

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΕΚΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βιβλιογραφική ανασκόπηση ιδιοτήτων σύνθετων και πολυμερών υλικών σε κρυογενικές θερμοκρασίες

ΓΙΑΚΟΥΜΑΚΗΣ ΜΗΝΑΣ

1071003

Γεώργιος Λαμπέας, Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ, Φεβρουάριος 2025

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

Γιακουμάκης Μηνάς ©2025

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα. Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Βιβλιογραφική ανασκόπηση ιδιοτήτων σύνθετων και πολυμερών υλικών σε κρυογενικές θερμοκρασίες

Γιακουμάκης Μηνάς

Η ανάγκη για νέες τεχνολογίες που σκοπό έχουν να επιλύσουν προβλήματα που αντιμετωπίζει η κοινωνία, αλλά και να βελτιώσουν τις ήδη υπάρχουσες, φέρνει στο προσκήνιο τις κρυογενικές εφαρμογές. Εφαρμογές δηλαδή που λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από τους -100 °C και μπορεί να προσεγγίζουν ακόμα και το απόλυτο μηδέν (-273°C). Πιο συγκεκριμένα το υγρό υδρογόνο μοιάζει να αποτελεί το καύσιμο νέας γενιάς, αφού δεν παράγει επιβλαβή αέρια κατά την καύση του και διαθέτει υψηλή αναλογία ενέργειας προς βάρος συγκριτικά με τα άλλα καύσιμα. Έπειτα η μεταφορά και αποθήκευση υγροποιημένων αερίων δίνει λύση στις ενεργειακές ανάγκες της κοινωνίας ελαχιστοποιώντας το κόστος. Ακόμα η κρυοχειρουργική που συναντάται στον τομέα της ιατρικής εμφανίζει ευεργετικά αποτελέσματα στην καταπολέμηση των καρκινικών κυττάρων. Η πρόκληση σε όλες τις παραπάνω εφαρμογές είναι η επίτευξη και η διατήρηση των εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών που απαιτούνται. Έτσι απαραίτητη είναι η επιλογή κατάλληλων υλικών, που θα ανταποκρίνονται στις εκάστοτε απαιτήσεις.

Η εργασία αυτή στοχεύει στη μελέτη των ιδιοτήτων τέτοιων υλικών, όπως σύνθετα και πολυμερή υλικά, αλλά και στις πειραματικές δοκιμές με τις οποίες εξετάζονται τα υλικά αυτά. Μιας και τα σύνθετα υλικά φαίνεται να παρουσιάζουν καλύτερες ιδιότητες για τέτοιου είδους εφαρμογές, πραγματοποιείται εκτενέστερη έρευνα τόσο στη μεταβολή των ιδιοτήτων τους, όσο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών και στους τρόπους που μελετάται στις κρυογενικές θερμοκρασίες. Μια πιο συνοπτική ανάλυση γίνεται πάνω στα πολυμερή υλικά, με σημείο αναφοράς το πολυμερές PEEK, το οποίο παρουσιάζει πολύ καλές ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Από τη βιβλιογραφική μελέτη που πραγματοποιήθηκε προκύπτει ότι και οι δυο κατηγορίες υλικών εμφανίζουν αρκετές βελτιωμένες ιδιότητες στις κρυογενικές θερμοκρασίες. Η αντοχή σε εφελκυσμό και σε θλίψη, καθώς και το μέτρο ελαστικότητας αυξάνονται με την μείωση της θερμοκρασίας, ενώ η θερμική αγωγιμότητα και ο συντελεστής θερμικής διαστολής μειώνονται. Οι μεταβολές αυτές ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις και τα καθιστούν κατάλληλα για κρυογενικές εφαρμογές. Λέξεις κλειδιά

Κρυογενικές εφαρμογές, Υγρό υδρογόνο, Σύνθετα υλικά, Πολυμερή, Πειραματικές δοκιμές

ABSTRACT

Literature review of properties of composites and polymer materials at

cryogenic temperatures

Giakoumakis Minas

The need for new technologies to solve problems facing society, but also to improve existing ones, brings cryogenic applications to the foreground. That is, applications that take place at temperatures below -100°C and can even approach absolute zero (-273°C). In particular, liquid hydrogen seems to be the next generation fuel, as it does not produce harmful gases during combustion and has a high energy-to-weight ratio compared to other fuels. Then, the transport and storage of liquefied gases provides a solution to society's energy needs by minimizing costs. Even cryosurgery found in the field of medicine shows beneficial effects in the fight against cancer cells. The challenge in all the above applications is to achieve and maintain the extremely low temperatures required. It is therefore essential to select suitable materials to meet the requirements in each case.

This work aims to study the properties of such materials, such as composites and polymers, and the experimental tests by which these materials are tested. Since composite materials seem to exhibit better properties for such applications, more extensive research is carried out on both the variation of their properties and the ways in which they are studied at cryogenic temperatures. A more concise analysis is carried out on polymeric materials, with reference to the polymer PEEK, which shows very good properties at low temperatures.

The literature study carried out shows that both classes of materials exhibit several improved properties at cryogenic temperatures. Tensile and compressive strength, modulus of elasticity increases with decreasing temperature, while thermal conductivity and coefficient of thermal expansion decrease. These changes meet the requirements and make them suitable for cryogenic applications.

Key Words

Cryogenic applications, Liquid hydrogen, Composite materials, Polymer materials, Experimental tests

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης ενός GFRP σε θερμοκρασίες RT , -196 °C και -253
°C [2]
Εικόνα 2: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για θλίψη ενός GFRP σε θερμοκρασίες -60°C, -20°C,
RT [5] 11
Εικόνα 3: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για διάτμηση του υλικού T800H/3633 CFRP σε
θερμοκρασίες RT , -196 °C , -269 °C [6] 12
Εικόνα 4: Ρυθμός ανάπτυξης αποκόλλησης λόγω κυκλικής κόπωσης σε υφασμένα πολύστρωτα
GFRP σε θερμοκρασίες RT, -196 °C και -269 °C [9]14
Εικόνα 5: Πυκνότητα ρωγμών συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για δύο ρυθμούς ψύξης σε
θερμικό κύκλο από -196°C σε 23°C για το σύνθετο υλικό CFRP 5250-4 RTM/IM7 [11]15
Εικόνα 6: Πυκνότητα ρωγμών συναρτήσει του διαμήκους CTE των ινών για σύνθετα υλικά CFRP
[12]
Εικόνα 7: Αντοχή σε κάμψη σύνθετων υλικών CFRP που υποβλήθηκαν σε διαφορετικούς
θερμικούς κύκλους [14]
Εικόνα 8: Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση σύνθετων υλικών CFRP που υποβλήθηκαν σε
διαφορετικούς θερμικούς κύκλους [14]17
Εικόνα 9: Απορροφούμενη ενέργεια συναρτήσει της ενέργειας κρούσης για σύνθετο υλικό CFRP
σταυρωτής στρώσης [16]
Εικόνα 10: Ρυθμός διείσδυσης συναρτήσει της παραμόρφωσης για τρεις διαφορετικές
θερμοκρασίας ενός σύνθετου υλικού CFRP [20]

Εικόνα 11: Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης για δοκιμές εφελκυσμού σε κρυογενικό
περιβάλλον [26]
Εικόνα 12: Πειραματική διάταξη για εφελκυσμό σε κρυογενική θερμοκρασία και οι λαβές
εφελκυσμού 3 σιαγόνων [23]
Εικόνα 13: : Συνδεσμολογία του συστήματος ακουστικής παρακολούθησης για τα πειράματα
εφελκυσμού: (a) στη θερμοκρασία δωματίου, (b) στους -196 °C [27]
Εικόνα 14: Πειραματική διάταξη για πειράματα σε χαμηλές θερμοκρασίες [5]
Εικόνα 15: Δοκιμή θλίψης του σύνθετου υποστυλώματος σε χαμηλές θερμοκρασίες [28] 29
Εικόνα 16: Δοκιμή θλίψης του σύνθετου πάνελ σάντουιτς σε χαμηλές θερμοκρασίες [28] 29
Εικόνα 17: Πειραματική διάταξη. a) Σχηματική απεικόνιση του θαλάμου χαμηλής θερμοκρασίας,
b) Μηχανή θλίψης MTS συνδεδεμένη με τον θάλαμο [29]
Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση του θαλάμου κρυογενικών δοκιμών [31]
Εικόνα 19: Μηχάνημα κρούσης Charpy [32]
Εικόνα 20: Δοκιμή κρούσης με πτώση βάρους σε θερμοκρασία υγρού οξυγόνου -183°C [33] 34
Εικόνα 21: Σκίτσο της πειραματικής διάταξης για πειράματα κρούσης σε κρυογενικές
θερμοκρασίες [16]
Εικόνα 22: Πειραματική διάταξη για κρούση υψηλών ταχυτήτων σε κρυογενικές θερμοκρασίες
[34]
Εικόνα 23: Κρυογενικός θάλαμος [34]
Εικόνα 24: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης [34]
Εικόνα 25: Δοκίμιο DCB με τα μπλοκ φόρτισης [9]
Εικόνα 26: Μπλοκ φόρτισης μηχανικά συνδεδεμένα με το δοκίμιο [37] 40
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών xi

Εικόνα 27: Δοκίμιο κάμψης με εγκοπή 4 σημείων [38]
Εικόνα 28: Διαμόρφωση για πειράματα κάμψης 4 σημείων [38]
Εικόνα 29: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης για πειράματα φόρτισης τύπου ΙΙ σε
θερμοκρασία υγρού αζώτου [39]
Εικόνα 30: Εφελκυστική αντοχή του PTFE συναρτήσει της θερμοκρασίας [40]45
Εικόνα 31: Μέτρο θλίψης συναρτήσει της θερμοκρασίας του PTFE [40]
Εικόνα 32: Μεταβολή του συντελεστή θερμικής διαστολής CTE συναρτήσει της θερμοκρασίας
για 5 διαφορετικές εποξικές ρητίνες [41]
Εικόνα 33: Καμπύλες Τάσης – Παραμόρφωσης για πειράματα θλίψης σε διάφορες θερμοκρασίες
για το υλικό PEEK [42]
Εικόνα 34: Καμπύλες Τάσης – Παραμόρφωσης για πειράματα εφελκυσμού σε διάφορες
θερμοκρασίες για το υλικό ΡΕΕΚ [42]
Εικόνα 35: Μεταβολή του Μέτρου Ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας για το υλικό
PEEK [42]

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΙ	PIAH	[Ψ H					
ABSTRACTVIII							
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝΧ							
ΠΕΙ	IIEPIEXOMENAXIV						
1.	ΕΙΣ	ЕАГΩГН1					
	1.1		ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ				
	1.2		ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ				
2.0		BIBA	ΔΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ5				
	2.1		ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ				
	2.2		ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΕΣ				
	ΘΕ	ΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ					
		2.2.1	ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ8				
		2.2.2	ΘЛІΨН10				
		2.2.3	ΔΙΑΤΜΙΣΗ11				
		2.2.4	ΚΟΠΩΣΗ				
		2.2.5	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ18				
		2.2.6	ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ19				
		2.2.7	АІАПЕРАТОТНТА 20				
	2.3	2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ					
		2.3.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ22				
Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών xiv							

		2.3.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ			
		2.3.3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΡΟΥΣΗΣ			
		2.3.4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΥΠΟΥ Ι			
		2.3.5	ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΥΠΟΥ ΙΙ	40		
	2.4	I	ПОЛҮМЕРН			
	2.5	Ν	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΚΡΥ	ογονικές		
	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ					
3.0		ΣΥΜ	ΠΕΡΑΣΜΑΤΑ			
4.0		ΒΙΒΛ	ЛОГРАФІА	54		

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όσο η τεχνολογία εξελίσσεται και η επιστήμη προοδεύει, η ανάγκη για εφαρμογές σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (κρυογενικές) γίνεται επιτακτική. Αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι ο όρος 'κρυογενικές εφαρμογές' χρησιμοποιείται για εφαρμογές που λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασίες από -100 °C έως και το απόλυτο μηδέν (-273 °C) και μπορεί να αφορά όλους τους επιστημονικούς τομείς. Τα οφέλη που παρέχουν οι εφαρμογές αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω.

