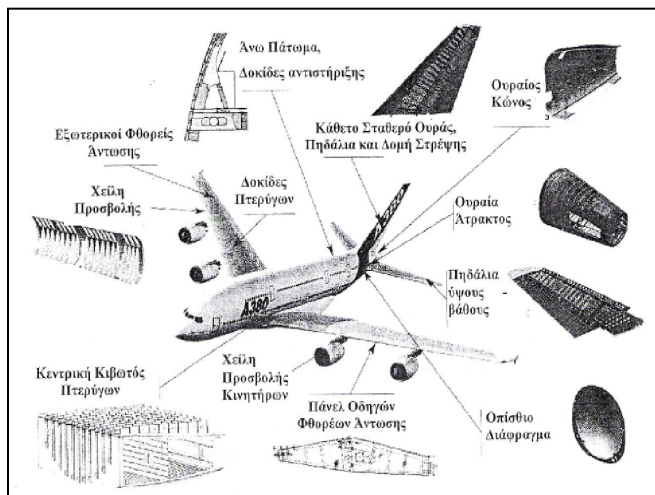




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ»



ΧΑΣΑΝΑΪ ΑΝΤΙΤ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΠΑΤΡΑ, 2023

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου αναφέρεται στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών όπως έχει αναπτυχθεί μέχρι σήμερα.

Από τη θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα, υπεύθυνο καθηγητή της παρούσας πτυχιακής Καθηγητή Δρ. Τσινόπουλο Στέφανο για την υποστήριξή του, τις πολύτιμες συμβουλές του, την αμέριστη συμπαράστασή του κατά την διεξαγωγή της πτυχιακής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή και στήριξη που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας αλλά και συνολικά κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

**Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή:** Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

(Ονοματεπώνυμο)

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Αειφίμα', written in a cursive style.

.....  
Υπογραφή

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη της ανάπτυξης της τεχνολογίας των σύνθετων υλικών μέχρι σήμερα με έμφαση στον τομέα της αεροναυπηγικής. Η μελέτη αυτή σχετίζεται τόσο με το υλικό κατασκευής όσο και με το εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί για μια συγκεκριμένη κατασκευή. Ειδικότερα:

Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται βασικά στοιχεία και έννοιες των σύνθετων υλικών. παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή, οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών στην αεροναυπηγική, την αυτοκινητοβιομηχανία, τη Ναυπηγική, την Αιολική ενέργεια και τις Κατασκευές και Υποδομές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα σύνθετα υλικά κατασκευής αεροσκαφών METAL MATRIX. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται τα σύνθετα υλικά με βάση το αλουμίνιο, το μαγνήσιο, το τιτάνιο ενώ παρουσιάζονται και οι εφαρμογές τους.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις τεχνικές κατασκευής των σύνθετων υλικών METAL MATRIX όπως είναι η επεξεργασία υγρής κατάστασης, στερεάς κατάστασης και φυσικής εναπόθεσης ατμών.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει στοιχεία για τα σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (CERAMIC MATRIX COMPOSITES-CMC). Πιο συγκεκριμένα αναφέρονται τα χαρακτηριστικά τους, οι μέθοδοι επεξεργασίας τους όπως η Διαδικασία σε πυροσυσσωμάτωση αντίδρασης, η Μέθοδος Διήθησης Υγρών, η Διαδικασία Sol-Gel και η Διήθηση χημικών ατμών (CVI). Τέλος, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρονται οι εφαρμογές τους σε εξαρτήματα αεροσκαφών όπως στις Λεπίδες Στροβίλου, στο Σύστημα πέδησης, στα Blisks (Blade Discs), στο Ακροφύσιο εξάτμισης και στις Λεπίδες ακροφυσίων στροβίλου.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει στοιχεία για τα σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας (POLYMER-MATRIX COMPOSITES-PMCS). Ειδικότερα αναφέρονται τα χαρακτηριστικά τους, η κατασκευή PMC με Χύτευση με έγχυση, Χύτευση μεταφοράς ρητίνης (RTM), Χύτευση με συμπίεση, Τοποθέτηση προεμποτίσματος και Εξώθηση. Τέλος, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέρονται οι εφαρμογές τους σε εξαρτήματα αεροσκαφών.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα προηγμένα σύνθετα υλικά στην αεροναυπηγική όπως τα αυτοθεραπευόμενα σύνθετα υλικά (SELF-HEALING COMPOSITES), τα αγωγήμα σύνθετα υλικά, τα υλικά με έγχυση ρητίνης και τα νανοσύνθετα. Τέλος, ακολουθούν τα συμπεράσματα και η βιβλιογραφία.

## **ABSTRACT**

The subject of the thesis is the study of the development of the technology of composite materials until today with an emphasis on the field of aeronautics. This study is related to both the machining material and the tool to be used for a specific machining. Particularly:

In the first chapter, basic elements and concepts of composite materials are mentioned. a historical review is presented, the applications of composite materials in aeronautics, automotive, shipbuilding, wind energy and construction and infrastructure.

The second chapter presents the METAL MATRIX composite aircraft construction materials. More specifically, composite materials based on aluminum, magnesium, and titanium are presented, while their applications are also presented.

The third chapter includes the manufacturing techniques of METAL MATRIX composite materials such as liquid state, solid state and physical vapor deposition processing.

The fourth chapter includes information on ceramic matrix composites (CERAMIC MATRIX COMPOSITES-CMC). More specifically, their characteristics, their treatment methods such as the Reaction Sintering Process, the Liquid Filtration Method, the Sol-Gel Process and Chemical Vapor Filtration (CVI) are mentioned. Finally, their applications in aircraft components such as Turbine Blades, Braking System, Blisks (Blade Discs), Exhaust Nozzle and Turbine Nozzle Blades are mentioned in this chapter.

The fifth chapter includes information on polymer matrix composites (POLYMER-MATRIX COMPOSITES-PMCS). In particular, their characteristics are mentioned, the manufacture of PMC by Injection Molding, Resin Transfer Molding (RTM), Compression Molding, Pre-impregnation Placement and Extrusion. Finally, in the specific chapter, their applications to aircraft components are mentioned.

The sixth chapter covers advanced composites in aeronautics such as SELF-HEALING COMPOSITES, conductive composites, resin-injected materials, and nanocomposites. Finally, the conclusions and bibliography follow.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	13
ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - ΈΝΝΟΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	13
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	13
1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	15
1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	16
1.3.1 Αεροναυπηγική.....	16
1.3.2 Αυτοκινητοβιομηχανία.....	16
1.3.3 Ναυπηγική.....	17
1.3.4 Αιολική ενέργεια.....	18
1.3.5 Κατασκευές και Υποδομές.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	20
ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ METAL MATRIX.....	20
2.1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ (Al).....	20
2.2 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΑΓΝΗΣΙΟ (MG).....	21
2.3 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΤΙΤΑΝΙΟ.....	23
2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ METAL MATRIX.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	28
ΟΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ METAL MATRIX.....	28
3.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....	28

<b>3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ.....</b>	<b>29</b>
<b>3.3 ΦΥΣΙΚΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΑΤΜΩΝ.....</b>	<b>30</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>	<b>32</b>
<b>ΣΥΝΘΕΤΑ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (CERAMIC MATRIX COMPOSITES-CMC).....</b>	<b>32</b>
<b>4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (CERAMIC MATRIX COMPOSITES-CMC).....</b>	<b>32</b>
<b>4.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ CMC.....</b>	<b>39</b>
4.2.1. Διαδικασία σε πυροσυσσωμάτωση αντίδρασης.....	39
4.2.2 Μέθοδος Διήθησης Υγρών.....	40
4.2.3 Διαδικασία Sol-Gel.....	40
4.2.4 Διήθηση χημικών ατμών (CVI).....	41
<b>4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ CMC ΣΕ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ.....</b>	<b>42</b>
4.3.1 Λεπίδες Στροβίλου.....	43
4.3.2 Σύστημα πέδησης.....	43
4.3.3 Blisks (Blade Discs).....	44
4.3.4 Ακροφύσιο εξάτμισης.....	44
4.3.5 Λεπίδες ακροφυσίων στροβίλου.....	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>46</b>
<b>ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΜΗΤΡΑΣ (POLYMER-MATRIX COMPOSITES-PMCS).....</b>	<b>46</b>
<b>5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΜΗΤΡΑΣ.....</b>	<b>46</b>
<b>5.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ PMC.....</b>	<b>47</b>
5.2.1 Χύτευση με έγχυση.....	47
5.2.2 Χύτευση μεταφοράς ρητίνης (RTM).....	48
5.2.3 Χύτευση με συμπίεση.....	49
5.2.4 Τοποθέτηση προεμποτίσματος.....	49

<b>5.2.5 Εξώθηση.....</b>	<b>50</b>
<b>5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ PMC ΣΕ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ.....</b>	<b>50</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>	<b>52</b>
<b>ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ.....</b>	<b>52</b>
<b>6.1. ΑΥΤΟΘΕΡΑΠΕΥΟΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (SELF-HEALING COMPOSITES)...</b>	<b>52</b>
<b>6.2 ΑΓΩΓΙΜΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....</b>	<b>55</b>
<b>6.3 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΡΗΤΙΝΗΣ.....</b>	<b>55</b>
<b>6.4. ΝΑΝΟΣΥΝΘΕΤΑ.....</b>	<b>56</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>57</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>59</b>



## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

**Πίνακας 1: Ιδιότητες και εφαρμογές σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας σε αεροσκάφη.**  
**25**

**Πίνακας 2: Ιδιότητες και εφαρμογές CMC σε αεροσκάφη** **32**

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ**

<b>Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση τεχνικής χύτευσης με συμπίεση.</b>	<b>29</b>
<b>Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση τεχνικής φυσικής εναπόθεσης ατμών.</b>	<b>31</b>
<b>Εικόνα 3: Σχηματική απεικόνιση δίσκων πέδησης κατασκευασμένα με υλικό C/C</b>	<b>38</b>
<b>Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας διήθησης χημικών ατμών</b>	<b>42</b>
<b>Εικόνα 5: Τεχνική χύτευσης μεταφοράς ρητίνης</b>	<b>49</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αεροπορική βιομηχανία παραδοσιακά βασιζόταν σε υλικά όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο. Ωστόσο, καθώς η αεροδιαστημική βιομηχανία απαιτεί ελαφρύτερα και ισχυρότερα υλικά, νέα μηχανικά υλικά αναπτύσσονται συνεχώς. Τα σύνθετα υλικά αντικαθιστούν τώρα πολλά συμβατικά υλικά σε διάφορους τομείς όπως η αεροναυπηγική, η γεωργία, η κλωστοϋφαντουργία, η αυτοκινητοβιομηχανία, η άμυνα, η ηλεκτρονική, ο αθλητισμός, η πολιτική υποδομή και η ναυτιλία. Στην αεροναυπηγική, τα σύνθετα υλικά έχουν μεγάλη ζήτηση λόγω της υψηλής απόδοσής τους. Η αεροναυπηγική επιθυμεί υλικά που είναι ελαφρύτερα σε βάρος και έχουν ενισχυμένη ανοχή σε ζημιές. Αυτή η επιθυμία για ελαφρύτερα υλικά καθοδηγείται από τον στόχο της μείωσης του κόστους μέσω της χαμηλότερης κατανάλωσης καυσίμου (Dursun et al., 2014).

Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά προσφέρουν εξαιρετική αντοχή στην κόπωση και στη θραύση, καθιστώντας τα πιο κατάλληλα για επαναλαμβανόμενους κύκλους ανύψωσης και προσγείωσης αεροσκαφών σε σύγκριση με τα μέταλλα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού των απαιτούμενων επιθεωρήσεων και του κόστους συντήρησης κατά τη διάρκεια ζωής του αεροσκάφους (Starke et al., 2010).

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στο σχεδιασμό των πρωταρχικών δομών σκελετού αεροσκαφών στην αεροναυπηγική βιομηχανία. Αυτή η τάση φαίνεται στα τελευταία πιστοποιημένα μεγάλα μεταφορικά και περιφερειακά αεροσκάφη, με τα σύνθετα μέρη να αποτελούν σημαντικό ποσοστό του βάρους τους. Για παράδειγμα, το Boeing B787 και το Airbus A350 αποτελούνται από σύνθετα μέρη κατά 50% και 53% κατά βάρος, αντίστοιχα, ενώ το Bombardier CS100 έχει 26% σύνθετα μέρη (Aabid et al., 2022).

Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η χρήση σύνθετων υλικών, επιτρέπονται υψηλότερα όρια αντοχής κατά τη φάση σχεδιασμού. Αυτό γίνεται εφικτό με τη συνεχή αναγνώριση και παρακολούθηση της ζημιάς που συμβαίνει εντός της σύνθετης δομής κατά τη διάρκεια της επιχειρησιακής ζωής του αεροσκάφους. Επιπλέον, ένα δίκτυο αισθητήρων χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του επιπέδου απορρόφησης υγρασίας της σύνθετης κατασκευής, καθώς αυτό σχετίζεται στενά με τη μηχανική αντοχή της. Η τρέχουσα πρακτική σχεδιασμού για σύνθετα αεροσκάφη ενσωματώνει μηχανικά επιτρεπτά μηχανικά επιτρεπτά μηχανήματα για να ληφθεί

υπόψη η υψηλή ευαισθησία των σύνθετων κατασκευών στην έκθεση του περιβάλλοντος, όπως ζημιά, υγρασία και θερμοκρασία (Pantelakis et al., 2012).

Τα σύνθετα υλικά FRP που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές αεροσκαφών είναι επιρρεπή σε ζημιές, συμπεριλαμβανομένης της αποκόλλησης και της κρουστικής ρωγμής. Αυτές οι βλάβες μπορεί να οδηγήσουν σε ξαφνικές και απροσδόκητες δομικές αστοχίες, που μερικές φορές συμβαίνουν χωρίς ορατά σημάδια. Για να διασφαλιστεί η ασφάλεια, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί η παρουσία, το μέγεθος, η θέση και ο ρυθμός ανάπτυξης των ρωγμών σε πρώιμο στάδιο. Διάφορες μη καταστροφικές μέθοδοι, σε συνδυασμό με τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, έχουν αναπτυχθεί για να εκτιμηθεί γρήγορα και οικονομικά η αόρατη ζημιά σε στοιχεία μηχανών και δομές αεροσκαφών. Αυτές οι μέθοδοι στοχεύουν στην πρόληψη καταστροφικών αποτυχιών και στη διάσωση ζωών (Starke et al., 2010).

Το επίκεντρο αυτής της εργασίας είναι η εφαρμογή σύνθετων υλικών στην αεροπορική βιομηχανία και τα πλεονεκτήματά τους έναντι των συμβατικών μετάλλων και κραμάτων που χρησιμοποιούνται σε εξαρτήματα αεροσκαφών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - ΈΝΝΟΙΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### 1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Στη δεκαετία του 1970, η χρήση σύνθετων πολυμερών μήτρας (PMC) σε στρατιωτικά αεροσκάφη, όπως τα F-14 και F-15, αντιπροσώπευαν μόνο το 2-4% του συνολικού βάρους. Ωστόσο, στη δεκαετία του 1990, η εφαρμογή των PMC σε αεροσκάφη όπως τα AV-8 και F-18 αυξήθηκε στο 15-30% του βάρους. Επί του παρόντος, σε προηγμένα στρατιωτικά αεροσκάφη όπως το Eurofighter, η χρήση έχει φτάσει το 70% του βάρους. Ομοίως, η χρήση PMC σε εμπορικά αεροσκάφη έχει επίσης αυξηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Για παράδειγμα, το αεροσκάφος Boeing 787 αποτελείται από σύνθετα υλικά που αντιπροσωπεύουν περισσότερο από το 50% του βάρους (80% κατ' όγκο) (Aabid et al., 2022).

Τα σύνθετα υλικά FRP, όπως τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP), τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRP) και τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες αραμιδίου (KRPC), προτιμώνται για πολλά δομικά συστατικά στον αεροδιαστημικό χώρο, συμπεριλαμβανομένων πτερυγίων, ατράκτων, σταθεροποιητών, κουτιά, συστήματα πρόωσης και πτερύγια ρότορα ελικοπτέρων. Αυτά τα σύνθετα υλικά είναι κατάλληλα τόσο για πρωτογενείς όσο και για δευτερεύουσες δομές αεροσκαφών (Pantelakis et al., 2012).

Η χρήση φυσικών ινωδών σύνθετων υλικών, ειδικά του ξύλου, παρατηρήθηκε για πρώτη φορά σε εξαρτήματα αεροσκαφών στις αρχές του 1900, ξεκινώντας από το Flyer 1 των αδελφών Wright στη Βόρεια Καρολίνα. Για σχεδόν ογδόντα χρόνια, τα κράματα με βάση το αλουμίνιο ήταν το κύριο δομικό υλικό για τα αεροσκάφη λόγω της γνωστής μηχανικής συμπεριφοράς και της ευκολίας σχεδιασμού και κατασκευής τους. Αυτά τα κράματα είναι κατάλληλα για κατασκευές που εκτίθενται σε περιβάλλοντα μέτριας θερμοκρασίας (Starke et al., 2010).

Ωστόσο, υπήρξε μια αυξανόμενη ζήτηση για κατασκευές αεροσκαφών που είναι ελαφρύτερες σε βάρος και έχουν βελτιωμένες θερμομηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες. Ως αποτέλεσμα, η χρήση κραμάτων με βάση το αλουμίνιο έχει μειωθεί και τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες

γυαλιού και ανθρακονήματα έχουν γίνει πιο συχνά χρησιμοποιούμενα. Στις δεκαετίες του 1950 και του 1960, σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού εισήχθησαν για πρώτη φορά σε δομές αεροδιαστημικής, όπως δεξαμενές καυσίμων αεροσκαφών και στρατιωτικά συστήματα ραντάρ. Παρά τη σχετικά υψηλή ειδική αντοχή και το χαμηλό κόστος των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού, συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται ευρέως ως γνωστά δομικά υλικά μέχρι σήμερα (Pantelakis et al., 2012).

Στη δεκαετία του 1960, οι ίνες άνθρακα ανακαλύφθηκαν για πρώτη φορά στο Royal Aircraft Establishment στο Farnborough του Ηνωμένου Βασιλείου. Αρχικά, τα σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για δευτερεύουσες δομές αεροσκαφών όπως σπόιλερ, γλωττίδες επένδυσης, πηδάλια και πόρτες. Ωστόσο, καθώς οι απαιτήσεις της αεροδιαστημικής εξελίσσονταν και η έρευνα προχωρούσε, αναπτύχθηκαν νέα σύνθετα υλικά με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες (Kim et al., 2006).

