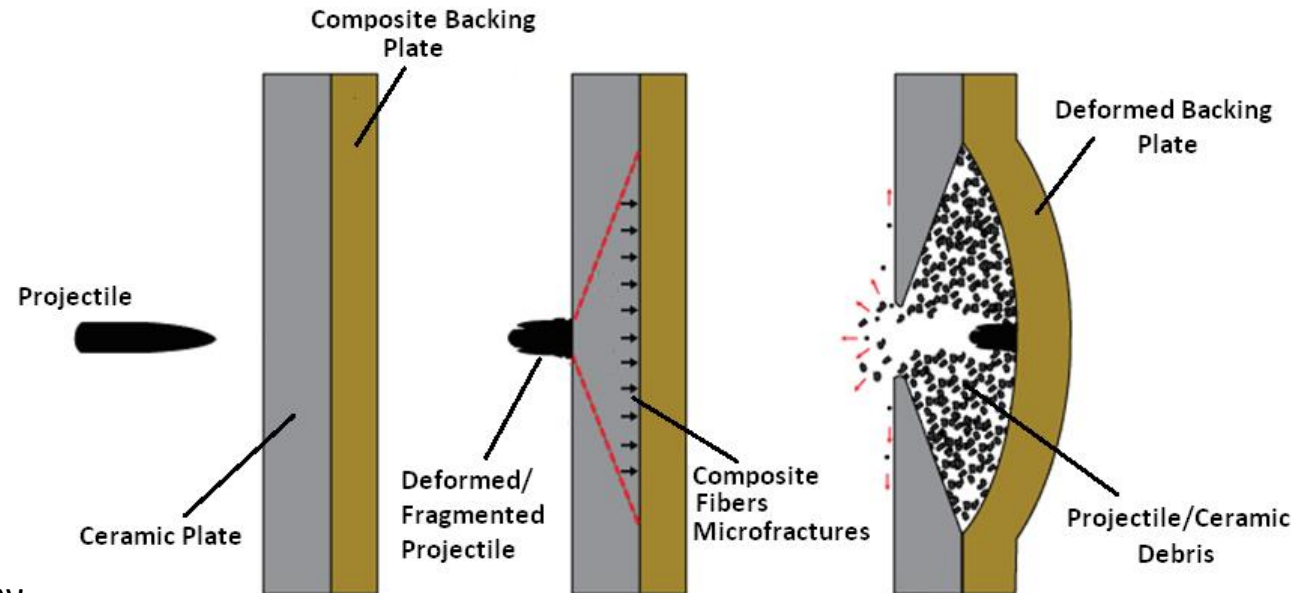


ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ U.H.M.W.PE ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ (ΑΝΤΙ)ΒΑΛΛΙΣΤΙΚΗΣ ΤΟΥΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΕ ΥΒΡΙΔΙΚΕΣ ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΕΡΑΜΙΚΟΥ- ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΙΝΩΝ U.H.M.W.PE.



Περιεχόμενα παρουσίασης :

1. Σύνθετα Υλικά-Γενικά Στοιχεία.
2. Κατηγοριοποίηση Σύνθετων Υλικών.
3. Σύνθετα Υλικά και Θωράκιση.
4. Απόδοση μιας θωράκισης – Back Face Signature (BFS)
5. Σύνθεση υβριδικών βαλλιστικών δοκιμίων
6. Σχηματισμός τελικής βαλλιστικής θωράκισης
7. Θραυστομηχανική ανάλυση και βάθος διείσδυσης (DOP)
8. Στάδια διείσδυσης διατρητικών βλημάτων
9. Βαλλιστικές δοκιμές
10. Μηχανικές δοκιμές
11. Γενικά συμπεράσματα
12. Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

Γεωργίου Βαρβάρα

Τομέας : Κατεργασιών

Επιβλέπων : Δρ. Δ. Μανωλάκος,
Καθηγητής ΕΜΠ

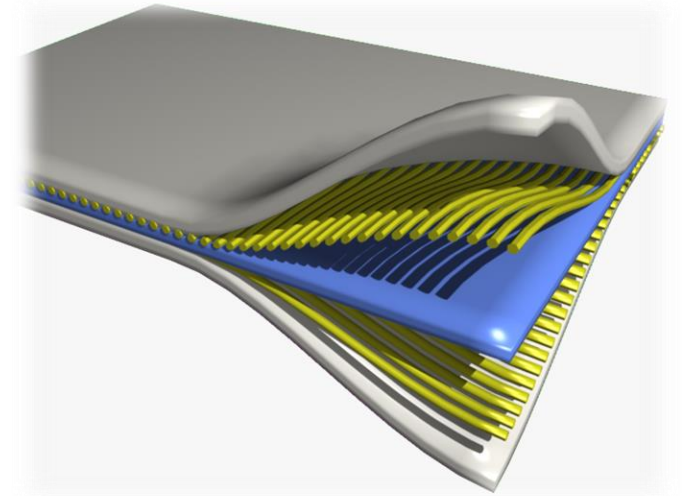
Αθήνα, Ιούλιος 2023



Σύνθετα Υλικά-Γενικά Στοιχεία

Ορισμός : Ως σύνθετα υλικά ορίζονται δομικά υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα συστατικά συνδυασμένα σε μακροσκοπικό επίπεδο και όχι σε μορφή μείγματος (όπως για παράδειγμα τα κράματα).

- Το ένα συστατικό, το οποίο καλείται και **ενισχυτική (ή δεύτερη) φάση** (reinforcing phase), είναι ενσωματωμένο (σε «διάσπαρτη» μορφή) στο **δεύτερο συστατικό**, που ονομάζεται **μήτρα** (matrix) ή και **συνεχής φάση** (continuous phase).
- Η **ενισχυτική φάση** μπορεί να βρίσκεται στη **μορφή σωματιδίων** (μικρών σφαιρών κλπ.), **φύλλων, ινών** (κυλινδρικής συνήθως διατομής), ενώ το **υλικό της μήτρας είναι πάντοτε συνεχές**. Συνολική εξαίρεση, όσον αφορά την τριδιάστατη συνέχεια των δύο φάσεων, αποτελούν τα διαστρωματωμένα σύνθετα υλικά
- Το **οπλισμένο σκυρόδεμα** είναι ένα **χαρακτηριστικό παράδειγμα** παραδοσιακού σύνθετου υλικού, όπου τη συνεχή φάση (μήτρα) αποτελεί το μίγμα του τσιμέντου, της άμμου και του νερού ενώ την ενισχυτική φάση (σε μορφή «ινών») αποτελούν οι χαλύβδινες ράβδοι αλλά. Ως ενισχυτικό κόκκου, στη μήτρα, μπορεί να θεωρηθεί το χαλίκι-γαρμπίλι.



Διαστρωματωμένο σύνθετο υλικό.



Οπλισμένο σκυρόδεμα.

- Τα σύνθετα υπακούουν με αρκετή ακρίβεια στον **κανόνα των μειγμάτων** (γραμμικότητα ιδιοτήτων) : $\rho_c = \rho_m v_m + \rho_f (1 - v_m) \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ όπου,
 - ρ_c : η πυκνότητα του συνθέτου [kg/m³]
 - ρ_m : η πυκνότητα της μήτρας [kg/m³]
 - v_m : το κλάσμα όγκου της μήτρας στο σύνθετο και
 - ρ_f : η πυκνότητα της των ινών [kg/m³]

Κατηγοριοποίηση Σύνθετων Υλικών

Η κατηγοριοποίηση των συνθέτων γίνεται με 5 βασικά κριτήρια που αφορούν πότε την μήτρα, πότε την ενίσχυση και άλλοτε και τις δύο φάσεις ως :

➤ **Κατηγοριοποίηση συνθέτων με βάση τα συστατικά τους**

➤ **Με βάση την κλίμακα των περιοχών του συνθέτου σε :**

- Μακροσύνθετα : όπου η «μικρή» διάσταση της δεύτερης φάσης $\geq 1-10 \mu\text{m}$.
- Μικροσύνθετα : όπου η «μικρή» διάσταση της δεύτερης φάσης = 10 nm έως 1 μm ή και 500 nm.
- Νανοσύνθετα : όπου η διάσταση «μικρή» της δεύτερης φάσης $\leq 1 \text{ nm}$ έως 10 nm ή και 100 nm.

➤ **Με βάση τα γεωμετρικά/μορφολογικά χαρακτηριστικά του συνθέτου σε :**

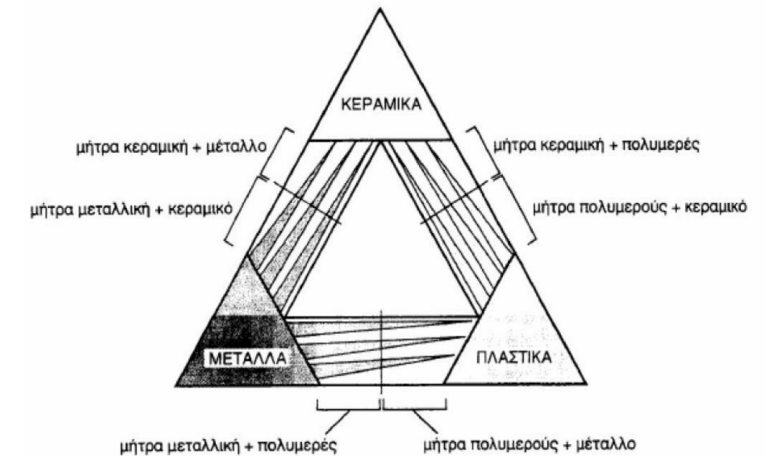
- Τριδιάστατα Σύνθετα
- Διαστρωματωμένα Σύνθετα.

➤ **Με βάση τη σύσταση των φάσεων σε :**

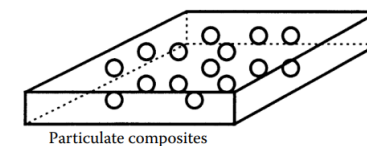
- Ημικρυσταλλικά πολυμερή.
- Σύνθετα Υλικά Άνθρακα-Άνθρακα.
- Κεραμικά Ομοσύνθετα.

➤ **Με βάση το υλικό της μήτρας σε :**

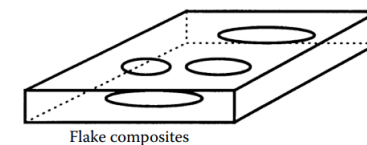
- Μεταλλικής μήτρας (MMC)
- Κεραμικής μήτρας (CMC)
- Πολυμερικής μήτρας (PMC)



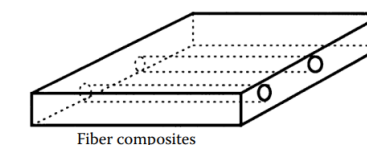
Κατηγοριοποίηση συνθέτων με βάση τα συστατικά τους.



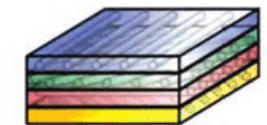
Particulate composites



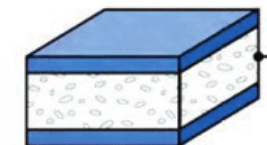
Flake composites



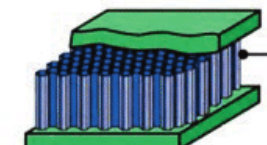
Fiber composites



Laminate



Foam



Honeycomb

Σύνθετα τύπου «μήτρα-διασπορά».

Διαστρωματωμένα σύνθετα.

Σύνθετα Υλικά και Θωράκιση – Γενικά

- Ο ρόλος της θωράκισης είναι να προστατεύει τον χρήστη με την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας ενός βλήματος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με πλαστική παραμόρφωση του υλικού της θωράκισης είτε με θραύση του.
- Η βαλλιστική χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος της θωράκισης ή αλλιώς τον «όγκο»/δυσκαμψία της :
 - Η «μαλακή» θωράκιση (soft/lightweight armor) καθιστά τον φορέα της πιο ευκίνητο και χρησιμοποιείται για να εμποδίσει βλήματα μικρού διαμετρήματος από φορητά όπλα μικρού βεληνεκούς (small arms bullets - frangible bullets) και όχι διατρητικά βλήματα υψηλότερου διαμετρήματος (high caliber bullets/armor piercing rounds).
 - Η «σκληρή» θωράκιση (hard body armor) συντίθεται είτε από πλάκες χάλυβα ή συνθέτου συνθέτου, για αντοχή σε μη διατρητικά βλήματα (non piercing bullets) από μαλακά μέταλλα (Light Steel Core bullets-LPS) είτε από συνδυασμό κεραμικής με μεταλλική ή σύνθετη πλάκα, για **διατρητικές σφαίρες με συμπαγή ατσάλινο πυρήνα** (FMJ or AP/armor piercing bullets with hard metal core).
- Σύνθετα υλικά με βαλλιστικές εφαρμογές προσφέρουν μείωση του βάρους του προστατευτικού εξοπλισμού του φορέα (κράνος, γιλέκο), χωρίς όμως να γίνεται **έκπτωση της αντοχής** τους σε εχθρικά πυρά.



Kevlar Soft Armor.



Hard Body Armor.

Ammunition	7.62x51 FFV Bofors AB	7.62x51 Hirtenberger Patronfabrik	7.62x51 AP Fabrique National	30-06 AP M2 US Government Arsenal
Total weight (g)	8.21	9.45	9.75	10.69
Core weight (g)	5.93	4.32	3.8	5.17
Core diameter (mm)	5.59	5.59	6.08	6.22
Core nose angle (deg)	58	flat - 2.27mm	45	54
Core hardness (Hv)	1450	750	870	785
Core material	Tungsten carbide	Steel	Steel	Steel

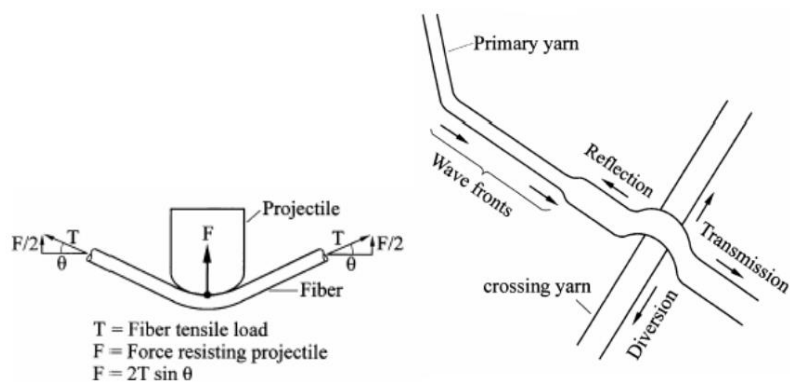
Complete projectiles and disassembled cores				
---	--	--	--	--

Συλλογή διατρητικών βλημάτων διαφορετικού διαμετρήματος.