Λόγω της συνεχούς αύξησης των ενεργειακών αναγκών της κοινωνίας και των σημαντικών δυσκολιών της αποθήκευσης αλλά και της μεταφοράς του φυσικού αερίου σε αέρια μορφή, δημιουργήθηκε η ανάγκη της υγροποίησής του. Το υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG) βρίσκεται σε θερμοκρασία -162 °C και έχει όγκο περίπου 600 φορές μικρότερο από αυτόν της αέριας φάσης. Είναι φανερό λοιπόν πως η ανάπτυξη των δεξαμενών αποθήκευσης LNG διευκολύνει την διαδικασία μεταφοράς του φυσικού αερίου και ελαχιστοποιεί το κόστος της. Βέβαια παρόμοιου τύπου δεξαμενές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για όλα τα υγροποιημένα αέρια παρέχοντας τα ίδια πλεονεκτήματα. Ενδεικτικά τέτοια αέρια είναι: το άζωτο, το ήλιο, το υδρογόνο, η αμμωνία κ.α.

Φυσικά οι κρυογενικές εφαρμογές αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του διαστήματος και της εξερεύνησής του. Η προώθηση πυραύλων με κρυογενικά καύσιμα, όπως το υγρό υδρογόνο και το υγρό οξυγόνο έχει γίνει ζωτικής σημασίας για τα διαστημικά ταξίδια, αλλά αυτό το κομμάτι θα αναλυθεί παρακάτω. Πέραν όμως της πρόωσης, κρυογενικές διατάξεις όπως οι αισθητήρες και τα ψυχρά ηλεκτρονικά, δίνουν λύση σε σημαντικά προβλήματα που αντιμετώπιζε η διαστημική Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών κοινότητα. Για παράδειγμα οι κρυο-ψύκτες (cryocoolers) είναι εναλλάκτες θερμότητας που λειτουργούν σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και αποτελούν μια σημαντική αναβάθμιση των δορυφόρων, που σκοπό έχουν να ψύχουν τους ανιχνευτές υπέρυθρων ακτινοβολιών και μικροκυμάτων για να μπορεί να γίνει λήψη ευκρινέστερων εικόνων.

Ένας άλλος τομέας που χρησιμοποιεί κρυογενικές εφαρμογές είναι αυτός της ιατρικής. Η κρυοχειρουργική είναι μια θεραπεία που χρησιμοποιεί το ψύχος που παρέχεται από υγρό άζωτο ή αργό για την καταστροφή των καρκινικών κυττάρων. Έχει τοπική εφαρμογή και χρησιμοποιείται για τη θεραπεία όγκων στο δέρμα, καθώς και ορισμένων όγκων στο εσωτερικό του σώματος. Ακόμα η κρύο-συντήρηση είναι η διαδικασία με την οποία βιολογικό υλικό αποθηκεύεται σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. -196 °C), διατηρώντας όλα τα χαρακτηριστικά ανέπαφα. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να διατηρηθούν βιολογικά δείγματα για απεριόριστο χρονικό διάστημα και να χρησιμοποιηθούν αργότερα για μεταμοσχεύσεις.

Στο κομμάτι της έρευνας έχει βοηθήσει σημαντικά η δυνατότητα ψύξης υλικών σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, με σκοπό την εκμετάλλευση της υπερ-αγωγιμότητάς τους. Έτσι κατασκευάζονται υπερ-αγώγιμοι ηλεκτρομαγνήτες και χρησιμοποιούνται ως επιταχυντές σωματιδίων σε μεγάλες ερευνητικές εγκαταστάσεις που απαιτούν πολύ ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Πέραν της έρευνας, οι υπεραγωγοί χρησιμοποιούνται συχνά στην μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας όταν αυτή γίνεται με υπόγεια καλώδια. Λόγω της θέρμανσης των καλωδίων, η αντίστασή τους αυξάνεται με αποτέλεσμα τη σπατάλη ενέργειας. Επομένως ειδικά καλώδια που αποτελούνται από υπεραγωγούς ψύχονται με κρυογενικά υγρά όπως το άζωτο και το ήλιο, αυξάνοντας σημαντικά την απόδοση ισχύος τους.

Μια από τις σημαντικότερες κρυογενικές εφαρμογές αφορά τη χρήση υγρού υδρογόνου (LH2) ως καύσιμο στην αεροπορική αλλά και διαστημική βιομηχανία. Λόγω της έντονης κλιματικής αλλαγής που υφίσταται ο πλανήτης τα τελευταία χρόνια, η μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων, που οδηγούν στην υπερθέρμανση του, κρίνεται απαραίτητη. Έτσι έχει προταθεί από την επιστημονική κοινότητα η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων (κηροζίνη) με το υδρογόνο, το οποίο εμφανίζει μηδενική εκπομπή βλαβερών αερίων (COx και NOx) και ταυτόχρονα διαθέτει υψηλή αναλογία ενέργειας προς βάρος συγκριτικά με άλλα καύσιμα. Ωστόσο, προτιμάται η αποθήκευσή του σε υγρή μορφή, αφού ο όγκος που καταλαμβάνει είναι 5.6 φορές μικρότερος από αυτόν της αέριας. Το πρόβλημα όμως που προκύπτει σε αυτήν την περίπτωση είναι η εξαιρετικά χαμηλή θερμοκρασία που απαιτείται για να διασφαλιστεί η υγρή φάση του υδρογόνου, θερμοκρασία μικρότερη από -253 °C.

Για την υλοποίηση όλων αυτών των εφαρμογών είναι απαραίτητη η επιλογή των κατάλληλων υλικών, τα οποία θα πληρούν στόχους αξιοπιστίας και ασφάλειας, ενώ παράλληλα θα μπορούν να ανταποκριθούν στις εκάστοτε απαιτήσεις. Επομένως η διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών αλλά και του τρόπου μεταβολής τους σε ακραίες συνθήκες, όπως οι κρυογενικές θερμοκρασίες, θα δώσει λύση σε πολλά προβλήματα και θα οδηγήσει σε νέες τεχνολογίες και εφαρμογές. Μιας και τα μέταλλα δεν έχουν καλύψει πλήρως τις απαιτήσεις αυτές, η προσοχή της επιστημονικής κοινότητας έχει στραφεί σε άλλα υλικά, κυρίως σύνθετα αλλά και πολυμερή.

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθούν οι ιδιότητες των σύνθετων και των πολυμερών υλικών σε κρυογενικές θερμοκρασίες, καθώς επίσης να παρουσιαστούν οι υπάρχουσες πειραματικές διατάξεις και πειραματικές διαδικασίες που αφορούν τις δοκιμές σε αυτές τις θερμοκρασίες.

1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται στα παρακάτω τρία κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται αναφορά στην σπουδαιότητα των κρυογενικών εφαρμογών και στο πως αυτές εισέρχονται στην καθημερινότητα της κοινωνίας. Ακόμα περιγράφεται η ανάγκη για διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών στις κρυογενικές θερμοκρασίες και τέλος παρουσιάζεται ο σκοπός της παρούσας εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά τα σύνθετα και τα πολυμερή υλικά και την μεταβολή των ιδιοτήτων τους σε κρυογενικές θερμοκρασίες, καθώς επίσης και τις υπάρχουσες πειραματικές διατάξεις και πειραματικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές σε εκείνες τις θερμοκρασίες.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας σπουδαστικής εργασίας.

2.0 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται η βιβλιογραφική ανασκόπηση. Η πρώτη υπόενότητα αφορά τα σύνθετα υλικά και το πως μεταβάλλονται οι μηχανικές και θερμικές τους ιδιότητες σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Η έλλειψη βιβλιογραφίας και πληροφορίας για την συμπεριφορά τους σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά και η σπουδαιότητά τους για μελλοντική χρήση, αποτέλεσαν κίνητρο για μια όσο το δυνατόν επαρκέστερη ανασκόπηση, η οποία παρουσιάζεται στη συνέχεια. Έπειτα παρουσιάζονται οι ήδη υπάρχουσες πειραματικές διατάξεις και πειραματικές δοκιμές που εκτελούνται σε όλο τον κόσμο για τη διερεύνηση των ιδιοτήτων τους. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ολοκληρώνεται με μια σύντομη αναφορά στα πολυμερή υλικά, μιας και η χρήση τους στις κρυογενικές εφαρμογές είναι πιο περιορισμένη.

2.1 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Η απαίτηση για σύγχρονες βελτιωμένες κατασκευές, έχει συμβάλει στην ανάπτυξη νέων υλικών με βελτιωμένες ιδιότητες και χαρακτηριστικά. Αυτά τα υλικά είναι τα σύνθετα, τα οποία παράγονται όταν δύο ή περισσότερα υλικά χρησιμοποιούνται μαζί για να δώσουν ένα συνδυασμό ιδιοτήτων που δεν μπορεί να επιτευχθεί με άλλο τρόπο. Όπως είναι λογικό, στις εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας όπως εκείνες που συναντώνται στην αεροναυπηγική βιομηχανία, στην

εμβιομηχανική, στις μεταφορές και φυσικά στις κρυογενικές εφαρμογές, τέτοια υλικά είναι απαραίτητα.

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από μια συνεχή φάση που ονομάζεται μήτρα, και από μια ασυνεχή φάση που ονομάζεται ενίσχυση. Η κατηγοριοποίηση βάσει του τύπου της μήτρας είναι η εξής:

- Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal matrix composites)
- Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (Ceramic matrix composites)
- Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (Polymer matrix composites)

Ενώ η κατηγοριοποίηση βάσει του τύπου της ενίσχυσης είναι:

- Σύνθετα υλικά με ενίσχυση διασποράς (Particular composites), στα οποία η μήτρα ενισχύεται με διασπορά σωματιδίων
- Ινώδη σύνθετα υλικά (Fibrous composites), στα οποία η μήτρα ενισχύεται με συνεχείς ή ασυνεχείς ίνες
- Πολύστρωτα σύνθετα υλικά (Laminated composites), τα οποία αποτελούνται από στρώσεις

Επισημαίνεται ότι συχνός είναι και ο συνδυασμός των παραπάνω κατηγοριών με σκοπό την απόκτηση των εκάστοτε επιθυμητών ιδιοτήτων.

Το πλήθος των σύνθετων υλικών είναι τεράστιο, αλλά στον τομέα των κρυογενικών εφαρμογών χρησιμοποιείται ένα μέρος αυτών. Αυτά είναι τα ινώδη σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (fiber- reinforced plastics) που θεωρούνται τεχνολογικώς από τα σπουδαιότερα σύνθετα υλικά και λειτουργούν πολύ καλά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα ινώδη πλαστικά αποτελούνται Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

από μήτρα πολυμερούς ρητίνης και συνεχείς ή ασυνεχείς ίνες από γυαλί, άνθρακα, αραμίδιο κ.α. Στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν δύο κυρίως υλικά: τα πολυμερή σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών γυαλιού (GFRP) και τα πολυμερή σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες άνθρακα (CFRP). Οι λόγοι είναι οι εξής: αυτά τα υλικά παρουσιάζουν πολύ καλές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, όπως το υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας και η υψηλή ειδική αντοχή, τόσο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος όσο και σε κρυογενικές θερμοκρασίες, ενώ επίσης έχουν αναπτυχθεί διαδικασίες παραγωγής οι οποίες είναι σχετικά φθηνές και αποτελεσματικές καθιστώντας τα οικονομικά και άμεσα διαθέσιμα. Τέλος, θα εξεταστούν δύο κατηγορίες των παραπάνω υλικών ως προς την δομή τους: τα πολύστρωτα πολυμερή ενισχυμένα με ευθυγραμμισμένες ίνες (unidirectional laminates) και τα πολυμερή με περιέλιξη ινών (woven fabric composites). Τα woven fabric composites μπορεί να αναφέρονται και ως πλεκτά σύνθετα υλικά.

