απλώνουμε όσο καλύτερα μπορούμε και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία τουλάχιστον 3-4 φορές MONO αν χρησιμοποιούμε κερί σε στερεά μορφή και όχι υγρό. στην περίπτωση του υγρού κεριού ένα καλό και προσεγμένο «στρώμα» είναι αρκετό. αφήνουμε το κερί περίπου 30 λεπτά να «πιάσει» επάνω στη επιφάνεια.



Σχήμα 4.3

Βήμα 3ο Βερνίκι: αφού έχουμε τελειώσει με το wax περνάμε το καλούπι μας με το βερνίκι PVA 2 χέρια είναι αρκετά το αφήνουμε να στεγνώσει (όχι να ξεραθεί) ακουμπώντας το με το δάχτυλο να δίνει την αίσθηση του κολλώδεις.

Βήμα 4ο Εποξικό Σύστημα: εδώ αρχίζουν λίγο τα δύσκολα η εποξική ρητίνη πρέπει να αναμιχθεί με τον Σκληρυντή η αναλογία τους θα επέλθει φυσικά από το τι υλικά (ρητίνη και σκληρυντής) έχουμε επιλέξει όσο περισσότερος σκληρυντής τόσο πιο γρήγορα πρέπει να δουλέψουμε την κατασκευή μας γιατί μειώνεται ο χρόνος «ελαστικότητας» της ρητίνης αλλά και στο σύνολο η

κατασκευή μας θα γίνει αρκετά σκληρή πράγμα το οποίο δεν θέλουμε γιατί στις carbon κατασκευές αλλά και κυρίως στις πολυεστερικές (άσχετο.. αλλά το αναφέρω) πρέπει το τελικό υλικό να έχει μια ελάχιστη ελαστικότητα ώστε να μην δούμε μακροχρόνια ενδεχόμενες παραμορφώσεις από τη συστολή διαστολή. σε αυτό το τομέα παίζει πολύ μεγάλο ρόλο και η ποιότητα των υλικών και τη μηχανικές ιδιότητες διαθέτουν (κοινώς ότι πληρώσεις παίρνεις) αφού αναμίξουμε τα υλικά, που προσωπικά επέλεξα διότι θεωρώ ότι είναι άκρως «φιλικά» στη χρήση-εφαρμογή τους για «οικιακούς» χρήστες, απλώνουμε το πρώτο στρώμα στο καλούπι.



Σχήμα 4.4

Βήμα 5ο Φύλλα Υαλονημάτων: αφού επιστρώνουμε το πρώτο στρώμα ρητίνης βάζουμε το πρώτο φύλλο υαλονήματος και σπατουλάρουμε από πάνω το φύλλο με ρητίνη ώστε να γίνει ένα με το καλούπι ιδιαίτερη προσοχή πάντα κατά την εφαρμογή να μην μείνει αέρας μεταξύ ρητίνης και φύλλων:



Σχήμα 4.5

επαναλαμβάνουμε το ίδιο βήμα με ακόμα ένα φύλλο η περισσότερα αναλόγως πόσο «δυνατή» επιθυμούμε την κατασκευή μας.

Βήμα 6ο εφαρμογή φύλλων ανθρακουφάσματος: αφού περάσουμε τα

φύλλα υαλονημάτων και έχουμε φροντίσει να πατήσουν καλά στο καλούπι χωρίς την δημιουργία θυλάκων αέρα είμαστε έτοιμοι να εφαρμόσουμε τα φύλλα ανθρακουφάσματος με την ίδια μέθοδο όπως και τα φύλλα υαλονημάτων:

επαναλαμβάνουμε το ίδιο βήμα με ακόμα ένα φύλλο η περισσότερα αναλόγως πόσο «δυνατή» επιθυμούμε την κατασκευή μας. Πάντα συνεχίζουμε να προσέχουμε να μην μείνουν θύλακες αέρα κατά το σπατουλάρισμα με το πινέλο του εποξικού συστήματος ουσιαστικά η κατασκευή είναι στο τελείωμα της και το μόνο που πρέπει να γίνει είναι να «ψηθεί» για 24 ώρες περίπου στο δωμάτιο με τις προϋπόθεσης που χαρακτήρισα παραπάνω. κάθε 2-3 ώρες καλό είναι να ψεκάζουμε την κατασκευή μας με ασετόν άνυδρο 99% καθαρότητας acetone βοηθάει τη ρητίνη να απωθήσει τυχόν θύλακες αέρα που έχουν εγκλωβιστεί ώστε να «δέσει» καλύτερα το υλικό.

