

ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΥΝΕΔΡΙΑ ΤΗΣ 29ΗΣ ΜΑΪΟΥ 1986

ΠΡΟΕΔΡΙΑ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΤΡΥΠΑΝΗ

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΕΝΑ ΝΕΟ ΕΠΙΤΕΥΓΜΑ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

ΟΜΙΛΙΑ ΤΟΥ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ Κ. ΛΟΥΚΑ ΜΟΥΣΟΥΛΟΥ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της βιομηχανίας των κατασκευών είναι η συνεχής προσπάθεια μείωσης του βάρους σε σχέση με την αντοχή του αντικειμένου. Στην προσπάθειά της αυτή η κατασκευαστική βιομηχανία βοηθήθηκε ουσιαστικά από τη Μεταλλουργία, η οποία, ανέπτυξε την παρασκευή μεγάλου αριθμού μεταλλικών κραμάτων υψηλής αντοχής στις διάφορες κοπώσεις. Πάνω στα κράματα αυτά βασίσθηκαν τα καταπληκτικά τεχνολογικά επιτεύγματα του τρέχοντος αιώνας, που μπορεί να χαρακτηριστεί ως «αίώνας των κραμάτων».

Από των όμως ετών ανέληφθησαν έντατικές έρευνες και προς άλλες κατευθύνσεις, για αναζήτηση υλικών με ενδοϊκότερη σχέση αντοχή/βάρος και ικανοποιητική συμπεριφορά σε υψηλές σχετικά θερμοκρασίες. Αποτέλεσμα των εν λόγω ερευνών υπήρξε η δημιουργία ενός νέου μεταλλουργικού κλάδου που ασχολείται με την έρευνα και παρασκευή ιδιόμορφου τύπου υλικών, των λεγομένων «συνθέτων». Πρόκειται περί ονομοιογενών υλικών που αποτελούνται από μια βασική μάζα π.χ. ρητίνη, η οποία ενισχύεται καταλλήλως με ενσωμάτωση ενός δευτέρου υλικού π.χ. ινών από άνθρακα, σε τρόπο ώστε να λαμβάνονται σύνθετα προϊόντα με βελτιωμένες ειδικές ιδιότητες (ένα είδος βέτον αρμέ).

Μεγάλη προσπάθεια καταβάλλεται σήμερα για την ανάπτυξη του νέου αυτού κλάδου. Από δε του 1975 οργανούνται συστηματικά, διεθνείς συναντήσεις γνωστές υπό το όνομα «International Conference series on Composite Materials»

(*ICCM*), όπου συζητούνται τὰ σχετικά προβλήματα καὶ ἀνταλλάσσονται ἀπόψεις γιὰ τὴν προώθησή των.

Ἡ παρούσα ἀνακοίνωση ἀναφέρεται στὴ συνάντηση τοῦ 1985, τῆς ὁποίας προβάλλει ὀρισμένα πορίσματα. Ἀποβλέπει κυρίως σὲ μιὰ γενικὴ ἐνημέρωση ἐπὶ τοῦ θέματος τῶν συνθέτων ὑλικῶν τὰ ὁποῖα ἀποτελοῦν ἕνα νέο σημαντικό ἐπίτευγμα τῆς Μεταλλουργίας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται συνοπτικὰ ἡ σημερινὴ κατάσταση σὲ ὅ,τι ἀφορᾷ τὸ πεδίο ἐφαρμογῆς τῶν ὑλικῶν αὐτῶν καὶ περιγράφονται σὲ γενικὲς γραμμές, οἱ διάφορες αὐτῶν κατηγορίες.

ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Ἡ χρῆση συνθέτων ὑλικῶν ἔχει ἤδη εἰσχωρήσει στὴν ἀεροναυπηγικὴ καὶ διαστημικὴ βιομηχανία, προχωρεῖ δὲ ταχέως πρὸς ἄλλους τομεῖς τῶν ἐλαφρῶν κατασκευῶν, ὅπως ἡ αὐτοκινητοβιομηχανία. Πολλὴ ἐργασία γίνεται σήμερα πρὸς τὴν κατεύθυνση αὐτῆ ὅπου ὑπάρχουν σημαντικὲς δυνατότητες.