Μεταξύ αυτών των σύνθετων υλικών, τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP) αναδείχθηκαν ως προτιμώμενη επιλογή λόγω των ανώτερων χαρακτηριστικών απόδοσης τους. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, υψηλό συντελεστή, εξαιρετικές ιδιότητες απόσβεσης, καλή αντοχή στην τριβή και δυνατότητες γεφύρωσης ρωγμών. Ως αποτέλεσμα, τα σύνθετα υλικά CFRP μπόρεσαν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά υλικά όπως το αλουμίνιο, το νικέλιο και τα κράματα τιτανίου σε πρωτογενείς αεροδιαστημικές δομές όπως άτρακτοι, κάθετες ουρές, πηδάλια, κιβώτια εμπέδωσης και πτερύγια.

Επιπλέον, η χρήση σύνθετων υλικών CFRP είχε ως αποτέλεσμα σημαντική μείωση βάρους στα αεροσκάφη. Αντικαθιστώντας τα συμβατικά μεταλλικά υλικά, τα σύνθετα υλικά CFRP μείωσαν το βάρος των αεροσκαφών κατά 50%, οδηγώντας σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και μείωση του συνολικού κόστους κατά 20%.(Aabid et al., 2022).

Εκτός από τα σύνθετα υλικά CFRP, άλλα σύνθετα υλικά έχουν επίσης θεωρηθεί ως υποκατάστατα δομικών εξαρτημάτων αεροδιαστημικής από αλουμίνιο και χάλυβα. Αυτά περιλαμβάνουν σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες αραμιδίου (AFRP) και σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες βορίου (BFRP). Τα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (GFRPs) και τα AFRP χρησιμοποιούνται συνήθως για εξαρτήματα αεροσκαφών με χαμηλότερες δυνατότητες μεταφοράς φορτίου (Starke et al., 2010).

## 1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα σύνθετα είναι υλικά που συνδυάζουν διαφορετικά συστατικά χωρίς να διακυβεύονται οι ατομικές τους ιδιότητες ή ακεραιότητά τους. Αντίθετα, ενισχύουν το ένα το άλλο, με αποτέλεσμα δομικά πλεονεκτήματα που βελτιώνουν την αντοχή και την απόδοση των αεροσκαφών. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι σύνθετων υλικών: τα ινώδη και τα σωματιδιακά (Kim et al., 2006).

Τα ινώδη σύνθετα αποτελούνται από σκληρές ίνες ενσωματωμένες σε μια μήτρα ρητίνης, ενώ τα σωματιδιακά σύνθετα αποτελούνται από μη μεταλλικά σωματίδια, όπως η σιλικόνη, σε μια μεταλλική μήτρα, όπως το αλουμίνιο. Στις πρώτες ημέρες της κατασκευής αεροσκαφών, το fiberglass χρησιμοποιήθηκε συνήθως. Τα σύνθετα υλικά είναι ανθρωπογενή υλικά που αποτελούνται από πολλαπλά διακριτά συστατικά, το καθένα με διαφορετικά μηχανικά, φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά. Όταν συνδυάζονται, αυτά τα συστατικά δημιουργούν ένα εντελώς νέο κατασκευασμένο υλικό με ανώτερες ιδιότητες σε σύγκριση με τα μεμονωμένα εξαρτήματα. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο φάσεις: τη φάση ενίσχυσης και τη φάση μήτρας (Aabid et al., 2022).

Η φάση ενίσχυσης φέρει το φορτίο στο σύνθετο, ενώ η φάση μήτρας συνδέει τις ίνες μεταξύ τους και διατηρεί τη θέση και τον προσανατολισμό τους. Η μήτρα προστατεύει επίσης τις μεμονωμένες ίνες από ζημιές που προκαλούνται από το περιβάλλον. Η εξωτερική τάση μεταφέρεται και κατανέμεται στις ίνες από το υλικό μήτρας, το οποίο επίσης λειτουργεί ως εμπόδιο στη διάδοση των ρωγμών (Starke et al., 2010).

Ο οπλισμός μπορεί να έχει τη μορφή ινών ή σωματιδίων και η μήτρα μπορεί να είναι κατασκευασμένη από πολυμερή, κεραμικά, μέταλλα, άνθρακα (γραφίτη) ή συνδυασμό αυτών των υλικών. Ανάλογα με τη δομή του οπλισμού, τα σύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν ως σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες, σύνθετα υλικά με σωματίδια, σύνθετα ενισχυμένα με μουςτάκια, δομικά σύνθετα και νανοσύνθετα. Με βάση τον τύπο της μήτρας, τα σύνθετα υλικά κατηγοριοποιούνται ως σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας (PMC), σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (MMC) και σύνθετα κεραμικής μήτρας (CMC) (Amaechi et al., 2019).

## **1.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

### **1.3.1 Αεροναυπηγική**

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αερομεταφορών (IATA), περίπου 11.000 αεροσκάφη θα αποσυρθούν την επόμενη δεκαετία. Η πανδημία COVID-19 μείωσε σημαντικά τα αεροπορικά ταξίδια, γεγονός που αναμένεται να επιταχύνει τον παροπλισμό αυτών των αεροπλάνων και να τονίσει τη σημασία της ανακύκλωσης (IATA, 2020). Επιπλέον, η χρήση σύνθετων υλικών σε αεροπλάνα έχει αυξηθεί σημαντικά, ιδιαίτερα σε εμπορικά αεροσκάφη που κατασκευάζονται από την Airbus και την Boeing (Yang et al., 2012). Για παράδειγμα, το Airbus A300 χρησιμοποίησε 4,5% σύνθετα υλικά από το 1971 έως το 2007, ενώ το Boeing B787 χρησιμοποιεί 50% σύνθετα υλικά από το 2007 έως σήμερα. Το σώμα του B787 αποτελείται από 50% σύνθετα υλικά, 10% χάλυβα, 15% τιτάνιο, 20% αλουμίνιο και 5% άλλα υλικά. Τα σύνθετα υλικά στο B787 αποτελούνται κυρίως από δομές σάντουιτς άνθρακα, ελάσματα CFRP και υαλοβάμβακα. Το αλουμίνιο ήταν παραδοσιακά ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό στα αεροσκάφη, αλλά η χρήση του έχει μειωθεί από 50% στο Boeing B777 σε μόλις 20% στο Boeing B787. Αυτή η στροφή προς τα σύνθετα μπορεί να εξηγηθεί συγκρίνοντας το μέτρο εφελκυσμού και τα χαρακτηριστικά αντοχής των ινών E-glass (72 GPa, 3,5 GPa) με το αλουμίνιο (68,9 GPa, 0,31 GPa) (Yang et al., 2012).

### **1.3.2 Αυτοκινητοβιομηχανία**

Τα σύνθετα υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε σπορ οχήματα λόγω της ελαφριάς φύσης τους, η οποία επιτρέπει τη βέλτιστη απόδοση. Οι πρόσφατες εξελίξεις στην κινητικότητα, όπως η ηλεκτρική πρόωση και οι τεχνολογίες αυτοκαθοδήγησης, έχουν αυξήσει περαιτέρω τη ζήτηση για ελαφριά υλικά σε αυτά τα οχήματα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, καθώς τα ελαφριά υλικά τους επιτρέπουν να επιτυγχάνουν μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ της επαναφόρτισης. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη για κατασκευή



σύνθετων υλικών μεγάλου όγκου και διάθεση στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Η ανακύκλωση προωθείται επίσης από τις βιομηχανίες αυτοκινήτων και αεροδιαστημικής, οι οποίες παράγουν μεγάλες ποσότητες εξαρτημάτων από ανθρακονήματα, αλλά συχνά σπαταλούν σημαντικό ποσοστό των πρώτων υλών, μερικές φορές έως και 20-40% (Chen et al., 2020). Η αυτοκινητοβιομηχανία στοχεύει στη δημιουργία οχημάτων με οικονομία καυσίμου και ελαφρού βάρους και η χρήση σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ανθρακονήματα (CFRC) σε εξαρτήματα αυτοκινήτων μπορεί να μειώσει το βάρος ενός τυπικού οχήματος κατά 30%. Η περιβαλλοντική διαχείριση είναι μια κρίσιμη πτυχή, καθώς οι νόμοι της ΕΕ στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας απαιτούν ότι το 85% ενός αυτοκινήτου μπορεί να ανακυκλωθεί (Amaechi et al., 2019).

Με τη συλλογή και τη μετατροπή απορριμμάτων ανθρακονημάτων σε νέα εξαρτήματα, απαιτείται λιγότερο από το 10% της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή παρθένων ινών άνθρακα, ευθυγραμμίζοντας με τους νομικούς και περιβαλλοντικούς στόχους. Το CFRC συμβάλλει επίσης στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μειώνοντας τη χρήση καυσίμου μέσω της δημιουργίας ελαφρύτερων αμαξωμάτων αυτοκινήτων και αεροπλάνων. Επιπλέον, η μείωση του κόστους είναι ένας σημαντικός κινητήριος παράγοντας στον τομέα των σύνθετων υλικών (Chen et al., 2020).

### **1.3.3 Ναυπηγική**

Τα σύνθετα υλικά έχουν φέρει επανάσταση στην υπεράκτια βιομηχανία, ιδιαίτερα στην ανάπτυξη της θαλάσσιας ενέργειας, τη ναυπηγική βιομηχανία και την επισκευή θαλάσσιων μηχανικών. Τα σύνθετα υλικά από ίνες γυαλιού (GF) και ίνες άνθρακα (CF) έχουν γίνει απαραίτητα υλικά σε αυτούς τους τομείς, αντικαθιστώντας σταδιακά τις ανώτερες μεταλλικές κατασκευές σε νέες εγκαταστάσεις και ανακαινίσεις υφιστάμενων θαλάσσιων κατασκευών. Οι ίνες άνθρακα προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα στις κατασκευές θαλάσσιας μηχανικής, όπως η ελαφριά φύση, η υψηλή αντοχή και η αντοχή στη φθορά. Τα δομικά μέρη που κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά μπορούν να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά δομικά υλικά, με αποτέλεσμα μειωμένο βάρος, αντοχή στη διάβρωση του θαλασσινού νερού και λιγότερα προβλήματα με τα υλικά οπλισμού (Gagani et al., 2018).

Σε ό,τι αφορά τις ναυτιλιακές εφαρμογές, το πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GRP) προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως περιβαλλοντική αντίσταση, ανθεκτικότητα, οικονομική απόδοση, ικανότητα διαμόρφωσης πολύπλοκων και απρόσκοπτων αντικειμένων, ικανότητα προσαρμογής της αντοχής με βάση τις συνθήκες φορτίου, εξαιρετική αντοχή -αναλογία προς βάρος, χαμηλό βάρος (περίπου οι μισές παρόμοιες κατασκευές από χάλυβα), χαμηλή συντήρηση και επισκευή (Amaechi et al., 2019).

#### **1.3.4 Αιολική ενέργεια**

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες λόγω της υψηλής ειδικής αντοχής τους. Με περισσότερες από 330.000 ανεμογεννήτριες σε κλίμακα χρησιμότητας εγκατεστημένες παγκοσμίως, η πλειονότητα των οποίων αναμένεται να έχει διάρκεια ζωής 20-25 χρόνια, η πρώτη σημαντική ομάδα σύνθετων ανεμογεννητριών θα φτάσει στο τέλος της ζωής τους (EOL) τη δεκαετία του 2020. Αυτό αποτελεί πρόκληση για την ανακύκλωση των πτερυγίων ανεμογεννητριών, με περίπου δύο γιγαβάτ να αναμένεται να αντικατασταθούν το 2019 και το 2020. Η Δανία, που υιοθέτησε πρώιμα ανεμογεννήτριες, είναι μία από τις πρώτες χώρες που αντιμετωπίζει το ζήτημα της μαζικής διάθεσης. Ορισμένα κράτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) έχουν απαγορεύσει ακόμη και τη διάθεση σύνθετων λεπίδων σε χώρους υγειονομικής ταφής για περιβαλλοντικούς λόγους, καθιστώντας αναγκαία την ανάπτυξη νέων λύσεων EOL για σύνθετα υλικά στη βιομηχανία αιολικής ενέργειας. Η ποσότητα των χρησιμοποιημένων υλικών λεπίδων scrap προβλέπεται να διπλασιαστεί την επόμενη δεκαετία, από 1.000.000 τόνους το 2020 σε 2.000.000 τόνους το 2030. Η ΕΕ εκτιμάται ότι θα παράγει το 25% του συνόλου των απορριμμάτων EOL σε αυτόν τον κλάδο. Οι ρότορες των ανεμογεννητριών αποτελούνται συνήθως από τρία πτερύγια, με μέγεθος από 12 μέτρα έως 80 μέτρα ή περισσότερο, και πολλά από αυτά τα πτερύγια σύντομα θα καταργηθούν σταδιακά (Gagani et al., 2018).

Η Siemens Gamesa Renewable Energy (SGRE) έχει αναπτύξει ακόμη και ανεμογεννήτριες ισχύος 14 MW με Integral Blades μήκους 108 μέτρων, υπογραμμίζοντας περαιτέρω την ανάγκη για λύσεις ανακύκλωσης. Επί του παρόντος, περίπου το 90% της συνολικής μάζας των ανεμογεννητριών είναι ανακυκλώσιμη και ο τομέας της αιολικής ενέργειας καταναλώνει περίπου

2,5 εκατομμύρια τόνους σύνθετου υλικού παγκοσμίως. Μέχρι το 2023, περίπου 14.000 λεπίδες βάρους 40.000-60.000 τόνων θα παροπλιστούν, δίνοντας έμφαση στην εστίαση της βιομηχανίας στην ανακύκλωση λεπίδων. Αυτή η πρόκληση απαιτεί τόσο υλικοτεχνικές όσο και τεχνικές λύσεις για την αποσυναρμολόγηση, τη συλλογή, τη μεταφορά, τη διάθεση απορριμμάτων και την επανεισαγωγή σύνθετων υλικών στις αλυσίδες παραγωγής (Amaechi et al., 2019).

### **1.3.5 Κατασκευές και Υποδομές**

Μια συναρπαστική εφαρμογή προηγμένων σύνθετων υλικών είναι η κατασκευή μιας λειτουργικής γέφυρας στο κρατικό σύστημα αυτοκινητοδρόμων. Αυτή η γέφυρα χρησιμοποίησε κοίλους σύνθετους σωλήνες άνθρακα και ελαφρύ σκυρόδεμα στην κατασκευή της. Τα προηγμένα σύνθετα υλικά (ACM) είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για σεισμική μετασκευή λόγω της ευελιξίας και της ευκολίας εφαρμογής τους. Έχουν επίσης γίνει πολύτιμος πόρος για τη μετασκευή και τη βελτίωση των διαδικασιών στην εγκληματολογική μηχανική. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ίνες στα ACM είναι οι ίνες γυαλιού και άνθρακα, οι οποίες είναι συνήθως ενσωματωμένες σε μια μήτρα εποξειδικής ρητίνης (Gagani et al., 2018; Amaechi et al., 2019).

Επιπλέον, οι απόβλητες πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων (WPCB) έχουν αναδειχθεί ως μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες πηγές παγκόσμιων αποβλήτων, μετά τις ανεμογεννήτριες. Συμβάλλουν σημαντικά στα ηλεκτρονικά απόβλητα και περιέχουν υψηλό ποσοστό ινών γυαλιού (27,4-45,55 wt%). Η ανάκτηση αυτών των WPCB για την ανάκτηση των ινών γυαλιού είναι μια προκλητική διαδικασία λόγω της παρουσίας επικίνδυνων μετάλλων, οργανικών ουσιών και των ίδιων των ινών γυαλιού (Rocha et al., 2014).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ METAL MATRIX

Μερικές από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες διαμορφώσεις μεταλλικών υποστρωμάτων για εφαρμογές αεροσκαφών είναι σύνθετα υλικά με βάση το αλουμίνιο (Al), το μαγνήσιο και το τιτάνιο όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια.

#### 2.1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ (Al)

Τα σύνθετα υλικά αλουμινίου (Aluminum Matrix Composites-AMC) είναι ένας εξελιγμένος τύπος σύνθετων υλικών που περιλαμβάνουν ενίσχυση αλουμινίου ή κραμάτων αλουμινίου με δευτερεύον υλικό υψηλής αντοχής, όπως κεραμικά ή ενισχυτικά ινών όπως ίνες άνθρακα. Αυτά τα υλικά μπορούν να προσαρμοστούν ώστε να έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες όπως αντοχή, ακαμψία και πυκνότητα, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές υψηλής απόδοσης. Τα AMC προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των μη ενισχυμένων μετάλλων, όπως υψηλότερη αντοχή και ακαμψία, μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας, ανώτερη αντοχή σε ζημιές, βελτιωμένη αντοχή στη φθορά, ευκολότερη επισκευή και εύκολη ανακύκλωση. Στην πραγματικότητα, τα AMC μπορούν να παρέχουν την ίδια αντοχή με τον χάλυβα, αλλά μόνο με το ένα τρίτο του βάρους (Rahman et al., 2012).

Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, τα κράματα αλουμινίου έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη μείωση του βάρους και του κόστους στην κατασκευή, λειτουργία και επισκευή δομών αεροσκαφών. Ωστόσο, η χρήση τους στα σκελετά αεροσκαφών αυξάνεται ραγδαία. Αυτό μπορεί να φανεί σε εμπορικά μοντέλα αεροσκαφών όπως τα Airbus A350XWB, A380 και Boeing 787, καθώς και σε επαγγελματικά αεροσκάφη από εταιρείες όπως η Dassault και η Raytheon. Η χρήση των AMC αυξάνεται επειδή προσφέρουν βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τα συμβατικά κράματα αλουμινίου. Αυτά τα σύνθετα υλικά όχι μόνο μειώνουν το βάρος αλλά επηρεάζουν και το κόστος συντήρησης (Koli et al., 2015).

Τα AMC είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για σκληρά περιβάλλοντα όπου η αξιοπιστία και η ασφάλεια είναι ζωτικής σημασίας, καθώς παρουσιάζουν ανώτερη αντοχή στην κόπωση σε σύγκριση με τον χάλυβα. Βρίσκουν εφαρμογές σε εξοπλισμό προσγείωσης αεροσκαφών, σφραγίδες υψηλής πίεσης και καθίσματα. Χρησιμοποιώντας AMC στα όργανα προσγείωσης, οι κατασκευαστές

μπορούν να μειώσουν σημαντικά το βάρος έως και 30% σε σύγκριση με τα συμβατικά υλικά (Kumar et al., 2020).