ΤΕΛΙΚΟ ΣΤΑΔΙΟ

Αφού η κατασκευή έχει ψηθεί έρχεται η ώρα του ξεκαλουπώματος και το τελικό φινίρισμα αυτής εδώ θα παίξει ρόλο πόσο καλά απλώσαμε το wax όσο καλύτερα κάναμε την επάλειψη του καλουπιού με το wax τόσο πιο εύκολα θα ξεκολλήσει το carbon από αυτό αφού το ξεκολλήσουμε με προσοχή γυρίζουμε την κατασκευή από την μέσα μεριά και τραβάμε το φιλμ που έχει δημιουργηθεί από το PVA που περάσαμε στη αρχή.



Σχήμα 4.6

αμέσως μετά χρησιμοποιούμε ένα dremel ώστε να κόψουμε τα περιττά κομμάτια από το κυρίως «σώμα» στο τέλος για το τελικό φινίρισμα μπορούμε να το τρίψουμε με λίγο ντουκόχαρτο αν μείνουν ακίδες κλπ.



Σχήμα 4.7

Στο τέλος το μόνο που έχει μείνει είναι να κάνουμε την κατασκευή μας glanz (από matt που είναι). Περνώντας ένα χέρι gel coat έχουμε το τελικό φινίρισμα το οποίο θέλει 6-8 ώρες να στεγνώσει (και παραπάνω να το αφήσουμε καλό θα είναι):



Σχήμα 4.8

Οι φωτογραφίες είναι δανεισμένες από την MAXCARE μια Αμερικανική εταιρεία ειδικών κατασκευών.

5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η μορφοποίηση ινωδών συνθέτων υλικών περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα τρία στάδια:

- Παραγωγή των ινών.
- Διάταξη-διευθέτηση των ινών σε ιστό, πλέγμα ή πακέτα (yarn, tow, roving), όπου οι μεμονωμένες ίνες ομαδοποιούνται κατάλληλα ανά 100-100.000.
- Εισαγωγή των ινών στη μήτρα.

Με βάση το υλικό της μήτρας, οι μέθοδοι μορφοποίησης ινωδών συνθέτων υλικών μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

A. Μορφοποίηση συνθέτου οργανικής μήτρας

A1. Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου (Σχ.5.1)

- Χειροποίητη στρώση (hand lay-up)
- Χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag)
- Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding)

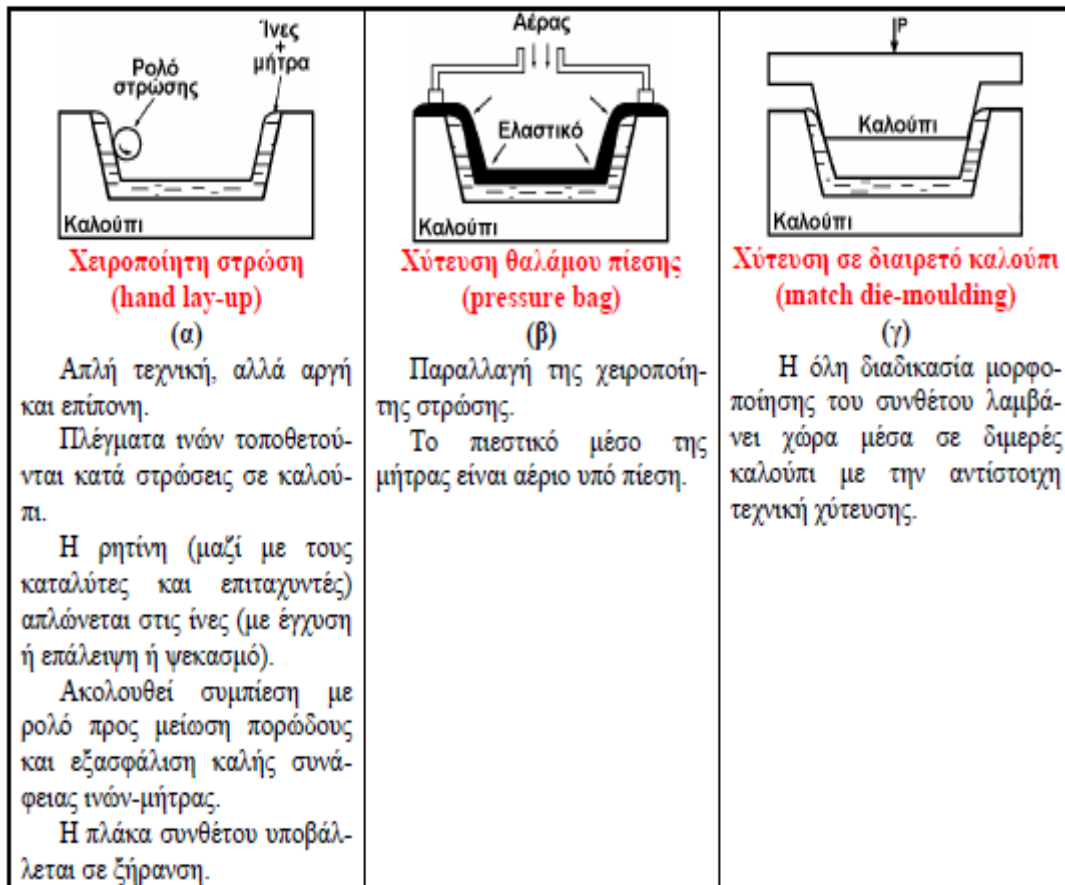
A2. Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου (Σχ. 18-20)