Κατὰ τὸν Δρα R. C. Forney τῆς Ἑταιρείας DuPont, εἰσερχόμεθα πλέον στὴν ἐποχὴ τῶν συνθέτων ὑλικῶν. Διαγράφονται σοβαρὲς προοπτικὲς εὐρείας ἀντικαταστάσεως τῶν μεταλλικῶν κραμάτων ἀπὸ σύνθετα ὑλικά με ἐπαναστατικὲς ἐνδεχομένως ἐπιπτώσεις σὲ ὅ,τι ἀφορᾷ τὶς δομὲς τῶν κατασκευῶν. Τοῦτο ἀποδίδεται στὶς ποιοτικὲς βελτιώσεις πὸν τελευταίως ἐπιτεύχθηκαν στὰ συνιστατικὰ τῶν συνθέτων ὑλικῶν. Διατίθενται σήμερα ἰσχυρότερες καὶ δυσκαμπτότερες ἴνες, σκληρότερες καὶ ἀνθεκτικότερες ρητίνες, ἐνῶ σημαντικὲς πρόοδοι σημειώθηκαν σὲ ὅ,τι ἀφορᾷ τὶς μεταλλουργικὲς μεθόδους παραγωγῆς.

Ἀναλόγως τῆς φύσεως τῆς βασικῆς μάζας (*matrix*) τὰ σύνθετα ὑλικά κατατάσσονται σὲ τρεῖς κατηγορίες: τὰ πολυμεροῦς (*PMC*), τὰ κεραμικῆς (*CMC*) καὶ τέλος τὰ μεταλλικῆς μάζης (*MMC*). Πρόκειται γιὰ τὶς τρεῖς κατηγορίες πὸν διατίθενται σήμερα στὸ ἐμπόριο γιὰ κατασκευὲς καὶ εἶναι ἐνδιαφέρον νὰ προβληθοῦν ἐδῶ τὰ βασικὰ των χαρακτηριστικὰ καὶ ὀρισμένες σχετικὲς μετὰ τὴ χρῆση των πληροφορίες.

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΜΑΖΗΣ (PMC)

Ἡ βασικὴ μάζα ἀποτελεῖται ἀπὸ πολυμερές. Γιὰ ἐνίσχυση χρησιμοποιοῦνται ἴνες ἄνθρακος, Kevlar ἢ συμβατικὲς ἴνες ὑάλου.

Ὁ κυριότερος σήμερα καταναλωτῆς συνθετικῶν πολυμεροῦς μάζης εἶναι ἡ βιομηχανία τοῦ ἀεροδιαστήματος ὅπου προεξάρχουν τὰ συνθετικὰ τῶν ἰνῶν ἄν-

θρακος. Στά συνθετικά ίνων ύαλον κυριαρχοῦν τρεῖς τύποι: E , S_2 , καὶ S . Ἐκ τούτων ὁ ἐνδιάμεσος, δηλ. ὁ τύπος S_2 , σαφῶς ἰσχυρότερος ἀπὸ τὸν κοινὸν τύπο E καὶ εὐθηνότερος ἀπὸ τὸν πολὺ ὑψηλῆς ἰσχύος τύπο S , χρησιμοποιεῖται εὐρέως στὴν κατασκευὴ δεξαμενῶν πίεσεως, γιὰ τμήματα τῶν ἀεροδιαστημοπλοίων, τακτικῶν καὶ στρατηγικῶν ὄπλων.

Μεγάλης σημασίας γιὰ τὰ σύνθετα πολυμεροῦς μάζης εἶναι ἡ ποιότητα τῆς χρησιμοποιουμένης μάζης. Μάζες ἀπὸ ἐποξικὲς καὶ πολυεστερικὲς ρητίνες (*thermosetting resins*) ἔχουν χαμηλὴ σκληρότητα καὶ ἀντοχὴ στὴ θραύση, εἶναι δυσκόλου κατεργασίας καὶ περιορισμένης διαρκείας. Τὰ μειονεκτήματα αὐτὰ ἀμβλύνονται μὲ τὴ χρήση μαζῶν ἀπὸ ὀρισμένες νέες θερμοπλαστικὲς (*thermoplastic*) ρητίνες ποὺ ἐπινοήθησαν τελευταίως. Μὲ τὶς ἐν λόγω ρητίνες ἡ χύτευση εἶναι εὐκολότερη, γίνεται δυνατὴ ἢ διὰ τήξεως συγκόλληση καθὼς καὶ ἡ ἀνακύκλωση. Ὅμως ἀπαιτεῖται ὑψηλότερη θερμοκρασία παρασκευῆς, μειώνεται ἡ ἀντοχὴ στὴ χημικὴ προσβολή.