Σύνθετα Υλικά και Θωράκιση – Αντιβαλλιστική συμπεριφορά

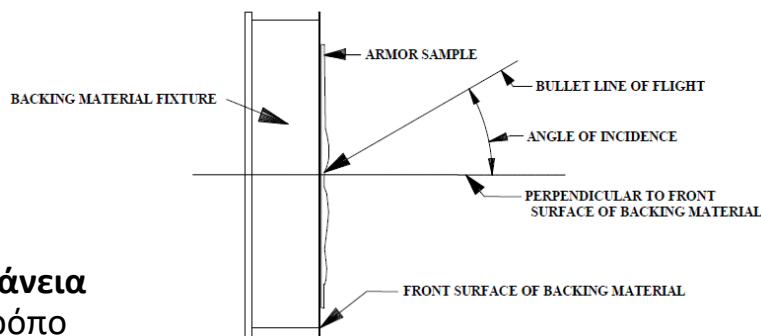
- Οι δύο βασικοί παράγοντες που χαρακτηρίζουν μία καλή θωράκιση είναι η **παροχή προστασίας και η ελαχιστοποίηση του πάχους και του βάρους** της διάταξης, για δεδομένη (αντι)βαλλιστική απόδοση (αλλά και η ανάγκη βελτιστοποίησης του σχήματος και της ευκαμψίας), η οποία και επάγεται τη διατήρηση της δομής της.
- Η (αντι)βαλλιστική ικανότητα των σύνθετων υλικών βασίζεται κυρίως στις **διαδοχικές μικροθραύσεις (microfractures) που λαμβάνουν χώρα κατά την πρόσκρουση και διείδυση του βλήματος στο υλικό**. Οι μικροθραύσεις αυτές αφορούν τις ίνες και έχουν σαν αποτέλεσμα την απώλεια της κινητικής ενέργειας του βλήματος. **Η τελική απορρόφηση ενέργειας, και άρα η αποτελεσματικότητα της ύπαρξης της σύνθετης πλάκας στη θωράκιση, εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη μέγιστη καταπόνηση, έως θραύσεως, που μπορούν να υποβληθούν οι ίνες του συνθέτου.**

- Στα εξεταζόμενα σύνθετα υλικά όπου οι ίνες (δεύτερη φάση) είναι «δεσμευμένες» με την μήτρα, έχει δήλαδή προηγηθεί προδιαπότιση των ινών με το υλικό της μήτρας (pre-impregnated fibers), η **εξέλιξη του δυναμικού φαινομένου** μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει χώρα σε **δύο φάσεις** και επομένως «καθυστερείται».

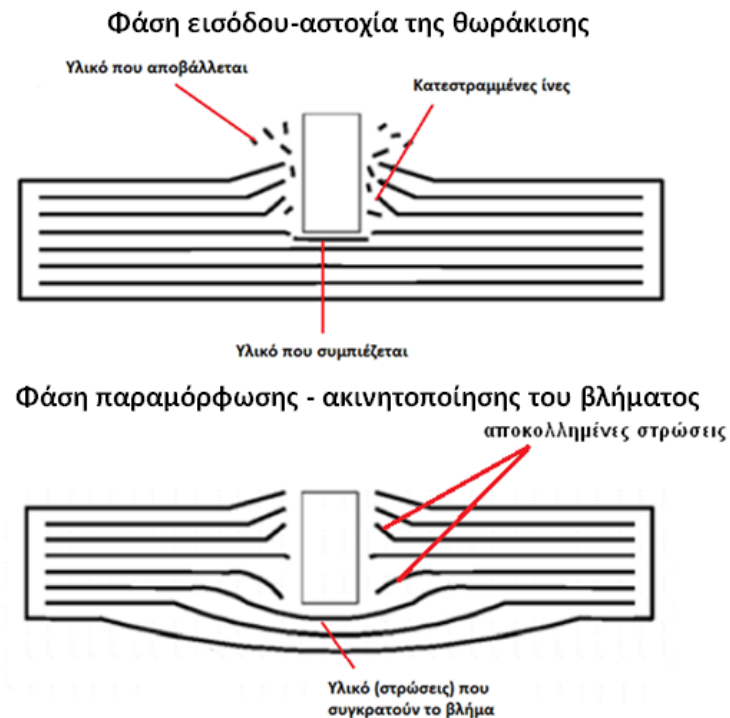


Συνθήκες φόρτισης των ινών κατά τη διείδυση του βλήματος.

Δύο φάσεις μιας βαλλιστικής κρούσης σε σύνθετη πλάκα.



Γωνία προσβολής του βλήματος.



- Θεωρούμε πως κάθε βλήμα προσπίπτει **κάθεται στην επιφάνεια της θωράκισης** (γωνία προσβολής μηδέν). Με αυτόν τον τρόπο θα έχει τυπικά την μεγαλύτερη δυνατή **πένετρα (διατρητική ικανότητα)** ώστε να εξετάζεται η μέγιστη αντοχή της θωράκισης.

Σύνθετα Υλικά και Θωράκιση – NIJ Standard-0101.06 (1)

- Σύμφωνα με το **NIJ Standard-0101.06**, ισχύον πρότυπο του Ινστιτούτου Δικαιοσύνης (National Institute of Justice) των Η.Π.Α., υπάρχει συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση προβλεπόμενων απειλών για το εκάστοτε επίπεδο προστασίας.
- Επικεντρωνόμαστε γύρω από την **μελέτη σύνθετων υβριδικών θωρακίσεων επιπέδου/τύπου III+++ (Special Threat) Stand Alone (SA)**.

Armor Type	Test Round	Test Bullet	TEST VARIABLES			PERFORMANCE REQUIREMENTS				SHOT REQUIREMENTS				Total Shots Required
			Bullet Mass	Conditioned Armor Test Velocity*	New Armor Test Velocity*	Hits Per Panel at 0° Angle	Maximum BFS Depth	Hits Per Panel at 30° or 45° Angle ¹	Shots Per Panel	Panel Size	Panel Condition	Panels Required	Shots Required	
IIA	1	9 mm FMJ RN	8.0 g (124 gr)	355 m/s (1165 ft/s)	373 m/s (1225 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	144
										Small	New Conditioned	4	24	
	2	.40 S&W FMJ	11.7 g (180 gr)	325 m/s (1065 ft/s)	352 m/s (1155 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	
										Small	New Conditioned	2	12	
II	1	9 mm FMJ RN	8.0 g (124 gr)	379 m/s (1245 ft/s)	398 m/s (1305 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	144
										Small	New Conditioned	4	24	
	2	.357 Magnum JSP	10.2 g (158 gr)	408 m/s (1340 ft/s)	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	
										Small	New Conditioned	2	12	
IIIA	1	.357 SIG FMJ FN	8.1 g (125 gr)	430 m/s (1410 ft/s)	448 m/s (1470 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	144
										Small	New Conditioned	2	12	
	2	.44 Magnum SJHP	15.6 g (240 gr)	408 m/s (1340 ft/s)	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	
										Small	New Conditioned	2	12	
III	1	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g (147 gr)	847 m/s (2780 ft/s)	-	6	44 mm (1.73 in)	0	6	All	Conditioned	4	24	24
IV	1	.30 Caliber M2 AP	10.8 g (166 gr)	878 m/s (2880 ft/s)	-	1 to 6	44 mm (1.73 in)	0	1 to 6	All	Conditioned	4 to 24	24	24
Special	-	Each test threat to be specified by armor manufacturer or procuring organization.				Armor performance and shot requirements shall depend on armor type.								

*Target measurement velocity. Fair hit measurement velocities must be within ± 9.1 m/s (± 30 ft/s) of this value, as defined in Section 7.6.
¹Each armor that is to be shot at angles other than 0° shall be shot once at a 30° angle and once at a 45° angle.

NIJ Standard-0101.06 P-BFS performance test summary.

Μάζα/Είδος βλήματος	Ταχύτητα εξόδου (από το εκάστοτε τουφέκι)	Ενέργεια εξόδου [J]	Διαστάσεις Βλήματος (mm)	Βλήμα	Ενδεικτικός τύπος τουφεκιού
9.6 g (147 gr)/ M80 FMJ (Full Metal Jacket) μη διατρητικό (LPS)	847 m/s (2,780 ft/s)	3,470 J (2,559 ft-lbf)	7.62x51 (NATO)		G-3
7.9 g (121.9 gr)/ MSC (Mild Steel Core) διατρητικό (APM2)	718 m/s (2,356 ft/s)	2,036 J (1,502 ft-lbf)	7.62x39		AK-47
4 g (62 gr)/SS109 FMJBT (Full Metal Jacket Boat Tail) μη διατρητικό (LPS)	948 m/s (3,110 ft/s)	1,797 J (1,325 ft-lbf)	5.56x45		M-16

Χαρακτηριστικά απειλητικών βλημάτων για αλεξίσφαιρες πλάκες επιπέδου III +++ (SA).

- Μια πλάκα III+++ (Special Threat) Stand Alone (SA) είναι σε θέση να αντιμετωπίσει :
 - **6 βολές από τον εκάστοτε ίδιο τύπο βλήματος** που αναγράφονται στον άνωθεν Πίνακα.
 - **6 συνδυαστικές βολές** (2 βολές από τον εκάστοτε τύπο βλήματος) όπως αναγράφονται στον άνωθεν Πίνακα (κάθε διαφορετικός τύπος βλήματος στον οποίο μπορεί να ανταπεξέλθει η σύνθετη υβριδική αλεξίσφαιρη θωράκιση προσθέτει ένα + στο εκάστοτε επίπεδο προστασίας της).

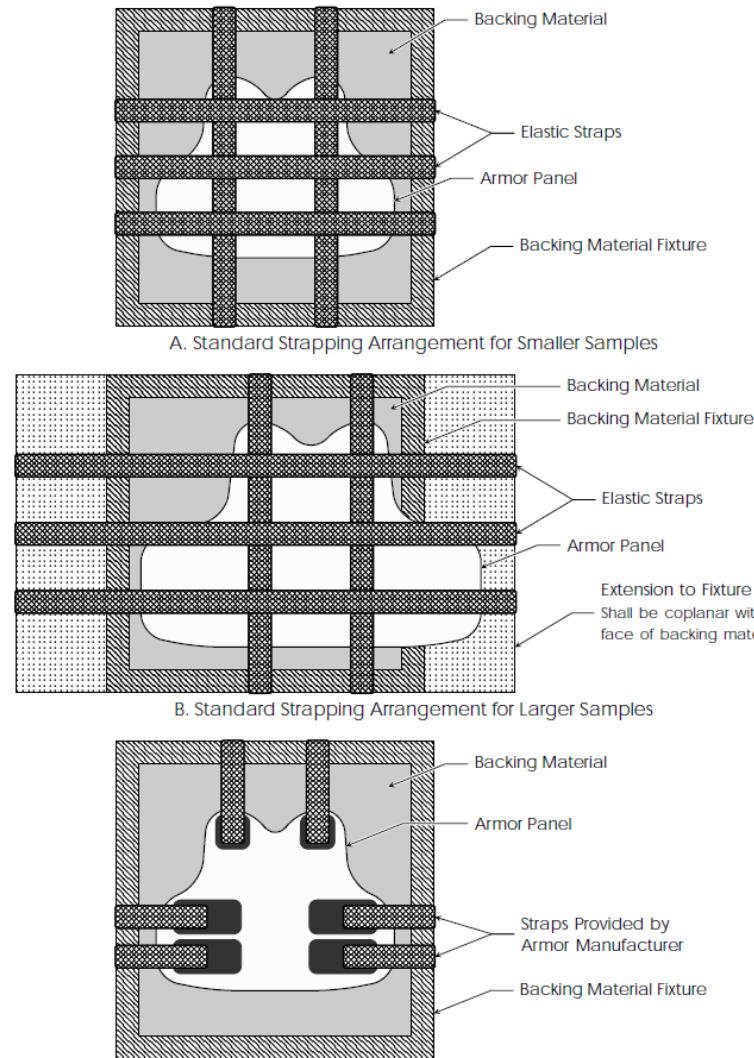
Σύνθετα Υλικά και Θωράκιση – NIJ Standard-0101.06 (2)

➤ Οι θέσεις βολής (και επομένως η διαδοχή των βολών) επί του υβριδικού συνθέτου/θωράκισης ακολουθούν **δύο γενικούς κανόνες** (shot-to-shot and shot-to-edge spacing requirements) :

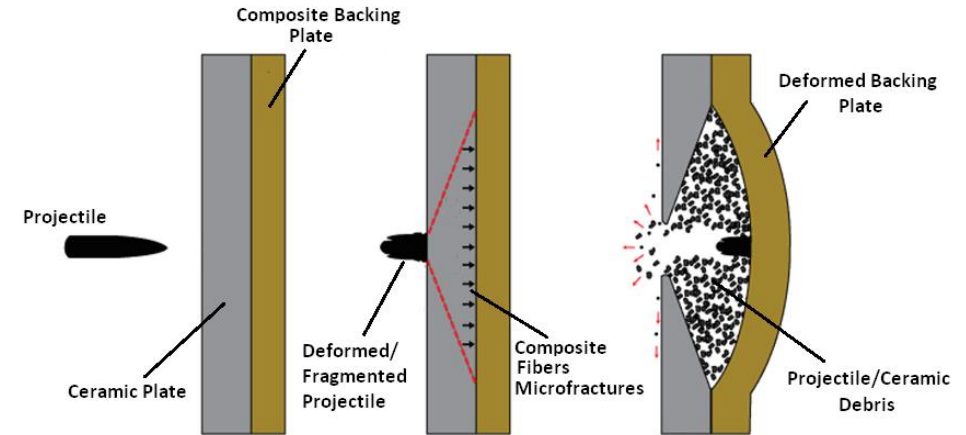
1. Η κυκλική ζώνη επιρροής (δηλαδή η απόσταση προς όλες τις κατευθύνσεις) **μεταξύ δύο διαδοχικών βολών δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 76 mm (3.0 in)** και

2. Η απόσταση κάθε βολής από την ακμή της οριοθέτησης του γιλέκου να μην είναι μικρότερη από 19 mm.

