



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΥΛΙΚΩΝ & ΕΜΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ, ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ

**ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ
ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ανάπτυξη νόνο-ενισχυμένων Tensylon πάνελ για αντιβαλλιστική προστασία

ΑΥΓΟΥΣΤΙΝΟΣ ΚΙΤΡΟΜΗΛΙΔΗΣ

1056666

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΒΑΣΙΛΗΣ ΚΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΧΡΙΣΤΙΝΑ ΚΩΣΤΑΓΙΑΝΝΑΚΟΠΟΥΛΟΥ, ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ**

ΠΑΤΡΑ, Οκτώβριος/2022

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	Ακρυλονιτριλίου βουταδιενίου στυρολίου
AFP	Automate Fiber Placement	Αυτοματοποιημένη τοποθέτηση ινών
AP	Armor Piercing	Διάτρηση πανοπλίας
ASTM	American Society for Testing Materials	Αμερικανικός σύλλογος δοκιμής υλικών
ATL	Automate Tape Laying	Αυτοματοποιημένη τοποθέτηση ταινίας
ATP	Automate Tape Placement	Αυτοματοποιημένη τοποθέτηση ταινίας
BMC	Bulk Molding Compound	Υλικό χυτεύσεως
CCVD	Catalytic Chemical Vapor Deposition	Καταλυτική Χημική Εναπόθεση Ατμών
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer	Πολυμερές ενισχυμένο με ίνες άνθρακα
CMC	Ceramic Matrix Composite	Σύνθετο με κεραμική μήτρα
CNT	Carbon Nanotube	Νανοσωλήνας άνθρακα
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency	Οργανισμός Προηγμένων Ερευνητικών Προγραμμάτων Άμυνας
DWCNT	Double Walled Carbon Nanotube	Νανοσωλήνας άνθρακα διπλού τοιχώματος
FMJ	Full Metal Jacket	Βλήμα καλυμμένα με περίβλημα χαλκού
FMJ RN	Full Metal Jacket Round Nose	Βλήμα καλυμμένα με περίβλημα χαλκού με σφαιρικό σχήμα
FN	Flat Nose	Επίπεδο σχήμα

FRP	Fiber Reinforced Polymer	Πολυμερές ενισχυμένο με ίνες
GNP	Graphene Nanoplatelet	Νανοαιμοπετάλια γραφενίου
GO	Graphene Oxide	Οξείδιο γραφενίου
HDPE	High Density Polyethylene	Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας
LDPE	Low Density Polyethylene	Πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας
LLDPE	Linear Low-Density Polyethylene	Γραμμικό πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας
MDPE	Medium Density Polyethylene	Πολυαιθυλένιο μέσης πυκνότητας
MJ SP	Magnum Jacket Soft Point	Βλήμα μάγκνουμ μαλακού σημείου
MMC	Metal Matrix Composite	Σύνθετο με μεταλλική μήτρα
MRI	Magnetic Resonance Imaging	Απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού
MSJ HP	Magnum Semi Jacket Hollow Point	Βλήμα μάγκνουμ ημικαλυμμένο με μεγάλο άνοιγμα στο μπροστινό μέρος
MWCNT	Multi Walled Carbon Nanotube	Νανοσωλήνας άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων
NIJ	National Institute of Justice	Εθνικό Ινστιτούτο Δικαιοσύνης
NP	Nanoparticle	Νανοσωματίδιο
OEM	Original Equipment Manufacturer	Κατασκευαστής πρωτότυπου εξοπλισμού
PBP	Personal Ballistic Protection	Ατομική Βαλλιστική Προστασία
PE	Polyethylene	Πολυαιθυλένιο
PEG	Polyethylene Glycol	Πολυαιθυλενογλυκόλη
PET	Polyethylene Terephthalate	Τερεφθαλικό πολυαιθυλένιο
PMC	Polymer Matrix Composite	Σύνθετο με πολυμερική μήτρα