Αρχικά να αναφερθεί, ότι ο κύριος ρόλος της μήτρας είναι να συνδέει τις ίνες, να μεταφέρει και να διανέμει εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία στις ίνες. Ο δεύτερος ρόλος της είναι να προστατεύει τις ίνες από επιφανειακή βλάβη ως αποτέλεσμα μηχανικής εκτριβής ή χημικών αντιδράσεων με το περιβάλλον. Από την άλλη πλευρά οι ίνες είναι αυτές που παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος των εξωτερικών φορτίων και προσδίδουν στο υλικό μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία [1]. Τέλος, οι ιδιότητες της διεπιφάνειας μεταξύ μήτρας-ίνας είναι πολύ σημαντικές για την απόδοση του υλικού και θα αναλυθούν στη συνέχεια.

2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

2.2.1 ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

Το μέτρο ελαστικότητας (Ε) και η εφελκυστική αντοχή της μήτρας τείνουν να αυξάνονται με την μείωση της θερμοκρασίας. Ο λόγος είναι η μείωση της κινητικότητας των πολυμερικών αλυσίδων, η οποία αυξάνει τις δυνάμεις σύνδεσης μεταξύ των μορίων και επομένως την αντοχή του υλικού. Επίσης, σύμφωνα με την αρχή της υπέρθεσης χρόνου-θερμοκρασίας, όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται για τη χαλάρωση των τάσεων. Έτσι σε κρυογενικές θερμοκρασίες η χαλάρωση μπορεί να σταματήσει εντελώς, με αποτέλεσμα την αύξηση της δυσκαμψίας του υλικού [2], [3] [4].

Σε αντίθεση με τα πολυμερή, η μοριακή δομή των ινών δεν είναι ομοιογενής, και λόγω της θερμικής επεξεργασίας σε υψηλή θερμοκρασία που εφαρμόζεται κατά την κατασκευή τους, το επίπεδο της κρυσταλλικότητας και του μοριακού προσανατολισμού τους είναι ήδη σχεδόν βέλτιστο. Συνεπώς, περαιτέρω βελτίωση δεν μπορεί πρακτικά να επιτευχθεί με την έκθεσή τους σε κρυογενικές θερμοκρασίες και το μέτρο ελαστικότητάς τους αυξάνεται ελάχιστα. Λόγω της ρηγμάτωσης της επιφάνειας των ινών άνθρακα (CF) σε κρυογενική θερμοκρασία, η αντοχή της ίνας μειώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας. Οι ίνες Kevlar (ή αραμιδίου, AF), ωστόσο διαθέτουν διαφορετική μοριακή δομή και έτσι μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της αντοχής τους με κρυογενική επεξεργασία. Ωστόσο, η μειωμένη αντοχή των ινών άνθρακα επισκιάζεται από την επίδραση της διεπιφάνειας μεταξύ ινών και ρητίνης, που εμφανίζει αυξημένη αντοχή σε

κρυογενικές θερμοκρασίες. Με την μείωση της θερμοκρασίας σε τόσο χαμηλά επίπεδα, η πολυμερική μήτρα συστέλλεται, επομένως αυξάνεται η τάση σύσφιξης των ινών και ως επακόλουθο ισχυροποιείται ο διεπιφανειακός δεσμός ινών – μήτρας. Όσο πιο ισχυρή είναι η διεπιφανειακή σύνδεση τόσο πιο αποτελεσματικά μεταφέρονται οι τάσεις από την μήτρα στις ίνες και άρα τόσο περισσότερο αυξάνεται η αντοχή του υλικού [4]. Επομένως το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή εφελκυσμού του υλικού αυτή τη φορά, αυξάνονται με την μείωση της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1. Επίσης, η εγκάρσια αντοχή και η δυσκαμψία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη σχέση της ρητίνης με την διεπιφάνεια ινών - ρητίνης, οδηγώντας σε βελτίωση των ιδιοτήτων αυτών σε κρυογενικές θερμοκρασίες.

Καθώς η ρητίνη χάνει την ολκιμότητά της και αυξάνει η δυσκαμψία της στις κρυογενικές θερμοκρασίες, η επιμήκυνση θραύσης της μειώνεται. Το ίδιο συμβαίνει και με τις ίνες άνθρακα (CF), ενώ όσον αφορά τις ίνες γυαλιού (GF), η επιμήκυνση θραύσης τους αυξάνεται.



Εικόνα 1: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης ενός GFRP σε θερμοκρασίες RT , -196 °C και -253 °C [2]

2.2.2 ΘΛΙΨΗ

Οι ιδιότητες που αφορούν την θλίψη στις κρυογενικές θερμοκρασίες είναι παρόμοιες με αυτές του εφελκυσμού. Το μέτρο θλίψης και η αντοχή σε θλίψη της μήτρας αυξάνονται, ενώ η παραμόρφωση αστοχίας μειώνεται (Εικόνα 2). Καθώς η μήτρα είναι υπεύθυνη για τη στήριξη των ινών όταν υποβάλλονται σε θλιπτική φόρτιση, η αυξημένη δυσκαμψία της και η αυξημένη διεπιφανειακή αντοχή ινών-ρητίνης παρέχουν αυξημένη αντοχή και δυσκαμψία σε διαμήκη θλίψη για τα σύνθετα υλικά. [5]



Εικόνα 2: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για θλίψη ενός GFRP σε θερμοκρασίες -60°C, -20°C, RT

[5]

2.2.3 ΔΙΑΤΜΙΣΗ

Πρωταγωνιστικό ρόλο στη διάτμηση των ενισχυμένων με ίνες σύνθετων υλικών παίζει η μήτρα. Αυτό συμβαίνει διότι σε αντίθεση με τον εφελκυσμό, στη διάτμηση η μήτρα παραλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου [6]. Σύμφωνα με τα παραπάνω, στις χαμηλές θερμοκρασίες η πολυμερική μήτρα γίνεται πιο άκαμπτη, ισχυρότερη και η παραμόρφωση αστοχίας της μειώνεται. Επομένως, η αντοχή του υλικού σε διάτμηση αυξάνεται, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3. Ένας ακόμη παράγοντας που ενισχύει την διατμητική αντοχή ενός σύνθετου υλικού σε κρυογενικές θερμοκρασίες, είναι η καλή διεπιφανειακή σχέση μεταξύ μήτρας και ινών. Σύμφωνα με μελέτη που έγινε από τον Islam et al. [7], σύνθετο υλικό με ίνες άνθρακα στην ίδια

θερμοκρασία (-196°C). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι ίνες Kevlar εμφανίζουν χειρότερες διεπιφανειακές ιδιότητες με την πολυμερική μήτρα από ότι οι ίνες άνθρακα.



Εικόνα 3: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για διάτμηση του υλικού T800H/3633 CFRP σε θερμοκρασίες RT , -196 °C , -269 °C [6]

2.2.4 ΚΟΠΩΣΗ

Στις κρυογενικές εφαρμογές συναντώνται δύο είδη κόπωσης: η μηχανική και η θερμική. Η μηχανική κόπωση είναι μια μορφή φόρτισης που εμφανίζεται σε δομές κάτω από την επίδραση δυναμικών και κυμαινόμενων μηχανικών τάσεων. Οι εφαρμοζόμενες αυτές τάσεις μπορεί ναι είναι αξονικής, καμπτικής ή στρεπτικής φύσης. Από την άλλη, η θερμική κόπωση προκαλείται Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

από θερμικές τάσεις, που έχουν δημιουργηθεί από τον περιορισμό της διαστολής ή συστολής των διαστάσεων ενός δομικού στοιχείου, λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας [1]. Αναμενόμενα σε κρυογενικές εφαρμογές, όπως είναι οι δεξαμενές υγροποιημένων αερίων που επιδέχονται επαναλαμβανόμενους ανεφοδιασμούς, η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι εξαιρετικά μεγάλη και επομένως οι θερμικές τάσεις που αναπτύσσονται είναι ιδιαίτερα κρίσιμες. Παρακάτω γίνεται ανάλυση των δύο αυτών ειδών κόπωσης.

2.2.4.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΟΠΩΣΗ

Η αστοχία των σύνθετων υλικών υπό μηχανικά φορτία κόπωσης οφείλεται στην έναρξη και τη συσσώρευση ρωγμών στη μήτρα. Επομένως και σε αυτή την περίπτωση η μήτρα έχει σημαντική επίδραση. Η αντοχή σε μηχανική κόπωση είναι μεγαλύτερη σε χαμηλές θερμοκρασίες από ότι σε θερμοκρασία δωματίου [8]. Ο λόγος είναι ότι με την μείωση της θερμοκρασίας, τόσο η αντοχή της ρητίνης (πολυμερική μήτρα) όσο και η αντοχή της διεπιφάνειας ίνας-ρητίνης, αυξάνονται. Έτσι η ανθεκτικότητα της μήτρας εμποδίζει την διάδοση των ρωγμών, αλλά και οι δυνάμεις επαφής μεταξύ ίνας και μήτρας που έχουν βελτιωθεί από την συρρίκνωση της μήτρας λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας, ελαττώνουν την πιθανότητα εξώθησης των ινών. Αυτό επαληθεύεται από μελέτη που έγινε με δοκίμια υφασμένων πολυμερών ενισχυμένων με ίνες γυαλιού σε κυκλική φόρτιση τύπου Ι. Σε θερμοκρασία δωματίου οι επιφάνειες των ινών ήταν σχεδόν τελείως απαλλαγμένες από υπολείμματα ρητίνης, γεγονός που υποδηλώνει τη χαμηλή αντοχή της διεπιφάνειας. Με τη μείωση της θερμοκρασίας στους -196 °C, οι ίνες παρέμειναν

καλυπτόμενες από ρητίνη, γεγονός που υποδηλώνει τη βελτιωμένη διεπιφανειακή αντοχή [9]. Όμως, σε διάφορες μελέτες έχει παρατηρηθεί ότι όσο πλησιάζει η θερμοκρασία το απόλυτο μηδέν, τόσο περισσότερο παγώνει η μοριακή κίνηση της ρητίνης και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καταστολή της χαλάρωσης των τάσεων και ταυτόχρονα την μείωση της δυσθραυστότητας της μήτρας. Αυτό τελικά οδηγεί στην μείωση της αντίστασης στην ανάπτυξη και διάδοση ρωγμών λόγω κόπωσης. Ενδεικτική είναι και η Εικόνα 4 όσον αφορά το φαινόμενο αυτό.