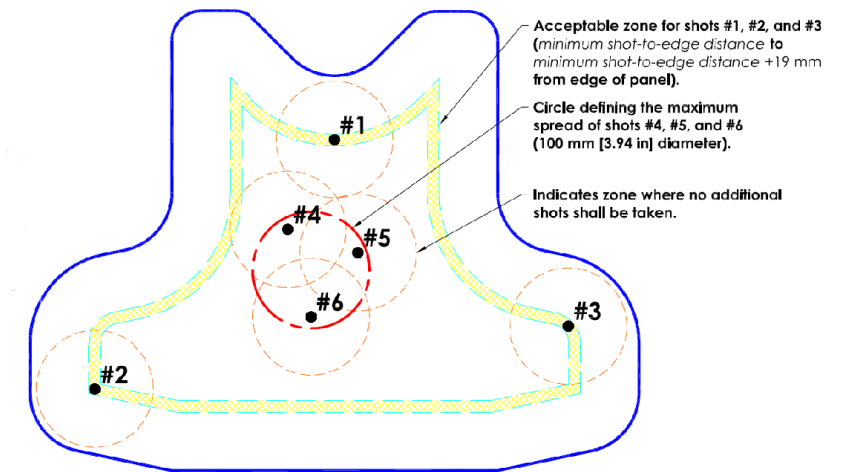
➤ Η διάταξη των θέσεων των βολών επηρεάζει την μεταφορά του φαινομένου αποκόλλησης και άρα πανομοιότυπα δείγματα με διαφορετική αρίθμηση θέσεων βολών δεν είναι εντελώς συγκρίσιμα.



Τρόποι πρόσδεσης βαλλιστικών δοκιμών.



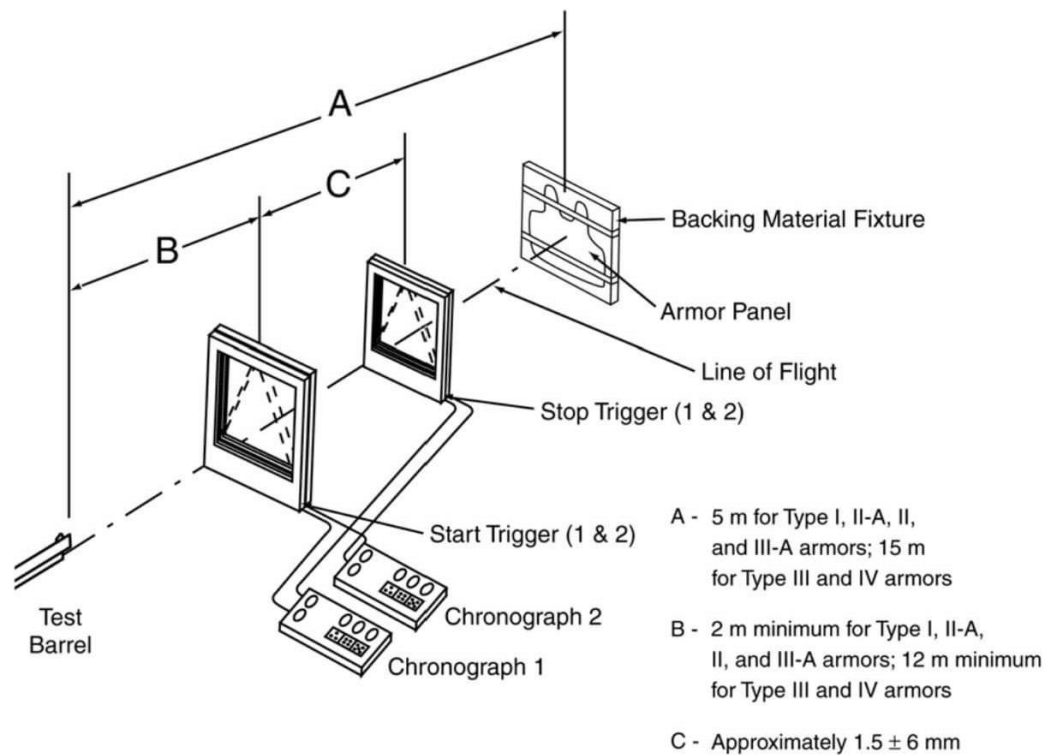
Θραύση κεραμικού και παραμόρφωση του σύνθετου πάνελ σε βαλλιστική κρούση.



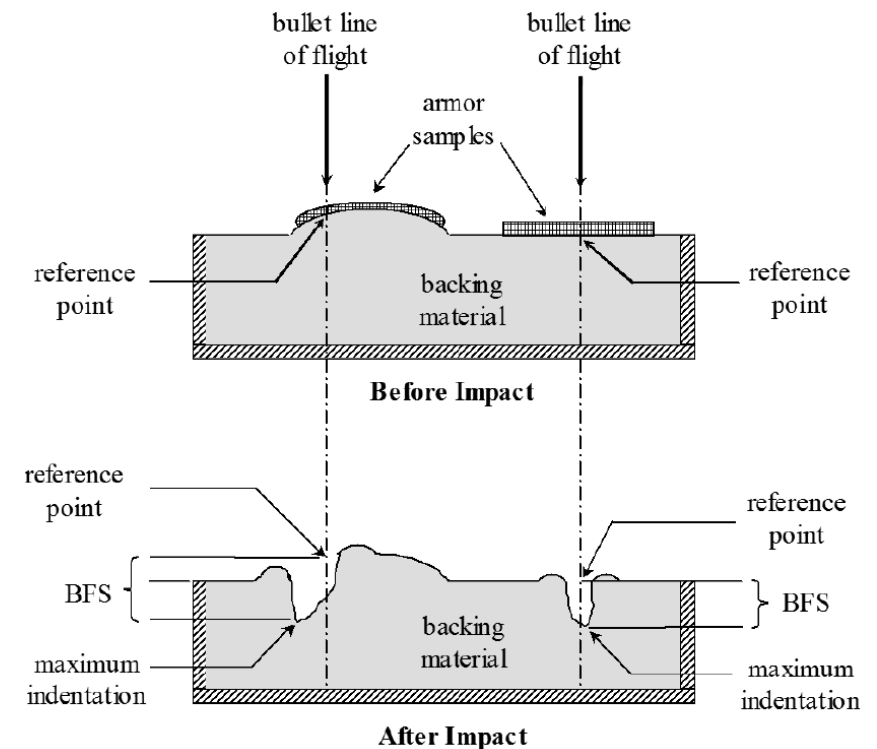
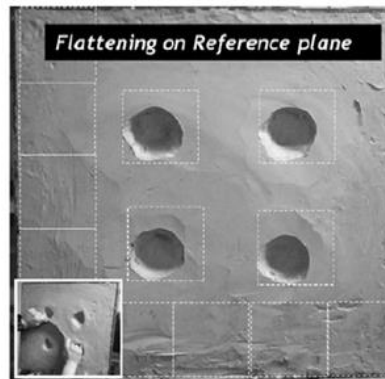
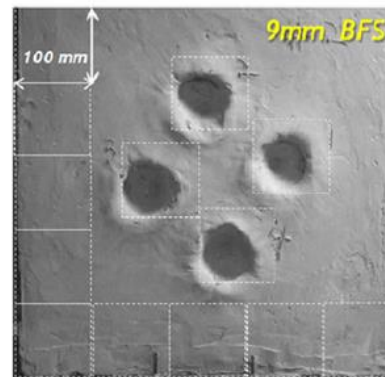
Κανόνες αρίθμησης της τοποθεσίας διαδοχικών βολών.

Απόδοση μιας θωράκισης – Back Face Signature (BFS)

- Η «αποτελεσματικότητα» μίας υβριδικής αλεξίσφαιρης διάταξης εξαρτάται από τον τελικό βαλλιστικό της έλεγχο. Αυτός επιτελείται, μέσω της πρόσδεσής τους επί πηλού/πλαστελίνης (π.χ Roma Plastilina ballistic clay) καθώς μετράται το τελικό αποτύπωμα BFS (**P-BFS – Perforation and Backface Signature Test**).
- Το BFS μετράται ως το αποτύπωμα της μέγιστης απόκλισης του πίσω προσώπου της θωράκισης από το αρχικό της επίπεδο δηλαδή του μηχανισμού παραμόρφωσης BFD (Back Face Deformation). Το BFS δεν πρέπει να υπερβαίνει σε βάθος τα 44 mm (1.73 in) ώστε να θεωρηθεί επιτυχής ο έλεγχος του αλεξίσφαιρου γιλέκου και να κατασταθούν βιώσιμοι οι τραυματισμοί των χρηστών.



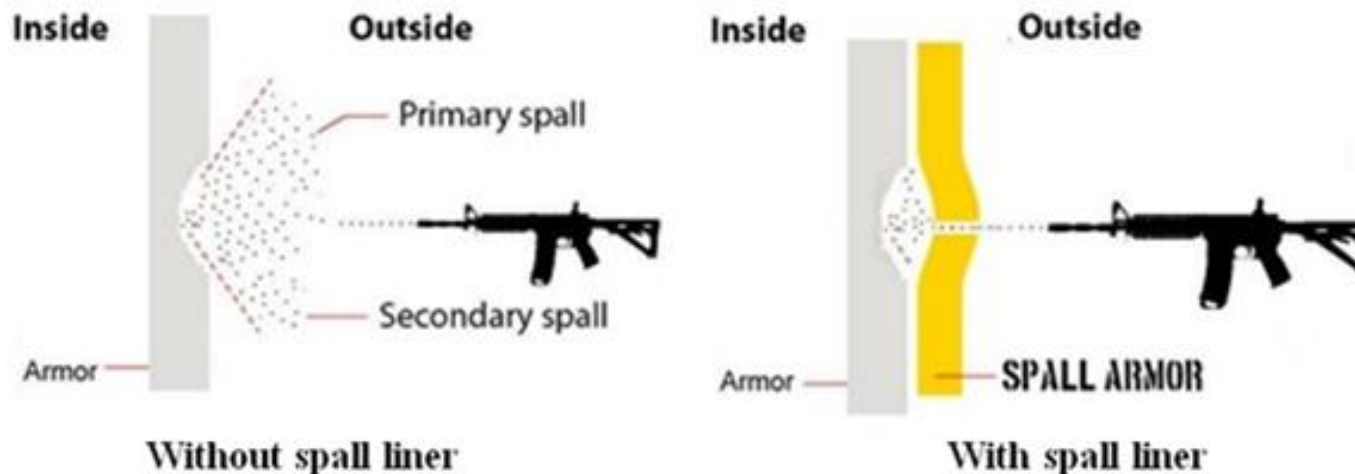
Τυπική διάταξη βαλλιστικών δοκιμών.



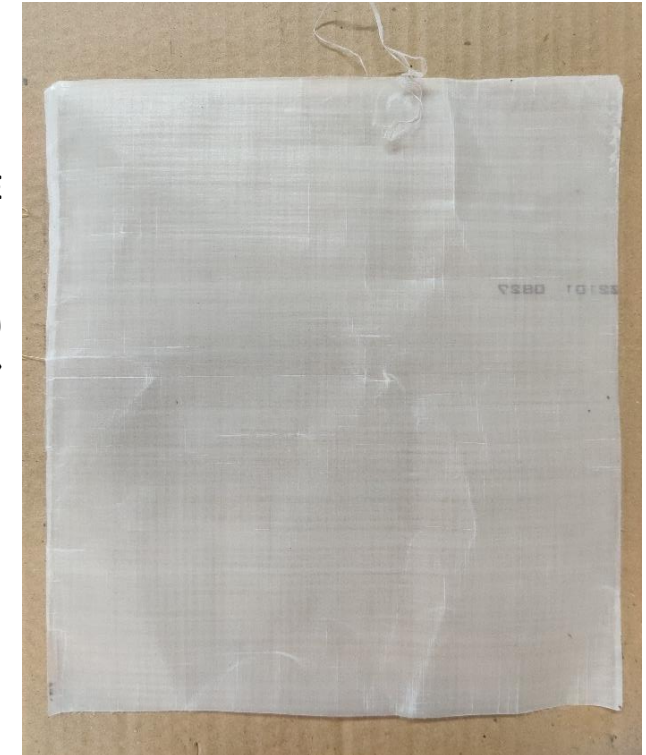
Μέτρηση του βάθους BFS.

Σύνθεση υβριδικών βαλλιστικών δοκιμίων - Αντιθραυσματική επίστρωση

- Οι εξεταζόμενες υβριδικές διατάξεις επιπέδου III+++ (Special Threat) Stand Alone (SA) αποτελούν την «συσσωμάτωση» :
 1. Μιας **αντιθραυσματικής επίστρωσης (spall liner)**.
 2. Ενός **κεραμικού πάνελ** (με ή χωρίς αραμιδική ενίσχυση)
 3. Μιας **σύνθετης πλάκας θερμοσυμπιεσμένων επάλληλων φύλλων με προεμποτισμένες ίνες UHMWPE** (Ultra High Density Polyethilane).
 4. Κάποιου **βαλλιστικού αφρού**.
- Η **αντιθραυσματική (antifragment) μεμβράνη (spall liner)** μιας θωράκισης συγκρατεί τα θραύσματα του κεραμικού και του βλήματος **περιορίζοντας τη σκέδαση τους** επομένως «καθυστερεί» τον πλήρη «εκφυλισμό» της από τα βαλλόμενα πυρά.