PNC	Polymer Nanocomposite	Νανοσύνθετο πολυμερές
PP	Polypropylene	Πολυπροπυλένιο
PVC	Poly Vinyl Chloride	Πολυβινυλοχλωρίδιο
RADAR	Radio Detection And Ranging	Ραδιοανίχνευση και εμβέλεια
RIM	Reaction Injecting Moulding	Χύτευση με έγχυση αντίδρασης
RTM	Resin Transfer Moulding	Χύτευση μεταφοράς ρητίνης
SHC	Self-Healing Composite	Σύνθετο Αυτοθεραπευόμενο
SMC	Sheet Moulding Compound	Σύνθεση Χυτεύσεως Φύλλων
SNP	Silica Nanoparticles	Νανοσωματίδια πυριτίου
SRC	Self-Reinforced Composite	Αυτοενισχυμένο Σύνθετο
STF	Shear Thickening Fluid	Διατμητικό υγρό πάχυνσης
SWCNT	Single Walled Carbon Nanotube	Νανοσωλήνας άνθρακα μονού τοιχώματος
TEM	Transmission Electron Microscopy	Ηλεκτρονική μικροσκοπία μετάδοσης
UHF	Ultra-High Frequency	Πάρα πολύ υψηλή συχνότητα
UHMWPE	Ultra-High Molecular Weight Polyethylene	Πολυαιθυλένιο εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους
VHF	Very High Frequency	Πολύ υψηλή συχνότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανακάλυψη καινοτόμων υλικών και διαδικασιών στην ναυοκλίμακα, έχει δώσει τεράστιες ευκαιρίες για την ανάπτυξη νέων νανοσύνθετων υλικών σε όλους τους τομείς που θα βοηθήσουν στην αναβάθμιση της ζωής μας. Οι εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στον τομέα της αμυντικής βιομηχανίας και ειδικότερα για την βελτίωση της προσωπικής αντιβαλλιστικής προστασίας έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον. Τα τελευταία χρόνια γινόμαστε μάρτυρες μιας πιο εντατικής διαδικασίας για την βελτίωση και την ανάπτυξη πιο αποδοτικών και ελαφριών συστημάτων προσωπικής αντιβαλλιστικής προστασίας. Η βάση για αυτή την εξέλιξη των αντιβαλλιστικών γιλέκων είναι τα σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα και συγκεκριμένα το Tensylon. Ειδικότερα τα πολυμερή που βρίσκουν εφαρμογή σε τέτοιες ιδιότητες λόγω των ιδιοτήτων τους είναι τα θερμοπλαστικά. Το Tensylon είναι πολυαιθυλένιο με εξαιρετικά υψηλό μοριακό βάρος (UHMWPE) το οποίο έχει επιδείξει της ανώτερης ποιότητας αντιβαλλιστικές ιδιότητες του από οποιοδήποτε άλλο υλικό. Η ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας αλλά και η δημιουργία νανοσύνθετων υλικών με πολυμερική μήτρα έχει δώσει ελπίδες για την περαιτέρω βελτίωση των αντιβαλλιστικών πλακών για προσωπική προστασία. Υλικά όπως το γραφένιο, οι νανοσωλήνες άνθρακα και γενικά οποιαδήποτε άλλο υλικό σε ναυοκλίμακα βρίσκονται στο επίκεντρο για τέτοιου είδους έρευνες στην αμυντική βιομηχανία. Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την αναζήτηση ερευνών και την μελετών για την ανάπτυξη νανοσύνθετων αντιβαλλιστικών πλακών με σκοπό την βελτίωση της αντιβαλλιστικής τους απόδοσης.

Τα σύνθετα υλικά είναι ένας συνδυασμός τουλάχιστον δύο υλικών (συστατικών) με διαφορετικές ιδιότητες. Αποτέλεσμα της σύνθεσης είναι η δημιουργία ενός υλικού που παρουσιάζει συνολικά καλύτερη μηχανική συμπεριφορά σε σχέση με τη συμπεριφορά κάθε υλικού ξεχωριστά. Ένα από τα συστατικά ενός σύνθετου χαρακτηρίζεται ως ενισχυτικό στοιχείο και προσδίδει βελτιωμένες κυρίως μηχανικές ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό ονομάζεται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων του ενισχυτικού στοιχείου. Τα σύνθετα υλικά έχουν

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής,

μοναδικά πλεονεκτήματα έναντι των μονολιθικών υλικών. Στα σύνθετα υλικά δίνεται η δυνατότητα για πλήρη τροποποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους μέσω της κατάλληλης επιλογής των δύο συστατικών τους και της γεωμετρίας της ενίσχυσης τους, για αυτό το λόγο έχουν μια μεγάλη γκάμα εφαρμογών. Σε αυτή την περίπτωση ενδιαφερόμαστε περισσότερο για τα σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα και κυρίως τα θερμοπλαστικά.