Εικόνα 4: Ρυθμός ανάπτυξης αποκόλλησης λόγω κυκλικής κόπωσης σε υφασμένα πολύστρωτα GFRP σε θερμοκρασίες RT, -196 °C και -269 °C [9]

2.2.4.2 ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΟΠΩΣΗ

Αρχικά να επισημανθεί ότι υπάρχουν δυο κύριοι τύποι θερμικής κόπωσης. Στον πρώτο τύπο ο θερμικός κύκλος κυμαίνεται από την θερμοκρασία δωματίου στην εκάστοτε κρυογενική Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών θερμοκρασία, ενώ στην δεύτερη περίπτωση ο θερμικός κύκλος κυμαίνεται από μια υψηλή θερμοκρασία σε μια κρυογενική. Κατά τη διάρκεια της θερμικής κυκλικής φόρτισης μπορεί να αναπτυχθούν ρωγμές στο υλικό. Αλλά ο αριθμός των ρωγμών ως συνάρτηση των θερμικών κύκλων εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους. Όταν το δοκίμιο υποβάλλεται σε υψηλότερες θερμοκρασιακές διαφορές (ΔΤ) [10] ή σε υψηλότερο ρυθμό ψύξης [11], τότε αναπτύσσει περισσότερες ρωγμές υπό τον ίδιο αριθμό κύκλων φόρτισης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Πυκνότητα ρωγμών συναρτήσει των κύκλων φόρτισης για δύο ρυθμούς ψύξης σε θερμικό κύκλο από -196°C σε 23°C για το σύνθετο υλικό CFRP 5250-4 RTM/IM7 [11]

Από τη άλλη, σύνθετα υλικά που περιέχουν ρητίνες ή ίνες με χαμηλότερο συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE), είναι πιο ανθεκτικά στην ανάπτυξη και διάδοση ρωγμών υπό θερμική κόπωση [12] (Εικόνα 6). Αντίθετα η ομαλότερη επιφανειακή τραχύτητα στο δοκίμιο και το μικρότερο πάγος των στρώσεων, το οποίο προκαλεί μικρότερη διακύμανση θερμικών τάσεων, οδηγούν σε λιγότερες ρωγμές [13]. Τμήμα Μηγανολόγων και Αεροναυπηγών Μηγανικών 15



Εικόνα 6: Πυκνότητα ρωγμών συναρτήσει του διαμήκους CTE των ινών για σύνθετα υλικά CFRP [12]

Τέλος έχει παρατηρηθεί από αρκετούς επιστήμονες ότι οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών αρχικά βελτιώνονται με την αύξηση του αριθμού των κύκλων θερμικής φόρτισης και ο λόγος είναι η υψηλότερη αντοχή και ακαμψία της ρητίνης κατά τις κρυογενικές θερμοκρασίες. Έπειτα οι ιδιότητες υποβαθμίζονται, λόγω της συσσώρευσης ρωγμών και της επακόλουθης απώλειας αντοχής του υλικού, ενώ στο τέλος εμφανίζεται ένα πλατό όσον αφορά τις ιδιότητες, που οφείλεται στο ότι οι ρωγμές της μήτρας ανακουφίζουν τις συγκεντρώσεις τάσεων στο υλικό [14] (Εικόνες 7 και 8).



Εικόνα 7: Αντοχή σε κάμψη σύνθετων υλικών CFRP που υποβλήθηκαν σε διαφορετικούς θερμικούς

κύκλους [14]



Εικόνα 8: Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση σύνθετων υλικών CFRP που υποβλήθηκαν σε

διαφορετικούς θερμικούς κύκλους [14]

2.2.5 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΡΟΥΣΗ

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η απόδοση της ρητίνης σε κρούση φαίνεται να μειώνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας. Ο λόγος είναι η ελάττωση της ολκιμότητας της ρητίνης σε κρυογενικές θερμοκρασίες, το οποίο αποτρέπει την υποχώρηση της μήτρας κατά τη διάρκεια της κρούσης και οδηγεί σε χαμηλότερη απαιτούμενη ενέργεια για τη θραύση του υλικού [4]. Ωστόσο σε περιπτώσεις υψηλής ενέργειας κρούσης, η θραύση των ινών παίζει τον κύριο ρόλο και η δομή μπορεί να απορροφήσει περισσότερη ενέργεια στις κρυογενικές θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει, επειδή όπως παρουσιάστηκε και προηγουμένως, σε κρυογενικές θερμοκρασίες παρατηρείται αυξημένη αντοχή της διεπιφάνειας ίνας – ρητίνης, η οποία μετριάζει τον μηχανισμό εξόλκευσης των ινών κατά τη διάδοση της βλάβης και αντ' αυτού επιβάλλει τη θραύση των ινών [15] (Εικόνα 9).



Εικόνα 9: Απορροφούμενη ενέργεια συναρτήσει της ενέργειας κρούσης για σύνθετο υλικό CFRP

σταυρωτής στρώσης [16]

2.2.6 ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ

Η θερμική διαστολή παίζει καθοριστικό ρόλο στη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε χαμηλές και κρυογενικές θερμοκρασίες. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από τουλάχιστον δύο διαφορετικά υλικά, που το κάθε ένα έχει διαφορετικό συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE). Έτσι σε κρυογενικές θερμοκρασίες τα υλικά που απαρτίζουν το σύνθετο υλικό, μεταβάλλονται διαφορετικά με αποτέλεσμα να δημιουργούνται θερμικές τάσεις και παραμορφώσεις. Επιπλέον υπάρχει διαφορά μεταξύ του CTE των ινών κατά τη διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση. Για τα σύνθετα υλικά που μελετώνται σε αυτή την εργασία, ισχύει ότι οι περισσότερες ίνες άνθρακα διαστέλλονται κατά την ψύξη, ενώ οι ίνες γυαλιού συστέλλονται τόσο στη διαμήκη όσο και στην εγκάρσια διεύθυνση [17].

Η μήτρα ρητίνης συστέλλεται με την μείωση της θερμοκρασίας. Επομένως σε συνδυασμό με την εγκάρσια διαστολή της ίνας άνθρακα, δημιουργούνται θλιπτικές τάσεις στη διεπιφάνεια ίνας-ρητίνης, οι οποίες αυξάνουν την αντοχή της διεπιφάνειας. Όπως παρουσιάστηκε και προηγουμένως το φαινόμενο αυτό ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιείται ο γενικός όρος σύνθετων υλικών, διότι ακόμα και στην περίπτωση των GFRPs, όπου οι ίνες γυαλιού συστέλλονται με την μείωση της θερμοκρασίας, ο αρκετά μεγαλύτερος CTE της ρητίνης κυριαρχεί επί των ινών με αποτέλεσμα να υφίσταται ο ίδιος μηχανισμός όπως και στην περίπτωση των CFRPs [18]. Πιστεύεται επίσης, ότι οι θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά μήκος του άξονα των

διαμήκως διαστελλόμενων ινών ανακουφίζουν την εφελκυστική μηχανική φόρτιση και οδηγούν σε υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό [19].

2.2.7 ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ

Η διαπερατότητα αποτελεί πολύ σημαντική ιδιότητα κυρίως για εφαρμογές όπως είναι οι κρυογενικές δεξαμενές (π.χ. δεξαμενές υγρού υδρογόνου). Επίσης, μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: τη διάχυση και τη διαρροή. Αρχικά η διάχυση είναι το φαινόμενο που ευθύνεται για τη διέλευση των ατόμων του προωθητικού μέσα από το υλικό, ενώ η διαρροή προκαλείται από την παρουσία διαδρομών ρωγμών στο υλικό που εξαρτώνται από τη διαστρωμάτωση. Όπως είναι λογικό η διάχυση είναι συνήθως αμελητέα συγκριτικά με τη διαρροή, για αυτό τον λόγο η δεύτερη απασχολεί περισσότερο την επιστημονική κοινότητα.

Γενικά ο συνολικός ρυθμός ροής του προωθητικού μειώνεται σε κρυογενικές θερμοκρασίες λόγω της χαμηλής μοριακής κινητικής του ενέργειας σε αυτές τις θερμοκρασίες. Ωστόσο οι θερμό-μηχανικές επιδράσεις στις χαμηλές θερμοκρασίες προκαλούν θερμικές τάσεις και επακόλουθη ρηγμάτωση της μήτρας. Καθώς οι ρωγμές αναπτύσσονται και συνδέονται μεταξύ τους σε όλη τη στρώση, προκύπτουν 'μονοπάτια' διαρροής. Η παρουσία αυτών των ρωγμών και η αυξανόμενη πυκνότητά τους με τη μείωση της θερμοκρασίας και την αύξηση των θερμικών κύκλων αυξάνουν τη συνολική διαπερατότητα του υλικού [20], όπως φαίνεται στην Εικόνα 10. Ωστόσο, εάν η πυκνότητα των ρωγμών και το μέγεθος των 'μονοπατιών' διαρροής φτάσουν σε ένα 'πλατό', τότε η περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας μπορεί να μειώσει τη διαπερατότητα λόγω της μειωμένης μοριακής κίνησης [21].


Εικόνα 10: Ρυθμός διείσδυσης συναρτήσει της παραμόρφωσης για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίας

ενός σύνθετου υλικού CFRP [20]

2.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Για να πραγματοποιηθεί η μελέτη των ιδιοτήτων των υλικών σε κρυογενικές θερμοκρασίες, απαραίτητη είναι η ανάπτυξη πειραματικών διατάξεων και διαδικασιών, ώστε πρωτίστως να επιτευχθούν αυτές οι θερμοκρασίες και έπειτα να προκύψουν ακριβή και αξιόπιστα αποτελέσματα. Στην τρέχουσα υπό-ενότητα παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή για τον έλεγχο των ιδιοτήτων των υλικών και σύμφωνα με τις οποίες προέκυψαν τα βιβλιογραφικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

2.3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Για δοκιμές εφελκυσμού σε σύνθετα υλικά σε θερμοκρασία δωματίου έχουν σχεδιαστεί κάποιες τυποποιημένες μέθοδοι ώστε να υπάρχει κοινή αναφορά στον τρόπο διεξαγωγής των πειραμάτων αλλά και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Ενδεικτικά αναφέρονται τα πρότυπα ASTM D 3039/D 3039 M και τα ιαπωνικά βιομηχανικά πρότυπα (JIS) K 7164 και K 7165 [22]. Ωστόσο δεν υπάρχει καθολικά αποδεκτή μέθοδος για κρυογενικές δοκιμές εφελκυσμού σε σύνθετα υλικά και αυτό διότι ο προσδιορισμός της αντοχής σύνθετου υλικού σε εφελκυσμό σε κρυογενικές θερμοκρασίες δεν είναι απλός. Η υψηλή αντοχή, η δυσκαμψία, η ανισοτροπία των σύνθετων υλικών αλλά και η δυσκολία συγκράτησης των δοκιμίων στις αρπάγες των μηχανών είναι κάποια από τα προβλήματα. Έτσι οι διάφορες ερευνητικές ομάδες χρησιμοποιούν

διαφορετικά πρότυπα για τις κρυογενικές δοκιμές τους. Κάποια από αυτά είναι: ASTM D638-96 [4], ASTM D 3039 [23] κ.α.

Συνήθως τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται για κάθε πειραματική δοκιμή με σκοπό να βελτιωθεί η επαναληψιμότητα είναι πέντε [2], [24] ή τουλάχιστον πέντε [4], ενώ ο Yang et al. [25] χρησιμοποίησαν έξι δοκίμια για την εκάστοτε δοκιμή.

Όσον αφορά την πειραματική διάταξη γενικά χρησιμοποιούνται υδραυλικές ή ηλεκτρικές μηχανές εφελκυσμού με εύρος κυψέλης φορτίου από 30 μέχρι 100 kN. Έπειτα για να επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία χρησιμοποιείται είτε κάποιος θάλαμος μέσα στον οποίο εξατμίζεται κρυογενικό υγρό, είτε ένα ντουάρ (dewar) που περιέχει κρυογενικό υγρό (π.χ. άζωτο, ήλιο) μέσα στο οποίο βυθίζεται η διάταξη φόρτισης, το δοκίμιο και τα όργανα μέτρησης [18]. Ένας ακόμα νέος τρόπος ψύξης σε κρυογενικές θερμοκρασίες είναι με χρήση εναλλακτών θερμότητας, αλλά αυτός θα παρουσιαστεί παρακάτω. Ο Yang et al. [26] διερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες νάνοσύνθετων υλικών με εποξική μήτρα και ενίσχυση με νάνο-σωλήνες άνθρακα σε θερμοκρασία υγρού αζώτου (-196 °C). Για να επιτευχθεί η συγκεκριμένη θερμοκρασία, καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής, το δοκίμιο και οι αρπάγες της μηχανής ήταν βυθισμένα μέσα σε έναν κρυοστάτη γεμάτο με υγρό άζωτο όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.



Εικόνα 11: Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης για δοκιμές εφελκυσμού σε κρυογενικό περιβάλλον [26]

Την ίδια διαδικασία με παρόμοια πειραματική διάταξη χρησιμοποίησαν ο Feng et al. [24]. Ενώ ο Shindo at al. [27] έφτασαν σε θερμοκρασία υγρού ηλίου (-269 °C) με τον ίδιο τρόπο, και προκειμένου να διατηρείται το δοκίμιο πλήρως βυθισμένο στο υγρό ήλιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού, ενσωματώθηκε ένα αυτόματο σύστημα αναπλήρωσης (TRG-300).