Συγκράτηση θραυσμάτων χωρίς και με αντιθραυσματική επίστρωση.



Αντιθραυσματική μεμβράνη μονόφυλλου συνθέτου UHMWPE .

Σύνθεση υβριδικών βαλλιστικών δοκιμίων – Κεραμικό πάνελ

➤ Το **κεραμικό είναι το πρώτο συμπαγές υλικό** (πέραν της εύκαμπτης αντιθραυσματικής επίστρωσης) της διαστρωματωμένης θωράκισης που **θραύεται κατά την κρούση** από κάποιο βλήμα. Το κεραμικό **αλλοιώνει την γεωμετρία της κεφαλής του βλήματος και στην συνέχεια διαπερνάται πλήρως** από αυτό.

➤ Τα **κυρίαρχα κεραμικά** που χρησιμοποιούνται στις βαλλιστικές εφαρμογές σύνθετων πλακών επιπέδου III+ SA είναι :

- το καρβίδιο του βορίου (**Boron Carbide**)
- το καρβίδιο του πυριτίου (**Silicon Carbide**) και
- το οξείδιο του αργιλίου (**Alumina/Aluminium Oxide**)



Κεραμικό	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Boron Carbide (B₂C)	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή ελαστικότητα • Υψηλή σκληρότητα • Υψηλό σημείο τήξης 	<ul style="list-style-type: none"> • Οξειδωση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (>500 οC)
Silicon Carbide (SiC)	<ul style="list-style-type: none"> • Καλή απορροφητικότητα ενέργειας και θερμότητας. • Αντοχή στην φθορά και την οξείδωση. • Πολύ υψηλός λόγος αντοχής προς πυκνότητα. 	<ul style="list-style-type: none"> • Δυσκολία πυροσυσσωμάτωσης λόγω χημικής αδράνειας.
Alumina (Al₂O₃)	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλό κόστος • Εξαιρετικές φυσικές ιδιότητες και απόδοση. • Πλήθος μεθόδων παραγωγής (χύτευση με έγχυση ή με ολίθωση, συμπίεση κ.α) 	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλή αντοχή σε κάμψη • Χαμηλός συντελεστής κόπωσης (stress intensity factor)

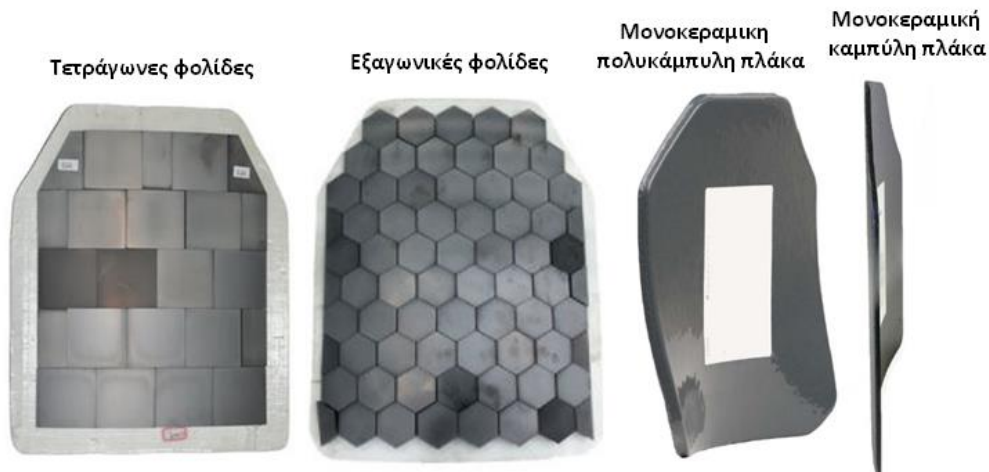
Σύγκριση βασικών κεραμικών υλικών πάνελ.

Παράμετρος-Μονάδα	Τιμή
SiC %	84-89
Silicon %	10-13
Πυκνότητα [kg/m³]	3050-3100
Αντοχή σε κάμψη [Gpa]	0.31-0.37
Σκληρότητα κατά Vickers HV0.5	2100-2400
Σκληρότητα [Gpa]	20.6-23.5

Ιδιότητες του θερμοδुμπιεσμένου (hot-pressed) μονοκεραμικού SiC, πάχους 5.2 mm, των δοκιμών που εξετάζονται.

Δομή	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Με φολίδες	<ul style="list-style-type: none"> • Συγκόληση επί της σύνθετης πλάκας UHMWPE χωρίς επαναθέρμανση του συσσωμάτωματος. • Χαμηλό κόστος κατασκευής. 	<ul style="list-style-type: none"> • Βαλλιστική ανισοτροπία λόγω παρουσίας αρμών. • Μεγάλη γεωμετρική αναντιστοιχία μεταξύ κεραμικού και σύνθετης πλάκας UHMWPE. • Αντοχή σε λίγες εξακολουθητικές βολές λόγω της μη συνέχειας του υλικού.
Μονοκεραμική πλάκα	<ul style="list-style-type: none"> • Ομοιογενής συμπεριφορά και άρα υψηλή αντοχή κατά την πρόσκρουση των βολών. • Άριστη συναρμογή κεραμικού-συνθέτου UHMWPE. 	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλότερο κόστος σε σχέση με τις αντίστοιχες φολίδες.

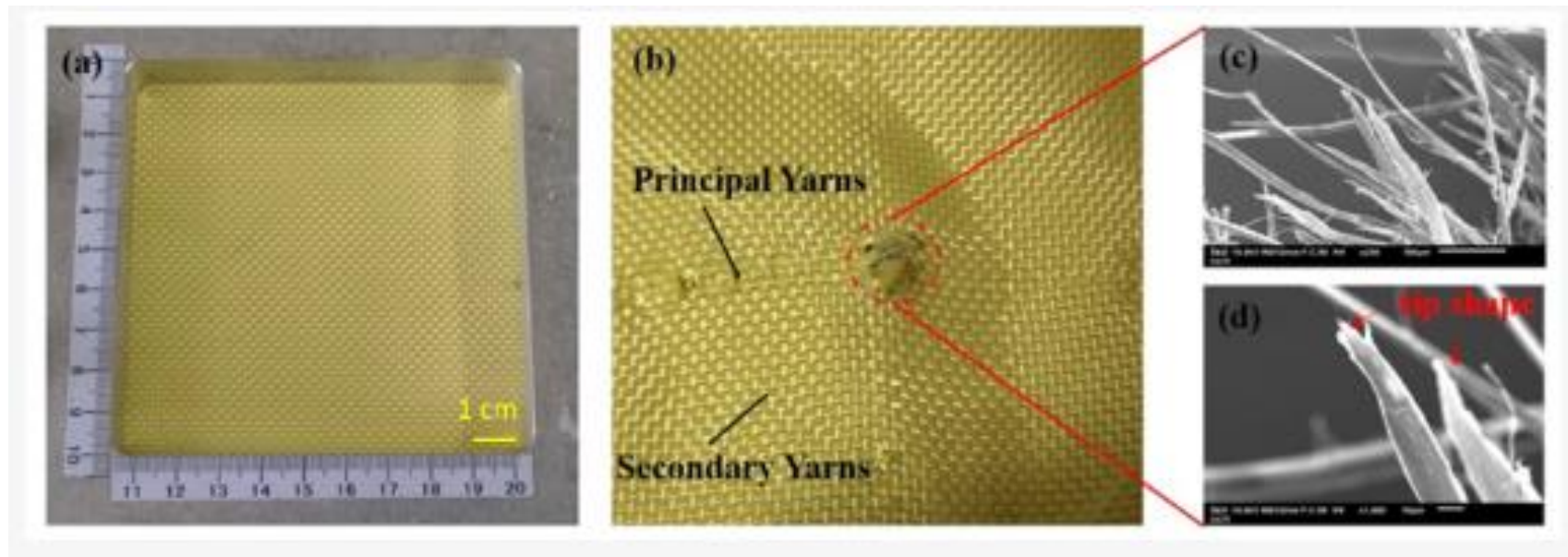
Σύγκριση βασικών δομών κεραμικών πάνελ.



Βασικές γεωμετρίες/δομές κεραμικών πάνελ.

Σύνθεση υβριδικών βαλλιστικών δοκιμίων – «Υφασμα» αραμιδικής ενίσχυσης

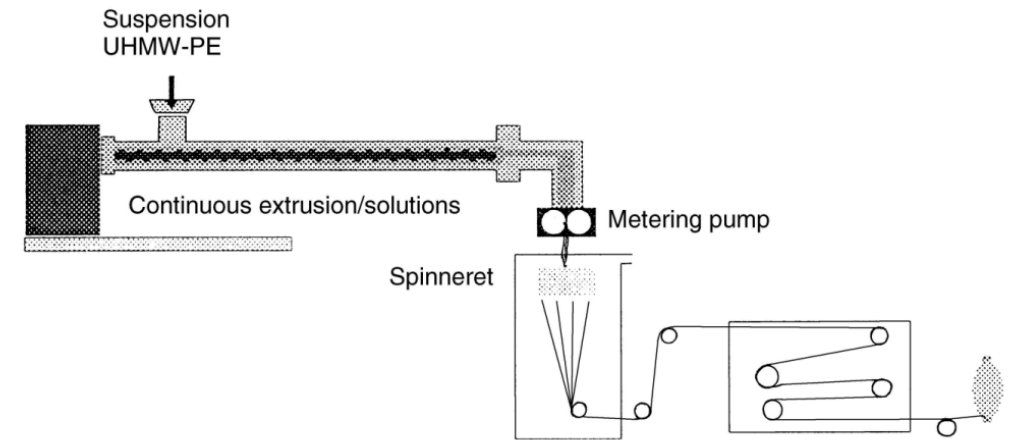
- Η πρακτική εμπειρία μας δείχνει πως η μείωση στο πάχος ενός μονοκεραμικού μερικές φορές χρήζει την προσθήκη ενίσχυσης αραμιδικού «υφάσματος» (aramid backing- π.χ από προεμπτισμένες ίνες Kevlar® σε εποξειδική μήτρα) μεταξύ του κεραμικού και του συνθέτου UHMWPE.
- Αποτελεί ενισχυτικό του συνόλου της θωράκισης, συμβάλει καλή συγκόλληση της ολισθηρής επιφάνειας του σύνθετου πάνελ UHMWPE με το κεραμικό, στη διατήρηση της «υγείας» του μονοκεραμικού κατά την πρόοδο των βολών αλλά και κατά τον διαχωρισμό της διεπιφάνειας κεραμικού-σύνθετου πάνελ χωρίς αυτό να διασκορπιστεί πλήρως.



Υφασμάτινες ενισχύσεις Kevlar® (a) πριν την βαλλιστική δοκιμή (αριστερά), (b) κατόπιν βαλλιστικής δοκιμής, (c,d) ηλεκτρονική μικρογραφία (SEM) των ινών κατόπιν αστοχίας τους.

Σύνθεση υβριδικών βαλλιστικών δοκιμίων – Σύνθετο πάνελ ινών UHMWPE (1)

- Το πολυαιθυλένιο εξαιρετικά υψηλού μοριακού βάρους (UHMWPE), είναι ένας τύπος θερμοπλαστικού πολυαιθυλενίου με **μοριακή μάζα μεταξύ 3.5 και 7.5 εκατομμυρίων amu** και εξαιρετικά **μακριές μοριακές αλυσίδες** οι οποίες επιτρέπουν τη μεταφορά φορτίων σε μεγάλες αποστάσεις, προσδίδοντας στο UHMWPE εξαιρετική μηχανική αντοχή σε κρούση και υψηλή σκληρότητα.
- Το UHMWPE είναι **άοσμο, άγευστο και μη τοξικό**, έχει **αυξημένη ανθεκτικότητα** σε οξέα, αλκάλια, οργανικούς διαλύτες και διαβρωτικά χημικά χαρακτηριστικά, **απορροφά ελάχιστη υγρασία** και έχει **πολύ χαμηλό συντελεστή τριβής**, κάνοντάς το ανθεκτικό στη φθορά.
- Το UHMWPE **εισήλθε στην αγορά περί το 1950** και σήμερα παράγεται ως σκόνη. Από τα τέλη της **δεκαετίας του 1970** μορφοποιείται σε ίνες πάχους της τάξης των **18.22 ± 1.15 μm** και χρησιμοποιείται στη **βαλλιστική**, σε αμυντικές εφαρμογές (**αμυντικό εξοπλισμό**), σε **ιατρικές συσκευές**, την ιστιοπλοΐα, σε εξοπλισμό πεζοπορίας-αναρρίχησης κ.α.
- Το **σημείο τήξεως** των ινών UHMWPE είναι περίπου **130°C** έως **136°C** ενώ γίνεται ιδιαίτερα **εύθραυστο** σε θερμοκρασίες **κάτω των -150°C**.
- Οι ίνες UHMWPE είναι **15 φορές ισχυρότερες από το ατσάλι** (ανθρακούχους χάλυβες) και **40% ισχυρότερες από τις ίνες αραμιδίου, για τα ίδια (κατ' όγκο) βάρη** αντίστοιχα.
- Οι προεμποτισμένες ίνες (με αντίστοιχη μήτρα) **παρασκευάζονται με την μέθοδο πήγματος (gel-spinning) ακολουθούμενη από θερμή διέλαση (hot drawing)**.

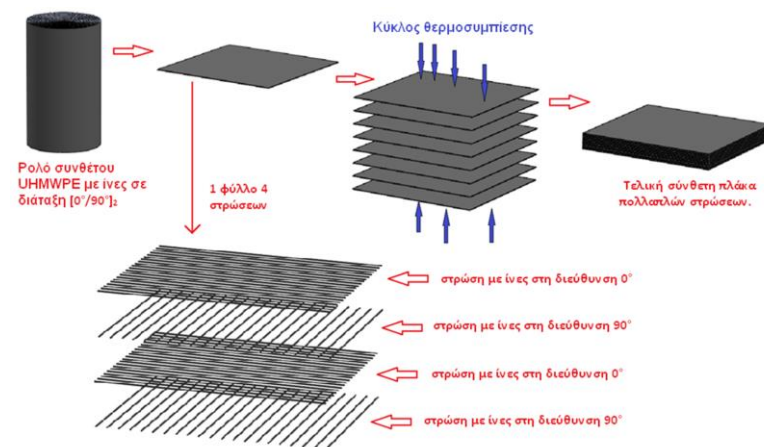


Παραγωγή ινών UHMWPE με τη μέθοδο πήγματος (gel-spinning process).