Η προσθήκη SiC και Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> στη μήτρα αλουμινίου έχει βρεθεί ότι βελτιώνει τη σκληρότητα, την τελική αντοχή σε εφελκυσμό και την αντοχή σε κρούση. Επιπλέον, η εφαρμογή επιστρώσεων θερμικού φραγμού όπως Alumina-Titania, κράμα Super-Z, PSZ, Zirconia Toughened Alumina (ZTA) και Alumina μέσω τεχνικών ψεκασμού πλάσματος ενισχύει σημαντικά τη θερμική αντοχή και την αντίσταση στην κόπωση των AMC. (Rahman et al., 2012).

Τα σύνθετα υλικά Al7075/TiC, που κατασκευάζονται μέσω μιας διαδικασίας υγρής μεταλλουργίας, έχουν δείξει αυξημένη αντοχή και αντοχή στη φθορά, καθιστώντας τα κατάλληλα για αεροδιαστημικές εφαρμογές. Ο Yan και οι συνεργάτες του τόνισαν τη σημασία μιας φυσικής συχνότητας στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα της αεροδιαστημικής για τη διατήρηση της μηχανικής αντοχής και την αντοχή στους κραδασμούς. Τα σύνθετα υλικά SiC/Al, σε σύγκριση με τα υπάρχοντα κράματα, έχουν υψηλότερη φυσική συχνότητα, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των συστατικών. Τα σύνθετα υλικά A356 ενισχυμένα με Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiC και Gr εμφάνισαν 35% αύξηση στην αντοχή εφελκυσμού και 40% αύξηση στη συνολική αντοχή, καθιστώντας τα μια βιώσιμη επιλογή για δομές αεροσκαφών υψηλής αντοχής (Rahman et al., 2012).

Αυτά τα παραδείγματα δείχνουν ότι οι ιδιότητες του αλουμινίου μπορούν να τροποποιηθούν χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνολογίες και κατάλληλες ενισχύσεις σε κλάσματα όγκου, παρέχοντας εναλλακτικές λύσεις σε βαρύτερα υπάρχοντα υλικά σε διάφορες εφαρμογές. Τα τελευταία χρόνια, τα AMC έχουν βρει σημαντική χρήση σε λειτουργικές και δομικές εφαρμογές αεροσκαφών. Με την αυξανόμενη σημασία της κατανάλωσης καυσίμου και των περιβαλλοντικών ανησυχιών, τα AMC γίνονται όλο και πιο επιθυμητά στον τομέα των μεταφορών (Kumar et al., 2020).

## **2.2 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΜΑΓΝΗΣΙΟ (MG)**

Η ζήτηση για ελαφριά και υψηλής απόδοσης υλικά αυξάνεται, ειδικά σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική. Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας με βάση το μαγνήσιο (MMCs) γίνονται δημοφιλή λόγω της χαμηλής πυκνότητάς τους. Συγκεκριμένα, τα συστήματα Mg-Al είναι εξαιρετικά για τη δημιουργία ελαφρών δομών για στρατιωτικά και πολιτικά αεροσκάφη. Αυτά τα σύνθετα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα εξαρτήματα αεροσκαφών, όπως αυλακώσεις δακτυλίου εμβόλου, ρότορες δίσκου και γρανάζια. Ωστόσο, οι πολύπλοκες τεχνικές κατασκευής τους καθιστούν ακριβή την παραγωγή τους. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, οι ερευνητές διερευνούν τη χρήση φθηνών υλικών ενίσχυσης για να κάνουν αυτά τα υλικά χαμηλής πυκνότητας πιο προσιτά (Anbarasan et al., 2020).

Τα MMC είναι επιθυμητά για κατασκευές αεροσκαφών επειδή συμβάλλουν στη μείωση του βάρους. Ωστόσο, απαιτείται περισσότερη έρευνα για τη βελτίωση της μηχανικής απόδοσης του μαγνησίου και των κραμάτων του για καλύτερη χρήση στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Η βελτίωση της μικροδομής των κραμάτων με βάση το Mg, όπως το μαγνήσιο-λίθιο και το μαγνήσιο-ψευδάργυρος-ζιρκόνιο, μπορεί να αυξήσει την πλαστικότητα τους και να επιτρέψει την παραγωγή πολύπλοκων δομών με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Τα κράματα Mg χρησιμοποιούνται συνήθως σε κατασκευές αεροσκαφών μέσω χύτευσης και μηχανικής κατεργασίας. Για θερμοκρασίες λειτουργίας 250 °C, προτείνονται ειδικά κράματα Mg ενισχυμένα με υλικά σπάνιων γαιών για εφαρμογές αεροσκαφών. Οι κατασκευαστές αεριωθούμενων κινητήρων χρησιμοποιούν όλο και περισσότερο κράματα με βάση το Mg τόσο σε στρατιωτικές όσο και σε εμπορικές κατασκευές αεροσκαφών. Η επενδυτική χύτευση είναι μια διαδικασία που βελτιώνει τη μηχανική απόδοση των κραμάτων μαγνησίου (Viswanathan et al., 2019).

Ενισχύσεις όπως B<sub>4</sub>C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και SiC προστίθενται στη μήτρα για να βελτιώσουν τις τριβολογικές και μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων μαγνησίου. Η επιμετάλλωση μπορεί επίσης να αυξήσει τη σκληρότητα των κραμάτων μαγνησίου με επικάλυψη χρωμίου. Τα AM60 και AZ91 είναι τα πιο ευρέως μελετημένα κράματα Mg-Al για σύνθετα υλικά μήτρας Mg, καθώς χρησιμοποιούνται εκτενώς στην αυτοκινητοβιομηχανία. Τα κεραμικά σωματίδια συχνά προτιμώνται ως ενισχύσεις λόγω της υψηλής αντοχής, της σκληρότητας, του συντελεστή ελαστικότητας, της θερμικής σταθερότητας και της χαμηλής πυκνότητάς τους (Kurzynowski et al., 2020). Τα σύνθετα υλικά μήτρας μαγνησίου ενισχυμένα με σωματίδια διβοριδίου τιτανίου

έχουν δείξει αυξημένη σκληρότητα και αντοχή σε συμπίεση, καθιστώντας τα κατάλληλα για αεροδιαστημική μηχανική. Οι ερευνητές μελέτησαν επίσης την επίδραση της αλουμίνας και των ενισχύσεων SiC στις μηχανικές ιδιότητες των κραμάτων Mg, διαπιστώνοντας ότι η σκληρότητα βελτιώνεται με την αύξηση του ποσοστού ενίσχυσης. Ωστόσο, αυτές οι ενισχύσεις έχουν περιορισμούς όπως χαμηλότερη συμβατότητα, χαμηλή ολκιμότητα και κακή διαβρεξιμότητα με τη μήτρα Mg (Rashad et al., 2015).

### **2.3 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΤΙΤΑΝΙΟ**

Τα σύνθετα υλικά μήτρας τιτανίου (TMCs) αποτελούνται από κράματα τιτανίου ως το κύριο υλικό. Αυτά τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική, η ναυτιλία και η αυτοκινητοβιομηχανία λόγω της εξαιρετικής αντοχής στη διάβρωση και της υψηλής αντοχής τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε αντίθεση με το αλουμίνιο, τα κράματα τιτανίου διατηρούν την αντοχή τους ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας τα ιδανικά για την κατασκευή αεροσκαφών και δομών πυραύλων που λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες και ταχύτητες (Inagaki et al., 2014). Τα TMC ενισχυμένα με ίνες χρησιμοποιούνται συνήθως στην ανάπτυξη δομών αεροσκαφών. Τα TMC που έχουν δείξει ιδιότητες κατάλληλες για αεροδιαστημικές εφαρμογές αποτελούνται συνήθως από συμβατικά κράματα μήτρας τιτανίου (όπως Ti6Al2Sn4Zr2Mo και Ti6Al4V) και προηγμένα κράματα μήτρας τιτανίου (όπως TiAl και Ti3Al) ενισχυμένα με συνεχείς συστοιχίες 30-40% όγκου ινών SiC. Αυτές οι ίνες έχουν υψηλό μέτρο και αντοχή (Metcalf, 2015).

Τα TMC μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες με βάση τον τύπο των οπλισμών: συνεχείς και ασυνεχείς. Τα συνεχή ενισχυμένα TMC αρχικά παρήχθησαν χρησιμοποιώντας ίνες βορίου επικαλυμμένες με SiC, γνωστές ως ίνες βορίου. Ωστόσο, λόγω του υψηλού κόστους αυτών των ινών, αντικαταστάθηκαν με ίνες άνθρακα και ίνες πυριτίου. Η συμπεριφορά αυτών των σύνθετων υλικών που είναι ενισχυμένα με ίνες δεν έχει μελετηθεί εκτενώς για εφαρμογές υψηλής απόδοσης (Inagaki et al., 2014).

Τα ασυνεχή ενισχυμένα TMC, από την άλλη πλευρά, έχουν δείξει υψηλότερη ειδική ακαμψία, ειδική αντοχή, θερμική σταθερότητα, αντοχή στη φθορά και σταθερότητα σε υψηλή θερμοκρασία σε σύγκριση με τα συμβατικά κράματα Ti, καθιστώντας τα πιο εφαρμόσιμα στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Διάφορα σωματίδια, όπως B4C, TiB2, ZrC, TiB, TiN, Al2O3, SiC

και TiC, προτιμώνται ως ενισχύσεις για TMC. Μεταξύ αυτών, χρησιμοποιούνται συνήθως TiC και TiB<sub>2</sub>, ενώ άλλες ενισχύσεις όπως νανο SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, νανο Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν επίσης να βρεθούν στη βιβλιογραφία (Huang et al., 2015).

Τα ασυνεχώς ενισχυμένα TMC έχουν χαμηλότερο κόστος παραγωγής σε σύγκριση με τα συνεχώς ενισχυμένα TMC. Η προσαρμογή της κατανομής του οπλισμού έχει αναγνωριστεί ως ένας αποτελεσματικός τρόπος ενίσχυσης της ολκιμότητας, της παραμορφωσιμότητας και της αντοχής σε υψηλή θερμοκρασία των ασυνεχώς ενισχυμένων TMC που παράγονται από τη μεταλλουργία σκόνης. Άλλες τεχνικές κατασκευής, όπως η μεταλλουργία σκόνης, η περιδίηση τήγματος και η τήξη κενού, έχουν χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία σύνθετων υλικών από κράμα TiAl ενισχυμένα με ίνες άνθρακα επικαλυμμένες με γραφένιο, με αποτέλεσμα σύνθετα υλικά με καλή θραύση, εξαιρετική αντοχή και μικροσκληρότητα. Σε μια άλλη μελέτη, ένα *in situ* σύνθετο υλικό μήτρας Ti<sub>6</sub>4 ενισχυμένο με σωματίδια TiC, εξαιρετικά λεπτές βελόνες Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> και ράβδους Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> αναπτύχθηκε με επιτυχία, παρουσιάζοντας βελτιωμένη ολκιμότητα και αντοχή σε σύγκριση με το μονολιθικό κράμα Ti<sub>6</sub>4 (Liu et al. 2015). Αυτές οι βελτιώσεις αποδόθηκαν σε παράγοντες όπως το σημαντικό μέγεθος της περιοχής μήτρας, το φαινόμενο ενίσχυσης του υβριδικού και στερεού διαλύματος και η προσαρμοσμένη δομή δικτύου.

Επιπλέον, οι Kim et al. (2011) ανέπτυξαν σύνθετα υλικά μήτρας τιτανίου ενισχυμένα με B<sub>4</sub>C (TiB + TiC) μέσω τήξης επαγωγής υπό κενό. Πέτυχαν βελτιωμένη συμπεριφορά τριβής και φθοράς με 20% περιεκτικότητα σε ενίσχυση. Μια άλλη επιτυχημένη εξέλιξη έγινε από τους An et al. (2018), οι οποίοι δημιούργησαν *in situ* σύνθετα Ti<sub>6</sub>4 ενισχυμένα με TiB χρησιμοποιώντας μια μεταλλουργική διαδικασία σκόνης. Η προσθήκη TiB ενίσχυσε σημαντικά τη σκληρότητα και τις ιδιότητες φθοράς των σύνθετων υλικών σχηματίζοντας ένα όριο δικτύου που λειτουργούσε ως «τοίχωμα φραγμού» και αντιστεκόταν αποτελεσματικά στην τριβή σε σύγκριση με το κράμα Ti<sub>6</sub>4. Οι Chaudhari et al. (2018) κατασκεύασαν σύνθετα Ti-4Al-2Fe ενισχυμένα με TiB και TiC χρησιμοποιώντας πυροσυσσώματωση με σπινθήρα πλάσματος. Παρατήρησαν μια μοναδική κατανομή των ενισχύσεων, με λεπτές βελόνες TiB κοντά στην επιφάνεια, εξαιρετικά λεπτό TiC στην κορυφή και πιο χοντρά μουςτάκια TiB στο μεγαλύτερο μέρος. Το στρώμα TiC στην επιφάνεια παρουσίασε την υψηλότερη σκληρότητα.

Αυτά τα παραδείγματα δείχνουν ότι τα ειδικά χαρακτηριστικά φθοράς των ασυνεχώς ενισχυμένων TMC μπορούν να βελτιωθούν ελέγχοντας προσεκτικά τη μικροδομή και το κλάσμα



όγκου των οπλισμών. Έχει διεξαχθεί εκτενής έρευνα σχετικά με τους μηχανισμούς σκλήρυνσης των TMC ενισχυμένων με ίνες. Οι Yan-Qing et al. (2010) ερεύνησαν την επίδραση της προσθήκης ινών SiC (μονοαξονικά) στην αντοχή στη θραύση του κράματος Ti64. Διαπίστωσαν ότι η αντοχή στη θραύση μειώθηκε μετά τη θερμική επεξεργασία λόγω μιας διεπιφανειακής αντίδρασης μεταξύ της μήτρας Ti64 και των ινών SiC. Το μέγεθος (διάμετρος) της ίνας βρέθηκε επίσης να επηρεάζει την αντοχή σε θραύση των σύνθετων μετάλλων.

**Πίνακας 1: Ιδιότητες και εφαρμογές σύνθετων υλικών μεταλλικής μήτρας σε αεροσκάφη.**

Υλικό Matrix	Υλικό οπλισμού	Ιδιότητες	Εφαρμογή
Τιτάνιο	Ούτω	-Ενέργεια υψηλής πρόσκρουσης -Μείωση βάρους (32%)	Σύστημα προσγείωσης
Ο Αλ	Cu-Nb <sub>3</sub>	-Βελτιωμένη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες	Κινητήρες
κράμα Al (LM25)	Ούτω	-Ελαφρύ -Βέλτιστη απόδοση -Μειώνει το κόστος καυσίμου	Πτέρυγα αεροσκάφους
κράμα Al	Ούτω	-Χαμηλή πυκνότητα -Υψηλό μέτρο ελαστικότητας -Υψηλή θερμική αγωγιμότητα -Αποτροπή κραδασμών συντονισμού	Δεξαμενή καυσίμου (τμήμα πόρτας) και ανεμιστήρες (μαχητικό αεροσκάφος F-16)

Υλικό Matrix	Υλικό οπλισμού	Ιδιότητες	Εφαρμογή
Κράμα Al (AA6061)	Ενεργός άνθρακας	- Καλή θερμική αντίσταση	Κινητήρες
Cu	Nb3Sn	-Αντοχή ερπυσμού -Ακαμψία	Κινητήρες

**Πηγή: (Parveez et al. 2022)**

## 2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ METAL MATRIX

Η επιλογή των MMC για εξαρτήματα αεροσκαφών εξαρτάται από τις ιδιότητες των υλικών, τις μεθόδους επεξεργασίας και την ποιότητα του προϊόντος, καθώς και από τις ειδικές απαιτήσεις της εφαρμογής. Στην αεροναυπηγική, ιδιότητες όπως το χαμηλό κόστος, η υψηλή συγκολλησιμότητα και ο υψηλός ειδικός συντελεστής είναι επιθυμητές για το ενισχυμένο με εξώθηση αλουμίνα Al. Τα MMC βρίσκουν εφαρμογές σε διάφορα εξαρτήματα αεροσκαφών, συμπεριλαμβανομένων εξαρτημάτων κινητήρα, εξαρτημάτων φρένων και κινητήριων αξόνων. Ωστόσο, η χρήση τους στον τομέα των μεταφορών περιορίζεται λόγω κόστους. Μειώνοντας το κόστος κατασκευής των MMC, μπορούν ενδεχομένως να αντικαταστήσουν τα παραδοσιακά εξαρτήματα (Chawla et al. 2013).

Τα MMC είναι ιδιαίτερα ωφέλιμα στην αεροναυπηγική καθώς προσφέρουν βελτιωμένη ειδική αντοχή και ακαμψία, οδηγώντας σε βελτιωμένη απόδοση του αεροσκάφους. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε στρατιωτικά και εμπορικά αεροσκάφη. Για παράδειγμα, οι πόρτες πρόσβασης από αλουμίνιο στα αεροσκάφη F16 έχουν αντικατασταθεί με MMC ενισχυμένα με σωματίδια SiC για τη βελτίωση της διάρκειας κόπωσης (Fahrenholtz et al., 2007). Τα συνεχή ενισχυμένα με ίνες MMC χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικές εφαρμογές λόγω της υψηλής αντοχής στην κόπωση, της ειδικής ακαμψίας και της αντοχής τους. Σύνθετα υλικά με βάση το τιτάνιο, ενισχυμένα με μονόινα νήματα SiC, έχουν χρησιμοποιηθεί στη συσκευή ελέγχου ενεργοποιητή ακροφυσίων

κινητήρα F119 του F16, αντικαθιστώντας βαρύτερα υλικά όπως το Inconel 718 και τον ανοξείδωτο χάλυβα. (Chawla et al. 2013).

Τα MMC μπορούν επίσης να αντικαταστήσουν τα σύνθετα υλικά άνθρακα/εποξειδικά που είναι επιρρεπή σε βλάβη ξένου σώματος (FOD) (Chawla et al. 2013).