Ο Kim et al. [23] διερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες του πολύστρωτου σύνθετου υλικού T700/epoxy (CFRP) σε 4 διαφορετικές θερμοκρασίες: θερμοκρασία δωματίου (25°C), -50 °C, - 100 °C και -150 °C. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε περιβαλλοντικός θάλαμος και η θερμοκρασία μειώθηκε στις επιθυμητές τιμές μέσω της εξάτμισης υγρού αζώτου. Επίσης ο θάλαμος ήταν σφραγισμένος με μονωτικό υλικό, ενώ κατά την διάρκεια των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε μια συσκευή συμπίεσης για τον έλεγχο του χρόνου ψύξης από τη θερμοκρασία δωματίου στη εκάστοτε κρυογενική και τη διατήρηση της πίεσης εξάτμισης στα 22 psi.



Εικόνα 12: Πειραματική διάταξη για εφελκυσμό σε κρυογενική θερμοκρασία και οι λαβές εφελκυσμού 3 σιαγόνων [23]

Για την παραπάνω μέθοδο ψύξης απαιτείται ένα χρονικό διάστημα από τη στιγμή που θα επιτευχθεί η επιθυμητή θερμοκρασία, έτσι ώστε να γίνει ομοιόμορφη η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θαλάμου και σε ολόκληρο τον όγκο του δοκιμίου. Ο Yang et al. [25] υπολόγισαν αυτό το χρονικό διάστημα στα 15 λεπτά.

Για τη μέτρηση των παραμορφώσεων χρησιμοποιούνται μετρητές παραμόρφωσης, ειδικοί για χαμηλές θερμοκρασίες. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι η θερμική διαστολή των μετρητών παραμόρφωσης και της κόλλας, που χρησιμοποιείται για τη συγκόλλησή τους στο δοκίμιο, μπορεί να οδηγήσει σε αποκόλληση των μετρητών. Ως εκ τούτου, συνιστώνται κρυογενικές κόλλες και κατάλληλη βαθμονόμηση. Ο Chu et al. [2] χρησιμοποίησαν χαλαζία ως δοκίμιο αναφοράς λόγω του πολύ χαμηλού συντελεστή θερμικής διαστολής (CTE) και επικόλλησαν μετρητές παραμόρφωσης 120 Ω στην επιφάνεια του δοκιμίου με εξαιρετικά λεπτή κόλλα ανθεκτική σε

χαμηλές θερμοκρασίες, έτσι ώστε ο μετρητής παραμόρφωσης και το δοκίμιο να έχουν την ίδια παραμόρφωση όταν οι θερμοκρασίες μεταβάλλονται.

Το κρυογενικό υγρό αλλά και η παρουσία αερίου εντός του θαλάμου εξαλείφει την δυνατότητα οπτικής παρατήρησης. Για το λόγο αυτό η ακουστική εκπομπή είναι μια προτιμώμενη μέθοδος για την παρατήρηση της αστοχίας σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Ο Shindo et al. [27] χρησιμοποίησαν παρακολούθηση ακουστικής εκπομπής με ένα σύστημα ΑΕ MISTRAS για τον προσδιορισμό της έναρξης της βλάβης και την παρακολούθηση της συσσώρευσης αυτής στα δοκίμια. Στη θερμοκρασία δωματίου τοποθετήθηκαν δύο αισθητήρες στο δοκίμιο, ενώ στη θερμοκρασία υγρού αζώτου, οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν έξω από το dewar στο άκρο των κυματοδηγών από ανοξείδωτο χάλυβα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13:



Εικόνα 13: : Συνδεσμολογία του συστήματος ακουστικής παρακολούθησης για τα πειράματα εφελκυσμού: (a) στη θερμοκρασία δωματίου, (b) στους -196 °C [27]

Τέλος οι επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων εξετάζονται συνήθως με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Ενώ πριν από την εξέταση συχνός είναι ο καθαρισμός των επιφανειών με οινόπνευμα και στη συνέχεια η επικάλυψή τους με λεπτό στρώμα χρυσού για τη βελτίωση της αγωγιμότητας [4], [2].

2.3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΘΛΙΨΗΣ

Όπως και στον εφελκυσμό, δεν έχουν αναπτυχθεί τυποποιημένα πρότυπα για πειράματα θλίψης σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Έτσι, και σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούνται προδιαγραφές που έχουν αναπτυχθεί για πειράματα σε θερμοκρασία δωματίου.

Επίσης, οι διατάξεις μείωσης και διατήρησης της θερμοκρασίας είναι οι ίδιες ή παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται για τον εφελκυσμό. Ο Torabizadeh [5] πραγματοποίησε πειράματα θλίψης και εφελκυσμού χρησιμοποιώντας τον ίδιο περιβαλλοντικό θάλαμο. Ο συγκεκριμένος θάλαμος έχει τη δυνατότητα να ψύχεται μέχρι και τους -192°C μέσω της εξάτμισης υγρού αζώτου, ωστόσο στα συγκεκριμένα πειράματα η θερμοκρασία μειώθηκε μέχρι τους -60°C. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, μια συσκευή συμπίεσης χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο του

χρόνου ψύξης από θερμοκρασία δωματίου μέχρι τους -60°C και τη διατήρηση πίεσης εξάτμισης στα 152 kPa. Προκειμένου να επιτευχθεί θερμική ισορροπία, η θερμοκρασία του θαλάμου διατηρήθηκε στην επιθυμητή θερμοκρασία για τουλάχιστον μία ώρα. Επίσης, τα δοκίμια παρέμειναν σε σταθερή χαμηλή θερμοκρασία για τουλάχιστον μία ώρα πριν από την έναρξη της φόρτισης. Ο θάλαμος ήταν εξοπλισμένος με ανεμιστήρα για την επίτευξη ομοιόμορφης θερμοκρασίας. Ένα ψηφιακό θερμόμετρο τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του θαλάμου για την παρακολούθηση της ενεργού θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Η διάταξη αυτή φαίνεται στην Εικόνα 14:



Εικόνα 14: Πειραματική διάταξη για πειράματα σε χαμηλές θερμοκρασίες [5]

Ο Liu et al. [28] διερεύνησαν τη συμπεριφορά σε θλίψη ενός σύνθετου υλικού τύπου 'σάντουιτς' ενισχυμένο με ίνες γυαλιού, χρησιμοποιώντας και αυτοί έναν αντίστοιχο περιβαλλοντικό θάλαμο για να πετύχουν τις επιθυμητές θερμοκρασίες. Οι ιδιοσυσκευές που χρησιμοποίησαν, τόσο για τα υποστυλώματα, όσο και για τα ολοκληρωμένα πάνελ, φαίνονται στις Εικόνες 15 και 16 αντίστοιχα: Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών 28



Εικόνα 15: Δοκιμή θλίψης του σύνθετου υποστυλώματος σε χαμηλές θερμοκρασίες [28]



Εικόνα 16: Δοκιμή θλίψης του σύνθετου πάνελ σάντουιτς σε χαμηλές θερμοκρασίες [28]

Ακόμα ο Wang et al. [29] χρησιμοποιήσαν έναν αυτοσχέδιο θάλαμο για να μελετήσουν τη συμπεριφορά σε θλίψη πλεκτών σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες άνθρακα (CFRP) συναρτήσει της θερμοκρασίας και της γωνίας πλέξης. Επίσης, χρησιμοποίησαν δύο θερμοζεύγη



για την μέτρηση της θερμοκρασίας, με το ένα να μετράει την θερμοκρασία του δείγματος αναφοράς και το άλλο την θερμοκρασία μέσα στο θάλαμο, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 17:

Εικόνα 17: Πειραματική διάταξη. a) Σχηματική απεικόνιση του θαλάμου χαμηλής θερμοκρασίας, b) Μηχανή θλίψης MTS συνδεδεμένη με τον θάλαμο [29]

Η εμβάπτιση του εξαρτήματος φόρτισης και του δοκιμίου σε δεξαμενή γεμάτη με κρυογενικό υγρό (π.χ. άζωτο) χρησιμοποιείται και στα πειράματα θλίψης, όπως και στον εφελκυσμό. Ενδεικτικά ο Li et al. [30] εφάρμοσαν αυτή την μέθοδο για να πετύχουν τη θερμοκρασία υγρού αζώτου (-196°C).

Πέρα από τις μεθόδους ψύξης που αναφέρθηκαν προηγουμένως, αναπτύσσεται μια νέα πειραματική διάταξη που λειτουργεί με χρήση εναλλακτών θερμότητας. Ο Tsolakis et al. [31] παρουσίασαν μια πειραματική διάταξη για πειράματα θλίψης σε δοκίμια σκυροδέματος σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Μπορεί η παρούσα εργασία να μην πραγματεύεται υλικά όπως το σκυρόδεμα, αλλά μια τέτοια διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στα σύνθετα υλικά, γι' αυτό και θα αναλυθεί περαιτέρω. Σύμφωνα με την παραπάνω ερευνητική ομάδα η συγκεκριμένη πειραματική διάταξη αποτελείται από έναν θάλαμο, ο οποίος περιέχει δύο ομόκεντρους κυλίνδρους αλουμινίου που διαχωρίζονται με κενό. Μέσα από τον εσωτερικό κύλινδρο τοποθετείται ένα στρώμα αφρού πολυουρεθάνης και στο εσωτερικό του στρώματος υπάρχει ένας τρίτος κύλινδρος πάνω στον οποίο στηρίζεται το δοκίμιο. Το επάνω μέρος του θαλάμου είναι κατασκευασμένο από αφρό πολυουρεθάνης με κατάλληλα ανοίγματα για την εισαγωγή υγρού ή αερίου αζώτου και της συσκευής μέτρησης ύψους. Το δοκίμιο περιβάλλεται από ένα λεπτό φύλλο χαλκού και με τη σειρά του αυτό περιβάλλεται από χάλκινους σωλήνες που τυλίγονται γύρω από το δοκίμιο. Οι χάλκινοι σωλήνες έχουν εξωτερική διάμετρο 8 mm και εσωτερική 6 mm, ενώ η παροχή του αζώτου (υγρού ή αερίου) διοχετεύεται σε αυτές τις σπείρες μέσω ενός συλλέκτη αλουμινίου.



Εικόνα 18: Σχηματική απεικόνιση του θαλάμου κρυογενικών δοκιμών [31]

Αυτός ο σχεδιασμός στοχεύει στην ψύξη του δοκιμίου με μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής μεταξύ του ψυκτικού μέσου και του δείγματος. Το κύριο πρόβλημα με τις υπάρχουσες πειραματικές διατάξεις που εκμεταλλεύονται τη χρήση της ελεύθερης συναγωγής για τη μεταφορά θερμότητας είναι ότι η ροή θερμότητας είναι εξαιρετικά μεταβλητή. Σε κρυογενικές συνθήκες αναπτύσσονται τυρβώδη οριακά στρώματα αερίου, τα οποία σπάνια είναι σταθερά με την πάροδο του χρόνου και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία. Κατά συνέπεια, ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας εμφανίζει αυξομειώσεις. Από την άλλη μεριά, το φύλλο χαλκού που βρίσκεται μεταξύ του δοκιμίου και των σπειρών χαλκού επιφέρει ομοιόμορφη ψύξη του δοκιμίου, ενώ με την απουσία του θα επικρατούσε ραγδαία αύξηση της μεταβολής της θερμοκρασίας στα σημεία επαφής των σπειρών με το δοκίμιο, αυξάνοντας την πιθανότητα έναρξης ρωγμών στις ενδιάμεσες περιοχές.