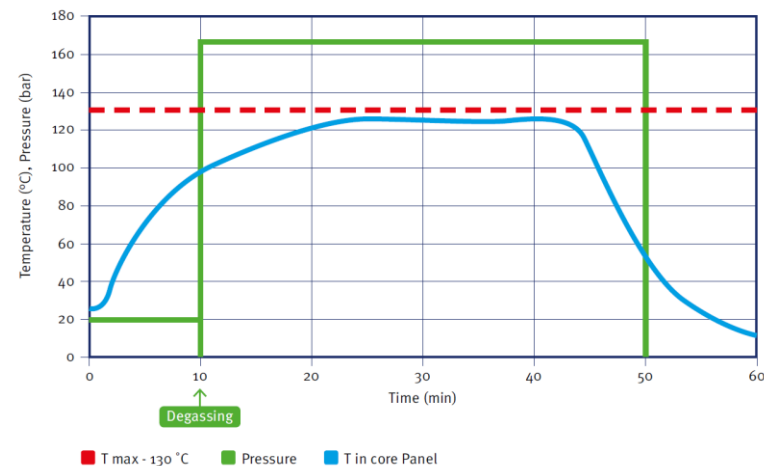
- Οι **μήτρες** που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως μήτρες ρητίνης είτε **πολυουρεθάνης (PU - Polyurethane)** είτε **συμπολυμερούς τριών συστάδων στυρενίου-ισοπρενίου-στυρενίου (SIS - Styrene-Isoprene-Styrene triblock copolymer)**, με ποσοστά μικρότερα από **20% κατ' όγκο**.
- Οι μήτρες από PU παρουσιάζουν υψηλότερη ελαστικότητα, παρέχουν καλύτερη υποστήριξη στην κεραμική πλάκα και έχουν μικρότερο κίνδυνο αποκόλλησης (delamination) σε σχέση με τις μήτρες από SIS.
- Ο **σκοπός της μήτρας** είναι να **προστατεύει τις ίνες UHMWPE** από περιβαλλοντικούς παράγοντες, να **διατηρεί την ευθυγράμμισή τους** κατά τη διάρκεια της θερμοσυμπίεσης των φύλλων και να **μεταφέρει την ενέργεια του βλήματος** σε αυτές κατά την πρόσκρουση.

Σύνθεση υβριδικών βαλλιστικών δοκιμίων – Σύνθετο πάνελ ινών UHMWPE (2)

- Τα **πολύστρωτα σύνθετα πάνελ** κατασκευάζονται από την «**συσσωμάτωση**» φύλλων UHMWPE (με την αντίστοιχη μήτρα) που προέρχονται με τη σειρά τους από **προκατασκευασμένα ρολά** με συνήθη **διάταξη 4 στρώσεων ινών** ως $[0^\circ/90^\circ]_2$.
- Τα φύλλα συνενώνονται με έναν αρχικό **κύκλο θερμοσυμπίεσης** (περί τους 120-140°C, τα 25 MPa-250 bar και για 15-30 λεπτά), μέσα σε ένα **καλούπι πλακών θέρμανσης-ψύξης** και ταυτόχρονα **υδραυλική πρέσα μορφοποίησης** (composite molding hydraulic platen press).
- Μέσω της αυτής της διαδικασίας, λόγω της **ανόπτησης** (annealing) και της **θερμικής οξειδωτικής αποικοδόμησης των ινών UHMWPE**, προκύπτει συχνά **υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων τους**.
- Οι γενικές συνθήκες θερμοσυμπιεστικών κύκλων για τα σύνθετα υλικά ινών UHMWPE A, B και C είναι :
 - Σύνθετο υλικού A : 130 °C, 175 bar, 15 min.
 - Σύνθετο υλικού B : 135 °C, 175 bar, 30 min.
 - Σύνθετο υλικού C : 125 °C, 175 bar, 15 min.

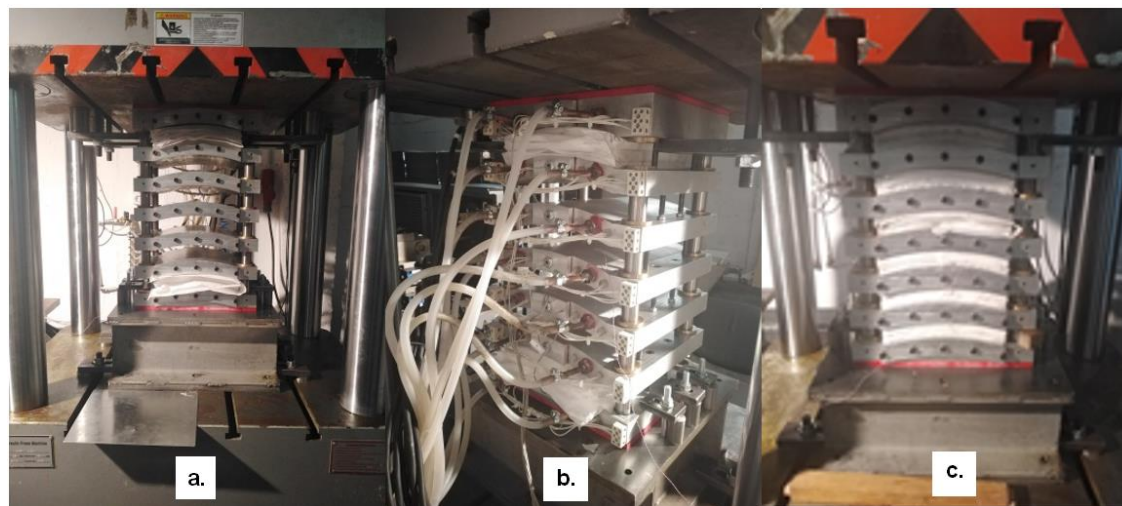


Διαδικασία κατασκευής πολύστρωτων συνθέτων με ίνες UHMWPE.

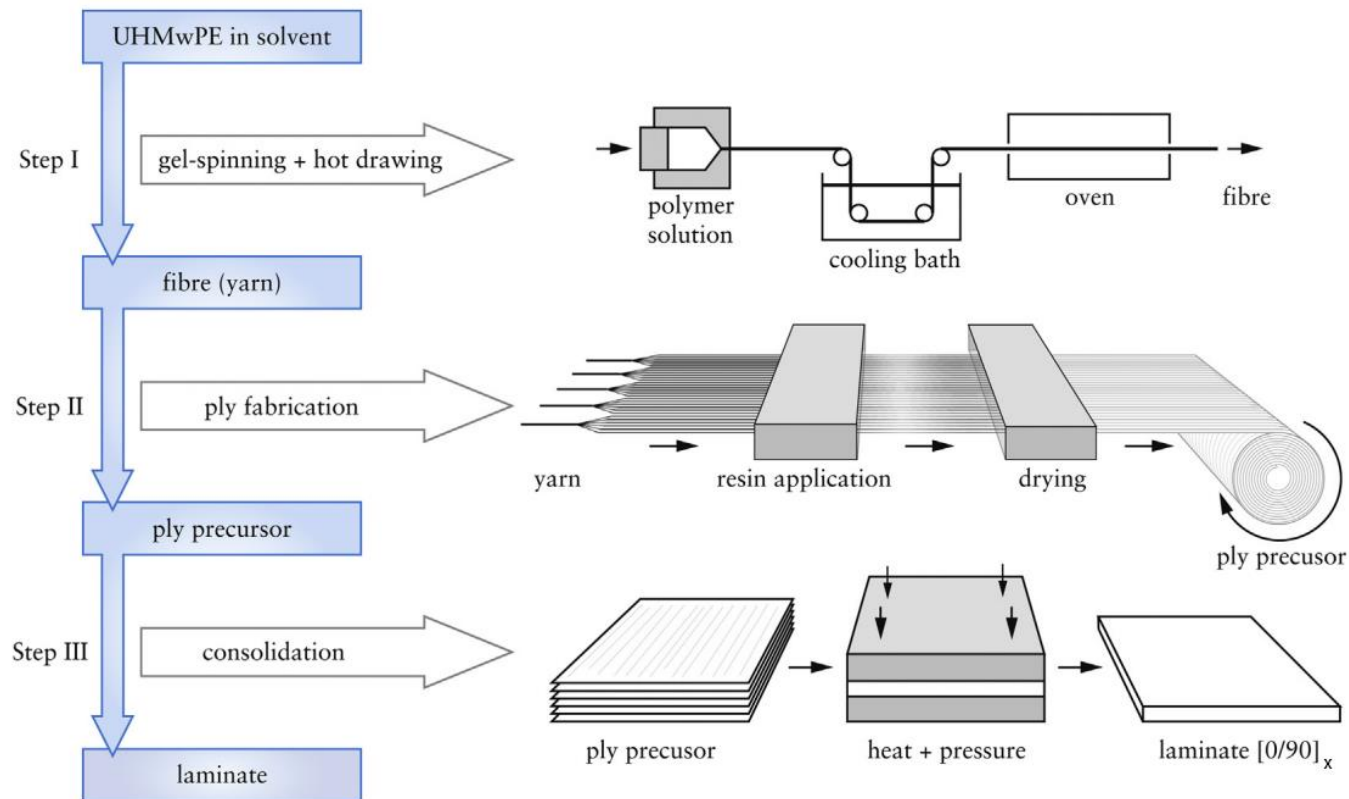


Οριοθέτηση θερμοσυμπιεστικού κύκλου παραγωγής σύνθετης πλάκας UHMWPE υλικού B.

- (a) Καλούπι θέρμανσης/ψύξης και μορφοποίησης των φύλλων με προεμποτισμένες ίνες UHMWPE (έξι θέσεων)
- (b) Δίκτυο ψύξης / θέρμανσης του καλουπιού
- (c) Καλούπι υπό πίεση και θερμοκρασία, πληρωμένο με μορφοποιούμενα φύλλα.



Σύνθεση υβριδικών βαλλιστικών δοκιμίων – Σύνθετο πάνελ ινών UHMWPE (3)



Συνολικός κύκλος παραγωγής πολύστρωτου συνθέτου x στρώσεων ινών UHMWPE.



Μορφοποιημένα φύλλα ινών UHMWPE σε πάνελ.

- Σύμφωνα με κάποιους κατασκευαστές **πίεση ενοποίησης** (στον θερμοσυμπιεστικό κύκλο) **μεγαλύτερη των 170 bar** ίσως να **βελτιώνει την βαλλιστική απόδοση** του σύνθετου πάνελ και σίγουρα δεν την ελαττώνει.

Σύνθεση υβριδικών βαλλιστικών δοκιμίων – Βαλλιστικός αφρός

- Στις πειραματικές διατάξεις αλεξίσφαιρων πλακών κατηγορίας Stand-Alone (SA) ως **τελευταίο στρώμα υλικού (μεταξύ της σύνθετης πλάκας UHMWPE και του φορέα)** χρησιμοποιούνται **βαλλιστικοί αφροί** με στόχο την αφομοίωση του BFS.
- Το στρώμα του αφρού στη βαλλιστική διάταξη αναλαμβάνει τον ρόλο του **αποστάτη μεταξύ του χρήστη** και της σχηματιζόμενης παραμόρφωσης της σύνθετης πλάκας UHMWPE (**μηχανισμός BFD**) και ταυτόχρονα απορροφά ταυτόχρονα τμήμα της εναπομείνουσας ωστικής ενέργειας.
- Οι χρησιμοποιούμενοι αφροί είναι ελαφριοί, με **πυκνότητα** της τάξης των **70 kg/m³** ώστε να μην επιβαρύνεται η κατασκευή με αχρειαστο βάρος.



Βαλλιστικός αφρός της εταιρείας ZOTEK®
N – Zotefoams.

A/A Δοκιμίου	Φύλλα (Layers) διαστρωματωμένου συνθέτου UHMWPE τύπου A	Πυκνότητα kg/m ²	Πάχος μονοκεραμικής πλάκας από SiC (mm)	Πάχος και τύπος αφρού	BFS ανά αριθμό βολής (mm)			Μέση Τιμή BFS βολών 1,2,3 (mm)	BFS ανά αριθμό βολής (mm)			Μέση Τιμή BFS βολών 4,5,6 (mm)	Ολική Μέση Τιμή BFS (mm)
					1	2	3		4	5	6		
1	79	10.59	5.2	6 mm πολυαμιδίου	46.5	45.8	41.2	44.5	54.2	46.2	38.3	46.2	45.4
2	79	10.59	5.2	9 mm πολυαμιδίου	39.0	43.7	43.6	42.1	44.6	46.8	47.2	46.2	44.2
3	79	10.59	5.2	12 mm πολυαμιδίου	25.6	40.1	38.0	34.6	43.0	44.1	56.8	48.0	41.3
4	79	10.59	5.2	9 mm nanofoam	26.4	35.6	40.2	34.1	43.7	43.1	51.8	46.2	40.1

Συνολικό βάθος αποτυπώματος BFS για διαφορετικά πάχη και τύπους βαλλιστικών αφρών για δεδομένο πάχος διαστρωματωμένου συνθέτου UHMWPE υλικού A και δεδομένης κεραμικής πλάκας SiC

- Για δεδομένο πάχος αφρού, διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά οδηγούν σε διαφορετική απορρόφηση ενέργειας του βλήματος, η οποία και αποτυπώνεται στο βάθος BFS λόγω παραμόρφωσης του εκάστοτε σύνθετου πάνελ μέσω του μηχανισμού BFD.