Τα θερμοπλαστικά αντιπροσωπεύουν περίπου το 90% όλων των πολυμερών που παράγονται παγκοσμίως. Τα θερμοπλαστικά χαρακτηρίζονται γενικά από υψηλότερη αντοχή σε κρούση, ευκολότερη επεξεργασία και ανώτερη προσαρμοστικότητα σε πολύπλοκα σχέδια καλουπιών από τα θερμοσκληρυνόμενα. Πλέον, πολύ συχνά εξαρτήματα από μέταλλα αντικαθίστανται συνήθως από θερμοπλαστικά και θερμοπλαστικά που περιέχουν σύνθετα και νανοσύνθετα.

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο πλαστικό στον κόσμο είναι το πολυαιθυλένιο. Είναι στην πραγματικότητα μια οικογένεια υλικών που έρχονται με μια σειρά από πυκνότητες και μοριακές δομές, το καθένα με τις δικές του εφαρμογές. Το κύριο ενδιαφέρον μας είναι η βαλλιστική απόδοση του νάνο-ενισχυμένου υψηλού μοριακού βάρους πολυαιθυλένιο (UHMWPE). Το UHMWPE είναι ένα μοναδικό θερμοπλαστικό πολυμερές με εξαιρετικές φυσικές και μηχανικές επιδόσεις, όπως καλή αντοχή στη φθορά και διάβρωση, χαμηλό συντελεστή τριβής, υψηλή αντοχή σε κρούση κ.α. Λόγω αυτών των εξαιρετικών ιδιοτήτων, το UHMWPE έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε πολλές εφαρμογές, όπως εξορύξεις, μεταφορές, στρατιωτικές βιομηχανίες, βιοϊατρική και αθλητισμό. Το UHMWPE είναι ένα ειδικό είδος πολυαιθυλενίου. Γενικά, το μοριακό βάρος του πολυμερούς έχει σημαντικές επιπτώσεις στη συμπεκνωμένη δομή, τη χημική του απόδοση, τις μηχανικές ιδιότητες και τη δυνατότητα επεξεργασίας του. Είναι προφανές ότι τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά του UHMWPE επωφελούνται σε μεγάλο βαθμό από το εξαιρετικά υψηλό μοριακό του βάρος. Συχνά ορισμένα πρόσθετα ή πληρωτικά προστίθενται στο θερμοπλαστικό για να βελτιώσουν συγκεκριμένες ιδιότητες όπως αντοχή σε κρούση, θερμική ή χημική σταθερότητα, αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία κ.λπ. Το πιο γνωστό υλικό ενίσχυσης μέχρι σήμερα, για βαλλιστική και ανθεκτική σε μαχαριές θωράκιση σώματος είναι το Kevlar. Το Kevlar είναι μια ανθεκτική στη θερμότητα, συνθετική, ελαφριά ίνα που προσφέρει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, βελτιωμένη προστασία και απόδοση σε μια σειρά βιομηχανιών και εφαρμογών. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει πολλές νέες έρευνες για την βελτίωση των πληρωτικών αλλά και την

ανάπτυξη των σύνθετων υλικών, με τη χρήση της νανοτεχνολογίας. Οι ιδιότητες της ύλης στη νανοκλίμακα είναι διαφορετικές από αυτές σε μεγαλύτερη κλίμακα. Όταν οι διαστάσεις ενός υλικού μειώνονται από ένα μεγάλο μέγεθος, οι ιδιότητες παραμένουν οι ίδιες στην αρχή, μετά συμβαίνουν μικρές αλλαγές. Τέλος, όταν το μέγεθος πέσει κάτω από τα 100 νανόμετρα, μπορεί να προκύψουν δραματικές αλλαγές στις ιδιότητες.