2.3.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΡΟΥΣΗΣ

Τα πειράματα κρούσης μπορούν να πραγματοποιηθούν με διάφορες μεθόδους, ανάλογα τις ιδιότητες του υλικού που πρέπει να μελετηθούν. Οι κύριες μέθοδοι για χαμηλές ταχύτητες είναι: με εκκρεμές που ελευθερώνεται από συγκεκριμένο ύψος και με πύργο πτώσης βάρους, ενώ για υψηλές ταχύτητες με εκτόξευση βλήματος. Το ζητούμενο είναι οι παραπάνω δοκιμές να εφαρμοστούν σε κρυογενικές θερμοκρασίες.

Όσον αφορά τις δοκιμές κρούσης με εκκρεμές (Charpy), ο Chen et al. [4] χρησιμοποίησαν ένα όργανο δοκιμής Reger σύμφωνα με τη σύσταση GB/T 2571-1995 (Εικόνα 19), για να μελετήσουν τις μηχανικές ιδιότητες νάνο-σύνθετων υλικών με εποξική μήτρα και ενίσχυση με

νάνο-σωλήνες άνθρακα σε θερμοκρασία υγρού αζώτου (-196 °C). Για να πετύχουν την συγκεκριμένη θερμοκρασία βύθισαν τα δοκίμια σε υγρό άζωτο για περίπου 5 λεπτά και έπειτα τα τοποθέτησαν στη μηχανή κρούσης. Οι δοκιμές έλαβαν χώρα σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά επειδή διήρκησαν μόλις λίγα δευτερόλεπτα θεωρήθηκε ότι δεν έχει μεταβληθεί η θερμοκρασία των δοκιμίων. Έπειτα οι επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων μετά τη δοκιμή κρούσης εξετάστηκαν με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM). Παρόμοια διαδικασία εφάρμοσαν και ο Feng et al. [24] χρησιμοποιώντας το πρότυπο ASTM D-256 με τη μόνη διαφορά ότι τα δοκίμια βυθίστηκαν στο υγρό άζωτο για πάνω από 10 λεπτά.



Εικόνα 19: Μηχάνημα κρούσης Charpy [32]

Ο Kim et al. [33] σχεδίασαν και κατασκεύασαν έναν κρουστικό μηχανισμό με πτώση

βάρους, που είναι ικανός να πληροί τις απαιτήσεις της δοκιμής ASTM D2512 και μπορεί να Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών 33

χρησιμοποιεί δοκίμια που βρίσκονται σε υγρό οξυγόνο (-183°C) (Εικόνα 20). Ο δοκιμαστής κρούσης είναι τοποθετημένος σε ένα άκαμπτο δομικό πλαίσιο για να διατηρεί την ακριβή κατακόρυφη ευθυγράμμιση υπό επανειλημμένες συνθήκες κρούσης. Αυτός ο δοκιμαστής είναι σχεδιασμένος ώστε να επιτρέπει σε ένα βαρίδι να πέφτει περίπου ελεύθερα πάνω σε έναν πείρο κρούσης, το κάτω μέρος του οποίου έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο που είναι βυθισμένο σε υγρό οζυγόνο. Για να επιτευχθούν οι κρυογενικές συνθήκες πραγματοποιείται προ-ψύξη του πείρου κρούσης εμβαπτίζοντάς τον 30 λεπτά πριν τη δοκιμή σε υγρό άζωτο. Έπειτα υγρό άζωτο χύνεται στη θήκη του κυπέλλου του δοκιμίου και στην περιοχή του αμονιού και η διαδικασία αυτή διαρκεί περίπου δύο ώρες. Στο τέλος τοποθετείται το δοκίμιο στη βάση του κυπέλλου και εισέρχεται υγρό οζυγόνο. Η δοκιμή ολοκληρώνεται ύστερα από την πτώση του βαριδίου από το επιθυμητό ύψος.



Εικόνα 20: Δοκιμή κρούσης με πτώση βάρους σε θερμοκρασία υγρού οξυγόνου -183°C [33]

Μια παρόμοια πειραματική διάταξη (Drop Weight Tower), αλλά με περιβαλλοντικό θάλαμο αυτή τη φορά, χρησιμοποιήθηκε από τον Gómez et al. [16] για να πραγματοποιήσουν Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών 34 δοκιμές κρούσης σε πολύστρωτα CFRP σε χαμηλές θερμοκρασίες (Εικόνα 21). Ένα θερμοστοιχείο ήταν συνδεδεμένο με έναν ελεγκτή θερμοκρασίας που ρύθμιζε το άνοιγμα μιας ηλεκτρικής βαλβίδας, η οποία επέτρεπε την είσοδο ελεγχόμενου όγκου υγρού αζώτου στο θάλαμο. Μόλις επιτεύχθηκε η επιθυμητή θερμοκρασία στο θάλαμο, το σύστημα ψύξης την διατήρησε για κάποιο χρονικό διάστημα με σκοπό να διασφαλιστεί ότι το δοκίμιο και η εσωτερική ατμόσφαιρα έχουν φτάσει την τιμή αυτή. Ο συνολικός χρόνος ψύξης του δοκιμίου προέκυψε από μια αριθμητική θερμική ανάλυση, η οποία έδωσε 20 ± 5 λεπτά για την επίτευξη των -60°C και 45 ± 10 λεπτά για την επίτευξη των -150 °C. Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στην Εικόνα 21:



Εικόνα 21: Σκίτσο της πειραματικής διάταξης για πειράματα κρούσης σε κρυογενικές θερμοκρασίες

[16]

Όσον αφορά τα πειράματα κρούσης υψηλών ταχυτήτων γίνονται συνήθως με διατάξεις όπου λαμβάνει χώρα εκτόξευση βλήματος από εκτόνωση αερίου και έχουν τροποποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να επικρατούν κρυογενικές θερμοκρασίες. Ο López et al. [34] χρησιμοποίησαν ένα Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών 35 όπλο αερίου SABRE και το συνέδεσαν με ένα κρυογενικό θάλαμο, στον οποίο τοποθετούνταν τα δοκίμια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 22. Στο εσωτερικό του θαλάμου διοχετευόταν αέριο άζωτο με παροχή ρυθμιζόμενη από μια ηλεκτρική βαλβίδα, η οποία ελεγχόταν από ένα θερμοστοιχείο που βρισκόταν κοντά στο δοκίμιο. Ένας ανεμιστήρας εξασφάλιζε ότι η θερμοκρασία του θαλάμου εμφάνιζε ομοιόμορφη κατανομή. Ενώ για να είναι βέβαιο ότι το δοκίμιο έχει την επιθυμητή θερμοκρασία σε όλο του τον όγκο, παρέμενε για 20 λεπτά στους -60 °C ή για 30 λεπτά στους - 150 °C πριν την έναρξη του πειράματος. Όταν το δοκίμιο είχε φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία, ένα βλήμα εκτοξευόταν με τη βοήθεια πεπιεσμένου ηλίου με ταχύτητα έως και 525 m/s. Μόλις το βλήμα εκτοξευόταν από το κανόνι, διένυε απόσταση 2 m μέσω μιας στοάς, στην οποία δύο φωτοηλεκτρικά κύτταρα ανίχνευαν τη διέλευση του βλήματος για να λάβουν την ταχύτητα πρόσκρουσης. Στο τέλος της στοάς, το βλήμα έφτανε σε ένα θωρακισμένο κουτί ,στο οποίο βρισκόταν ο κρυογενικός θάλαμος. Η συγκεκεσμένη διάταξη φαίνεται στις Εικόνες 22, 23 και 24.



Εικόνα 22: Πειραματική διάταξη για κρούση υψηλών ταχυτήτων σε κρυογενικές θερμοκρασίες [34]



Εικόνα 23: Κρυογενικός θάλαμος [34]



Εικόνα 24: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης [34]

Μια αντίστοιχη πειραματική διάταξη χρησιμοποίησαν ο Choudhury et al. [35] για να διερευνήσουν την επίδραση της θερμοκρασίας στο βαλλιστικό όριο πλεκτών σύνθετων υλικών GFRP.

2.3.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΥΠΟΥ Ι

Τα πειράματα φόρτισης τύπου Ι υπολογίζουν τη δυσθραυστότητα των υλικών αντιστοιχίζοντας την με την κάθετη μετατόπιση των επιφανειών στο επίπεδο διάδοσης της ρωγμής. Τα σύνθετα υλικά που μελετώνται στην παρούσα εργασία, λόγω του γεγονότος ότι αποτελούνται από πολλές στρώσεις, τείνουν να αστοχούν από το φαινόμενο της διαστρωματικής αποκόλλησης [36]. Εν γένει πειράματα φόρτισης τύπου Ι μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε με στατικά φορτία, είτε με κυκλική φόρτιση, ενώ στα συγκεκριμένα πειράματα χρησιμοποιούνται δοκίμια διπλής προβόλου δοκού (DCB).

Οσον αφορά τις κρυογενικές θερμοκρασίες δεν υπάρχουν τυποποιημένες μέθοδοι δοκιμής, οπότε χρησιμοποιούνται τα πρότυπα που αφορούν τη θερμοκρασία δωματίου. Ο Shindo et al. [9] πραγματοποίησαν πειράματα φόρτισης τύπου Ι σε φορτία κόπωσης τόσο σε θερμοκρασία δωματίου, όσο και σε θερμοκρασία υγρού αζώτου (-196 °C) και υγρού ηλίου (-269 °C). Το υλικό που χρησιμοποίησαν ήταν πλεκτό σύνθετο GFRP με τη διεύθυνση πλήρωσης του υφάσματος παράλληλη προς τη διαμήκη διεύθυνση του δοκιμίου. Μεμβράνη τεφλόν εισήχθη κατά μήκος της μιας άκρης του πάνελ πριν από την επεξεργασία για να παρέχει την αρχική ρωγμή αποκόλλησης στο μέσο του επιπέδου. Τα μπλοκ αλουμινίου επικολλήθηκαν στα δοκίμια ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή φορτίου (Εικόνα 25).



Εικόνα 25: Δοκίμιο DCB με τα μπλοκ φόρτισης [9]

Όλες οι δοκιμές διεξήχθησαν με τη χρήση σέρβο-υδραυλικής μηχανής δοκιμών με αξονική φόρτιση 30 kN σε θερμοκρασία δωματίου, -196 °C και -269 °C. Το περιβάλλον χαμηλής θερμοκρασίας επιτεύχθηκε με εμβάπτιση του εξαρτήματος φόρτισης και του δοκιμίου σε υγρό άζωτο (-196 °C) ή υγρό ήλιο (-269 °C). Επίσης, ενσωματώθηκε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα αναπλήρωσης (TRG-300) για να διατηρείται το δοκίμιο πλήρως βυθισμένο σε υγρό ήλιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής κόπωσης στους -269 °C. Τα φορτία εφαρμοζόταν στο δοκίμιο μέσω των μπλοκ αλουμινίου που ήταν κολλημένα σε αυτό, ενώ η συχνότητα που εφαρμόστηκε ήταν 2 Ηz και ο λόγος φορτίου R=0.1. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) για την παρατήρηση των μηχανισμών ανάπτυξης της αποκόλλησης λόγω κόπωσης για κάθε θερμοκρασία.

Παρόμοια διαδικασία εφάρμοσαν ο Oliver et al. [37] αλλά στα δικά τους πειράματα στις κρυογενικές θερμοκρασίες, η κόλλα μεταξύ των μπλοκ φόρτισης και του δοκιμίου απέτυχε. Έτσι χρησιμοποιήθηκε μια μέθοδος μηχανικής στερέωσης των μπλοκ φόρτισης. Στα δοκίμια Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

διανοίχθηκαν οπές, έτσι ώστε τα μπλοκ φόρτισης να μπορούν να βιδωθούν σε αυτά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 26.