Το Boeing 787, το οποίο χρησιμοποιεί εκτενώς σύνθετα υλικά στην κύρια δομή και την άτρακτό του, είναι ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα εφαρμογής των MMC. Περίπου το 80% του Boeing 787 κατ' όγκο αποτελείται από σύνθετα υλικά, με το υπόλοιπο ποσοστό να είναι αλουμίνιο, τιτάνιο, χάλυβας και άλλα υλικά. Αυτή η σχεδιαστική επιλογή επέτρεψε μείωση βάρους περίπου 20% σε σύγκριση με πιο παραδοσιακά σχέδια αλουμινίου. Παρά τα πλεονεκτήματα των MMC, εξακολουθούν να υπάρχουν λόγοι για να ληφθούν υπόψη ελαφριές ενώσεις αλουμινίου για ορισμένες εφαρμογές. (Chawla et al. 2013).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΟΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ METAL MATRIX

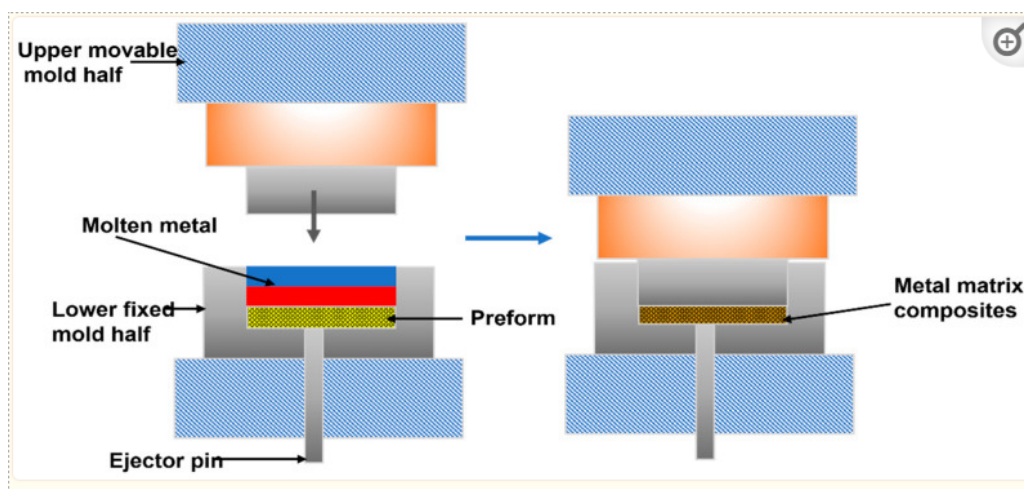
Οι τεχνικές κατασκευής των MMC καθορίζονται από την κατάσταση της μήτρας κατά την επεξεργασία, η οποία μπορεί να είναι σε υγρή, στερεή ή αέρια μορφή.

#### 3.1 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στην περίπτωση κραμάτων με χαμηλό σημείο τήξης, όπως το AL/Mg, η επεξεργασία υγρής κατάστασης είναι μια βολική τεχνική. Επιτρέπει την παραγωγή ενός σχήματος που μοιάζει πολύ με το επιθυμητό τελικό προϊόν με χαμηλότερο κόστος. Τα σωματίδια ή οι κοντές ενισχυτικές ίνες μπορούν να αναμειχθούν με τη λιωμένη μήτρα πριν από τη χύτευση για να δημιουργηθεί μια σύνθετη δομή. Η ανάδευση είναι συχνά απαραίτητη για να εξασφαλιστεί ένα πιο ομοιόμορφο υλικό. Τα παραδοσιακά χυτήρια χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία σύνθετων πλινθωμάτων, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να υποβληθούν σε επεξεργασία σε εξωθημένα ή έλασης μιγιέτες για περαιτέρω κατασκευή. Η συνεχής χύτευση είναι μια άλλη μέθοδος που παράγει μακριά ημικατεργασμένα προϊόντα με σταθερά τμήματα ή ράβδους. Ωστόσο, αυτές οι διεργασίες μπορεί να οδηγήσουν σε ετερογένεια, αλλά αυτό το ζήτημα μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω επεξεργασίας παραμόρφωσης ή ομαδοποίησης περιοχών με χαμηλές συγκεντρώσεις.

Οι Sun et al. (2012) χρησιμοποίησαν τη σπηλαιώση υπερήχων για τη διασπορά και την επεξεργασία νανοσωματιδίων Ni επικαλυμμένα με άνθρακα σε τετηγμένο μαγνήσιο, με αποτέλεσμα τα λεπτά ενισχυμένα σύνθετα υλικά με περιεκτικότητα σε Ni έως και 4,9% κατά βάρος. Μια άλλη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση υγρού μετάλλου για τη διείσδυση και την ενίσχυση των προμορφωμάτων, όπως η διείσδυση χωρίς πίεση, η χύτευση με συμπίεση και η διείσδυση χαμηλής πίεσης. Σε διείσδυση χωρίς πίεση, προμορφώματα σωματιδίων SiC (55-57%) τοποθετούνται σε πλινθώματα από κράμα Al, θερμαίνονται στους 790-810 °C ανάλογα με το πάχος της κλίνης σκόνης SiC και εκτίθενται σε ατμόσφαιρα αζώτου για 212 ώρες. Αυτή η τεχνική είναι οικονομικά αποδοτική και κατάλληλη για την παραγωγή ελαφρών σύνθετων υλικών υψηλής αντοχής σε συμπίεση για αεροδιαστημικές εφαρμογές.

Η χύτευση με συμπίεση όπως παρατηρείται στην παρακάτω εικόνα είναι μια μέθοδος διείσδυσης με τη βοήθεια πίεσης όπου σωματίδια ή κοντές ίνες διεισδύονται από υγρό μέταλλο. Προσφέρει πλεονεκτήματα όπως μικρότερο χρόνο επεξεργασίας, δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων σχημάτων, ελάχιστο πορώδες, βελτιωμένη διαβρεξιμότητα, ακρίβεια διαστάσεων και ελαχιστοποιημένες αντιδράσεις διεπιφανείας. Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική, σύνθετα υλικά Al ενισχυμένα με ίνες άνθρακα με βελτιωμένη σκληρότητα, σκληρότητα, αντοχή και διαβρεξιμότητα έχουν επιτευχθεί με επιτυχία.



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση τεχνικής χύτευσης με συμπίεση.

Πηγή: (Parveez et al. 2022)

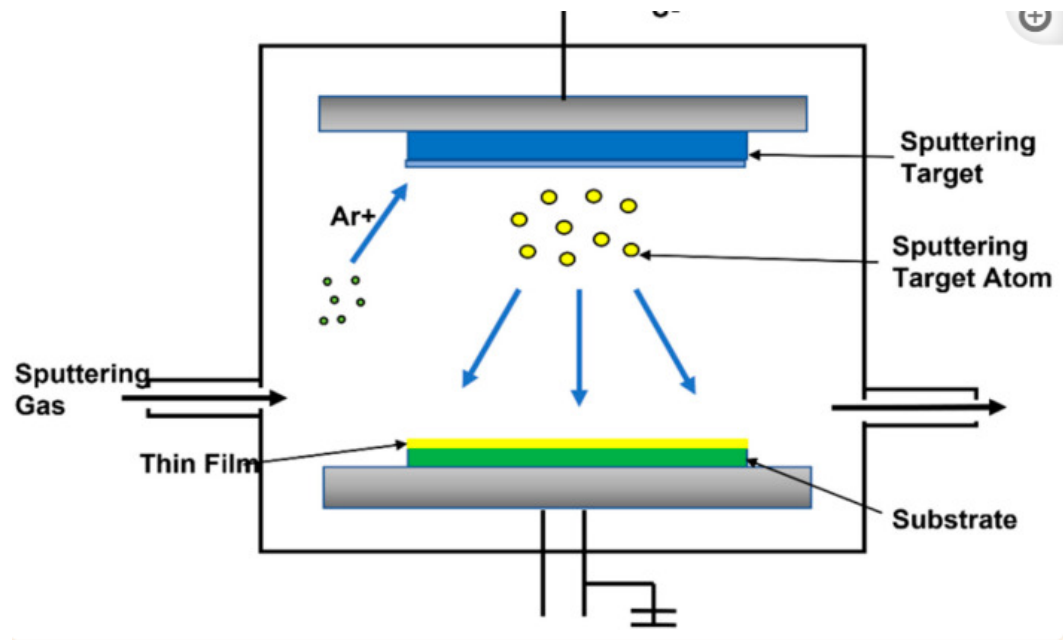
### 3.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Οι διεργασίες στερεάς κατάστασης, ιδιαίτερα η μεταλλουργία σκόνης (PM), χρησιμοποιούνται συνήθως για την κατασκευή σύνθετων υλικών. Σε αυτή τη μέθοδο, το ενισχυτικό υλικό, σε μορφή λεπτής σκόνης, αναμιγνύεται στενά με το κράμα μετάλλων. Το μίγμα στη συνέχεια συμπιέζεται εν ψυχρώ και στη συνέχεια υποβάλλεται σε θερμή συμπίεση ή πυροσυσσωμάτωση. Για να επιτευχθεί ένα πλήρως συμπαγές σύνθετο υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες, χρησιμοποιείται συχνά δευτερογενής επεξεργασία όπως σφυρηλάτηση ή εξώθηση, εκμεταλλευόμενη τη διάταξη κόκκων και ινών. Τα PM μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή σύνθετων υλικών με ασυνεχείς ίνες, καθώς και εκείνων που περιέχουν νανοσωματίδια. Αυτή η μέθοδος προσφέρει το πλεονέκτημα της παραγωγής εξαρτημάτων με

σχήματα που μοιάζουν πολύ με το επιθυμητό τελικό προϊόν. Επιπλέον, είναι δυνατό να ληφθούν λειτουργικά διαβαθμισμένα υλικά μεταβάλλοντας σταδιακά τον όγκο του οπλισμού σε συγκεκριμένες περιοχές του εξαρτήματος. Ένα μειονέκτημα, ωστόσο, είναι η δυσκολία στον έλεγχο της διασποράς του ενισχυτικού υλικού, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε λιγότερες ομάδες και περιοχές ενίσχυσης. Η Μορφοποίηση εν κενώ χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή TiMC ενισχυμένου με SiC. Σε αυτή τη διαδικασία, μονονήματα SiC με διάμετρο 140 nm επικαλύφθηκαν με Ti6Al4V, με πάχος 50 nm, και στοιβάστηκαν μαζί σε εξαγωνικά και τετράγωνα σχέδια. Η κατανομή των ινών στη μέθοδο αυτή ήταν πολύ ομοιόμορφη, επιτρέποντας ένα υψηλό κλάσμα όγκου ινών έως και 80%.

### 3.3 ΦΥΣΙΚΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΑΤΜΩΝ

Η εναπόθεση ατμών, ιδιαίτερα ο ψεκασμός με πλάσμα, χρησιμοποιείται συνήθως για επεξεργασία αερίων στην κατασκευή σύνθετων υλικών, όπως ίνες επικαλυμμένες με μέταλλο. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την εναπόθεση της μήτρας σε μεμονωμένες ίνες στη φάση ατμού. Στη συνέχεια παράγονται σύνθετα υλικά χρησιμοποιώντας θερμές ισοστατικές εργασίες συμπίεσης. Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, η επίστρωση PVD (Φυσική Εναπόθεση Ατμών-Physical Vapor Deposition) εφαρμόζεται σε μηχανικά εξαρτήματα των κινητήρων αεριωθουμένων για την αποφυγή φθοράς (Cui et al., 2008). Η επίστρωση PVD προσφέρει υψηλή σκληρότητα και χαμηλή τριβή, καθιστώντας την ιδανική λειτουργική μεταλλική επίστρωση για αεροδιαστημικές εφαρμογές. Οι κυμαινόμενες θερμοκρασίες που αντιμετωπίζουν αυτά τα εξαρτήματα, που κυμαίνονται από το μηδέν έως εκατοντάδες βαθμούς Κελσίου, απαιτούν μεταλλικές επικαλύψεις που μπορούν να αντέξουν σε ακραίες συνθήκες. Το PVD επιλέγεται για τη θερμική του σταθερότητα και την αντοχή στη διάβρωση, καθιστώντας το εξαιρετική επιλογή για το φινίρισμα μετάλλων της αεροναυπηγικής (Dhanashekar et al., 2014). Η τεχνική PVD έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη επιστρώσεων θερμικού φραγμού για κινητήρες αεροσκαφών, όπως παρατηρείται στην εικόνα.



Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση τεχνικής φυσικής εναπόθεσης ατμών.

Πηγή: (Parveez et al. 2022)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΣΥΝΘΕΤΑ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (CERAMIC MATRIX COMPOSITES-CMC)

#### 4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΚΕΡΑΜΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ (CERAMIC MATRIX COMPOSITES-CMC)

Τα σύνθετα κεραμικής μήτρας (CMCs) έχουν προταθεί ως κατάλληλα υλικά για κατασκευές αεροσκαφών που απαιτούν υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα στη θραύση. Αυτά τα σύνθετα υλικά προσφέρουν πολλά πλεονεκτικά χαρακτηριστικά, όπως ελαφρύ βάρος, χαμηλή θερμική διαστολή, υψηλή θερμοκρασία και αντοχή στην οξείδωση και αντοχή σε καταστροφική αστοχία. Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά μηχανικής όπως τα μέταλλα, τα CMC παρουσιάζουν ανώτερη αντοχή σε επιθετικά περιβάλλοντα και υψηλές θερμοκρασίες (Udayakumar et al., 2011). Στα CMC, το υλικό μήτρας είναι συνήθως ένα τεχνικό κεραμικό, το οποίο κατασκευάζεται μέσω μιας σχετικά σύνθετης διαδικασίας χρησιμοποιώντας πρώτες ύλες με μικρά μεγέθη σωματιδίων (κλίμακα μικρού ή νανομέτρων), υψηλή καθαρότητα και εξαιρετική μηχανική, θερμική και ηλεκτρική αντίσταση. Τα κεραμικά στα CMC τυπικά παρουσιάζουν συνδυασμό ιοντικών και ομοιοπολικών χημικών δεσμών. Διαθέτουν υψηλή σκληρότητα, χημική σταθερότητα, χαμηλή πυκνότητα και αντοχή στη φωτιά, επιτρέποντάς τους να διατηρούν τη μηχανική αντοχή ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες (Kiser et al., 2018).

Ο Πίνακας 2 παρέχει μια επισκόπηση των ιδιοτήτων και των συνθέσεων διαφόρων CMC που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αεροσκαφών.

*Πίνακας 2: Ιδιότητες και εφαρμογές CMC σε αεροσκάφη*



Σύνθετα	Μήτρα	Ενίσχυση	Ιδιότητες	Εφαρμογή
ZrB <sub>2</sub> ή HfB <sub>2</sub> /SiC ή Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrB <sub>2</sub> ή HfB <sub>2</sub>	SiC ή Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-Υψηλή αντοχή στην οξείδωση (2000 °C και άνω)	-Υπερηχητική πτήση (προώθηση πυραύλων και ατμοσφαιρική επανείσοδος)
ZrB <sub>2</sub> /SiC (μουστάκι ή ψιλοκομμένες ίνες)	ZrB <sub>2</sub>	Ψιλοκομμένες ίνες SiC ή μουστάκι SiC	-Καλή αντοχή σε θραύση -Υψηλή αντοχή σε θερμοκρασία δωματίου -Ανθεκτικότητα σε υψηλή θερμοκρασία	- Εξαρτήματα υψηλής θερμοκρασίας
Οξειδίο/οξειδίο	Οξειδίο	Οξειδίο	-Υψηλή απόδοση -Μειωμένος θόρυβος -Ανθεκτικότητα -Μείωση βάρους	-Υποχηητικούς κινητήρες αεριοθούμενου αέρα (στόμιο μείκτη εξάτμισης)
Γυαλί-κεραμικό	Κεραμικός	Ποτήρι	-Ελαφρύ -Υψηλή θερμοκρασία -Ελαφρύ -Καλύτερη απόδοση -Μειωμένη κατανάλωση	- Συμπιεστής αεροσκαφών, καυστήρας και τουρμπίνα

Σύνθετα	Μήτρα	Ενίσχυση	Ιδιότητες	Εφαρμογή
			καυσίμου ειδικής ώσης	
C/SiC	Ούτω	Ινα άνθρακα	-Καλύτερες τριλογικές ιδιότητες	- Φρένα αεροσκαφών
C/SiC	Ούτω	Ινα άνθρακα	-Δύναμη κάμψης -Σκληρότητα θραύσης	- Πτερύγια τουρμπίνας
C/SiC	Ούτω	Ινα άνθρακα	-Αντέχει σε θερμοκρασίες έως 1200 °C	- Φρένα αεροσκαφών
Ούτω	Ούτω	Ινα άνθρακα	-Μείωση βάρους -Βελτιωμένη επιβράδυνση -Αντοχή στη φθορά -Βελτιωμένο φορτίο φορέα και διαθεσιμότητα -Μείωση του κόστους συντήρησης	- Φρένο αεροσκάφους (δίσκοι και ρότορες)
C/SiC	Ούτω	Ινα άνθρακα	-Καλές θερμοδιαβρωτικές ιδιότητες (έως 2000 °C) -Υψηλή αντοχή στην οξείδωση -Υψηλή αναλογία	-Δομικά εξαρτήματα επανεισόδου -Θερμικές ασπίδες υψηλής απόδοσης -Δίσκοι φρένων

Σύνθετα	Μήτρα	Ενίσχυση	Ιδιότητες	Εφαρμογή
			αντοχής προς βάρος	-Ακροφύσια πυραύλων -Σωλήνες εναλλάκτη θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας
C-SiC	Ούτω	Ινα άνθρακα	-Μέσος γραμμικός και μαζικός ρυθμός διάβρωσης -Εξαιρετική αντοχή στη θερμοοξειδωτική διάβρωση -Αντοχή στη διάβρωση -Υψηλή θερμική αγωγιμότητα -Καλή αντοχή -Χαμηλό CTE -Εξαιρετική αντοχή σε θερμικό σοκ	- πτερύγια αεριοθουμένων
C/SiC	Ούτω	Ινα άνθρακα	-Ελαφρύ -Χαμηλή πυκνότητα -Υψηλός και σταθερός συντελεστής τριβής	-Συστήματα πέδησης αεροσκαφών (τακάκια και δίσκοι φρένων)