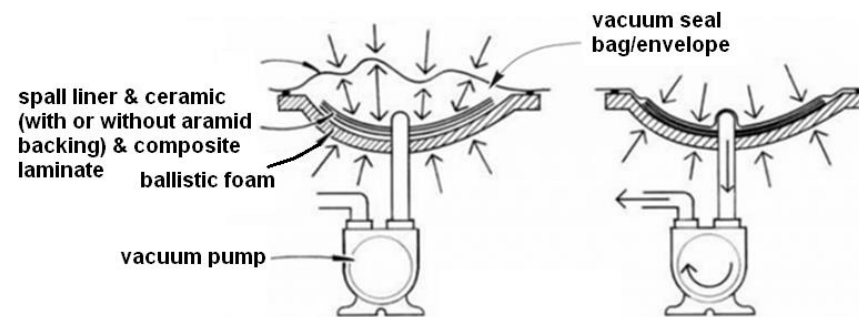
Σχηματισμός τελικής (αντι)βαλλιστικής θωράκισης

- Τα τελικά προϊόντα, τα οποία και υπόκεινται σε βαλλιστικές δοκιμές υφίστανται συνήθως συσσωμάτωση μέσα σε ειδικό κλίβανο (autoclave) με ταυτόχρονη θετική πίεση κλειστού θαλάμου και υποπίεση σε σακούλες κενού.
- Με σκοπό μια γρηγορότερη και οικονομικότερη παραγωγική διαδικασία, η **αντιθραυσματική επίστρωση (spall liner)**, το **κεραμικό** (ή και η **αραμιδική ενίσχυση**), το **πολύστρωτο σύνθετο** και ο **βαλλιστικός αφρός**, αφού έχουν κολληθεί διαστρωματικά με τα κατάλληλα συγκολλητικά (**adhesives**), τοποθετούνται μέσα στις ειδικές σακούλες κενού (vacuum seal bags) όπου και πάλι αφαιρείται ο αέρας μέσω μία αντλίας κενού σε υποπίεση περί τα **-0.4 bar**.
- Το συναρμολόγημα τοποθετείται σε νερό (θερμοκρασίας περίπου 90°C) ενώ ταυτόχρονα η **υποπίεση αυξάνεται στα -1 bar**. Εάν η υποπίεση εφαρμοστεί κατευθείαν στα -1 bar υπάρχει μεγάλος κίνδυνος ριγμάτωσης του κεραμικού.
- Πραγματοποιείται έτσι μορφοποίηση του συνθετου επάνω στο κεραμικο, καθώς το πρώτο «**αγκαλιάζει**» την **γεωμετρία** του δεύτερου, ενώ έπεται η συγκόληση αυτών και των υπόλοιπων συντελεστών, λόγω **τήξης των συγκολλητικών μέσων**, σε περίπτωση χρήσης θερμοπλαστικών φιλμ ή **λόγω σκλήρυνσης (curing)**, σε περίπτωση χρήσης εποξειδικών και πολυουρεθανικών ριτινών.
- Ακολουθεί **ψύξη του τελικού προϊόντος σε νερό θερμοκρασίας περιβάλλοντος (< 50 °C)**.
- Το τελικό συναρμολόγημα ντύνεται με ειδικό κάλυμα/αμπαλάζ.



Αυτόματος κλίβανος αναθέρμανσης-σκλήρυνσης (autoclave curing) σύνθετων υλικών.

Τελική μορφή θωράκισης επιπέδου III+++ (SA).



Σχηματική διάταξη συγκόλλησης του τελικού υβριδικού συνθέτου.



Πραγματική διάταξη συγκόλλησης του τελικού υβριδικού συνθέτου.

Θραυστομηχανική ανάλυση και βάθος διείσδυσης-DOP (1)

➤ Οι τρεις βασικοί μηχανισμοί θραύσης/παραμόρφωσης που λαμβάνουν χώρα κατά την διάτρηση πολυστρωματικών σύνθετων υλικών είναι :

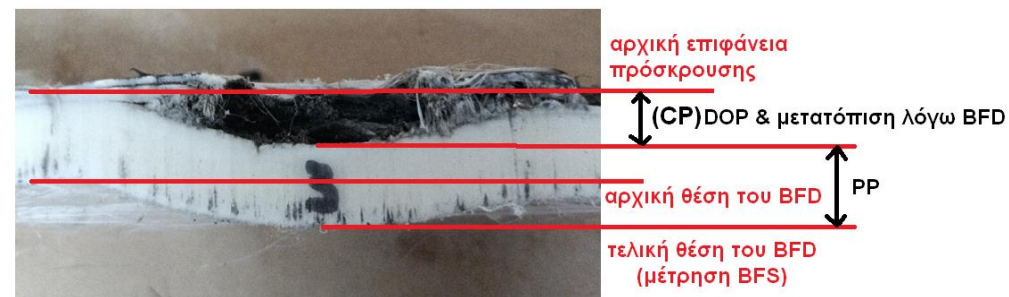
I. **Θραύση ινών** : Οι ίνες στην κατεύθυνση των 90° συγκρατούνται στις θέσεις τους από τις ίνες στην κατεύθυνση 0°, οδηγώντας σε συσσώρευση θλιπτικής τάσης στην κατεύθυνση των 90° και εφελκυστικής στην κατεύθυνση των 0°, έως θράυσης των εφελκούμενων ινών.

II. **Απώλεια ενέργειας λόγω τριβής** : Η απώλεια ενέργειας λόγω «έλξης» των ινών (fiber pull-in), προς το εσωτερικό της θωράκισης, κατά μήκος του επιπέδου αποκόλλησης (delamination) των στρώσεων και μεταξύ του βλήματος και του συνθέτου.

III. **Διάτμηση της μήτρας/διαστρωματική αποκόλληση**: Η διαστρωματική/διαφυλλική διάτμηση (interlaminar shear-delamination) εμφανίζεται μεταξύ των διαφορετικών στρώσεων του εκάστοτε συνθέτου ενώ η ενδοστρωματική/ενδοφυλλική διάτμηση (intralaminar shear) εμφανίζεται μεταξύ των ινών εντός της ίδιας στρώσης του συνθέτου.

➤ **DOP (Depth Of Penetration)**, δηλαδή το ποσοστό των φύλλων του πάνελ UHMWPE που έχουν διατρηθεί πλήρως (complete penetration-CP) από ένα βλήμα σε σχέση με αυτά που έχουν απλά «υποχωρήσει» (partial penetration - PP) αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό στη μελέτη των βαλλιστικών διατάξεων, σχετίζεται με το BFS ,τυπικά αυξάνεται με την πρόοδο των βολών επί της (αντι)βαλλιστικής διάταξης και συνδέεται με την σχετική τους θέση/μοτίβο αρίθμησης βολών (φαινόμενο γειτνίασης). Υπολογίζεται ως :

$$DOP = \frac{CP}{\text{composite total thickness}} \times 100 [\%]$$



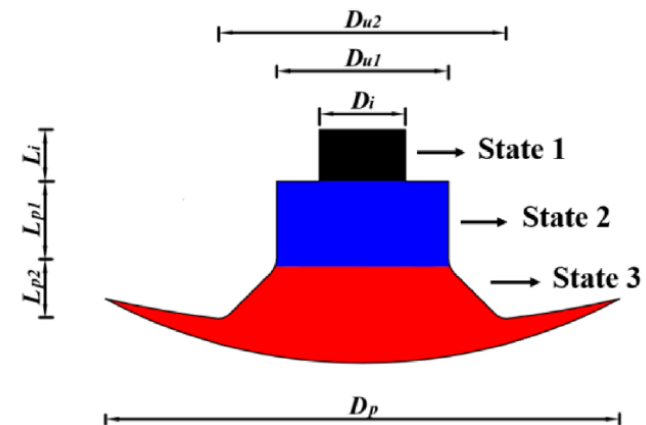
Μέτρηση των μεγεθών CP,DOP και PP σε τομή σημείου βολής.

A/A Βολής	1	2	3	4	5	6	M.O
BFS σύνθετου UHMWPE υλικού A (mm)	46	50	50	54	50	48	49.7>44
DOP σύνθετου UHMWPE υλικού A	19%	57%	50%	63%	31%	41%	43%
BFS σύνθετου UHMWPE υλικού B (mm)	32	39	32	37	36	41	36.2<44
DOP σύνθετου UHMWPE υλικού B	17%	37%	36%	5%	26%	42%	27%

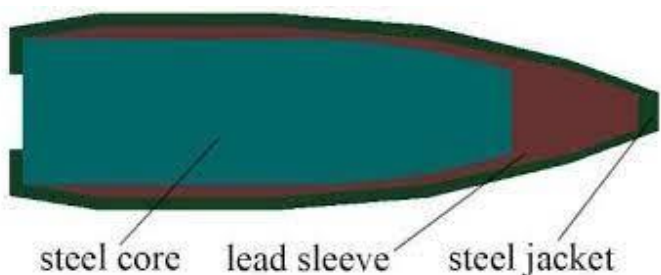
Σύγκριση BFS και DOP όμοιων (αντι)βαλλιστικών δοκιμών με διαφορετικά σύνθετα πάνελ UHMWPE από υλικά A και B.

Στάδια διείδυσης διατρητικών βλημάτων

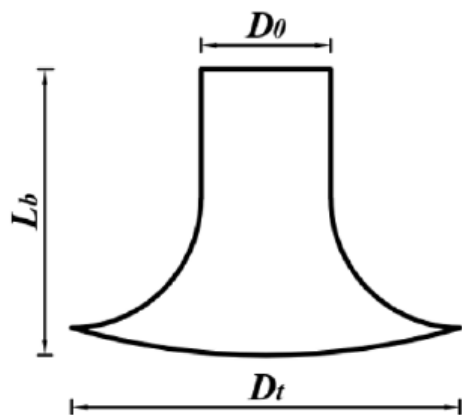
- Για διατρητικά βλήματα τύπου MSC (Mild Steel Core) 7.62x39 mm, απουσία κεραμικού και ανά τις 2 φάσεις διείδυσης (φάση εισόδου και φάση παραμόρφωσης) διακρίνουμε 3 επάλληλα στάδια σε μία τυφλή σπή.
- Ο ατσάλινος πυρήνας (steel bullet core) είναι το μόνο μέρος του βλήματος που εντοπίζεται κατόπιν κρούσης. Καθώς έχει διαχωριστεί από το περίβλημα/φυσσίγγιο (warhead steel jacket) και την μολύβδινη θήκη (lead sleeve) αποκτά ένα σχήμα «μανιτατοκεφαλής». Συγκεκριμένα το περίβλημα και η μολύβδινη θήκη θραυσματοποιούνται ή εξαυλώνονται.
- Η τελική μας θωράκιση περιλαμβάνει ωστόσο ένα κεραμικό πάνελ μπροστά από το σύνθετο ινών UHMWPE, επομένως το πρώτο στάδιο (State 1) «απορροφάται» από την θραύση του κεραμικού.



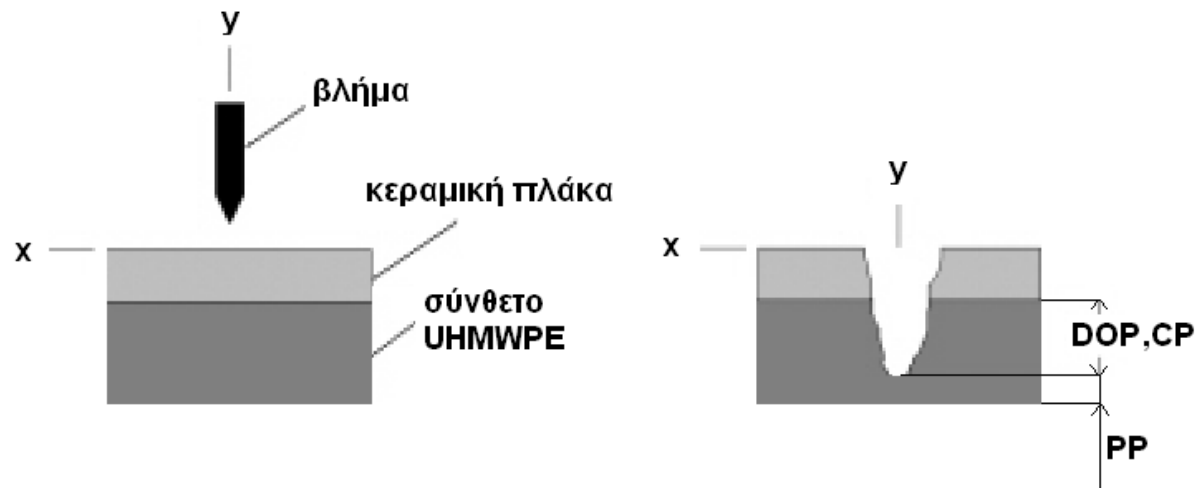
Διαστασιολόγηση στάδιων διείδυσης διατρητικού βλήματος.



Βασικά μέρη διατρητικού βλήματος.



Αναπαράσταση παραμορφωμένου βλήματος-πυρήνα σε σχήμα «μανιταριού» με βασικές διαστάσεις.

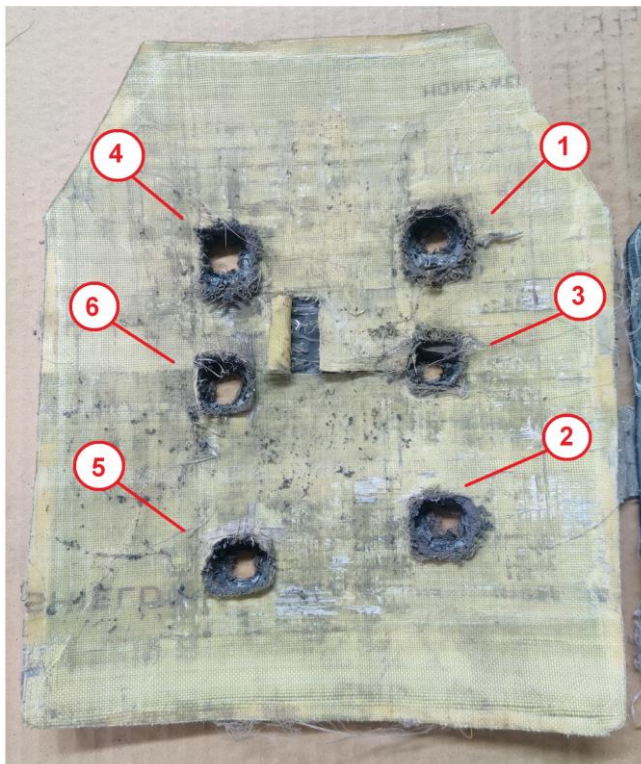


Σχηματική απεικόνιση των μεγεθών DOP, CP και PP παρουσία κεραμικού.