Ὡς παραδείγματα ἀναφέρονται τὰ σύνθετα ὕλικά *PEEK* τῆς *ICI* καὶ *K-Polymers* τῆς Ἑταιρείας *DuPont*. Τὰ πρῶτα συνίστανται ἀπὸ τὴν ἀρωματικὴ θερμοπλαστικὴ ρητίνη (*Polyetherether Ketone*) ἐνισχυμένη μὲ ἴνες ἄνθρακος ὑψηλῆς ἀντοχῆς καὶ ἔχουν 10πλάσια ἀντοχὴ στὴ θραύση ἀπὸ τὰ ὕλικά ἐποξικῆς μάζης (*epoxy resin*). Τὰ *K-Polymers* τῆς *DuPont* εἶναι μιὰ οἰκογένεια ἀπὸ θερμοπλαστικὰ *Polyimides* ἢ *Polyphenylene sulfide (PPS)*, τὸ ὁποῖο εἶναι ἀρωματικὸ ἡμικρυσταλλικὸ καὶ θερμοπλαστικὸ σουλφίδιο ποὺ ἀντέχει σὲ ὑψηλότερες θερμοκρασίες ἀπ' ὅ,τι οἱ ἐποξικὲς ρητίνες.

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΜΑΖΗΣ (ΜΜΚ)

Ἡ βασικὴ μάζα τῶν ὕλικῶν τῆς κατηγορίας αὐτῆς εἶναι ἀπὸ μέταλλο. Γιὰ ἐνίσχυση ἐχρησιμοποιοῦντο ἀρχικῶς ἴνες βορίου καὶ ἄνθρακος. Σήμερα διατίθεται μεγάλη ποικιλία ἐνισχύσεων ἀπὸ SiC καὶ Al_2O_3 .

Ὡς παράδειγμα τέτοιων ἐνισχύσεων ἀναφέρεται τὸ «*saffil*» τῆς *Imperial Chemical Industries (ICI)*. Πρόκειται γιὰ ἴνα ἀπὸ $\alpha-Al_2O_3$ μὲ περίπου 4% Si ποὺ προστίθεται γιὰ παρεμπόδιση τῆς ἀναπτύξεως τῶν κρυστάλλων. Ἡ ἴνα *saffil* ἐνσωματώνεται στὴ μεταλλικὴ μάζα ποὺ ἀποτελεῖται ἀπὸ Al κατὰ διαφόρους τρόπους, ἐμπνευσμένους ἀπὸ τὶς μεθόδους τῆς μεταλλουργίας τῶν κόνων (*powder metallurgy*), τῆς χυτεύσεως μετ' ἀναδεύσεως (*stir casting*), τῆς χυτεύσεως ὑπὸ ἔκθλιψη (*squeeze casting*) κλπ.

Τὸ μεγάλο πλεονέκτημα τῶν μεταλλικῆς μάζης συνθέτων ὑλικῶν εἶναι ἡ ἀντοχή των στὶς ὑψηλές θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, τὰ μὲ ἴνες saffil σύνθετα ὑλικά ἀλουμινίου διατηροῦν ἀξιόλογη ἀντοχή σὲ ὑψηλές θερμοκρασίες, ἐνῶ στὴ θερμοκρασία τοῦ περιβάλλοντος οἱ ιδιότητές των δὲν διαφέρουν οὐσιαστικῶς ἐκείνων τῆς θεμελιώδους μάζης, δηλαδή τοῦ ἀλουμινίου.