Σύνθετα	Μήτρα	Ενίσχυση	Ιδιότητες	Εφαρμογή
			-Υψηλή αντοχή στη φθορά	
C/SiC	Ούτω	Ινα άνθρακα	-Καλές θερμικές και μηχανικές ιδιότητες -Υψηλότεροι συντελεστές τριβής	- Φρένα αεροσκαφών
SiC/SiC (CERASEP A373)	Ούτω	Ινα άνθρακα	-Υψηλή αντοχή σε θραύση	- Καυστήρας κινητήρα (εξέδρα και εσωτερικές και εξωτερικές επενδύσεις)
SiC/C (SEPCARBINOXA262)	Ούτω		-Καλή ειδική δύναμη	-Εξωτερικά πτερύγια (κινητήρας Rafale Fighter M88 A262)
SiC/Fiber Carbon (C)	Ούτω		-Μείωση βάρους (50%) σε σύγκριση με το πτερύγιο υπερκράματος (Inconel 718)	Κινητήρας SNECMA M 88-2 (Στήριγμα φλόγας, πτερύγια κινητήρα και κώνοι εξάτμισης)

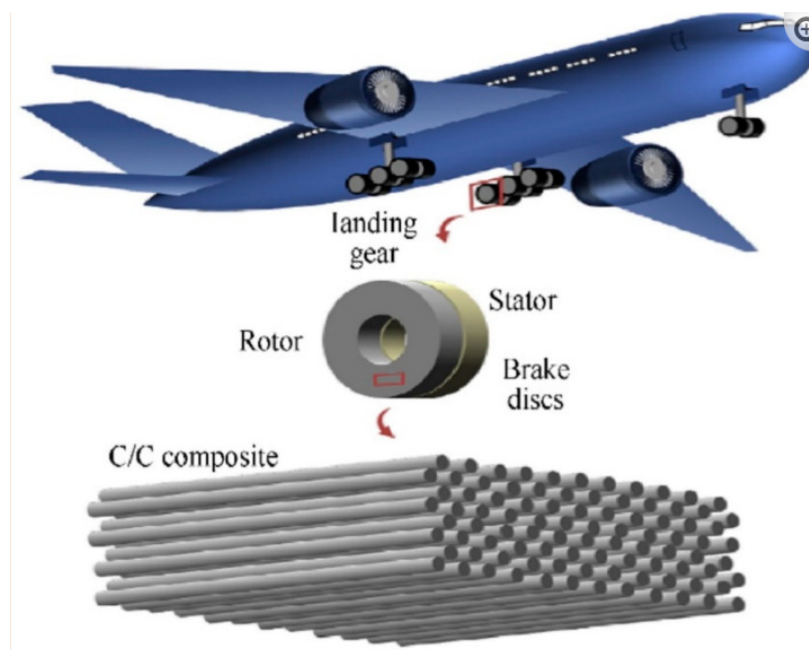
Πηγή: (Parveez et al. 2022)

Τα CMC μπορούν να χρησιμοποιήσουν διάφορες μορφές ενισχυτικών φάσεων, συμπεριλαμβανομένων ινών και συνεχών σωματιδίων. Τα χαρακτηριστικά των CMCs επηρεάζονται από παράγοντες όπως το κλάσμα όγκου, η συχνότητα κατανομής, το μέγεθος, ο προσανατολισμός και η γεωμετρία της φάσης ενίσχυσης. Οι τρέχουσες εφαρμογές των CMC περιλαμβάνουν αεροδιαστημικές/αεροναυπηγικές δομές, επένδυση υψηλής θερμοκρασίας, πλάκες πρόσωσης, κινητήρες εσωτερικής καύσης και στροβίλους. Καθώς το κόστος παραγωγής των CMC συνεχίζει να μειώνεται, το εύρος εφαρμογής τους αναμένεται να επεκταθεί σε νέους τομείς. Υπάρχει επιτακτική ανάγκη να αναπτυχθούν οικονομικά αποδοτικές ίνες SiC για να διευκολυνθεί η ευρύτερη υιοθέτηση των CMC, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπου το κόστος είναι σημαντικός παράγοντας. Η χρήση φρένων αεροσκαφών έχει περάσει από οργανικά υλικά (όπως οργανικά υλικά φρένων χωρίς αμίαντο και σύνθετα υλικά με βάση ρητίνη ενισχυμένα με ίνες αμιάντου) σε υλικά μεταλλουργίας σκόνης (όπως μέταλλα με βάση το σίδηρο και χαλκό) και άνθρακα/σύνθετα υλικά (άνθρακας φρένα) (Kiser et al., 2018).

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται σύνθετα υλικά άνθρακα-άνθρακα με διαφορετικούς προσανατολισμούς ινών, ειδικά σχεδιασμένα για αεροναυπηγικές εφαρμογές. Αυτά τα σύνθετα υλικά, παρουσιάζουν εξαιρετική απόδοση όσον αφορά την αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, τη μηχανική αντοχή και τις θερμικές ιδιότητες. Ως αποτέλεσμα, τα φρένα άνθρακα μπορούν να αντέξουν τις απαιτητικές απαιτήσεις των παραδοσιακών φρένων, ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, τα φρένα άνθρακα προσφέρουν σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των χαλύβδινων φρένων μειώνοντας σημαντικά το βάρος του συστήματος πέδησης. Αυτή η μείωση βάρους συμβάλλει άμεσα στη χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου και στις μειωμένες εκπομπές ρύπων του κινητήρα (Chen et al., 2016).

Για παράδειγμα, το σύστημα πέδησης του Boeing 737 NG, κατασκευασμένο από άνθρακα, είναι 300 kg ελαφρύτερο από τα χαλύβδινα φρένα. Τα σύνθετα φρένα C/SiC αντιμετωπίζουν τους περιορισμούς των φρένων άνθρακα διατηρώντας τα πλεονεκτήματά τους. Αυτά τα φρένα έχουν εξαιρετικές ιδιότητες, όπως μεγάλη διάρκεια ζωής, χαμηλή ευαισθησία στην τριβή, υψηλό και σταθερό συντελεστή τριβής και αντοχή στην οξειδωση. Ως αποτέλεσμα, τα υλικά πέδησης

C/SiC έχουν κερδίσει την προσοχή ως η τέταρτη γενιά υλικών πέδησης αεροσκαφών. Τα φρένα C/SiC παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες τριβής, όπως υψηλό συντελεστή στατικής τριβής, μειωμένη ευαισθησία σε βρεγμένες συνθήκες, χαμηλό ποσοστό φθοράς και υψηλότερη απόδοση πέδησης.



**Εικόνα 3: Σχηματική απεικόνιση δίσκων πέδησης κατασκευασμένα με υλικό C/C**

**Πηγή: How Do Aircraft Brakes Work?|Engineering 360. Available online:  
<https://insights.globalspec.com/article/12903/how-do-aircraft-brakes-work>**

Καθώς η αναλογία ώσης προς βάρος των κινητήρων αεροσκαφών αυξάνεται, τα εξαρτήματα υψηλής θερμοκρασίας, όπως τα ακροφύσια, οι θάλαμοι καύσης και τα εξαρτήματα του στροβίλου, υπόκεινται σε πιο σοβαρά φορτία ροής θερμότητας και κρούσης. Για παράδειγμα, όταν ο λόγος ώσης προς βάρος είναι 10, η θερμοκρασία εισόδου του στροβίλου μπορεί να φτάσει τους 1500 °C και μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω στους 1800 °C με υψηλότερο λόγο ώσης προς βάρος (Chen et al., 2016).

Συνθετικά σύνθετα κεραμικής μήτρας συνεχούς ενισχυμένης με ίνες (CFRC CMC), συμπεριλαμβανομένων σύνθετων κεραμικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες καρβιδίου πυριτίου (SiC/SiC CMC) και σύνθετων κεραμικών μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (C/SiC CMC), παρουσιάζουν χαμηλές τιμές από 2 g/cm<sup>3</sup>, αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες έως 1600 °C και υψηλότερη αντοχή στη θραύση σε σύγκριση με τα μονολιθικά κεραμικά (Yoshida, 2010).

Επομένως, το CFRC CMC θεωρείται ένα πολλά υποσχόμενο υλικό που πληροί τις απαιτήσεις των εξαρτημάτων θερμής διατομής σε αεροκινητήρες. Επιτρέπει την αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας στους 200-350 °C, μειώνοντας ή δυνητικά εξαλείφοντας την ανάγκη για δομές ψύξης. Επιπλέον, το CFRC CMC ενισχύει αποτελεσματικά την αξιοπιστία των αεροκινητήρων. Το CFRC CMC έχει ήδη χρησιμοποιηθεί στα ακροφύσια, τους θαλάμους καύσης, τους στάτες στροβίλων και άλλα θερμά τμήματα αεροκινητήρων όπως M882, F100PW229, CFM565B, F135, GENx και LEAPX. Η τεχνολογία κατασκευής του CFRC CMC θεωρείται ως σημαντική πρόοδος για εξαρτήματα θερμού τμήματος σε αεροκινητήρες, λαμβάνοντας υψηλή αναγνώριση από ανεπτυγμένες χώρες και περιοχές όπως η Ευρώπη, η Αμερική και η Ρωσία (Kiser et al., 2018).

## **4.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ CMC**

Υπάρχουν διάφορες διαθέσιμες μέθοδοι για την επεξεργασία των CMC χρησιμοποιώντας υγρές, στερεές ή αέριες πρόδρομες ουσίες. Ο συντελεστής διαφοράς θερμικής διαστολής μεταξύ της μήτρας και του ενισχυτικού υλικού δημιουργεί τάση εφελκυσμού στη μήτρα, η οποία εμποδίζει την πυκνωση. Ως αποτέλεσμα, το κλάσμα όγκου του οπλισμού διατηρείται συνήθως κάτω από το 40%.

### **4.2.1. Διαδικασία σε πυροσυσσωμάτωση αντίδρασης**

Η διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης αντίδρασης χρησιμοποιείται στην παραγωγή CMCs. Σε αυτή τη διαδικασία, κεραμικά σωματίδια, όπως ίνες άνθρακα που προστίθενται στο πυρίτιο, διεισδύουν σε χαμηλή πίεση και θερμοκρασία 1700 °C για να δημιουργήσουν υγρό πυρίτιο. Αυτό οδηγεί σε μια αντίδραση μεταξύ πυριτίου και άνθρακα, σχηματίζοντας μια λεπτή μήτρα που παρουσιάζει εξαιρετική θερμοχημική συμβατότητα μεταξύ του οπλισμού και της μήτρας

[101,102]. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας, αναπτύχθηκαν κεραμικά  $TiB_2SiC$  ενισχυμένα με νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων (MWCNTs), με αποτέλεσμα σημαντική βελτίωση στην αντίσταση του υλικού σε θερμικό σοκ.

#### 4.2.2 Μέθοδος Διήθησης Υγρών

Η μέθοδος διήθησης υγρού είναι παρόμοια με τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη διήθηση μετάλλων ή πολυμερών. Περιλαμβάνει τη διείσδυση μιας προδιαμορφωμένης φάσης ενίσχυσης από ένα υγρό ή πρόδρομο εναιώρημα μήτρας μέσω τριχοειδούς δράσης υπό κενό ή εξωτερική πίεση. Για παράδειγμα, τα σύνθετα υλικά γυάλινης μήτρας δημιουργούνται χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική, όπου διάφορες ίνες (όπως  $SiC$ ,  $C$ ,  $Al_2O_3$  και mullite) εμποτίζονται με τηγμένο γυαλί σε ένα χωνευτήριο. Άλλα υλικά παράγονται μέσω της διείσδυσης υδρογονανθράκων (πίσσας ή φαινολικής ρητίνης) ή οργανομεταλλικών πολυμερών, τα οποία στη συνέχεια πυρολύονται για να δημιουργήσουν  $SiC$  και μια μήτρα άνθρακα, αντίστοιχα.

#### 4.2.3 Διαδικασία Sol-Gel

Η διαδικασία sol-gel χαρακτηρίζεται από χαμηλές θερμοκρασίες επεξεργασίας και υψηλή ομοιομορφία σύνθεσης. Αρχικά, όταν σωματίδια νανο-μεγέθους με ακτίνα έως 100 nm (όπως τα κεραμικά σωματίδια) καθιζάνουν σε ένα υγρό (νερό ή οργανικός διαλύτης), σχηματίζεται ένα κolloειδές εναιώρημα μέσω μιας χημικής αντίδρασης. Αυτά τα υγρά διαλύματα έχουν χαμηλό ιξώδες, επιτρέποντάς τους να διεισδύουν εύκολα στο προπλάσμα. Ο πολυμερισμός στη συνέχεια μετατρέπει το κolloειδές διάλυμα σε γέλη. Η γέλη μπορεί να μετατραπεί σε κεραμικό σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο ζημιάς στις ενισχυτικές ίνες.

Δεδομένου ότι η περιεκτικότητα σε κεραμικά στο πήκτωμα είναι σχετικά χαμηλή, παρατηρείται σημαντική συρρίκνωση κατά την ξήρανση. Για να επιτευχθεί η επιθυμητή πυκνότητα, η κεραμική μήτρα συμπυκνώνεται μέσω επαναλαμβανόμενων κύκλων διείσδυσης και ξήρανσης. Η προσθήκη κεραμικών σωματιδίων μπορεί να βελτιώσει περαιτέρω την ογκομετρική απόδοση των κεραμικών κolloειδών πηκτής, ενώ επίσης μειώνει το σχηματισμό ρωγμών κατά τη φάση ξήρανσης. Ωστόσο, η ουσιαστική διαφορά στη συρρίκνωση μεταξύ του οπλισμού και της μήτρας μπορεί να οδηγήσει σε σχηματισμό ρωγμών. Επιπλέον, η τεχνολογία

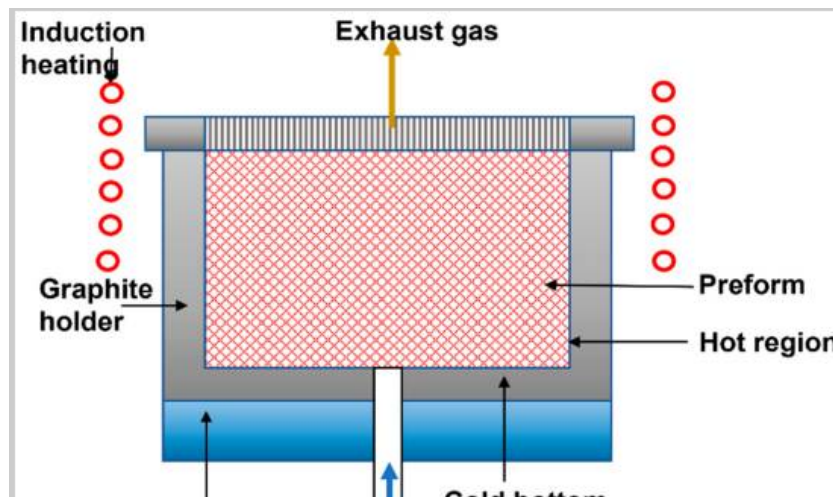


αυτο-πολλαπλασιαζόμενης σύνθεσης υψηλής θερμοκρασίας (SHS), που χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή πορωδών πυρίμαχων υλικών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή CMC όπως το SiC (μουστάκι) και το Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Σε αυτή τη διαδικασία, η πίεση εφαρμόζεται λίγο μετά ή κατά τη διάρκεια της εξώθερμης αντίδρασης εντός της μήτρας για να πυκνώσει το υλικό.

#### 4.2.4 Διήθηση χημικών ατμών (CVI)

Η Διήθηση Χημικών Ατμών (CVI) είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει χαμηλότερες θερμοκρασίες επεξεργασίας σε σύγκριση με τη διείσδυση υγρού, αποτρέποντας έτσι την υποβάθμιση των ινών. Ωστόσο, η ροή αέρα εντός του προπλάσματος μπορεί να οδηγήσει σε απόφραξη πόρων, απαιτώντας πολλαπλούς κύκλους εμποτισμού και επεξεργασίας για να κλείσουν πλήρως οι πόροι. Αρχικά, το CVI χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων υλικών άνθρακα/άνθρακα μέσω της πυρόλυσης του CH<sub>4</sub> σε θερμοκρασίες που κυμαίνονταν από 1000 έως 2000 °C. Στο πλαίσιο των CMC, το CVI χρησιμοποιείται για τη διείσδυση υλικών ενίσχυσης SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, C, B<sub>4</sub>C, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, καθώς και Nicalon (SiC) και Nextel (ένας τύπος Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) στα προμορφώματα ινών.

Το CVI είναι μια επέκταση της τεχνολογίας χημικής εναπόθεσης ατμών (CVD). Όταν το CVD χρησιμοποιείται για την ενσωμάτωση σημαντικής ποσότητας υλικού μήτρας στο προφόρμα ινών, αναφέρεται ως διήθηση ή διείσδυση χημικού ατμού. Η διαδικασία CVI έχει βελτιωθεί μέσω τροποποιήσεων όπως το CVI ενισχυμένο με μικροκύματα (MECVI) και εναλλακτικά στάδια προδιήθησης όπως η σακούλα κενού και η ηλεκτροφορητική διείσδυση. Αυτές οι τροποποιήσεις στοχεύουν στη μείωση της διάρκειας και του κόστους της τυπικά δαπανηρής διαδικασίας CVI. Το σύστημα που μελετήθηκε εστιάζει στις ίνες καρβιδίου του πυριτίου σε μια μήτρα καρβιδίου του πυριτίου (SiC/SiC). Η ενσάρκωση υπό κενό παρέχει βελτιωμένη σύνδεση των σωματιδίων της μήτρας στην περιοχή μεταξύ τους, ενώ η χρήση μεγαλύτερου μεγέθους σωματιδίων SiC μειώνει τη διείσδυση στην περιοχή εντός της απορρόφησης.



*Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας διήθησης χημικών ατμών*

*Πηγή: (Parveez et al. 2022)*

#### **4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ CMC ΣΕ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ**

Ενώ τα μονολιθικά κεραμικά υλικά προσφέρουν ορισμένες εγγενείς ιδιότητες, η ευαισθησία τους σε ελαττώματα και η λειτουργία εύθραυστου σπασίματος τα καθιστούν προβληματικά για χρήση σε κινητήρες αεροσκαφών. Τα CMC συνεχών ινών, ωστόσο, παρουσιάζουν μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση λόγω της απόδοσής τους σε υψηλή θερμοκρασία σε σύγκριση με τα υπερκράματα και της υψηλότερης αντοχής στη θραύση σε σχέση με τα μονολιθικά κεραμικά. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τα CMC κατάλληλα για εφαρμογές όπου η δομική ακεραιότητα είναι ζωτικής σημασίας, ικανοποιώντας τις γενικές απαιτήσεις των κινητήρων αεροσκαφών. Τα CMC επιτρέπουν υψηλότερες θερμοκρασίες υλικού, τη χρήση επιστρώσεων θερμικού φραγμού (TBC) και αερόψυκτων φύλλων, εξαλείφοντας την ανάγκη για ψύξη αέρα και βελτιώνοντας την απόδοση. Είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη τα συνολικά οφέλη από την εφαρμογή CMC σε αεροκινητήρες για να διασφαλιστεί η επιτυχής ενσωμάτωση. Επιπλέον, τα CMC προσφέρουν σημαντική μείωση βάρους, καθιστώντας τα κατάλληλα τόσο για μη δομικά όσο και για δομικά στοιχεία κινητήρων αεροσκαφών (Bansal et al., 2014).