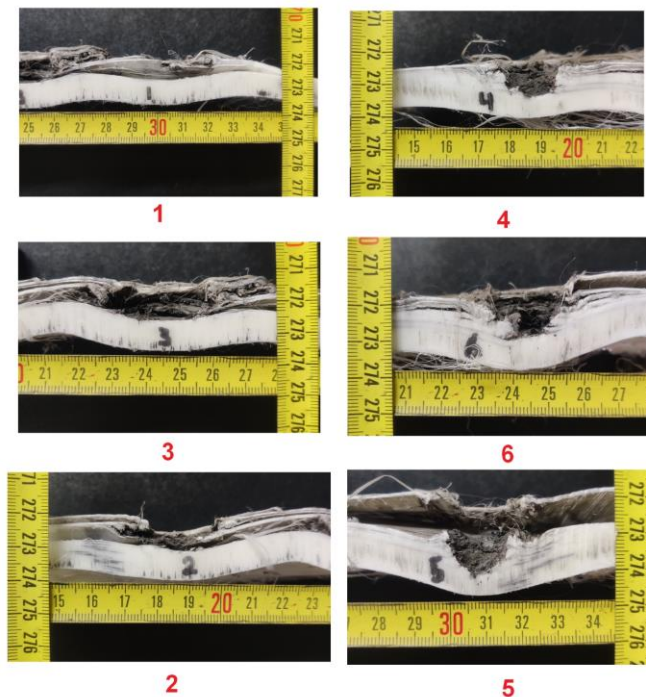
Βαλλιστικές δοκιμές – Αποσύνθεση θωράκισης

➤ Η αποσύνθεση της εκάστοτε βαλλιστικής θωράκισης ανά τις διεπιφάνειες των συντελεστών της, με εμφανή την αρίθμηση βολών κρίνεται απαραίτητη καθώς :

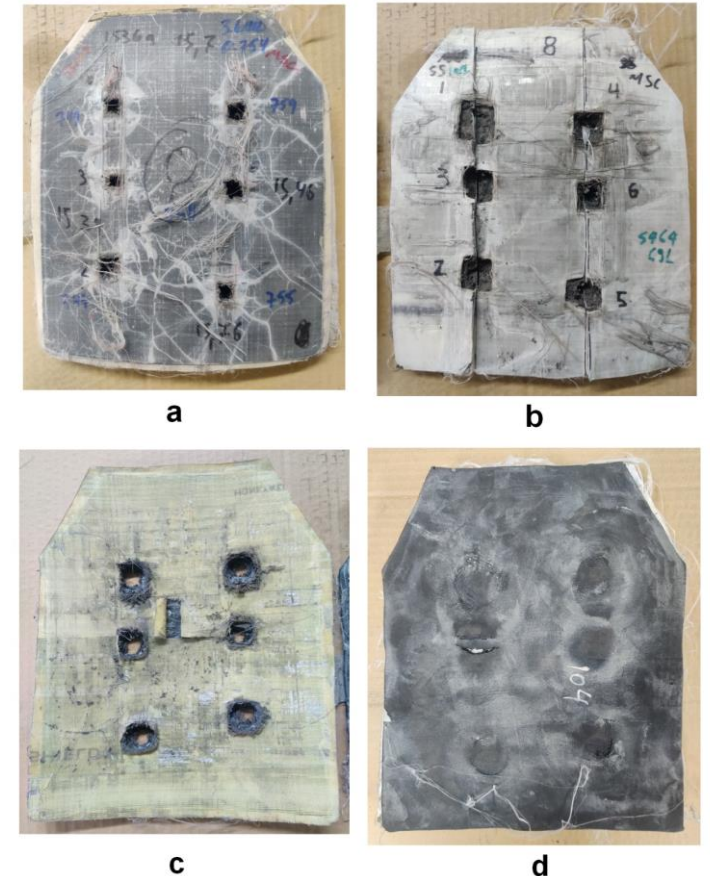
- Μετράται η πρόοδος της ακτίνας επιρροής τους στο κεραμικό με κέντρο την εστία του βλήματος ως ο μέσος όρος των δύο διαμέτρων της ελλειψοειδούς θραυσμένης περιοχής γύρω από την οπή του βλήματος στη κεραμική πλάκα.
- Υπολογίζονται τα μεγέθη PP, CP και DOP κατόπιν εγκάρσιας τομής στα σημεία βολής.



Αρίθμηση
(καθρέπτης) των
βολών του δοκιμίου
4 στην διεπιφάνεια
συνθέτου-κεραμικής
πλάκας με
αραμιδική ενίσχυση.



Σημεία βολών του δοκιμίου 4 σε τομή
και υπό κλίμακα.



Δοκίμιο 4 (a) εμπρόσθια όψη αντιθραυσματικής
επίστρωσης κατόπιν αφαίρεση του καλύματος,
(b) σύνθετη πλάκα (με τομές βολών), (c) κεραμική
πλάκα με αραμιδική ενίσχυση, (d) πίσω όψη με
κάλυμα.

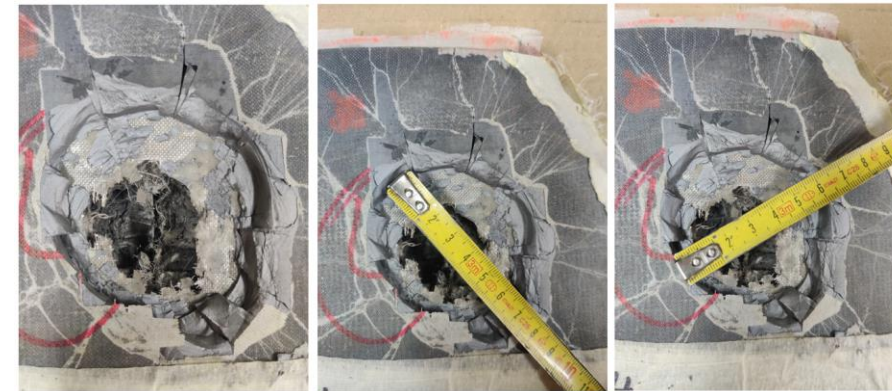
Βαλλιστικές δοκιμές – Θραυστομηχανική ανάλυση κεραμικών πάνελ

➤ Εξεταζόμενα δοκίμια :

- Θωράκιση από μονοκεραμικό SiC πάχους 5.2 mm με αραμιδική ενίσχυση και σύνθετο πάνελ υλικού A πάχους 9.6 mm (69 φύλλα πάχους 0.139 mm έκαστο) από μία βολή μη διατρητικού βλήματος M80 FMJ 7.62x51.
- 2 θωρακίσεις από μονοκεραμικού SiC, πάχους 5.2 mm και σύνθετο πάνελ υλικού A πάχους 9.6 mm, μία με αραμιδική ενίσχυση και μία χωρίς (2.A και 2.B αντίστοιχα) και 2 θωρακίσεις σύνθετου πάνελ υλικού B (3.A και 3.B αντίστοιχα), από 6 βολές μη διατρητικών βλημάτων M80 FMJ 7.62x51 η καθεμία.
- Θωράκιση από μονοκεραμικού SiC, πάχους 5.2 mm με αραμιδική ενίσχυση και σύνθετο πάνελ υλικού A πάχους 9.6 mm, από 3 βολές μη διατρητικών βλημάτων SS109 FMJBT 5.56x45 και 3 βολές διατρητικών βλημάτων MSC 7.62x39.

➤ Οι μέσες διαμέτροι δεν βαίνουν απαραίτητα μειούμενες κατά την πρόοδο των βολών καθώς το **μοτίβο αρίθμησης** παίζει ρόλο στην σταδιακή υποβάθμιση του μονοκεραμικού, δηλαδή η περιοχή ακτινικής θραύσης μεταξύ δύο βολών επηρεάζεται από την σχετική τους απόσταση.

➤ Ανεξαρτήτως τύπου βλήματος (διατρητικό η μη) και μοτίβου αρίθμησης των βολών η **μεγαλύτερη φθορά** επέρχεται στο κεραμικό πάνελ από το πρώτο βλήμα καθώς εκεί «**παραβιάζεται**» για πρώτη φορά η πρόσφυση μεταξύ των συντελεστών αυτών της θωράκισης.

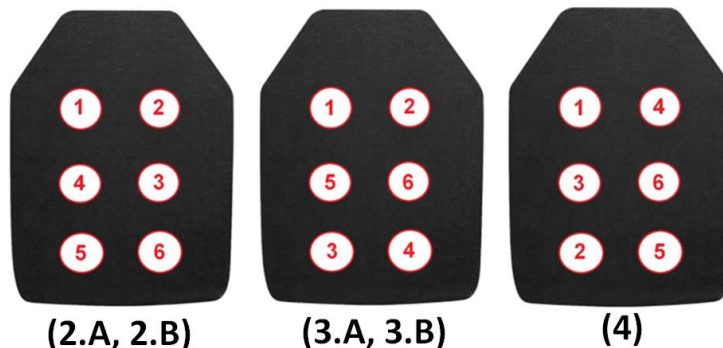


Μέτρηση των 2 κύριων διαμέτρων της ελλειψοειδούς θραυσμένης περιοχής για την εξαγωγή του μέσου όρου.

Βολή	Διάμετρος επιρροής του βλήματος επί του κεραμικού (mm)		
	Δοκίμιο 2.A (υλικό πάνελ A)	Δοκίμιο 3.A (υλικό πάνελ B)	Δοκίμιο 4 (υλικό πάνελ A)
1	30	40	25
2	25	25	25
3	20	42.5	20
4	20	25	27.5
5	25	22.5	27.5
6	25	15	25
M.O	24.2	24.2	25

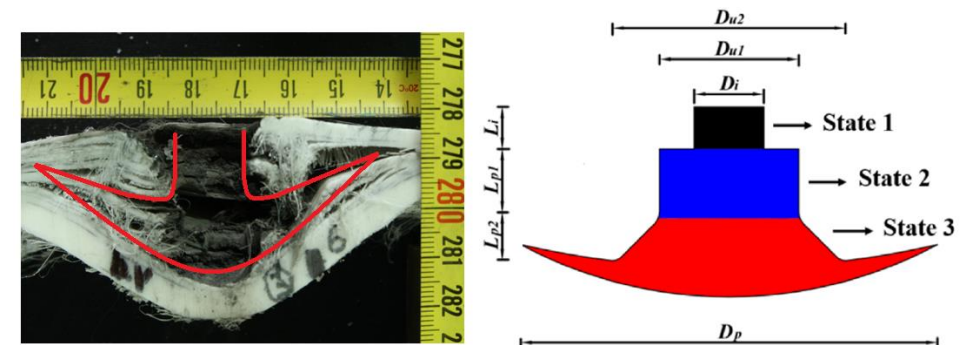
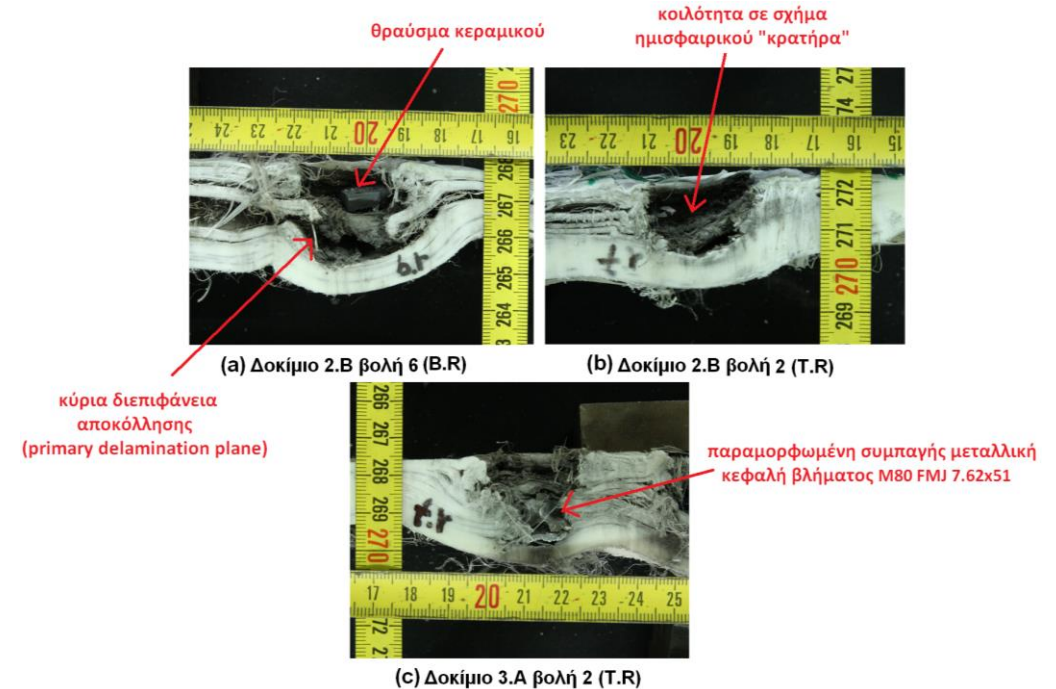
Διάμετροι επιρροής βλημάτων για τα δοκίμια 2.A, 3.A και 4.

Σειρά αρίθμησης βολών επί των δοκιμίων 2.A, 2.B, 3.A, 3.B και 4.