- Περιέλιξη νήματος (filament winding)
- Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
- Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)

B. Μορφοποίηση συνθέτου μεταλλικής μήτρας (Σχ. 21-23)

- Συνδιέλαση (co-extrusion)
- Μορφοποίηση με χύτευση (casting process)
- Συμπύεση σε στερεή κατάσταση
- Απόθεση υλικού μήτρας

Γ. Μορφοποίηση συνθέτου κεραμικής μήτρας

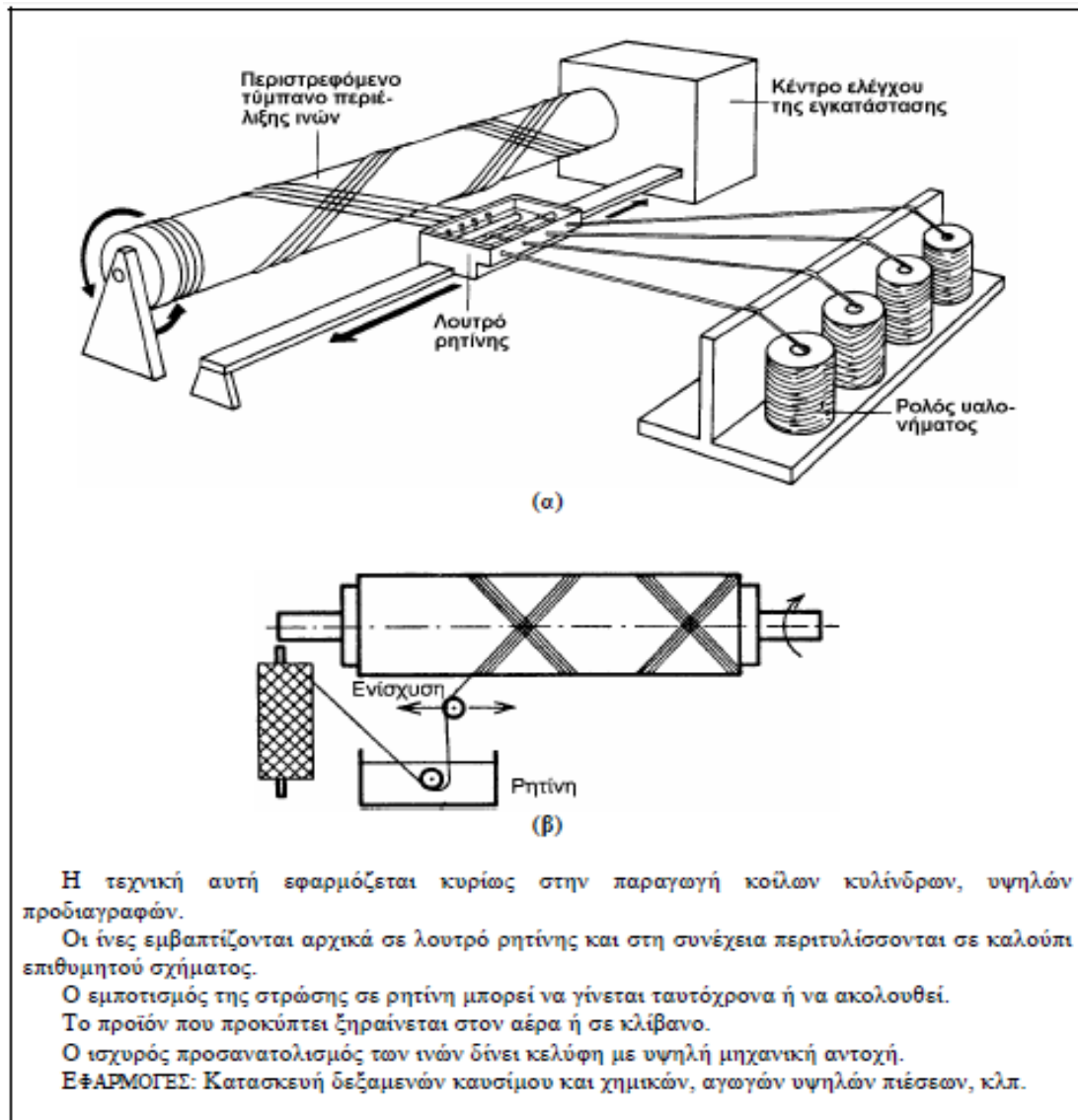


Σχήμα 5.1: Ασυνεχής μορφοποίηση συνθέτου: (α) χειροποίητη στρώση, (β) χύτευση θαλάμου πίεσης, (γ) χύτευση σε διαιρετό καλούπι.

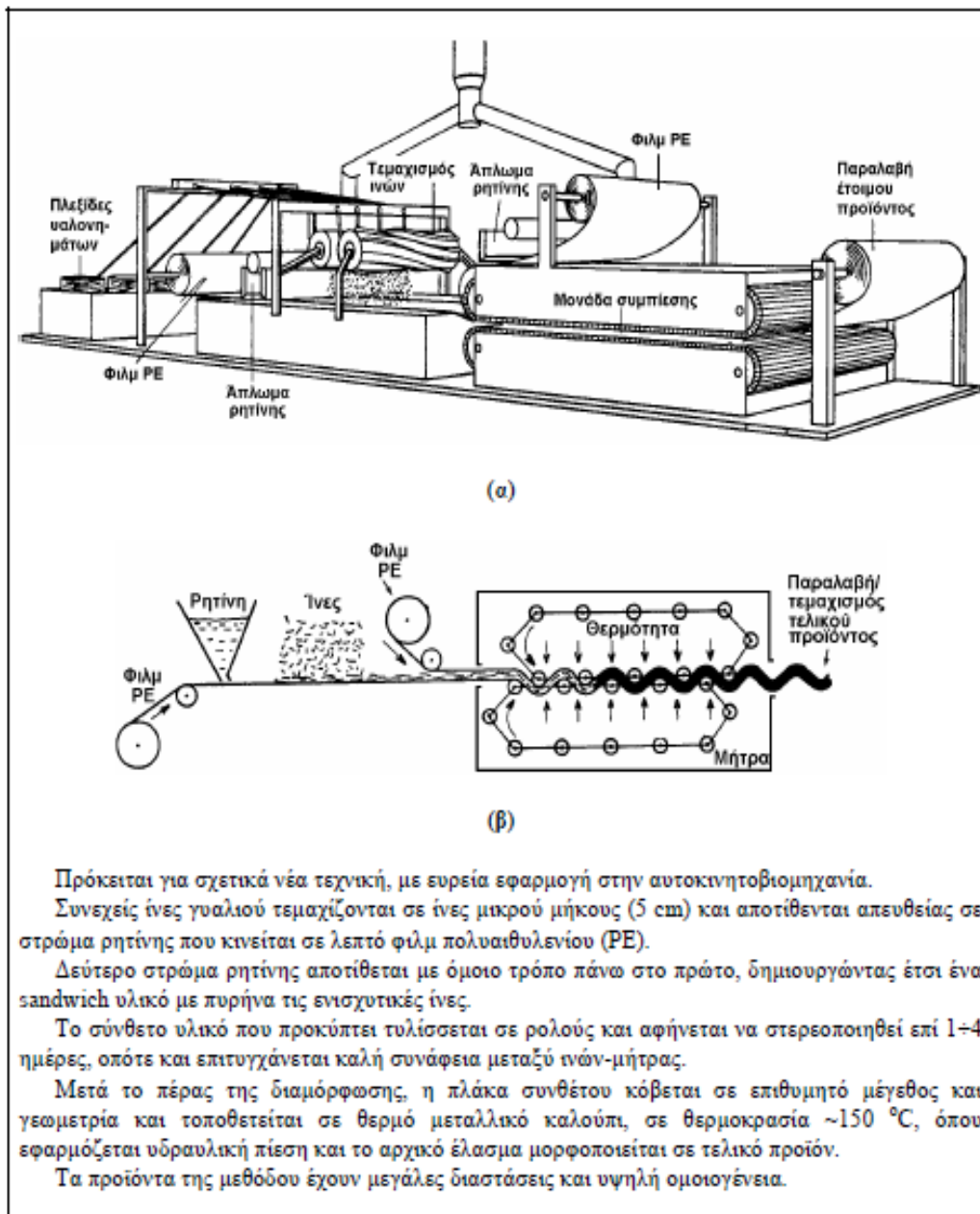
Οι ίνες διατίθενται στην αγορά σε δεσμίδες τυλιγμένες γύρω από ένα κυλινδρικό οδηγό. Μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένες ή πεπλεγμένες.