### 4.3.1 Λεπίδες Στροβίλου

Τα περύγια των αεριοστροβίλων απαιτούν υλικά που αντέχουν σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα περύγια σύνθετου στροβίλου άνθρακα/άνθρακα (CC), τα οποία διατηρούν αντοχή σε θερμοκρασίες περίπου 1050 °C στα καυσαέρια του στροβίλου, είναι ελαφριά και επιτρέπουν στα αεροσκάφη να επιτυγχάνουν ταχύτητες 10 Mach. Σε σύγκριση, τα σύνθετα υλικά με βάση το τιτάνιο μπορούν να φτάσουν μόνο τα 3,8 Mach θερμοκρασία λειτουργίας 450 °C. Οι ενώσεις CC, κατασκευασμένες από εναλλασσόμενες στρώσεις από κουβέρτες άνθρακα και ίνες μονής κατεύθυνσης, παρουσιάζουν ειδική αντοχή εφελκυσμού (s/r) 160 MPa/g cm<sup>3</sup> στους 2000 °C, ενώ τα παραδοσιακά κεραμικά έχουν ειδική αντοχή εφελκυσμού 40 MPa/g cm<sup>3</sup> έως 1200 °C.

Το SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ή το SiC (ίνα)/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> CMC, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτικά των σύνθετων υλικών C/C, παρουσιάζουν χαμηλότερη απόδοση με ειδική αντοχή εφελκυσμού 60 MPa/g cm<sup>3</sup>. Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, προτιμώνται σύνθετα υλικά από ανθρακονήματα επικαλυμμένα με SiC σε μήτρα άνθρακα. Η ανάπτυξη σύνθετων οξειδίων υψηλής απόδοσης (HIPOC) το 2009 επικεντρώθηκε σε διάφορα CMC με βάση οξείδια για εφαρμογές θερμού τμήματος σε αεροσκάφη τουρμπίνες ή κινητήρες εδάφους (Bansal et al., 2014).

### 4.3.2 Σύστημα πέδησης

Το σύστημα πέδησης είναι ένας κρίσιμος τομέας στον κλάδο της αεροναυπηγικής. Όταν ενεργοποιείται, η υδραυλική πίεση προκαλεί τριβή μεταξύ των εξαρτημάτων του δίσκου, με αποτέλεσμα οι επιφανειακές θερμοκρασίες να φτάνουν τους 3000 °C και τους 1500 °C. Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά συστήματα όπως ο χάλυβας υψηλής αντοχής και το πυροσυσσωματωμένο μέταλλο, η χρήση σύνθετων υλικών C/C στο σύστημα πέδησης μειώνει σημαντικά το βάρος. Με την εφαρμογή αυτού του υλικού σε συστήματα πέδησης εμπορικών αεροσκαφών, το συνολικό βάρος μπορεί να μειωθεί από 1100 σε 700 κιλά. Αυτό όχι μόνο ενισχύει τις ιδιότητες του υλικού όπως η αντοχή και η περιβαλλοντική σταθερότητα, αλλά

βελτιώνει επίσης την αναπαραγωγιμότητα, την αξιοπιστία της διαδικασίας και μειώνει το κόστος κατασκευής (Bansal et al., 2014).

### **4.3.3 Blisks (Blade Discs)**

Ο σχεδιασμός των blisks, που είναι περιστρεφόμενα μέρη, δίνει προτεραιότητα σε μια αναλογία δύναμης προς πυκνότητα διαφορετική από αυτή των στατικών στοιχείων. Οι ελαφριές μπίλιες συμβάλλουν στη μείωση των φορτίων του άξονα, των φορτίων του θαλάμου έδρασης και άλλων επιπτώσεων, με αποτέλεσμα μεγαλύτερα οφέλη του συστήματος πέρα από την εφαρμογή μόνο των CMC. Η μέγιστη αντοχή εφελκυσμού σε θερμοκρασία δωματίου είναι περίπου 500 MPa. Τρισδιάστατοι υφασμάτινοι δίσκοι, χρησιμοποιώντας συνεχή Tyrannoe Si-Ti-C-O (βαθμού LOXM), συμπυκνώνονται χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό τεχνικών χημικής διήθησης ατμού (CVI) και εμποτισμού πολυμερούς και πυρόλυσης (PIP) (Bansal et al., 2014).

### **4.3.4 Ακροφύσιο εξάτμισης**

Τα ακροφύσια εξάτμισης με βάση το CMC Ox-oxide (Ox/Ox) αξιολογούνται από αρκετές εταιρείες για να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα των εξαρτημάτων σε κινητήρες υποηχητικού τζετ (σε σύγκριση με το τιτάνιο) και να αποφύγουν την αύξηση βάρους που σχετίζεται με υψηλότερα κράματα μετάλλων. Η Boeing αναπτύσσει σύνθετους ακουστικούς πυρήνες Nextel 610/αλουμινοπυριτικό και ακροφύσια εξάτμισης για εμπορικά αεροσκάφη. Η GE Aviation έχει πραγματοποιήσει σημαντικές επενδύσεις σε ενώσεις Ox/Ox και αρχικά χρησιμοποίησε υλικό Ox/Ox ως αποκλίνουσα στεγανοποίηση καυσαερίων για τον κινητήρα F414. Ένας δοκιμαστής επίγειας εξάτμισης CMC χρησιμοποιήθηκε επίσης για μελλοντικά έργα πολιτικών μεταφορών μεγάλης κλίμακας, όπως το υπερηχητικό αεροσκάφος υψηλής ταχύτητας Πολιτικών Μεταφορών (HSCT) (Bansal et al., 2014).

#### 4.3.5 Λεπίδες ακροφυσίων στροβίλου

Τα πτερύγια των ακροφυσίων του στροβίλου έχουν πολύπλοκα σχήματα. Μουστάκια SiC και σκόνη νιτριδίου του πυριτίου ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) χρησιμοποιήθηκαν στη χύτευση καλουπιών ολίσθησης/ισχίου για την έρευνα διαμόρφωσης, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 7. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη για βασικές τεχνολογίες, όπως συστήματα υλικών (θερμική σταθερότητα μη οξειδωμένων ιών καρβιδίου του πυριτίου, μήτρα και διεπαφή), μέθοδοι σχεδιασμού, διαδικασίες παραγωγής χαμηλού κόστους και τεχνικές μη καταστροφικής αξιολόγησης πριν από την ευρεία χρήση των CMC. Η GE Aviation πραγματοποίησε δοκιμές στο πρώτο στον κόσμο περιστρεφόμενο υλικό CMC μήτρας SiC για πτερύγια τουρμπίνας χαμηλής πίεσης κινητήρων F414. Έχουν ξεκινήσει πρωτοβουλίες για την αύξηση της χρήσης εξαρτημάτων κινητήρων CMC στα αεροσκάφη, εστιάζοντας σε υλικά που αντέχουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, εξοικονομούν βάρος και δεν απαιτούν αέρα ψύξης (Bansal et al., 2014).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΜΗΤΡΑΣ (POLYMER-MATRIX COMPOSITES-PMCS)

#### 5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΟΥΣ ΜΗΤΡΑΣ

Τα σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας (PMC) είναι ελαφριά σύνθετα υλικά που βρίσκουν εκτεταμένες εφαρμογές σε στρατιωτικά αεροσκάφη μάχης, μικρά και μεγάλα αεροσκάφη πολιτικής μεταφοράς και ελικόπτερα. Η ευρεία χρήση των PMC σε αυτές τις μηχανολογικές εξελίξεις αναδεικνύει τις τεράστιες δυνατότητες αυτών των σύνθετων υλικών. Ακόμη και σε έναν συντηρητικό σχεδιασμό, είναι εύκολο να επιτευχθεί μείωση βάρους 30%. Ωστόσο, πρόσφατα, η χρήση ενισχυμένων πλαστικών σε εξαρτήματα αεροσκαφών περιορίστηκε σε δευτερεύοντα εξαρτήματα ατράκτου πλαισίου κατασκευασμένα από υαλοβάμβακα/εποξύ ή υαλοβάμβακα/πολυεστέρα. Επί του παρόντος, με την ανάπτυξη προηγμένων ινών αραμιδίου και γραφίτη, η εφαρμογή προηγμένων σύνθετων ινών/εποξειδικής ρητίνης επικεντρώνεται κυρίως στην κύρια δομή της ατράκτου (Khajeh et al., 2015).

Διεξήχθη μια μελέτη για την παραγωγή δειγμάτων προϊόντων προπέλας αεροσκαφών LSU03 με χρήση ινών/εποξειδικής ρητίνης, χρησιμοποιώντας δύο μεθόδους κατασκευής: πλαστικοποίηση με το χέρι και χύτευση μεταφοράς ρητίνης με τη βοήθεια κενού (VARTM). Το σύνθετο υλικό ινών/εποξειδικού υλικού βασίζεται στην εποξειδική μήτρα για τη στήριξη και τη σύνδεση των ινών μεταξύ τους. Η μήτρα είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά οποιουδήποτε εφαρμοζόμενου φορτίου στις ίνες, τη διατήρηση της θέσης και της κατεύθυνσής τους, την παροχή αντίστασης στους περιβαλλοντικούς παράγοντες και τον προσδιορισμό της μέγιστης θερμοκρασίας στην οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύνθετο υλικό (Dwi et al., 2019).

Ωστόσο, η χρήση σύνθετων ινών/εποξειδικών υλικών είναι περιορισμένη λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας μετάπτωσης υάλου και της περιορισμένης σταθερότητας θερμικής οξείδωσης. Σε σύγκριση με τις ενισχυμένες με ίνες εποξειδικές ρητίνες, οι οποίες είναι γνωστές ως ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες πολυμερή, τα σύνθετα υλικά ινών/εποξειδών προσφέρουν τη δυνατότητα διπλασιασμού του εύρους θερμοκρασίας χρήσης, αν και οι ιδιότητές

τους μπορεί να είναι δύσκολο να διαχειριστούν. Οι πρώτες εξελίξεις στην τεχνολογία ρητίνης υψηλής θερμοκρασίας διεύρυναν τις δυνατότητες κατασκευής δομικών στοιχείων. Ωστόσο, η παρουσία κενών ή ελαττωμάτων μειώνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες και τη σταθερότητα θερμικής οξειδωσης των σύνθετων υλικών (Li et al., 2017).

Στην επιδίωξη της ανάπτυξης ρητίνης υψηλής απόδοσης ως υλικού μήτρας για την αντιμετώπιση των προκλήσεων του σχεδιασμού πολύπλοκων εξαρτημάτων σε σύγχρονα αεροσκάφη, οι ίνες άνθρακα έχουν αναδειχθεί ως προτιμώμενη επιλογή για ενίσχυση. Τα σύνθετα πολυμερή ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP) έχουν βρει εκτεταμένη χρήση σε κατασκευές αεροσκαφών λόγω της ελαφριάς φύσης, της υψηλής αντοχής, της καλής θερμικής αντίστασης και των ευνοϊκών μηχανικών, τριβολογικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους. Μερικοί ερευνητές έχουν εξερευνήσει την ανάπτυξη νανοδομημένων σύνθετων υλικών με βελτιωμένες διηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες για εφαρμογές αεροσκαφών ενσωματώνοντας διάφορους τύπους νανοσωλήνων άνθρακα (μονούς, διπλούς και πολλαπλών τοιχωμάτων) στην εποξειδική μήτρα. Επιπλέον, άλλες ίνες όπως ίνες γραφίτη, ίνες γυαλιού κ.α. έχουν εισαχθεί σε πολυμερείς μήτρες για τη δημιουργία σύνθετων υλικών κατάλληλων για εφαρμογές αεροσκαφών (Guadagno et al., 2014).

## **5.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ PMC**

Κατά το σχεδιασμό ενός PMC, λαμβάνονται υπόψη διάφορες μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένων των τύπων καλουπιών και χαλύβδινων ράβδων, οι σχετικές αναλογίες τους, η γεωμετρία των χαλύβδινων ράβδων και τα χαρακτηριστικά της διεπαφής. Ο προσεκτικός έλεγχος αυτών των μεταβλητών είναι απαραίτητος για την ανάπτυξη δομικών υλικών βελτιστοποιημένων για τις συνθήκες χρήσης για την οποία προορίζονται. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κοινές τεχνικές επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται για ενώσεις με βάση πολυμερή:

### **5.2.1 Χύτευση με έγχυση**

Η χύτευση με έγχυση είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την κατασκευή πολυμερών και πλαστικών. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει διάφορες μορφές, όπως χύτευση με τη βοήθεια νερού, χύτευση με τη βοήθεια αερίου, χύτευση με αφρό έγχυσης, χύτευση με έγχυση

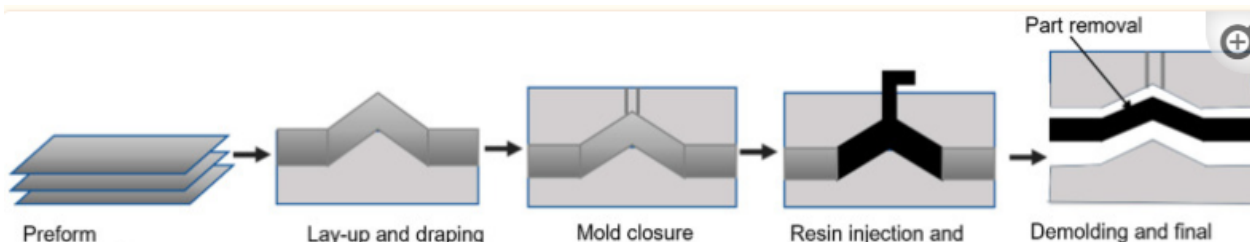
συμπύεσης, χύτευση με μικροέγχυση και χύτευση χαμηλής πίεσης. Η χύτευση με έγχυση επιτρέπει την παραγωγή σύνθετων εξαρτημάτων υψηλής ακρίβειας με ελάχιστο χρόνο κύκλου. Συνήθως, η διαδικασία περιλαμβάνει την τροφοδοσία σύνθετου υλικού από ίνες με τη μορφή σωματιδίων μέσω μιας χοάνης, η οποία στη συνέχεια μεταφέρεται από ένα θερμαινόμενο βαρέλι με μια βίδα. Μόλις το υλικό στο βαρέλι φτάσει στην επιθυμητή ποσότητα, η βίδα το εγχέει μέσω ενός ακροφυσίου στο καλούπι, ακολουθούμενο από ψύξη για να επιτευχθεί το επιθυμητό σχήμα. Το τελικό προϊόν που λαμβάνεται ταιριάζει με το σχήμα και το μέγεθος του καλουπιού (Khajeh et al., 2015).

Ωστόσο, αυτά τα προϊόντα μπορεί να έχουν ελαττώματα όπως σπρέι, σύντομες βολές, χαλάρωση, σημάδια ροής, επιπλέουσες ίνες και σημάδια συγκόλλησης. Αυτά τα ελαττώματα μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω επικάλυψης με ψεκασμό, αλλά αυτό αυξάνει το κόστος και τον χρόνο κατασκευής. Η χύτευση με έγχυση είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος για την κατασκευή σύνθετων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα (Guadagno et al., 2014).

### 5.2.2 Χύτευση μεταφοράς ρητίνης (RTM)

Η RTM είναι μια μέθοδος κατασκευής που μπορεί να παράγει μεγάλα και πολύπλοκα 3D εξαρτήματα με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, υψηλό φινίρισμα επιφάνειας και στενές ανοχές διαστάσεων. Είναι μια άκαμπτη διαδικασία κλειστού καλουπιού όπου η αλληλουχία ελασματοποίησης τοποθετείται σε μια κοιλότητα και το πάχος του εξαρτήματος προσδιορίζεται μεταξύ δύο κλειστών μισών καλουπιού. Στη συνέχεια, η ρητίνη εγχέεται υπό πίεση. Μόλις η ρητίνη φτάσει στον εξαερισμό, η πύλη σφραγίζεται και το πρόπλασμα εμποτίζεται. Μετά τη σκλήρυνση, το καλούπι ανοίγει και το τμήμα αφαιρείται. Το καλούπι μεταφοράς ρητίνης με τη βοήθεια κενού (VARTM) είναι μια προηγμένη έκδοση του RTM όπου οι προσχηματισμένες ίνες τοποθετούνται σε ένα καλούπι και ένας διάτρητος σωλήνας τοποθετείται μεταξύ της σακούλας κενού και του δοχείου ρητίνης. Η δύναμη κενού έλκει τη ρητίνη μέσω του διάτρητου σωλήνα για να συνδυαστεί με την πολυστρωματική δομή (Sozer et al., 2012).

Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες χρησιμοποιούνται συνήθως ως η προτιμώμενη μήτρα στο RTM λόγω του χαμηλού ιξώδους τους κατά την επεξεργασία. Διάφοροι τύποι θερμοσκληρυνόμενων ρητινών είναι κατάλληλοι για αεροδιαστημικές εφαρμογές στο RTM, συμπεριλαμβανομένων εποξειδικών ρητινών, φαινολικών ρητινών, κυανικών εστέρων και εποξειδικών ρητινών





βισμαλεϊμιδίου, οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά στην ανάπτυξη σύνθετων υλικών αεροδιαστημικής, ιδιαίτερα εποξειδικών ρητινών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα. Η μεγάλη ποικιλία διαθέσιμων εποξειδικών ρητινών και παραγόντων σκλήρυνσης ενισχύει την ευελιξία αυτών των συστημάτων όσον αφορά τη διαδικασία κατασκευής και τις επιτεύξιμες φυσικές ιδιότητες. Η RTM χρησιμοποιείται στην κατασκευή πρωτογενών δομών αεροσκαφών με βαρύ φορτίο, εξασφαλίζοντας παραγωγή υψηλής ποιότητας με χαμηλό κόστος (Van Velthem et al., 2015).