Η ανακάλυψη νέων υλικών, διαδικασιών και φαινομένων σε νανοκλίμακα και η ανάπτυξη νέων πειραματικών και θεωρητικών τεχνικών για έρευνα στα τέλη του 20ού αιώνα παρέχουν νέες ευκαιρίες για την ανάπτυξη καινοτόμων νανοσυστημάτων και νανοϋλικών. Ένας από τους πιο δημοφιλείς τομείς της νανοτεχνολογίας για την τρέχουσα έρευνα και ανάπτυξη είναι τα πολυμερή νανοσύνθετα υλικά (PNCs). Τα πολυμερή νανοσύνθετα είναι πολυμερή υλικά ενισχυμένα με διάφορους τύπους νανοϋλικών. Τις τελευταίες δεκαετίες, έχει παρατηρηθεί ότι η προσθήκη χαμηλής περιεκτικότητας αυτών των νανοπληρωτικών στο πολυμερές μπορεί να οδηγήσει σε βελτιώσεις στις μηχανικές και θερμικές ιδιότητες χωρίς να επηρεάζεται η ικανότητα επεξεργασίας τους. Η ενισχυτική επίδραση του πληρωτικού αποδίδεται σε διάφορους παράγοντες, όπως ιδιότητες της πολυμερούς μήτρας, φύση και τύπος νανοπληρωτικού, συγκέντρωση πολυμερούς και πληρωτικού, αναλογία σωματιδίων, μέγεθος σωματιδίων, προσανατολισμός σωματιδίων και κατανομή σωματιδίων. Διάφοροι τύποι νανοσωματιδίων, όπως νανοσωλήνες άνθρακα, γραφένιο, νανοάργιοι και νανοσωματίδια οξειδίου έχουν χρησιμοποιηθεί για τη λήψη νανοσύνθετων υλικών με διαφορετικά πολυμερή. Ειδικότερα, οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν υψηλή αντοχή, μικρό βάρος, εξαιρετική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και επομένως έχουν μεγάλες πιθανές εφαρμογές στην κατασκευή αντιβαλλιστικών υλικών και βρίσκονται στο επίκεντρο των τωρινών ερευνών. Έχουν προταθεί διάφορες εφαρμογές των νανοσωλήνων άνθρακα ως ενισχύσεων στη βιομηχανία σύνθετων πολυμερών λόγω των αξιοσημείωτων χημικών, μηχανικών και ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων. Επιπλέον, πολλές έρευνες τελευταία έχουν αποδείξει την αποτελεσματική χρήση νανοσωλήνων άνθρακα για εφαρμογές προσωπικής αντιβαλλιστικής προστασίας. Τα τελευταία χρόνια υπήρξε μια τεράστια στροφή στον σχεδιασμό βαλλιστικών προστατευτικών υλικών. Παρατηρήθηκε τεράστια βελτίωση μέσω των εξελίξεων στην τεχνολογία κατασκευής ινών υψηλής απόδοσης και οι διαδικασίες παραγωγής επέτρεψαν την παραγωγή ελαφριάς θωράκισης

σώματος με βελτιωμένα επίπεδα προστασίας. Η βαλλιστική προστασία γνώρισε τεράστια αναγνώριση με την εισαγωγή ελαφρού βάρους και πιο αποτελεσματικών συστημάτων θωράκισης.

Στη παρούσα Σπουδαστική Εργασία ασχοληθήκαμε κυρίως με τη βελτίωση της αντιβαλλιστικής συμπεριφοράς των μη εύκαμπτων πάνελ θωράκισης των ελαφριών θωράκων προστασίας σώματος για στρατιωτικές και πολιτικές-εμπορικές εφαρμογές. Η προσωπική βαλλιστική προστασία είναι ένα στοιχείο θωράκισης σώματος που βοηθά στην απορρόφηση της πρόσκρουσης και στη μείωση ή διακοπή της διείσδυσης σε μέρη του ανθρώπινου σώματος από βλήματα που εκτοξεύονται με πυροβόλα όπλα. Τα περισσότερα αντιβαλλιστικά υλικά που χρησιμοποιούνται σε αλεξίσφαιρα γιλέκα είναι κατασκευασμένα από ίνες Kevlar, Twaron ή Dyneema, οι οποίες εμποδίζουν τις σφαίρες να διεισδύσουν στην επιφάνεια εξαπλώνοντας και απορροφώντας την πρόσκρουση της δύναμης της σφαίρας. Αυτά τα προϊόντα ήταν ένα σημαντικό βήμα προς τα εμπρός, αλλά συχνά εξακολουθούν να έχουν ως αποτέλεσμα ο στόχος να υποφέρει από τραύμα αμβλείας δύναμης, σοβαρούς μώλωπες ή βλάβες σε ζωτικά όργανα. Μία από τις πιο ελπιδοφόρες πρόσφατες εξελίξεις στα πολυμερή υλικά για προστατευτικά ενδύματα είναι το Tensylon πολυαιθυλένιο υψηλού μοριακού βάρους (UHMWPE) της Dupont.