Οι ασυνεχείς (μικρού μήκους) ίνες συνδυάζονται με το υλικό μήτρας είτε σε τυχαία διάταξη, είτε όσο το δυνατόν προσανατολισμένες.

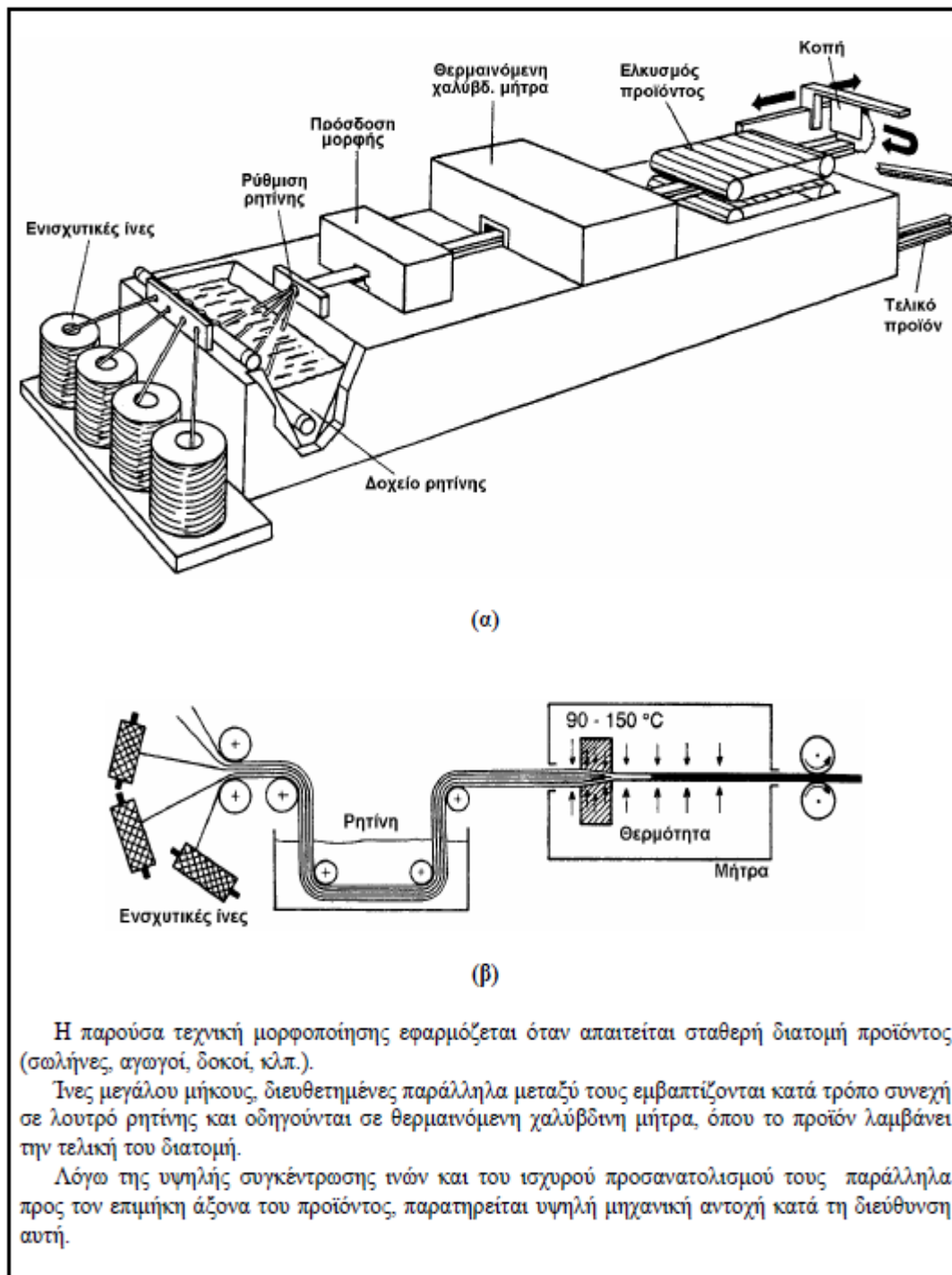
Οι συνεχείς (μεγάλους μήκους) ίνες είτε ευθυγραμμίζονται σε μία διεύθυνση σε μορφή ταινίας είτε διατάσσονται σε πλεγμένα στρώματα (υαλοϋφασμα).