*Εικόνα 5: Τεχνική χύτευσης μεταφοράς ρητίνης*

*Πηγή: (Parveez et al. 2022)*

### **5.2.3 Χύτευση με συμπίεση**

Η χύτευση με συμπίεση περιλαμβάνει τη χρήση προθερμασμένων καλουπιών που τοποθετούνται σε μηχανικές ή υδραυλικές πρέσες. Ένα υπόστρωμα από προεμποτισμό τοποθετείται ανάμεσα στα δύο μισά καλουπιού, τα οποία στη συνέχεια πιέζονται μεταξύ τους για να επιτευχθεί το επιθυμητό σχήμα καλουπιού. Αυτή η μέθοδος προσφέρει υψηλή παραγωγικότητα, σύντομο χρόνο κύκλου και σταθερότητα διαστάσεων, καθιστώντας την κατάλληλη για διάφορες εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία (Eguémann et al., 2013).

### **5.2.4 Τοποθέτηση προεμποτίσματος**

Η τοποθέτηση προεμποτίσματος περιλαμβάνει τη χρήση ενός μείγματος ινών και μη ωριμασμένης ρητίνης, συνήθως με ένα θερμοπλαστικό ή θερμοσκληρυνόμενο υλικό ρητίνης που απαιτεί ενεργοποίηση θερμοκρασίας. Αυτά τα προεμποτισμένα υλικά είναι έτοιμα προς χρήση υλικά, με το εύκολα εμποτιζόμενο στρώμα να κόβεται και να τοποθετείται σε ανοιχτό καλούπι. Η Dow Automotive Systems ανέπτυξε την τεχνολογία VORAFUSE, η οποία συνδυάζει ανθρακονήματα και εποξειδική ρητίνη για εφαρμογές προεμποτισμού, βελτιώνοντας τον χρόνο κύκλου και το χειρισμό των υλικών στη χύτευση με συμπίεση σύνθετων δομών. Σε συνεργασία με διάφορες αυτοκινητοβιομηχανίες, έχουν μειώσει επιτυχώς το βάρος και έχουν κατασκευάσει

αποτελεσματικά σύνθετες δομές CFRP. Στη διαδικασία, το προφύσμα ινών τοποθετείται σε καλούπι και εφαρμόζεται ένα λεπτό στρώμα απελευθέρωσης για να διευκολυνθεί η αφαίρεση. Στη συνέχεια, το υλικό ρητίνης χυτεύεται ή εφαρμόζεται στους οπλισμούς χρησιμοποιώντας μια βούρτσα. Οι κύλινδροι χρησιμοποιούνται για την πίεση της ρητίνης στο ύφασμα, διασφαλίζοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ του συνεχούς ενισχυμένου στρώματος και του υλικού της μήτρας (Ramôa Correia, 2013).

### **5.2.5 Εξώθηση**

Η εξώθηση είναι μια συνεχής διαδικασία όπου ίνες εμποτισμένες με ρητίνη ή άλλα προμορφώματα περνούν μέσα από ένα καλούπι με συγκεκριμένη ταχύτητα, διαμορφώνοντας σταδιακά και ωριμάζοντας το σύνθετο τμήμα. Αυτή η μέθοδος είναι οικονομικά αποδοτική και κατάλληλη για ρητίνες ταχείας ωρίμανσης, επιτρέποντας την παραγωγή εξαρτημάτων με σταθερές διατομές. Είναι μια συνεχής διαδικασία που επιτρέπει την κατασκευή σύνθετων υλικών με σταθερές διατομές και σχετικά μεγάλα μήκη, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος παραγωγής και υψηλό επίπεδο αυτοματισμού (Joshi et al., 2011).

## **5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ PMC ΣΕ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ**

Υλικά από υαλοβάμβακα/εποξειδικά υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μη κρίσιμων εξαρτημάτων, όπως πάνελ καλύμματος, ανεμιστήρες, φέρινγκ αγωγών, αποστάτες και σφραγίδες. Ωστόσο, η πιο πρακτική εφαρμογή των σύνθετων υλικών πολυμερούς μήτρας (PMCs) στον σχεδιασμό εξαρτημάτων αεροσκαφών παρατηρείται με το CFRP. Το CFRP επιλέγεται για διάφορα εξαρτήματα αεροσκαφών λόγω της ελαφριάς φύσης του και της ικανότητάς του να πληροί τις απαιτούμενες συνθήκες. Για παράδειγμα, η χρήση PMC σε αεροσκάφος 4 θέσεων είχε ως αποτέλεσμα μείωση βάρους περίπου 25% σε σύγκριση με το αντίστοιχο του μεταλλικού κράματος (Arena et al., 2021).

Επιπρόσθετα, σε μια προσπάθεια περαιτέρω μείωσης του βάρους του αεροσκάφους, εξαρτήματα έχουν ενσωματωθεί για να σχηματίσουν ένα ενιαίο σύνθετο μέρος, όπως η ενσωμάτωση του συστήματος προσγείωσης με την άτρακτο στην κύρια θέση του συστήματος προσγείωσης. Αυτή

η ενοποίηση περιλαμβάνει κυρίως τη χρήση CFRP και μειώνει την εξάρτηση από το τιτάνιο. Το σύνθετο εξάρτημα παρασκευάζεται μέσω μιας διαδικασίας ωρίμανσης μίας βολής, που οδηγεί σε σημαντική μείωση του επαναλαμβανόμενου κόστους συναρμολόγησης, έως και 80% (Viscardi et al., 2019).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΙΚΗ

Οι κατασκευές αεροσκαφών έχουν υιοθετήσει προηγμένα σύνθετα υλικά για τις πλεονεκτικές τους ιδιότητες όπως το ελαφρύ, η αντοχή στην κόπωση και η αντοχή στη διάβρωση. Μια εφαρμογή αυτών των σύνθετων υλικών είναι η τοποθέτηση αισθητήρων σε σύνθετα υλικά από άνθρακα και ίνες γυαλιού, επιτρέποντας την παρακολούθηση της δομικής υγείας (SHM) των αεροσκαφών. Αυτή η παρακολούθηση βοηθά στην ανάλυση της διάδοσης των κυμάτων που προκύπτουν από διάφορες συνθήκες φόρτισης

#### 6.1. ΑΥΤΟΘΕΡΑΠΕΥΟΜΕΝΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (SELF-HEALING COMPOSITES)

Τα σύνθετα υλικά μπορεί να υποστούν φθορά λόγω κρουστικών φορτίων. Αυτή η ζημιά ξεκινά ως μικρά κενά και εξελίσσεται σε σημαντική μικρορωγμή και αποκόλληση εντός της δομής, οδηγώντας σε μειωμένη δομική ακεραιότητα και πρόωμη αστοχία. Στο παρελθόν, μέθοδοι όπως επιθέματα ρητίνης, έγχυση και τεχνικές θερμικής πλάκας χρησιμοποιήθηκαν για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων. Ωστόσο, αυτές οι μέθοδοι έχουν περιορισμούς, συμπεριλαμβανομένης της αδυναμίας ανίχνευσης αφανών ζημιών, της ανάγκης παρακολούθησης των ζημιών και της αδυναμίας εφαρμογής τους κατά τις κατασκευαστικές δραστηριότητες. Αυτοί οι παράγοντες περιορίζουν τις πιθανές χρήσεις των σύνθετων υλικών (Bekas et al., 2016).

Υλικά που μπορούν να μειώσουν τις ζημιές, να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής και να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα των κατεστραμμένων εξαρτημάτων, συστημάτων ή συσκευών μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τη χρησιμότητά τους. Ένα παράδειγμα τέτοιων υλικών είναι τα αυτοθεραπευόμενα υλικά. Η δημοτικότητα των πολυμερών και των σύνθετων υλικών τους ως αυτοθεραπευόμενων υλικών μπορεί να αποδοθεί στην αυξημένη μοριακή τους κινητικότητα, η οποία τους επιτρέπει να επιδιορθώνουν τις βλάβες (Williams et al., 2007).

Πρόσφατες μελέτες έχουν επικεντρωθεί σε υλικά αυτο-θεραπείας όπως ο εποξικός βινυλεστέρας, το τετραφουράνιο βισμαλειμίδιο (2MEP4F), το ακατέργαστο πολυμερές, τα παράγωγα κυκλοπενταδιενίου, ο κυανικός εστέρας, καθώς και τα σύνθετα υλικά όπως τα σύνθετα υλικά

ενισχυμένα με ίνες γυαλιού E (FRCs) και ο άνθρακας. Ένα υβριδικό πολυανθρακικό πολυανθρακικό σύνθετο πολλαπλών κλιμάκων με νανοϊνες πυρήνα-κελύφους αυτο-θεραπευόμενες στις διεπαφές έχει επίσης αναπτυχθεί μέσω της συν-ηλεκτροϊνοποίησης. Οι νανοϊνες του πυρήνα του κελύφους έχουν σχεδιαστεί για να αυτοθεραπεύονται οι επιφανειακές βλάβες, όπως η αποκόλληση, σε πολυστρωματικά σύνθετα υλικά (Kim, 2016; Zhu et al., 2019).

Για την αποφυγή θραύσης αποκόλλησης σε σύνθετα πλαστικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP) που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αεροδιαστημικής, μικροκάψουλες που περιέχουν θεραπευτικούς παράγοντες ενσωματώθηκαν στο υλικό. Ο θεραπευτικός παράγοντας που χρησιμοποιήθηκε ήταν μικροκάψουλες ενθυλακωμένες με δικυκλοπενταδιένιο, σε συνδυασμό με 20% κατά βάρος εποξειδική ρητίνη. Η διαστρωματική αντοχή σε θραύση των δειγμάτων αποκαταστάθηκε στο 40% και 80% των αρχικών τους τιμών σε θερμοκρασία δωματίου και 80 °C, αντίστοιχα (Wu et al., 2013).

Μια άλλη προσέγγιση περιλάμβανε τη χρήση μιας θερμοπλαστικής πολυμερούς μήτρας, θερμικά αποκρινόμενης πολυουρεθάνης και της αντίδρασης Diels-Alder (DA) για την επανειλημμένη επούλωση της αποκόλλησης σε ένα σύνθετο υλικό από ίνες άνθρακα. Η αποτελεσματικότητα επούλωσης μετρήθηκε σε 85% και 75% στον πρώτο και δεύτερο κύκλο, αντίστοιχα. Επιπλέον, το χαρακτηριστικό αυτο-ίασης μεταφέρθηκε σε ένα πολυστρωματικό υλικό ενσωματώνοντας το CFRP με κοίλες ίνες γυαλιού (HGF) είτε σε πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού (GFRP) είτε σε πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP) και εγχύοντάς το με μη ωριμασμένη ρητίνη. Μετά από ζημιά, οι γεμάτες με ρητίνη ίνες σκάνε, απελευθερώνοντας τον αποθηκευμένο θεραπευτικό παράγοντα και ξεκινώντας τη διαδικασία επούλωσης. Η βασική απόδοση του πολυστρωματικού υλικού ήταν περίπου 89%, με αυτή τη διάταξη να ταιριάζει με την άθικτη κατάσταση κατά 97% (Williams et al., 2007).

Τα αυτοθεραπευόμενα υλικά βρίσκουν εφαρμογές σε αεροδομές, όπως άτρακτοι, φτερά, κινητήρες και καταρράκτες, ως προστατευτικά επιχρίσματα ή φράγματα. Στην περίπτωση υπερηχητικών πτερυγίων που λειτουργούν σε θερμοκρασίες άνω των 1600 °C, χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά άνθρακα/άνθρακα για μύτη, ακροφύσια και προπορευόμενα άκρα. Ωστόσο, σε υψηλότερες θερμοκρασίες, μπορεί να συμβεί οξείδωση, οδηγώντας σε μείωση της απόδοσης. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, εφαρμόζεται ένα ανθεκτικό στην οξείδωση εξωτερικό στρώμα για να δημιουργηθεί ένα στρώμα γυαλιού πάνω από ένα εσωτερικό στρώμα γυαλιού (Kim, 2016).

Άλλες επικαλύψεις φραγμού, όπως το καρβίδιο του πυριτίου και το νιτρίδιο του πυριτίου, χρησιμοποιούνται επίσης για την πρόληψη της οξείδωσης. Το γυαλί μπορεί να ρέει σε κενά και να σφραγίζει την επιφάνεια έναντι της διείσδυσης οξυγόνου όταν λιώνει σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα σωματιδιακά συστατικά με βάση το πυρίτιο και το βόριο στη μήτρα άνθρακα χρησιμοποιούνται επίσης ως υλικά αυτοίασης. Αυτές οι ουσίες αντιδρούν με το οξυγόνο για να δημιουργήσουν γυαλί, το οποίο μπορεί να ρέει σε ρωγμές και να εμποδίσει το οξυγόνο να εισέλθει σε αυτές. Επιπλέον, το συμπολυμερές αιθυλενίου/μεθακρυλικού μεθυλεστερά (EMMA) έχει διερευνηθεί για τις αυτοθεραπευόμενες και ανθεκτικές στην κρούση ιδιότητές του σε επιστρώσεις για αεροδομές (Bekas et al., 2016).

Πρόσφατα, οι μικροκάψουλες που ανταποκρίνονται στην υπεριώδη ακτινοβολία αυτο-θεραπεύονται για αεροναυτικές επικαλύψεις. Αυτές οι μικροκάψουλες έχουν ένα γρήγορα αποικοδομήσιμο εσωτερικό πολυμερικό κέλυφος. Όταν συμβεί βλάβη, μερικές από τις μικροκάψουλες σκάνε λόγω εξωτερικής πίεσης, ενώ άλλες καταστρέφονται από το υπεριώδες φως. Αυτό απελευθερώνει τις κλειστές θεραπευτικές χημικές ουσίες, οι οποίες στη συνέχεια θεραπεύουν τις ρωγμές. Τα σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας προσφέρουν μια οικονομικά αποδοτική και απλή μέθοδο παραγωγής για αυτοθεραπευόμενα υλικά σε σύγκριση με τα κεραμικά και τα μέταλλα. Επιπλέον, οι έννοιες της αυτοθεραπείας στα μέταλλα και τα κεραμικά βρίσκονται ακόμα στα αρχικά στάδια ανάπτυξης, καθιστώντας τις πιο περίπλοκες και απαιτητικές στην εφαρμογή τους (Zhu et al., 2019).

## 6.2 ΑΓΩΓΙΜΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Όταν ένα αεροπλάνο φθάνει σε μεγάλα ύψη, μπορεί να συσσωρευτούν στατικά φορτία στο εξωτερικό του λόγω αλληλεπιδράσεων με αιωρούμενα σωματίδια, πάγο, χαλάζι, σκόνη, ηφαιστειακή τέφρα και τριβοηλεκτρική φόρτιση. Εάν αυτές οι χρεώσεις υπερβούν ένα συγκεκριμένο όριο, μπορεί να οδηγήσει σε δυσλειτουργίες σε εξαρτήματα και συστήματα, συμπεριλαμβανομένων εκρήξεων και διακοπής της ραδιομετάδοσης (Alemour et al., 2019).

Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, έχουν αναπτυχθεί αγωγιμα σύνθετα συστήματα χρησιμοποιώντας μη αγωγιμες πολυμερείς μήτρες συμπληρωμένες με νανογεμιστικά ή νανοςύνθετα/νανοϋλικά με βάση τον άνθρακα. Το εποξειδικό έχει θεωρηθεί ως η πιο κοινή μήτρα, με την ενίσχυση νανοσωματιδίων με βάση τον άνθρακα, όπως αιθάλη, νανοσωλήνες άνθρακα (πολλαπλών και μονοτοιχωμάτων), γραφένιο και εποξειδική επίστρωση/AgSWs. Ωστόσο, προκλήσεις όπως η ανομοιόμορφη διασπορά ή η υψηλότερη φόρτιση μπορούν να οδηγήσουν σε συσσωμάτωση και υποβάθμιση τόσο στη δομική όσο και στην ηλεκτρική απόδοση. Αυτά τα αγωγιμα σύνθετα παρέχουν επίσης λύσεις για προβλήματα που σχετίζονται με κεραυνούς και συσσώρευση πάγου στα αεροσκάφη. Οι μεταλλικοί αφροί με εποξειδική ρητίνη έχουν αναπτυχθεί για την αιχμή των πτερυγίων αεροσκαφών για να βελτιώσουν την απόδοση πτήσης, την ασφάλεια και την απόδοση καυσίμου μειώνοντας τη διαβρεξιμότητα, την πρόσφυση εντόμων, τη συσσώρευση πάγου και τη φθορά των σωματιδίων (Vertuccio et al., 2016).

## 6.3 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΓΧΥΣΗ ΡΗΤΙΝΗΣ

Τα σύνθετα υλικά με έγχυση ρητίνης έχουν αναπτυχθεί για να βελτιώσουν την ασφάλεια πτήσης, την απόδοση και την απόδοση καυσίμου των αεροσκαφών. Συγκεκριμένα, οι αφροί μετάλλου που έχουν εγχυθεί με εποξική ρητίνη σχεδιάστηκαν για το μπροστινό άκρο των φτερών του αεροσκάφους για μείωση της διαβρεξιμότητας, της πρόσφυσης των εντόμων, της συσσώρευσης πάγου και της φθοράς των σωματιδίων (Marx et al., 2020).

#### 6.4. NANOΣΥΝΘΕΤΑ

Τα νανοςύνθετα είναι προηγμένα υλικά που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά που διαθέτουν ανώτερες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με τα παραδοσιακά σύνθετα υλικά. Διάφοροι τύποι νανοςύνθετων υλικών, όπως νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs), νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων (MWCNTs) και νανοςύνθετα υλικά πολυμερούς-πηλού, έχουν αναπτυχθεί για να αντιμετωπίσουν τις υπάρχουσες προκλήσεις στην αεροδιαστημική βιομηχανία. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση νανოსωματιδίων διπυριτικού μολυβδαινίου διασκορπισμένα σε μια μήτρα αλουμινίου, η οποία έχει δείξει καλή αντοχή στη φθορά και μπορεί να αποτρέψει την υποβάθμιση των εξαρτημάτων του συστήματος αεροσκαφών με την πάροδο του χρόνου. Μια άλλη προσέγγιση περιλαμβάνει την ενσωμάτωση οξειδίου του γραφενίου (GO) σε μια μήτρα νανοσκόνης τιτανίου για την επίτευξη υψηλής σκληρότητας, η οποία είναι επιθυμητή για διάφορα δομικά στοιχεία της αεροναυπηγικής (Vertuccio et al., 2016).