Tensylon είναι μια πολυστρωματική ταινία διπλής κατεύθυνσης υψηλής αντοχής για εφαρμογές σκληρής θωράκισης. Το Tensylon, παρέχει μια μοναδική ισορροπία βαλλιστικών και μηχανικών ιδιοτήτων για λύσεις θωράκισης και μπορεί να διευκολύνει την κατασκευή υψηλών επιδόσεων, μεγάλων μεγεθών και σύνθετων βαλλιστικών προστατευτικών ειδών. Το Tensylon παρέχει ανώτερη βαλλιστική προστασία και μείωση του τραύματος, μηχανική αντοχή, μακράς διάρκειας ανθεκτικότητα και ευελιξία επεξεργασίας και είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για επένδυση οχημάτων, με κεραμική βάση, ασπίδα, κράνος και άλλες εφαρμογές σκληρής θωράκισης.

Σκοπός της παρούσας Σπουδαστικής Εργασίας είναι ενίσχυση της αντιβαλλιστικής συμπεριφοράς των μη εύκαμπτων πάνελ από Tensylon με την χρήση νανοϋλικών. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε επιφανειακή τροποποίηση των υφασμάτων Tensylon με τη χρήση σωματιδίων από νανοενισχυμένα θερμοπλαστικά υλικά. Αναπτύχθηκαν 2 ειδών πολυστρωτες δομές των 3 στρώσεων, το ένα χρησιμοποιώντας μόνο το βασικό υλικό Tensylon (NEAT) και το άλλο με ενσωματωμένη σκόνη ενίσχυσης πολυαμιδίου (GRILTEX 1516) νάνο-τροποποιημένη με 10%wt

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών – Τομέας Εφαρμοσμένης Μηχανικής,

– νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων(MWCNTs). Η ποσότητα του νάνο-ενισχυμένου υλικού που τοποθετήθηκε σε κάθε στρώση Tensylon είναι 15 γραμμάρια ανά τετραγωνικό μέτρο(gsm). Στη συνέχεια ακολούθησε η παρασκευαστική διαδικασία αλλά και η διεξαγωγή των κρούσεων υψηλών ταχυτήτων για τον έλεγχο και την αξιολόγηση των δύο αναπτυχθέντων υλικών ως προς την αντιβαλλιστική τους συμπεριφορά. Μετά το πέρας των πειραμάτων χρησιμοποιώντας τις ταχύτητες πριν και μετά τη κρούση, υπολογίσαμε την ενέργεια εισόδου και εξόδου. Έτσι, με βάση τα παραπάνω δεδομένα υπολογίσαμε την ενέργεια που απορροφήθηκε κατά την διάρκεια της κρούσης. Ύστερα από την διεξαγωγή των απαιτούμενων δοκιμών εξήχθησαν τα απαραίτητα αποτελέσματα, με βάση τα οποία διαπιστώθηκε ότι η προσπάθεια ένταξης GRILTEX 1516 με νανοϋλικά(νανοσωλήνες άνθρακα) στο βασικό υλικό Tensylon, δεν οδήγησε στα επιθυμητά αποτελέσματα. Το NEAT δοκίμιο που αποτελείται μόνο από το βασικό υλικό(Tensylon) απορρόφησε περισσότερη ενέργεια από ότι το επιφανειακά τροποποιημένο δοκίμιο. Έτσι, παρά την ενίσχυση αλλά και την αύξηση της μάζας της νάνο-ενισχυμένης δομής για 1.4% η απορροφημένη ενέργεια είχε μειωθεί κατά 4%.