Μεταξὺ τῶν μεταλλικῆς μάζης συνθέτων ὑλικῶν ἀξίζει νὰ ἀναφερθοῦν καὶ τὰ ὑλικά μὲ ἴνες τύπου FP τοῦ οἴκου DuPont. Εἶναι ὑλικά μὲ θεμελιώδη μάζα ἀπὸ Al καὶ Mg καὶ συνεχεῖς ἴνες $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Κατασκευάζονται μὲ ὑπὸ πίεση διείσδυση τοῦ μεταλλικοῦ τήγματος σὲ κενό. Γιὰ βελτίωση τῆς προσφύσεως τοῦ Al στὴν ἴνα FP προστίθεται Li σὲ ἀναλογία 2-3%, ἐνῶ γιὰ τὴν πρόσφυση τοῦ Mg καὶ τῶν κραμάτων του δὲν ὑπάρχει πρόβλημα. Πρόσθετα βελτιώσεως τῆς προσφύσεως δὲν χρειάζονται ἐπίσης στὴν περίπτωση τῶν ἰνῶν saffil ὅταν τὸ ὑλικὸ κατασκευάζεται μὲ τὴ μέθοδο τῆς χυτεύσεως ὑπὸ ἐκθλίψη (squeeze casting). Σημειωτέον ὅτι οἱ πιέσεις ἐκθλίψεως ποὺ ἐφαρμόζονται στὴν πράξη εἶναι τῆς τάξεως τῶν 30 ἕως 40 MPa (~300-400 b).

Ἐδῶ θὰ πρέπει νὰ παρατηρηθεῖ ὅτι ὑπάρχει εὐρὸν πεδίο ἐρεύνης σὲ ὅ,τι ἀφορᾷ τὸ θέμα τῆς προσφύσεως. Εὐρύτατο πεδίο ἐρεύνης ὑπάρχει ἐπίσης πάνω σὲ πολλὰ ἄλλα θέματα ὅπως ἡ ἐπίδραση τῆς διαστολῆς λόγω θερμάνσεως, τοῦ τρόπου παρασκευῆς, τῆς κραματώσεως καθὼς καὶ τῆς θερμοκῆς κατεργασίας τῆς θεμελιώδους μάζης. Ὁ ρόλος τῆς τελευταίας αὐτῆς εἶναι ἰδιαίτερος κρίσιμος. Εἶναι ἀπαραίτητο νὰ τονισθεῖ ὅτι ἡ θεμελιώδης μάζα δὲν εἶναι δευτερεῶν συστατικὸ πὸν χρησιμεύει γιὰ νὰ συνδέει τὶς ἴνες μεταξὺ τους. Ἡ φύση της καὶ τὰ ἐν γένει χαρακτηριστικά της ἐπηρεάζουν οὐσιαστικὰ τὶς ιδιότητες τοῦ συνθέτου ὑλικοῦ. Ἡ τελικὴ δὲ δομὴ καὶ συμπεριφορὰ τῆς μάζης αὐτῆς ἐξαρτᾶται ἀπὸ πολλοὺς παράγοντες καὶ τοῦτο παρέχει μεγάλη εὐχέρεια ἐπεμβάσεων πρὸς ἔλεγχο τῶν ἐν λόγω ιδιοτήτων.

Στὰ ὑλικά μεταλλικῆς μάζης χρησιμοποιοῦνται σήμερα ὡς ἐνισχυτές συνεχεῖς ἴνες SiC, ἴνες μικροῦ μήκους, ἰνοειδῆ συμπλέγματα καὶ σωματίδια τούτου. Οἱ συνεχεῖς ἴνες διατίθενται γιὰ ὑψηλῆς ποιότητος ὑλικά, ἐνῶ οἱ τρεῖς ἄλλες κατηγορίες χρησιμεύουν γιὰ τρέχουσες ποιότητες. Τὰ σωματίδια παρουσιάζουν, ἐκτὸς τῆς χαμηλότερης τιμῆς, τὸ πλεονέκτημα ὅτι δίδουν ὑλικὸ περισσότερο ισότροπο καὶ εὐκολότερης κατεργασίας μὲ τὶς συνήθεις ἐργαλειομηχανές.

Τὸ μεγάλο μειονέκτημα τῶν μεταλλικῆς μάζης συνθέτων ὑλικῶν (MMC) φαίνεται νὰ εἶναι ἡ γενικῶς μικρὰ ἀντοχή των σὲ θραύση. Ἐντατικὲς ἐρευνες ἐπὶ τοῦ σημείου τούτου ἐδρῖσκονται σὲ ἐξέλιξη. Πάντως οἱ ἐμπορικὲς ἐφαρμογές τῶν ἐν λόγω ὑλικῶν βαθμιαίως ἐπεκτείνονται. Ἀναφέρεται μεταξὺ ἄλλων ἡ ὑπὸ τῆς

Ἐταιρείας *Toyota Motor Cy* τελευταία χρησιμοποίηση ὑλικοῦ μὲ θεμελιώδη μάζα κρᾶμα *Al-Si* καὶ ἐνίσχυση μικρῶν ἰνῶν *SiC* γιὰ κατασκευὴ ἐμβόλων τῶν κινητήρων αὐτοκινήτου.

ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ ΜΑΖΗΣ (CMC)

Τὰ σύνθετα ὑλικά κεραμικῆς θεμελιώδους μάζης εἶναι τὰ τελευταία εἰσαχθέντα. Στὰ ὑλικά αὐτά, τὸ ὄριο θραύσεως τῆς μάζης εἶναι, ἀντιθέτως μὲ ὅ,τι συμβαίνει στὰ ὑλικά μεταλλικῆς μάζης, μικρότερο ἀπὸ ἐκεῖνο τῆς ἴνας. Ἔτσι, ἡ ἀντοχή τοῦ ὑλικοῦ ἐλέγχεται ἀπὸ τὴν ἀντοχή τῆς ἴνας. Ὅμως ἡ ἀνάπτυξη τῶν τυχόν μικρορηγμάτων πὸν δημιουργοῦνται μέσα στὴ μάζα παρεμποδίζεται ἀπὸ τὶς ἴνες καὶ ἀπαιτοῦνται ἰσχυρότερες δυνάμεις γιὰ τὴ διεύρυνση τῶν ρωγμῶν. Πρέπει ἐπίσης νὰ σημειωθεῖ ὅτι ἡ ἀσθενῆς πρόσφυση μεταξὺ μάζας καὶ ἴνας προκαλεῖ παρέκκλιση τῆς μικρορωγμῆς πὸν φθάνει στὴν ἴνα καὶ προστατεύει τὴν τελευταία αὐτή.

Ὡς τυπικὸ παράδειγμα συνθέτων ὑλικῶν κεραμικῆς μάζης μπορεῖ νὰ ἀναφερθεῖ τὸ CMC: Nb, τοῦ ὁποίου ἡ μάζα ἀποτελεῖται ἀπὸ διπυριτικὸ μολυβδαίνιο ($MoSi_2$) καὶ ἡ ἐνίσχυση ἀπὸ σύρμα Nb. Γιὰ βελτίωση τῆς προσφύσεως καὶ τὴ διευκόλυνση τῆς συσσωματώσεως προστίθεται στὴ μάζα Ge. Ἔτσι, κατὰ τὴ συσσωμάτωση τὸ σύρμα τοῦ Nb καλύπτεται μὲ περίβλημα SiO_2-GeO_2 πὸν τὸ προστατεύει ἀπὸ ὀξείδωση ἀκόμη καὶ ὅταν σχηματίζονται ρωγμές στὴ μάζα. Πέραν δὲ τούτου, τὸ λεπτὸ αὐτὸ κάλυμμα πὸν περιέχει Ge προκαλεῖ τὴν ἀπόκλιση τῶν ἀκτινωτῶν ρωγμῶν πὸν φθάνουν στὸ σύρμα Nb καὶ προφυλάσσει τοῦτο. Ἡ ἀντοχή τοῦ ὑλικοῦ φθάνει τὸ ὄριο θραύσεως τοῦ σύρματος Nb.

Ἄλλα παραδείγματα ὑλικῶν κεραμικῆς μάζας πὸν ἀξίζει νὰ μνημονευθοῦν εἶναι τὰ ὑλικά στὰ ὁποῖα χρησιμοποιεῖται θεμελιώδης μάζα *SiC* ἐνισχυμένη μὲ ἴνες C καὶ *SiC*. Ἡ ἀντοχή τῶν ὑλικῶν τούτων σὲ θραύση βελτιώθηκε τελευταίως σημαντικὰ χάρις σὲ νέους τρόπους παρασκευῆς.

Ὅπως στὰ ὑλικά μεταλλικῆς θεμελιώδους μάζας, ἔτσι καὶ ἐδῶ ὑπάρχει εὐρύτατο πεδίο ἐρεῦνης. Τὰ προβλήματα πὸν τίθενται εἶναι τὰ ἴδια καὶ ἀφοροῦν στὴ λεπτομερέστερη μελέτη τῆς καταστάσεως στὴ διεπιφάνεια μάζας καὶ ἴνας, στὴ σύσταση τῆς μάζας, τὴ μεταλλουργικὴ διαδικασία τῆς παραγωγῆς κ.λπ.