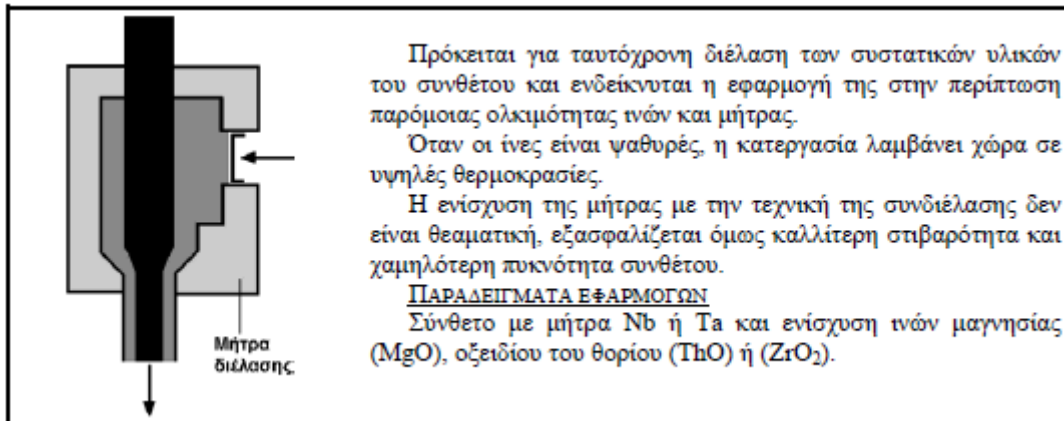
Σχήμα 5.2: Συνεχής μορφοποίηση συνθέτου με περιέλιξη νήματος (filament winding) (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.



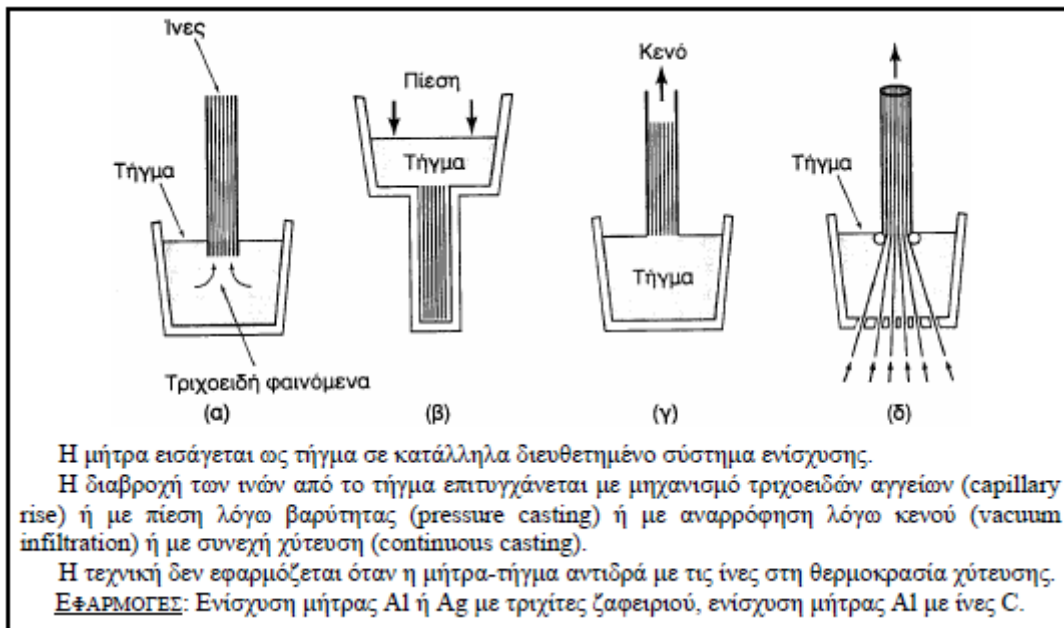
Σχήμα 5.3: Συνεχής μορφοποίηση ελάσματος (sheet moulding process, SMC)
(α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.