Εικόνα 26: Μπλοκ φόρτισης μηχανικά συνδεδεμένα με το δοκίμιο [37]

2.3.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΥΠΟΥ ΙΙ

Τα πειράματα φόρτισης τύπου ΙΙ, όπως και τα τύπου Ι, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της δυσθραυστότητας των πολύστρωτων σύνθετων υλικών. Σε αυτή την περίπτωση οι επιφάνειες της ρωγμής ολισθαίνουν μεταξύ τους παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσής της, ενώ για αυτά τα πειράματα χρησιμοποιούνται τα δοκίμια κάμψης με εγκοπή στο άκρο (End Notched Flexure, ENF). Βέβαια, τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται τα δοκίμια κάμψης με εγκοπή 4 σημείων (4ENF), με σκοπό να μειωθεί η επίδραση της τριβής που εμφανίζεται στη διαμόρφωση της κάμψης τριών σημείων και μπορεί να επηρεάσει την

διαστρωματική αντοχή σε θραύση του υλικού. Το δοκίμιο κάμψης με εγκοπή 4 σημείων φαίνεται στην Εικόνα 27:



Εικόνα 27: Δοκίμιο κάμψης με εγκοπή 4 σημείων [38]

Ενώ η διαμόρφωση για πειράματα κάμψης 4 σημείων είναι η εξής:



Εικόνα 28: Διαμόρφωση για πειράματα κάμψης 4 σημείων [38] Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

Ο Shindo et al. [38] πραγματοποίησαν πειράματα φόρτισης τύπου ΙΙ 4 σημείων για τον προσδιορισμό της διαστρωματικής αντοχής πλεκτών σύνθετων υλικών GFRP σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Αφού έκοψαν τα δοκίμια σύμφωνα με την Εικόνα 27, εισήγαγαν μεμβράνη τεφλόν κατά μήκος του δοκιμίου, ώστε να δημιουργηθεί η αρχική ρωγμή αποκόλλησης στο μέσο του επιπέδου. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση σέρβο-υδραυλικής μηχανής δοκιμών με δυναμοκυψέλη 30 kN σε θερμοκρασία δωματίου, -196 °C και -269 °C. Το περιβάλλον χαμηλών θερμοκρασιών επιτεύχθηκε με εμβάπτιση του εξαρτήματος φόρτισης και του δοκιμίου σε υγρό άζωτο (-196 °C) ή υγρό ήλιο (-269 °C), ανάλογα τα πειράματα. Στο τέλος το μήκος της ρωγμής α μετρήθηκε με οπτική παρατήρηση.

Ο Hojo et al. [39] πραγματοποίησαν πειράματα φόρτισης τύπου ΙΙ, τόσο τριών όσο και τεσσάρων σημείων, σε υγρό άζωτο (-196 °C). Αυτή τη φορά εισήχθη μια μεμβράνη πολυιμιδίου κατά μήκος των δοκιμίων για την εκκίνηση της ρωγμής αποκόλλησης. Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε υγρό άζωτο, ενώ χρησιμοποιήθηκε σέρβο-υδραυλική μηχανή με δυναμοκυψέλη 2.45 kN. Σε κάθε πείραμα, το δοκίμιο τοποθετούταν αρχικά κοντά στην επιφάνεια του υγρού αζώτου για να ελαχιστοποιηθεί το θερμικό σοκ. Στη συνέχεια βυθιζόταν μέσα στο υγρό άζωτο και παρέμενε εκεί για περίπου 30 λεπτά. Μετά από αυτή την διαδικασία ξεκινούσε το πείραμα. Η παρακάτω σχηματική απεικόνιση (Εικόνα 29) παρουσιάζει την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τα εν λόγω πειράματα:



Εικόνα 29: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης για πειράματα φόρτισης τύπου ΙΙ σε θερμοκρασία υγρού αζώτου [39]

2.4 ПОЛУМЕРН

Τα πολυμερή είναι ενώσεις οι οποίες συνίστανται από πολύ μεγάλα μόρια τα οποία σχηματίζονται από επαναλαμβανόμενες υπό-μονάδες, τα μονομερή. Οι αντιδράσεις μέσω των οποίων τα μονομερή ενώνονται και δημιουργούν το μακρομόριο λέγονται αντιδράσεις πολυμερισμού και αποτελούν το κύριο χαρακτηριστικό των πολυμερών. Τα πολυμερή μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες σύμφωνα με την προέλευσή τους: τα βιοπολυμερή, τα οποία παράγει η φύση, και τα τεχνητά πολυμερή. Στην παρούσα εργασία θα εξεταστούν τα τεχνητά

πολυμερή, καθώς είναι αυτά που χρησιμοποιούνται σε διάφορες τεχνολογικές εφαρμογές, με τις κρυογενικές να ανήκουν σε αυτές.

Ένας τρόπος ταξινόμησης των πολυμερών μπορεί να γίνει σύμφωνα με την συμπεριφορά τους με την αύξηση της θερμοκρασίας. Θερμοπλαστικά και Θερμοσκληρυνόμενα είναι οι δύο υποδιαιρέσεις. Τα θερμοπλαστικά γίνονται μαλακά όταν θερμαίνονται και σκληραίνουν όταν ψύχονται, διαδικασίες οι οποίες είναι πλήρως αντιστρεπτές και μπορούν να επαναληφθούν. Αντιθέτως τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή γίνονται μονίμως σκληρά κατά τον σχηματισμό τους και δεν μαλακώνουν με την θέρμανση. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή είναι γενικά σκληρότερα και ανθεκτικότερα από τα θερμοπλαστικά, ενώ εμφανίζουν και καλύτερη σταθερότητα στις διαστάσεις τους [1].

Τα πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες κρυογενικές εφαρμογές. Όσον αφορά τις δεξαμενές υδρογόνου, μπορούν να κατασκευαστούν από πολυμερικά υλικά αντλίες, βαλβίδες, σωληνώσεις και να επιτευχθεί η στεγανοποίησή τους. Αλλά πέρα από τις δεξαμενές αποθήκευσης και τροφοδότησης, τα πολυμερή μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα αναδυόμενων τεχνολογιών, το οποίο περιέχει επιταχυντές σωματιδίων, κρυογενικά ψυχόμενους υπερ-υπολογιστές, υπερ-αγώγιμους μαγνήτες κ.α.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών σε κρυογενικές θερμοκρασίες, καθώς επίσης δίνεται έμφαση στο πολυμερές PEEK μιας και αποτελεί υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως σε πειραματικές δοκιμές και κατ' επέκταση σε κρυογενικές διατάξεις.

2.5 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΚΡΥΟΓΟΝΙΚΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ

Καθώς τα πολυμερή ψύχονται από τη θερμοκρασία δωματίου προς τις κρυογενικές θερμοκρασίες, τείνουν να γίνονται πιο σκληρά, δύσκαμπτα και ψαθυρά προς τα μηχανικά φορτία [40]. Η αντοχή των πολυμερών τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη τείνει να αυξάνεται με την μείωση της θερμοκρασίας, και αυτό οφείλεται στην μείωση της κινητικότητας των πολυμερικών αλυσίδων, η οποία αυξάνει τις δυνάμεις σύνδεσης μεταξύ των μορίων και επομένως την αντοχή του υλικού, όπως παρουσιάστηκε και προηγουμένως στην ενότητα των σύνθετων υλικών. Στην Εικόνα 30 που ακολουθεί φαίνεται η μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής συναρτήσει της θερμοκρασίας για το υλικό PTFE:



Εικόνα 30: Εφελκυστική αντοχή του PTFE συναρτήσει της θερμοκρασίας [40]

Για τον ίδιο λόγο (μείωση της κινητικότητας των πολυμερικών αλυσίδων) αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο θλίψης των πολυμερών, όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από την Εικόνα 31:



Εικόνα 31: Μέτρο θλίψης συναρτήσει της θερμοκρασίας του PTFE [40]

Σε πολλές κρυογενικές εφαρμογές, όπως οι δεξαμενές υδρογόνου, απαραίτητη είναι η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, και ο λόγος είναι ότι πρέπει να αποτρέπεται η μεταφορά ανεπιθύμητης θερμότητας. Γενικά τα πολυμερή εμφανίζουν χαμηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με άλλα υλικά, όπως τα μέταλλα και τα κεραμικά, καθώς επίσης παρατηρείται μείωση της θερμικής τους αγωγιμότητας όταν η θερμοκρασία μειώνεται [40].

Όσον αφορά το συντελεστή θερμικής διαστολής CTE, παρόλο που εμφανίζει υψηλότερες τιμές συγκριτικά με εκείνες των μετάλλων και των κεραμικών, το μειονέκτημα αυτό εξαλείφεται αφού παρατηρείται μείωση του συντελεστή με τη μείωση της θερμοκρασίας. Για την περαιτέρω μείωση του CTE, συχνή είναι η προσθήκη νανοσωματιδίων άλλων υλικών, όπως πυριτίου, σε πολυμερή προκειμένου να πληρούν τις προδιαγραφές για τη χρήση τους σε κρυογενικές Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών εφαρμογές [41]. Η μεταβολή του CTE συναρτήσει της θερμοκρασίας για 5 διαφορετικές εποξικές ρητίνες φαίνεται στην Εικόνα 32 που ακολουθεί:





Όπου: Α: ρητίνη novolac

Β: κυκλο-αλειφατική ρητίνη

C: ρητίνη δισφαινόλης

D,E: εποξικές ρητίνες που σκληραίνουν σε θερμοκρασία δωματίου

Στην συνέχεια παρουσιάζεται το πολυμερές PEEK, αφού όπως αναφέρθηκε προηγουμένως αποτελεί ένα από τα βασικότερα πολυμερή υλικά που χρησιμοποιούνται σε κρυογενικές εφαρμογές.

Το πολυμερές PEEK, παρουσιάζει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπως μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία, χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, και σε συνδυασμό με το χαμηλό ειδικό βάρος του, καθίσταται ιδανική επιλογή για σωληνώσεις και βαλβίδες σε δεξαμενές αποθήκευσης κρυογενικών υγρών. Το PEEK γενικά ακολουθεί τη συμπεριφορά που παρουσιάζουν και τα υπόλοιπα πολυμερή, δηλαδή αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας με την μείωση της θερμοκρασίας, όπως παρουσιάζεται παραπάνω. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με τις πειραματικές δοκιμές που διεξήγαγε ο Rae et al. [42], προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα. Όσον αφορά τα πειράματα θλίψης, παρατηρείται αύξηση της αντοχής σε θλίψη όσο μειώνεται η θερμοκρασία, με ταυτόχρονη μείωση της παραμόρφωσης αστοχίας. Επιπρόσθετα η παραμόρφωση μέγιστης τάσης τείνει να αυξάνεται με την μείωση της θερμοκρασίας, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 33:



Εικόνα 33: Καμπύλες Τάσης – Παραμόρφωσης για πειράματα θλίψης σε διάφορες θερμοκρασίες για το υλικό ΡΕΕΚ [42]

Από την Εικόνα 33 φαίνεται ότι σε θερμοκρασία δωματίου (23 °C) η μέγιστη θλιπτική τάση ισούται με 135 MPa, ενώ σε θερμοκρασία -85 °C γίνεται 210 MPa.