Η αεροναυπηγική έχει «αγκαλιάσει» τη χρήση νανοςύνθετων υλικών σε πολλαπλά υποσυστήματα, ιδιαίτερα λόγω των αυτοθεραπευτικών ιδιοτήτων τους, υπογραμμίζοντας το πολλά υποσχόμενο μέλλον αυτών των υλικών. Για παράδειγμα, οι νανοςύνθετες επιστρώσεις στα πτερύγια των στροβίλων του κινητήρα jet ήταν αποτελεσματικές στην πρόληψη του σχηματισμού κόκκων ακόμη και σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας τις κατάλληλες για επικαλύψεις σε διάφορες εφαρμογές της (Sun et al., 2020).



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ζήτηση για κατασκευές αεροσκαφών υψηλών επιδόσεων έχει οδηγήσει σε αυξημένη εστίαση στην ανάπτυξη σύνθετων μεταλλικών υλικών (MMCs) τα τελευταία χρόνια. Για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί των παραδοσιακών υλικών, υπάρχει ανάγκη να δημιουργηθούν νέα προηγμένα υλικά που συνδυάζουν υψηλή αντοχή, βελτιωμένη ακαμψία και χαμηλή πυκνότητα. Για να εξασφαλιστεί η καταλληλότητα των MMC στην κατασκευή σκελετού αεροπλάνου και να ανταγωνιστούν τα υπάρχοντα πολυμερή σύνθετα υλικά, απαιτείται εκτεταμένη έρευνα για την αξιολόγηση της μηχανικής και δομικής τους απόδοσης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί βελτιώνοντας την αναλογία αντοχής προς βάρος ή μειώνοντας το συνολικό βάρος των εξαρτημάτων. Επιπλέον, οι ειδικές απαιτήσεις ορισμένων εξαρτημάτων, όπως η χαμηλή πυκνότητα και οι βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, μπορούν να ικανοποιηθούν μέσω της προσεκτικής επιλογής των κατάλληλων MMC.

Η ανάπτυξη ασφαλέστερων υλικών για εφαρμογές αεροσκαφών είναι υψίστης σημασίας. Μια προσέγγιση είναι η χρήση μη εύφλεκτων μεταλλικών σύνθετων υλικών, όπως τα κράματα με βάση το τιτάνιο, τα οποία προσφέρουν βελτιωμένες ιδιότητες. Η αντίσταση αυτών των κραμάτων σε υψηλή θερμοκρασία μπορεί να βελτιωθεί μέσω θερμομηχανικής επεξεργασίας και κράματος για τον έλεγχο των φάσεων. Επιπλέον, έχει υπάρξει μια αυξανόμενη υιοθέτηση των σύνθετων υλικών κεραμικής μήτρας (CMC) σε εμπορικά αεροσκάφη, με τη δυνατότητα τα κύρια εξαρτήματα των κινητήρων αεριοστροβίλων να αντικατασταθούν από CMC στο μέλλον, εκτός από ορισμένα εξαρτήματα όπως οι δίσκοι. Ωστόσο, η κύρια πρόκληση στην ευρεία χρήση των CMC είναι το υψηλό κόστος κατασκευής. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη μείωση του χρόνου κατασκευής και την αύξηση του όγκου παραγωγής.

Υπάρχει μεγάλη ανάγκη αντιμετώπισης της φθοράς, της αντοχής στην κόπωση, της ανοχής σε ζημιά και της αντοχής στη διάβρωση των υλικών του σκελετού αεροπλάνου, καθώς αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά το κόστος συντήρησης, επιθεώρησης και επισκευής. Είναι απαραίτητο να αξιολογηθούν οι ιδιότητες των μεταλλικών, κεραμικών και πολυμερών σύνθετων υλικών υπό διάφορες συνθήκες. Αυτό οδηγεί την ανάπτυξη νέων υλικών με βελτιωμένες τριβολογικές και μηχανικές ιδιότητες μέσω διαφορετικών στρατηγικών και μεθόδων, όπως η

τροποποίηση της σύνθεσης, η βελτίωση της μικροδομής, ο έλεγχος ακαθαρσιών, οι επικαλύψεις και οι βελτιωμένες τεχνικές κατασκευής.

Τα σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας (PMC) έχουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, αλλά είναι σημαντικό να βελτιστοποιηθούν οι εγγενείς ιδιότητες τους για συγκεκριμένες προβλεπόμενες χρήσεις. Με την αυξανόμενη ζήτηση για ελαφριές κατασκευές και την αποδοτική κατανάλωση καυσίμου, τα PMC αναμένεται να χρησιμοποιούνται εκτενώς σε συστήματα αεροδιαστημικής πρόωσης. Οι εξελίξεις στα PMC για εφαρμογές αεροδιαστημικής πρόωσης θα περιλαμβάνουν τη χρήση σύνθετων αρχιτεκτονικών κλωστοϋφαντουργικών ινών για την επίτευξη εξατομικευμένων ιδιοτήτων σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Η ανάπτυξη των PMC θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ικανοποίηση των απαιτήσεων υψηλής θερμοκρασίας των συστημάτων αεροδιαστημικής πρόωσης

Ωστόσο, εκτός από τη μείωση βάρους και τη βελτιωμένη δομική απόδοση, η μείωση του κόστους μέσω προηγμένων τεχνικών κατασκευής είναι επίσης κρίσιμη. Το κόστος κατασκευής που σχετίζεται με τα σύνθετα υλικά έχει σημαντικό αντίκτυπο στην υιοθέτησή τους στη βιομηχανία αεροσκαφών, καθώς η διαδικασία κατασκευής αποτελεί σημαντικό μέρος του κόστους του σκελετού αεροπλάνου. Ως εκ τούτου, καταβάλλονται σημαντικές προσπάθειες για την ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής με την εισαγωγή οικονομικών και αξιόπιστων τεχνικών. Έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας της κατασκευής μεταλλικών σύνθετων υλικών (MMCs). Μερικές από αυτές τις διαδικασίες έχουν χρησιμοποιηθεί από την αεροναυπηγική βιομηχανία τις τελευταίες δεκαετίες. Ωστόσο, προκλήσεις όπως η εκπαίδευση χειριστή, η ομοιογένεια των υλικών, η αξιοπιστία της διαδικασίας και το κόστος παραμένουν σημαντικά εμπόδια για εφαρμογές MMC μεγάλης κλίμακας.

## BIBΛIOΓΡΑΦΙΑ

- Aabid A., Parveez B., Parveen N., Khan S.A., Zayan J.M., Shabbir O. (2022). Reviews on Design and Development of Unmanned Aerial Vehicle (Drone) for Different Applications. *J. Mech. Eng. Res. Dev.* 45:53–69.
- Alemour B., Badran O., Hassan M.R. (2019). A review of using conductive composite materials in solving lightning strike and ice accumulation problems in aviation. *J. Aerosp. Technol. Manag.* ;11:1–23.
- Amaechi, C.V.; Agbomerie, C.O.; Sotayo, A.; Wang, F.; Hou, X.; Ye, J. (2019). Recycling of Renewable Composite Materials in the Offshore Industry. In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands,.
- Amaechi, C.V.; Agbomerie, C.O.; Sotayo, A.; Wang, F.; Hou, X.; Ye, J. (2019). Recycling of Renewable Composite Materials in the Offshore Industry. In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands.
- An Q., Huang L.J., Bao Y., Zhang R., Jiang S., Geng L., Xiao M. (2018). Dry sliding wear characteristics of in-situ TiBw/Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V composites with different network parameters. *Tribol. Int.* 121:252–259.
- Anbarasan A., Alvin P.A., Kannan K., Lokesh M. (2020). Mechanical characterisation of magnesium matrix composite for aerospace application. *Int. J. Res. Anal. Rev.* 7:724–729.
- Arena M., Chiariello A., Castaldo M., di Palma L. (2021). Vibration response aspects of a main landing gear composite door designed for high-speed rotorcraft. *Aerospace.* ;8:52.
- Bansal J., Lamon N.P. (2014). *Ceramic Matrix Composites: Materials, Modeling and Technology*. John Wiley & Sons; Hoboken, NJ, USA.
- Bekas D.G., Tsirka K., Baltzis D., Paipetis A.S. (2016). Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques. *Compos. Part B Eng.* ;87:92–119.

- Chaudhari R., Bauri R. (2018). A novel functionally gradient Ti/TiB/TiC hybrid composite with wear resistant surface layer. *J. Alloys Compd.* 744:438–444.
- Chawla N., Chawla K.K. (2013). *Metal Matrix Composites*. Springer; New York, NY, USA.
- Chen M., Qiu H., Jiao J., Wang Y., Xie W. (2016). High temperature oxidation behavior of silicon carbide ceramic. *Key Eng. Mater.* ;680:89–92.
- Chen, T.; Kazerooni, D.; Ju, L.; Okonski, D.A.; Baird, D.G. (2020). Development of Recyclable and High-Performance In Situ Hybrid TLCP/Glass Fiber Composites. *J. Compos. Sci.*, 4, 125.
- Cui Y., Wang L., Ren J. (2008). Multi-functional SiC/Al composites for aerospace applications. *Chin. J. Aeronaut.* ;21:578–584.
- Dhanashekar M., Kumar V.S.S. (2014). Squeeze casting of aluminium metal matrix composites—An overview. *Procedia Eng.* ;97:412–420.
- Dursun T., Soutis C. (2014). Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Mater. Des.* ;56:862–871.
- Dwi A.Z., Syamsudin H. (2019). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Volume 645. IOP Publishing; Bristol, UK.: Manufacturing Fiberglass-Epoxy LSU-03 Aircraft Propeller Using Hand Lay-up and Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM) Methods.
- Eguémann N., Giger L., Roux M., Dransfeld C., Thiébaud F., Perreux D. (2013). Compression moulding of complex parts for the aerospace with discontinuous novel and recycled thermoplastic composite materials; Proceedings of the 19th International Conference on Composite Materials; Montréal, QC, Canada. 28 July–2 August; pp. 6616–6626.
- Fahrenholtz W.G., Hilmas G.E., Talmy I.G., Zaykoski J.A. (2007). Refractory diborides of zirconium and hafnium. *J. Am. Ceram. Soc.* ;90:1347–1364.
- Gagani, A.; Krauklis, A.; Echtermeyer, A.T. (2018). Anisotropic fluid diffusion in carbon fiber reinforced composite rods: Experimental, analytical and numerical study. *Mar. Struct.*, 59, 47–59.

- Guadagno L., Raimondo M., Vittoria V., Vertuccio L., Naddeo C., Russo S., de Vivo B., Lamberti P., Spinelli G., Tucci V. (2014). Development of epoxy mixtures for application in aeronautics and aerospace. *RSC Adv.* ;4:15474–15488.
- Huang L.J., Geng L., Peng H.X. (2015). Microstructurally inhomogeneous composites: Is a homogeneous reinforcement distribution optimal? *Prog. Mater. Sci.* ;71:93–168.
- Inagaki I., Takechi T., Shirai Y., Ariyasu N. (2014). Application and features of titanium for the aerospace industry. *Nippon. Steel Sumitomo Met. Tech. Rep.* 106:22–27.
- Joshi S.C., Chen X. (2011). Time-variant simulation of multi-material thermal pultrusion. *Appl. Compos. Mater.* ;18:283–296.
- Khajeh A., Mustapha F., Sultan M.T.H., Bánhegyi G., Karácsony Z., Baranyai V. (2015). The Effect of Thermooxidative Aging on the Durability of Glass Fiber-Reinforced Epoxy. *Adv. Mater. Sci. Eng.* ;2015:372354.
- Kim I. (2016). Carbon-Carbon Composite Application Areas and Limitations *Fasil. J. Ergon.* ;6:17–19.
- Kim I.Y., Choi B.J., Kim Y.J., Lee Y.Z. (2011). Friction and wear behavior of titanium matrix (TiB + TiC) composites. *Wear.* 271:1962–1965.
- Kim S.T., Tadjiev D., Yang H.T. (2006). Fatigue life prediction under random loading conditions in 7475-T7351 aluminum alloy using the RMS model. *Int. J. Damage Mech.* ;15:89–102.
- Kiser J.D., David K.E., Davies C., Andrulonis R., Ashforth C. (2018). Updating composite materials handbook-17 volume 5—ceramic matrix composites. *Ceram. Trans.* 263:413–423.
- Koli D.K., Agnihotri G., Purohit R. (2015). Advanced Aluminium Matrix Composites: The Critical Need of Automotive and Aerospace Engineering Fields. *Mater. Today Proc.* ;2:3032–3041.
- Kumar M.S. SiC (2020). Reinforcement in the Synthesis and Characterization of A356/AL2O3/SiC/Gr Reinforced Composite—Paving a Way for the Next Generation of Aircraft Applications. *Silicon.* ;13:2737–2744.

- Kurzynowski T., Pawlak A., Smolina I. (2020). The potential of SLM technology for processing magnesium alloys in aerospace industry. *Arch. Civ. Mech. Eng.* ;20:23.
- Li Y., Wang S., Wang Q. (2017). A molecular dynamics simulation study on enhancement of mechanical and tribological properties of polymer composites by introduction of graphene. *Carbon.* ;111:538–545.
- Liu C., Huang L.J., Geng L., Jiao Y., Tang A. (2015). In Situ Synthesis of (TiC + Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> + Ti<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>)/Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V Composites with Tailored Two-scale Architecture. *Adv. Eng. Mater.* ;17:933–941.
- Marx J.C., Robbins S.J., Grady Z.A., Palmieri F.L., Wohl C.J., Rabiei A. (2020). Polymer infused composite metal foam as a potential aircraft leading edge material. *Appl. Surf. Sci.* ;505:144114.
- Metcalf A.G. (2015). Interaction and Fracture of Titanium-Boron Composites. *J. Compos. Mater.* ;1:356–365.
- Pantelakis S.G., Chamos A.N., Kermanidis A.T. (2012). A critical consideration for the use of Al-cladding for protecting aircraft aluminum alloy 2024 against corrosion. *Theor. Appl. Fract. Mech.* ;57:36–42.
- Parveez B, Kittur MI, Badruddin IA, Kamangar S, Hussien M, Umarfarooq MA. (2022). Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review. *Polymers (Basel)*. 18;14(22):5007.
- Rahman J.F., Yunus M., Yezdani T.M.T. (2012). Charting of a Strategy for the Application of Aluminium Metal Matrix Composites for Different Engineering Service Requirements. *Int. J. Mod. Eng. Res.* ;2:1408–1413.
- Ramôa Correia J. (2013). *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*. Woodhead Publishing; Sawston, UK:. Pultrusion of advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites; pp. 207–251.
- Rashad M., Pan F., Guo W., Lin H., Asif M., Irfan M. (2015). Effect of alumina and silicon carbide hybrid reinforcements on tensile, compressive and microhardness behavior of Mg-3Al-1Zn alloy. *Mater. Charact.* ;106:382–389.

Rocha, I.B.C.M.; Parente, E., Jr.; Melo, A.M.C. (2014). A hybrid shared/distributed memory parallel genetic algorithm for optimization of laminate composites. *Compos. Struct.*, 107, 288–297.

Sozer E.M., Simacek P., Advani S.G. (2012). *Resin Transfer Molding (RTM) in Polymer Matrix Composites*. Woodhead Publishing Limited; Sawston, UK.

Starke E.A., Staley J.T. (2010). Application of modern aluminium alloys to aircraft, *Fundam. Alum. Metall. Prod. Process. Appl.* ;32:747–783.

Sun Y., Choi H., Konishi H., Pikhovich V., Hathaway R., Chen L., Li X. (2012). Effect of core-shelled nanoparticles of carbon-coated nickel on magnesium. *Mater. Sci. Eng. A*. 546:284–290.

Sun Y., Mei J., Hu H., Ying J., Zhou W., Zhao X., Peng S. (2020). In-situ Polymerization of exfoliated structure PA6/organo-clay nanocomposites. *Rev. Adv. Mater. Sci.* ;59:434–440.

The International Air Transport Association (IATA). Helping Aircraft Decommissioning. 2020. Available online: <https://www.iata.org/en/programs/environment/aircraft-decommissioning/> (accessed on 11 August 2023).

Udayakumar A., Ganesh A.S., Raja S., Balasubramanian M. (2011). Effect of intermediate heat treatment on mechanical properties of SiCf/SiC composites with BN interphase prepared by ICVI. *J. Eur. Ceram. Soc.* ;31:1145–1153.

Van Velthem P., Ballout W., Daoust D., Sclavons M., Cordenier F., Henry E., Dumont D., Destoop V., Pardoën T., Bailly C. (2015). Influence of thermoplastic diffusion on morphology gradient and on delamination toughness of RTM-manufactured composites. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* ;72:175–183.

Vertuccio L., Guadagno L., Spinelli G., Lamberti P., Tucci V., Russo S. (2016). Piezoresistive properties of resin reinforced with carbon nanotubes for health-monitoring of aircraft primary structures. *Compos. Part B Eng.* ;107:192–202.

- Viscardi M., Arena M., Cerreta P., Iaccarino P., Imparato S.I. (2019). Manufacturing and Validation of a Novel Composite Component for Aircraft Main Landing Gear Bay. *J. Mater. Eng. Perform.* ;28:3292–3300.
- Viswanathan R., Sivashankar N., Chandrakumar S., Karthik R. (2019). Improving corrosion resistance of magnesium alloy for aerospace applications. *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.* ;9:769–774.
- Williams G., Trask R., Bond I. (2007). A self-healing carbon fibre reinforced polymer for aerospace applications. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* ;38:1525–1532.
- Wu X.F., Rahman A., Zhou Z., Pelot D.D., Sinha-Ray S., Chen B., Payne S., Yarin A.L. (2013). Electrospinning core-shell nanofibers for interfacial toughening and self-healing of carbon-fiber/epoxy composites. *J. Appl. Polym. Sci.* ;129:1383–1393.
- Yang, Y.; Boom, R.; Irion, B.; van Heerden, D.J.; Kuiper, P.; de Wit, H. (2012). Recycling of composite materials. *Chem. Eng. Process. Process. Intensif.*, 51, 53–68.
- Yan-Qing Y., Xian L., Bin H., Jian-kang L., Yan C. (2010). Fracture toughness of SiCf/Ti-6Al-4V composites. *Trans. Mater. Heat Treat.* ;31:1–4.
- Yoshida K. (2010). Development of silicon carbide fiber-reinforced silicon carbide matrix composites with high performance based on interfacial and microstructure control. *J. Ceram. Soc. Jpn.* ;118:82–90.
- Zhu Y., Cao K., Chen M., Wu L. (2019). Synthesis of UV-Responsive Self-Healing Microcapsules and Their Potential Application in Aerospace Coatings. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* ;11:33314–33322.