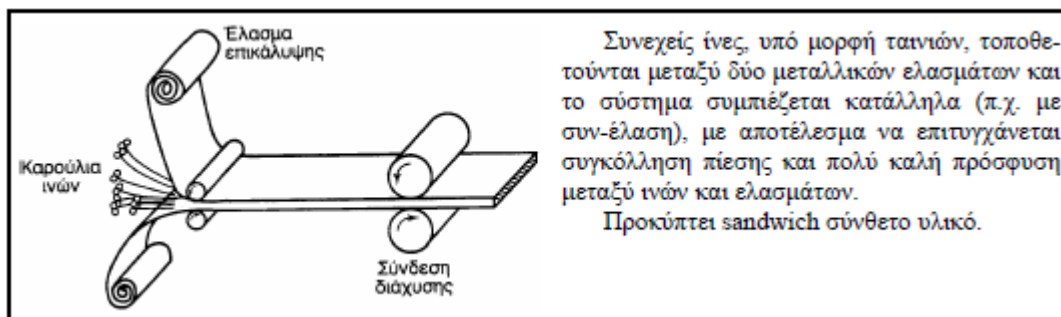
Σχήμα 5.4: Μορφοποίηση με εμβάπτιση (pultrusion)
 (α) Διάταξη μορφοποίησης, (β) Σχηματική παράσταση διαδικασίας.



Σχήμα 5.4: Συνδιέλαση (co-extrusion)



Σχήμα 5.5: Μορφοποίηση με: (α) χύτευση με τη βοήθεια τριχοειδών φαινομένων, (β) πίεση βαρύτητας, (γ) εφαρμογή κενού και (δ) συνεχή χύτευση.



Σχήμα 5.6: Μορφοποίηση συνθέτων μεταλλικής μήτρας με συμπίεση.

Η απόθεση υλικού μήτρας στις ενισχυτικές ίνες γίνεται με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD) ή με ηλεκτραπόθεση.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Με CVD αποτίθενται Al και Ni σε ίνες C.

Με ηλεκτραπόθεση από διάφορα διαλύματα τους αποτίθενται Al, Cu και Ni σε ενισχυτικές ίνες κάθε τύπου.

Μετά την απόθεση υλικού οι επικαλυμμένες ίνες υποβάλλονται σε έψηση που εξασφαλίζει καλύτερη συνάφεια μεταξύ ινών-μήτρας.

Οι τεχνικές μορφοποίησης συνθέτων κεραμικής μήτρας στηρίζονται στις τεχνικές μορφοποίησης των κεραμικών υλικών με διαδικασίες έψησης.

Η κεραμική μήτρα, υπό τη μορφή σκόνης, το συνδετικό υλικό (για εξασφάλιση καλής πρόσφυσης ινών-μήτρας) και οι ίνες υποβάλλονται σε έψηση σε υψηλή θερμοκρασία.

Στην περίπτωση υαλωδών κεραμικών, οι ενισχυτικές ίνες προστίθενται στη μήτρα, η οποία ευρίσκεται υπό μορφή τήγματος.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

Σύνθετα κεραμικής μήτρας με ενισχυτικές ίνες SiC.

Σύνθετα με μήτρα νιτρίδιο του πυριτίου και ενίσχυση ινών W, SiC ή C.