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στον εφελκυσμό, με τα αποτελέσματα των πειραμάτων να φαίνονται στην Εικόνα 34 που ακολουθεί:



Εικόνα 34: Καμπύλες Τάσης – Παραμόρφωσης για πειράματα εφελκυσμού σε διάφορες θερμοκρασίες για το υλικό ΡΕΕΚ [42]

Είναι φανερό ότι και στην περίπτωση του εφελκυσμού, η αντοχή αυξάνεται με την μείωση της θερμοκρασίας και ταυτόχρονα η παραμόρφωση θραύσης μειώνεται, αφού το υλικό γίνεται περισσότερο ψαθυρό και δύσκαμπτο. Η αύξηση της δυσκαμψίας καθώς η θερμοκρασία μειώνεται, γίνεται αντιληπτή με τη βοήθεια της Εικόνας 35, που παρουσιάζει την μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας:



Εικόνα 35: Μεταβολή του Μέτρου Ελαστικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας για το υλικό ΡΕΕΚ

[42]

3.0 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας σπουδαστικής εργασίας ήταν η διερεύνηση των ιδιοτήτων σύνθετων και πολυμερών υλικών σε κρυογενικές θερμοκρασίες. Ακόμα, πραγματοποιήθηκε έρευνα στις πειραματικές δοκιμές που διεξάγονται σε όλο τον κόσμο σε αυτές τις θερμοκρασίες και προβλήθηκαν οι διατάξεις και οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση αυτών των δοκιμών. Από αυτή την βιβλιογραφική ανασκόπηση προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

- Καθώς τα σύνθετα και τα πολυμερή υλικά ψύχονται προς τις κρυογενικές θερμοκρασίες, τείνουν να γίνονται πιο σκληρά, δύσκαμπτα και ψαθυρά προς τα εξωτερικά φορτία. Έτσι παρατηρείται αύξηση τόσο της εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής, όσο και του Μέτρου Ελαστικότητας των υλικών αυτών με τη μείωση της θερμοκρασίας, ενώ ταυτόχρονα εμφανής είναι η μείωση της παραμόρφωσης θραύσης τους, καθώς η θερμοκρασία μειώνεται.
- Η αντοχή σε διάτμηση και για τις δυο κατηγορίες υλικών αυξάνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, καθώς το πολυμερές, που αποτελεί τη μήτρα στα σύνθετα υλικά, γίνεται πιο σκληρό και άκαμπτο.
- Η δυσκαμψία και ψαθυρότητα των πολυμερών υλικών έχει αρνητική επίδραση στην αντοχή σε κρούση, ενώ στη περίπτωση των σύνθετων υλικών η μείωση αυτή είναι μικρότερη λόγω της συμβολής των ινών.

- Για πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού και θλίψης, οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη των χαμηλών θερμοκρασιών είναι κυρίως δύο:
 ο θάλαμος εξάτμισης κρυογενικού υγρού και η βύθιση των δοκιμίων και των αρπαγών μέσα σε δεξαμενή με κρυογενικό υγρό.
- Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται το υγρό άζωτο, το υγρό υδρογόνο και το υγρό ήλιο, ανάλογα την επιθυμητή θερμοκρασία που διεξάγονται οι δοκιμές.
- Μια καινοτόμα πειραματική διάταξη που δοκιμάζεται, εμπεριέχει χρήση εναλλακτών θερμότητας για την ψύξη του δοκιμίου, με την μεταφορά θερμότητας με αγωγή να αποτελεί το βασικό της πλεονέκτημα σε αντίθεση με τις ήδη υπάρχουσες, αφού πραγματοποιείται ομοιόμορφη ψύξη του δοκιμίου.

4.0 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] W. D. Callister και D. G. Rethwisch, Επισήμη και τεχνολογία των υλικών,
 Εκδόσεις Τζιόλα.
- [2] X. Chu, Z. Wu, R. Huang, Y. Zhou και L. Li, «Mechanical and thermal expansion properties of glass fibers reinforced PEEK composites at cryogenic temperatures,» *Cryogenics*, pp. 84-88, February 2010.
- [3] F. Li, Y. Hua, C.-B. Qu, H.-M. Xiao και S.-Y. Fu, «Greatly enhanced cryogenic mechanical properties of short carbon fiber/polyethersulfone composites by graphene oxide coating,» *Composites: Part A*, pp. 47-55, 2016.
- [4] Z.-K. Chen, J.-P. Yang, Q.-Q. Ni, S.-Y. Fu και Y.-G. Huang, «Reinforcement of epoxy resins with multi-walled carbon nanotubes for enhancing cryogenic mechanical properties,» *Polymer*, 2009.
- [5] M. A. Torabizadeh, «Tensile, compressive and shear properties of unidirectional glass/epoxy composites subjected to mechanical loading and low temperature services,» *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, pp. 299-309, August 2013.

- [6] S. Kumagai, Y. Shindo, K. Horiguchi και T. Takeda, «Mechanical characterization of CFRP woven laminates between room temperature and 4 K,» *International Journal Series*, 2003.
- [7] S. Islam, E. Melendez-Soto, A. Castellanos και P. Prabhakar, «Investigation of woven composites as potential cryogenic tank materials,» *Cryogenics*, pp. 82-89, 2015.
- [8] Y. Shindo, A. Inamoto και F. Narita, «Characterization of Mode I fatigue crack growth in GFRP woven laminates at low temperatures,» *Acta Materialia*, 2005.
- [9] Y. Shindo, A. Inamoto, F. Narita και K. Horiguchi, «Mode I fatigue delamination growth in GFRP woven laminates at low temperatures,» *Engineering Fracture Mechanics*, 2006.
- [10] J. Ju, R. J. Morgan, T. S. Creasy και E. E. Shin, «Transverse Cracking of M40J/PMR-II-50 Composites under Thermal–Mechanical Loading: Part I – Characterization of Main and Interaction Effects using Statistical Design of Experiments,» *Journal of composites materials*, 2007.
- [11] J. Ju και R. J. Morgan, «Characterization of Microcrack Development in BMI-Carbon Fiber Composite under Stress and Thermal Cycling,» Journal of composites materials, 2004.
- [12] J. F. Timmerman, M. S. Tillman, B. S. Hayes και J. C. Seferis, «Matrix and fiber influences on the cryogenic microcracking of carbon fiber/epoxy composites,» *Composites*, pp. 323-329, 2002.

- [13] D. M. Grogan, S. B. Leen, C. A. Semprimoschnig και C. M. 'O Bradaigh, «Damage characterisation of cryogenically cycled carbon fibre/PEEK laminates,» *Composites*, pp. 237-250, 2014.
- [14] Q. Yu, P. Chen, Y. Gao, J. Mu, Y. Chen, C. Lu και D. Liu, «Effects of vacuum thermal cycling on mechanical and physical properties of high performance carbon/bismaleimide composite,» *Materials Chemistry and Physics*, pp. 1046-1053, 2011.
- [15] H.-l. Ma, Z. Jia, K.-t. Lau, J. Leng και D. Hui, «Impact properties of glass fiber/epoxy composites at cryogenic environment,» *Composites*, pp. 210-217, 2016.
- [16] T. Gomez-del Rio, R. Zaera, E. Barbero και C. Navarro, «Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature,» *Composites*, pp. 41-50, 2005.
- [17] R. Reed και M. Golda, «Cryogenic properties of unidirectional composites,» Cryogenic Materials, 1994.
- [18] Z. Sapi και R. Butler, «Properties of cryogenic and low temperature composite materials – A review,» *Cryogenics*, 2020.
- [19] Y. Huang, P. Frings και E. Hennes, «Mechanical properties of Zylon/epoxy composite,» *Composites*, pp. 109-115, 2002.
- [20] M. J. Robinson, «Determination of Allowable Hydrogen Permeation Rates for Launch Vehicle Propellant Tanks,» *Journal of spacecraft and rockets*, 2008.
- [21] H. Kumazawa, T. Aoki, T. Ishikawa και I. Suzuki, «Modeling of propellant leakage through matrix cracks in composite laminates,» *AIAA*, 2001.
- [22] Y. Shindo και S.-Y. Fu, «Testing: Methods for Strength Characterization of Woven Fabric Composites at Cryogenic Temperatures,» Wiley Encyclopedia of Composites, 2012.
- [23] M.-G. Kim, S.-G. Kang, C.-G. Kim και C.-W. Kong, «Tensile response of graphite/epoxy composites at low temperatures,» *Composite Structures*, pp. 84-89, 2007.
- [24] Q. Feng, J. Yang, Y. Liu, H. Xiao και S. Fu, «Simultaneously enhanced cryogenic tensile strength, ductility and impact resistance of epoxy resins by polyethylene glycol,» *JMST*, pp. 90-96, 2014.
- [25] B. Yang, Z. Yue, X. Geng, P. Wang, J. Gan και B. Liao, «Effects of space environment temperature on the mechanical properties of carbon fiber/bismaleimide composites laminates,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2017.
- [26] J.-P. Yang, G. Yang, G. Xu και S.-Y. Fu, «Cryogenic mechanical behaviors of MMT/epoxy nanocomposites,» *Composites Science and Technology*, pp. 2934-2940, 2007.
- [27] Y. Shindo, S. Takano, F. Narita και K. Horiguchi, «Tensile and damage behavior of plain weave glass/epoxy composites at cryogenic temperatures,» *Fusion Engineering and Design*, pp. 2479-2483, 2006.

- [28] J. Liu, W. Qiao, J. Liu, D. Xie, Z. Zhou, L. Ma και L. Wu, «The compressive responses of glass fiber composite pyramidal truss cores sandwich panel at different temperatures,» *Composites*, pp. 93-100, 2015.
- [29] H. Wang, B. Sun και B. Gu, «Coupling effect of temperature and braided angle on compressive behaviors of 3D braided carbon–epoxy composite at low temperature,» *Journal of Composites Materials*, pp. 1-17, 2016.
- [30] D.-s. Li, C.-q. Zhao, T.-q. Ge, L. Jiang, C.-j. Huang και N. Jiang,
 «Experimental investigation on the compression properties and failure mechanism of
 3D braided composites at room and liquid nitrogen temperature,» *Composites*, pp. 647-659, 2014.
- [31] E. Tsolakis, C. Kalligeros, P. Tzouganakis, D. Koulocheris και V. Spitas, «A novel experimental setup for the determination of the thermal expansion coefficient of concrete at cryogenic temperatures,» *Construction and Building Materials*, 2021.
- [32] D.-s. Li, C.-q. Zhao, N. Jiang και L. Jiang, «Experimental study on the charpy impact failure of 3D integrated woven spacer composite at room and liquid nitrogen temperature,» *Fibers and Polymers*, pp. 875-882, 2015.
- [33] R. Kim, W. Lee, J. Camping και K. Bowman, «Impact Reaction of Composites in Liquid Oxygen,» *Materials in Cryogenic Environments II*, 2012.
- [34] J. Lopez-Puente, R. Zaera και C. Navarro, «The effect of low temperatures on the intermediate and high velocity impact response of CFRPs,» *Composites*, pp. 559-566, 2002.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

- [35] S. Choudhury, B. Ramagiri, B. K. Shah, C. S. Yerramalli και A. Guha, «Ballistic response of woven glass fabric-epoxy composites at low temperatures: Experimental investigation,» *Composites*, 2022.
- [36] P. Coronado, A. Arguelles, J. Vina, V. Mollon και I. Vina, «Influence of temperature on a carbon–fibre epoxy composite subjected to static and fatigue loading under mode-I delamination,» *International Journal of Solids and Structures*, pp. 2934-2940, 2012.
- [37] M. S. Oliver και S. W. Johnson, «Effect of Temperature on Mode I Interlaminar Fracture of IM7/PETI-5 and IM7/977-2 Laminates,» Journal of composite materials, pp. 1213-1219, 2009.
- [38] Y. Shindo, T. Sato, F. Narita και K. Sanada, «Mode II Interlaminar Fracture and Damage Evaluation of GFRP Woven Laminates at Cryogenic Temperatures using the 4ENF Specimen,» *Journal of Composite Materials*, 2008.
- [39] M. Hojo, S. Matsuda, B. Fiedler, T. Kawada, K. Moriya, S. Ochiai και H. Aoyama, «Mode I and II delamination fatigue crack growth behavior of alumina fiber/epoxy laminates in liquid nitrogen,» *International Journal of Fatigue*, pp. 109-118, 2002.
- [40] K. Hechtel, «Design considerations for the use of plastic materials in cryogenic environments,» *Curbell Plastics*, 2014.
- [41] S. Kalia και S.-Y. Fu, Polymers at Cryogenic Temperatures, Springer, 2013.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών

[42] P. J. Rae, E. N. Brown και E. B. Orler, «The mechanical properties of poly(ether-ether-ketone) (PEEK) with emphasis on the large compressive strain response,» *Polymer*, pp. 598-615, 2007.