Όταν το παραγόμενο σύνθετο υλικό πρέπει να λαμβάνει μη επίπεδη μορφή, η στρωματοποίηση επιτελείται μέσα σε καλούπια με ειδικές μεθόδους μορφοποίησης, π.χ. με έγχυση (injection moulding) ή με ψεκασμό (spray moulding).

Πιο πρόσφατα, με την ανάπτυξη 3-D (τρισεδιάστατων) συνθέτων υλικών, έχουν εξελιχθεί πιο πολύπλοκες διαδικασίες, ελεγχόμενες με υπολογιστή. Αφού το τρισεδιάστατο πλέγμα ινών στηθεί, το υλικό της μήτρας διαχέεται με πίεση εντός της διάταξης, όπου τελικά υφίσταται σκλήρυνση και παραδίδεται προς χρήση.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Η ηλεκτροδιάβρωση συνίσταται στην αποβολή ηλεκτρικά αγώγιμου υλικού από το κατεργάσιμο τεμάχιο μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ δυο ηλεκτροδίων (κατεργάσιμο τεμάχιο και εργαλείο) κάτω από ένα μέσο κατεργασίας (διηλεκτρικό υγρό) με σκοπό την πρόσδοση της επιθυμητής μορφής στο τεμάχιο. Με τον όρο ηλεκτροδιάβρωση γίνεται αναφορά σε δυο διαφορετικές τεχνικές:

Στην ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης (die sinking EDM) όπου με σταθερό εργαλείο γίνεται η πρόσδοση της μορφής του εργαλείου-ηλεκτροδίου στο “κατεργάσιμο τεμάχιο-ηλεκτρόδιο”

Στην ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire EDM) όπου το σταθερό ηλεκτρόδιο έχει αντικατασταθεί με μεταλλικό αγώγιμο σύρμα.

Έτσι λοιπόν, κατά τη γενική περιγραφή της μεθόδου αναδεικνύεται η δυνατότητα κατεργασίας ασυνήθιστα σκληρών αγώγιμων υλικών και εξαιρετικά πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών. Αναφορικά στα τεχνικά χαρακτηριστικά της μεθόδου, παρουσιάζεται η δυνατότητα του καθορισμού της έντασης μεταξύ των ηλεκτροδίων μέσω της ρύθμισης της απόστασης μεταξύ τους, της ποιότητας του διηλεκτρικού και της καθαρότητας του χώρου ανάμεσα στα ηλεκτρόδια.

Η ηλεκτροδιάβρωση λοιπόν είναι μια κατεργασία η οποία είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τη διάτρηση σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες άνθρακα.

Τέλος τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα είναι αυτά που αποτελούν το μέλλον στην αυτοκινητοβιομηχανία αφού στόχος είναι η μείωση του βάρους και η μεγαλύτερη αντοχή έτσι πλεονεκτούν έναντι των κοινών υλικών που χρησιμοποιούνται. Ήδη το carbon, carbon-fiber και κέβλαρ το συναντάμε σε διάφορα αντικείμενα όχι μόνο στο αυτοκίνητο και σε μερικά χρόνια θα αποτελεί το βασικό υλικό για πολλές κατασκευές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Συγγράμματα

- 1. Κ.Δ. Μπουζάκης**, «Μορφοποιήσεις με αφαίρεση υλικού», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 2001.
- 2. Ε. Παπαδανιήλ, Μ. Σφαντζικόπουλος**, «Μηχανουργική Τεχνολογία-Εργαστήριο II», Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου, Αθήνα 2002.
- 3. Α. Γ. Μάμαλης**, «Τεχνολογία των κατεργασιών των υλικών: Μη Συμβατικές Κατεργασίες», Αθήνα 2000.
- 4. Δ. Παντελής**, «Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά», Παπασωτηρίου, Αθήνα 19 8.
- 5. D.D.L. Chung**, «Carbon Fiber Composites», Butterworth-Heinemann, 1994. 96.

Διαδίκτυο

- 1.iceal.wikidot.com**
- 2.liontariblog.blogspot.gr**
- 3.wwwcarbodysign.com**
- 4.www.e-go.gr**
- 5.www.autoblog.gr**
- 6.www.in.gr**
- 7.www.4tforum.gr**
- 8.www.carbonfiberjournal.com**
- 9.www.paretzoglou.gr**
- 10.www.techgroup.gr**
- 11.www.sodick.com**
- 12.courseware.mec.ntua.gr**
- 13.www.harcomond.com**
- 14.wwwkreotech.eu**