Βαλλιστικές δοκιμές - Επίδοση θωρακίσεων διαφορετικών υλικών σύνθετων πάνελ για δεδομένο βλήμα

- Τα βλήματα των δοκιμών **2.A, 2.B, 3.A και 3.B** είναι **μη διατρητικά** (non-piercing). Τα φουσίγγια τους (jacket) και ο πυρήνας τους (core) αποτελούνται από μαλακά μέταλλα (Light Steel Core bullets-LPS) και όχι από σκληρό μέταλλο.
- Το **κυρίως σώμα** του βλήματος (**jacket & core**) τείνει να θραυσματοποιείται πλήρως ενώ η **συμπαγής κεφαλή** (**steel warhead**) είτε **εξαϋλώνεται** κατά την πρόσκρουση με το μονοκεραμικό είτε **παραμορφώνεται** εκτενώς.
- Εφόσον το βλήμα έχει διαπεράσει το μονοκεραμικό, κατά την φάση εισόδου του στο σύνθετο πάνελ ο μηχανισμός παραμόρφωσης που επικρατεί είναι η **θράυση των πρώτων ινών (I)**. Κατά την φάση θραυσματοποίησης του βλήματος το σύνθετο πάνελ υφίσταται **διαφυλλική αποκόλληση (III)** με ταυτόχρονη **θράυση ινών (I)** καθώς το βλήμα σταδιακά χάνει την διατρητική του ικανότητα λόγω τριβής με τις διεπιφάνειες αποκόλλησης (II).



Χαρακτηρισμός σταδίων διάνοιξης οπής 2 και 3 για μη διατρητικά βλήματα M80 FMJ επί τομής στο σημείο βολής 6 του δοκιμίου 2.A.

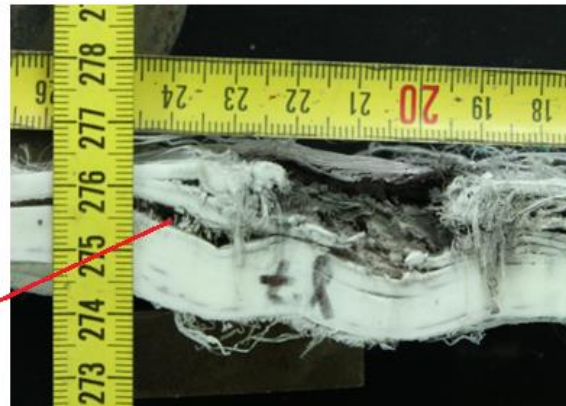
Βολή	Βάθος διείσδυσης DOP (%)			
	Υλικό πάνελ UHMWPE υλικού A		Υλικό πάνελ UHMWPE B	
	Δοκίμιο 2.A	Δοκίμιο 2.B	Δοκίμιο 3.A	Δοκίμιο 3.B
1	19	10	13	20
2	57	24	50	18
3	50	28	21	28
4	63	51	34	21
5	31	20	41	31
6	41	46	54	28
M.O	43	30	35	24

Βάθη διείσδυσης DOP (%) για τα δοκίμια 2.A, 2.B, 3.A και 3.B.

Βαλλιστικές δοκιμές - Απόκριση θωράκισης δεδομένου υλικού πάνελ σε διαφορετικά βλήματα

Δοκίμιο	Βολές	Βλήμα	Μ.Ο Βάθους διείσδυσης DOP (%)
2.B	1-6	M80 FMJ 7.62x51	29
4	1-3	SS109 FMJBT 5.56x45	7
4	4-6	MSC 7.62x39	32

Βάθη διείσδυσης DOP (%) βολών από διαφορετικούς τύπους βλημάτων επί θωρακίσεων ίδιου σύνθετου πάνελ υλικού Α.



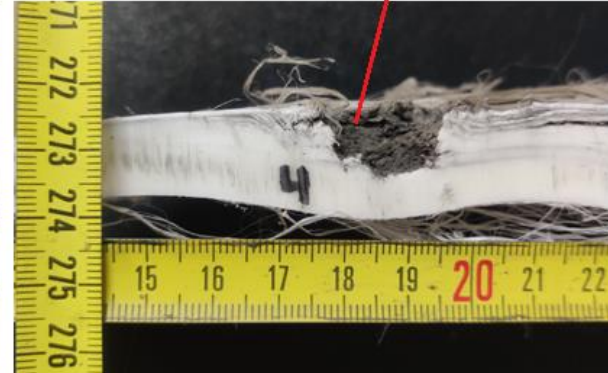
κύριες διεπιφάνειες αποκόλλησης (primary delamination planes)

τυφλή οπή σε σχήμα ημισφαιρικού "κρατήρα"

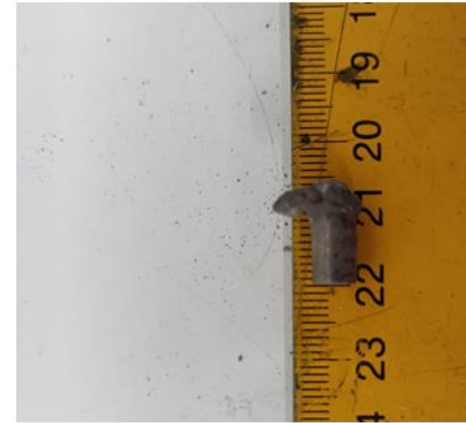
Δοκίμιο 2.B βολή 1 (βλήμα M80)



Δοκίμιο 4 βολή 1 (βλήμα SS109)



Δοκίμιο 4 βολή 4 (βλήμα MSC)



Διαστασιολόγηση παραμορφωμένου συμπαγούς πυρήνα βλήματος MSC 7.62x39 επί δοκιμίου 4. Εντοπίζονται θραύσματα του μεταλλικού περιβλήματος (steel jacket).



Βαλλιστικές δοκιμές – Συμπεράσματα και αντιστάθμιση κινδύνων διαφορετικών τύπων βλημάτων

- Τα μη διατρητικά βλήματα **M80 FMJ 7.62x51** έχουν υψηλή ενέργεια εξόδου (3,470 J) και τυπικά μικρή διατρητικότητα (μικρή πένετρα), εμφανίζουν βαθύ αποτύπωμα BFS λόγω του μηχανισμού BFD και προκαλούν έντονη παραμόρφωση λόγω αποκόλλησης των φύλλων του πάνελ (interlaminar shear-delamination).
- Τα μη διατρητικά βλήματα **SS109 FMJBT 5.56x45** έχουν αρκετά χαμηλότερη ενέργεια εξόδου (1,797 J) των **M80**, μικρή διατρητικότητα, εμφανίζουν μικρό αποτύπωμα BFS. Παρ' όλα αυτά προξενούν αισθητή αποκόλληση των φύλλων των σύνθετων πάνελ.
- Τα **διατρητικά βλήματα** τύπου **MSC 7.62x39** έχουν μεν χαμηλότερη ενέργεια εξόδου (2,036 J) των **M80** ωστόσο μεγαλύτερη διατρητικότητα (μεγάλη πένετρα) λόγω του συμπαγούς μεταλλικού τους πυρήνα, γι' αυτό και τείνουν να **εμφανίζουν πιο ρηχό και ευρύ αποτύπωμα BFS** καθώς ο **μηχανισμός της αποκόλλησης εξαπλώνεται του διεπιφανειακά των επάλληλων φύλλων, παρά κατά το πάχος του συνθέτου.**
- Τα **σύνθετα πάνελ υλικού A παρουσιάζουν**, για δεδομένο βλήμα (M80), **21% μεγαλύτερο βάθος διείσδυσης DOP** από τα πάνελ υλικού B και επομένως καθίστανται (αντι)βαλλιστικά υποδεέστερα.
- Ο μηχανισμός **BFD** λόγω της διαφυλλικής αποκόλλησης **εμφανίζεται εντονότερα στα σύνθετα πάνελ υλικού A.**
- Τα **βλήματα MSC παρουσιάζουν** για δεδομένη σύσταση (αντι)βαλλιστικών δοκιμίων με σύνθετο πάνελ υλικού A, **384% βαθύτερο DOP των SS109 και 11% βαθύτερο DOP των M80.**

Τύπος βλήματος	Βασικά χαρακτηριστικά, μηχανισμοί αστοχίας για τη θωράκιση και επίπεδο κινδύνου τραυματισμού του χρήστη.	Δυνατοί τρόποι αντιστάθμισης
M80 FMJ 7.62x51	<ul style="list-style-type: none"> • Πολύ υψηλή ενέργεια εξόδου • Σχετικά μικρή διατρητικότητα (μικρό βάθος διείσδυσης DOP) • Έντονη παραμόρφωση λόγω του μηχανισμού αποκόλλησης (delamination) • Βαθύ και συγκεντρωμένο αποτύπωμα BFS λόγω του μηχανισμού παραμόρφωσης BFD του συνθέτου. 	<ul style="list-style-type: none"> • Αύξηση του πάχους του βαλλιστικού αφρού ή υβριδοποίηση του με άλλα κατάλληλα υλικά με σκοπό την αφομείωση του BFS. • Αύξηση του πάχους πάνελ ώστε να περιοριστεί το εύρος του BFD. • Ίσως να καθίσταται δυνατή η πλήρης αντικατάσταση του κεραμικού πάνελ με ικανοποιητικό πάχος σύνθετου πάνελ και άρα υπολειπόμενου μη διατρηθέντος υλικού.
SS109 FMJBT 5.56x45	<ul style="list-style-type: none"> • Χαμηλή ενέργεια εξόδου • Πολύ μικρή διατρητικότητα • Ρηχό αποτύπωμα BFS 	<ul style="list-style-type: none"> • Ένα μεγαλύτερο πάχος κεραμικού δύναται να αντισταθμίσει την ανάγκη ύπαρξης του σύνθετου πάνελ εξ' ολοκλήρου.
MSC 7.62x39	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλή ενέργεια εξόδου • Μεγάλη διατρητικότητα • Μικρή παραμόρφωση του πάνελ λόγω εκτενούς παραμόρφωσης του συμπαγούς πυρήνα. • Ρηχό και ευρύ αποτύπωμα BFS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Αύξηση του πάχους του κεραμικού. • Αύξηση του πάχους του σύνθετου πάνελ. • Συνδυασμός της σκληρής με μαλακή θωράκιση (hard armor in conjunction with soft armor- ICW).

Μηχανικές δοκιμές – Εργαστηριακός εξοπλισμός

- Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τις μηχανικές δοκιμές είναι η **μηχανή στατικού/δυναμικού ελέγχου Instron® 4482 του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ**. Το **μέγιστο** στατικό (και το δυναμικό) **φορτίο** της μηχανής είναι τα **100 kN** ενώ οι μετρήσεις λαμβάνονται μέσω η/υ, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με την μηχανή, με το λειτουργικό πρόγραμμα **BLUEHILL 2**.
- Η μηχανή **βαθμονομείται πριν από κάθε ξεχωριστή δοκιμή**.
- Για τις δοκιμές εφελκυσμού και αποφλοιώσης η διάταξη φέρει 2 όμοιες μηχανικές αρπάγεις που συγκρατούν το εκάστοτε δοκίμιο σταθερό κατά τον κατακόρυφο άξονα. Το εφελκυστικό και το αποφλοιωτικό αντίστοιχα φορτίο ασκούνται από την επάνω αρπάγη ενώ η κάτω παραμένει σταθερή.
- Για τις δοκιμές κάμψης τριών σημείων τα αντίστοιχα δοκίμια τοποθετούνται επάνω σε κυλίνδρους αυτοσχέδιας στήριξης διαμέτρου 3 mm και κεντράρονται ως προς τον επάνω κύλινδρο του φορτίου διαμέτρου 6mm.



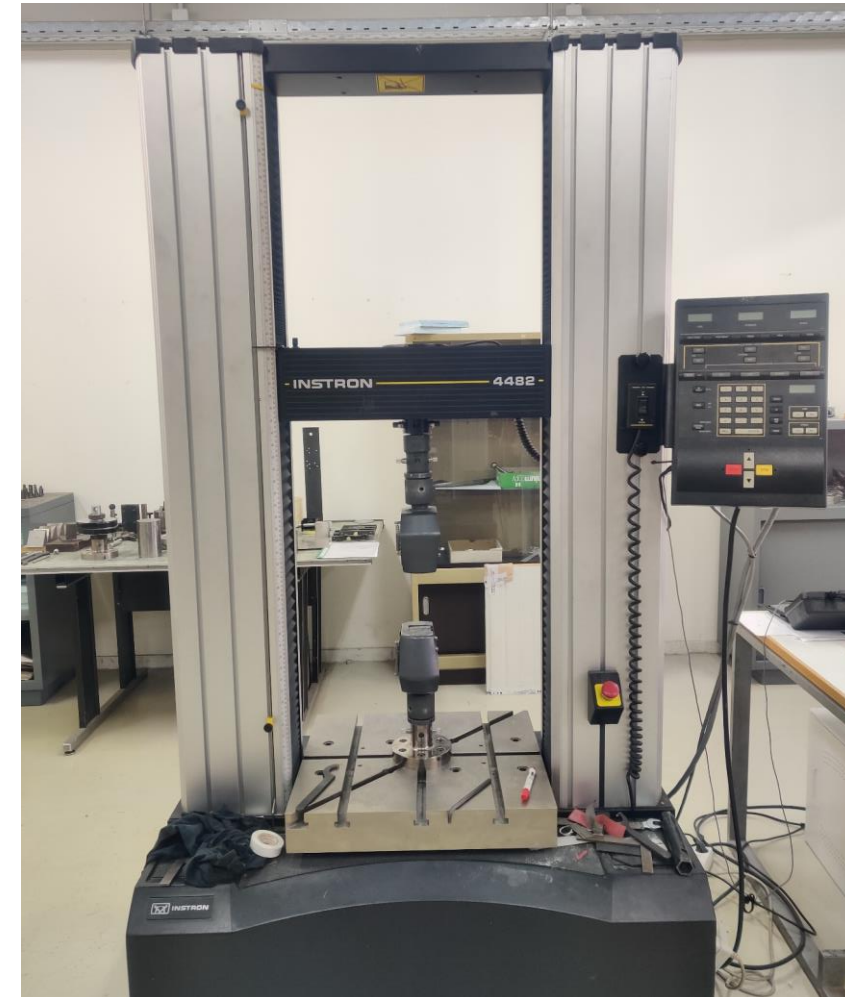
Δοκίμιο εφελκυσμού



Δοκίμιο αποφλοιώσης



Δοκίμιο κάμψης τριών σημείων

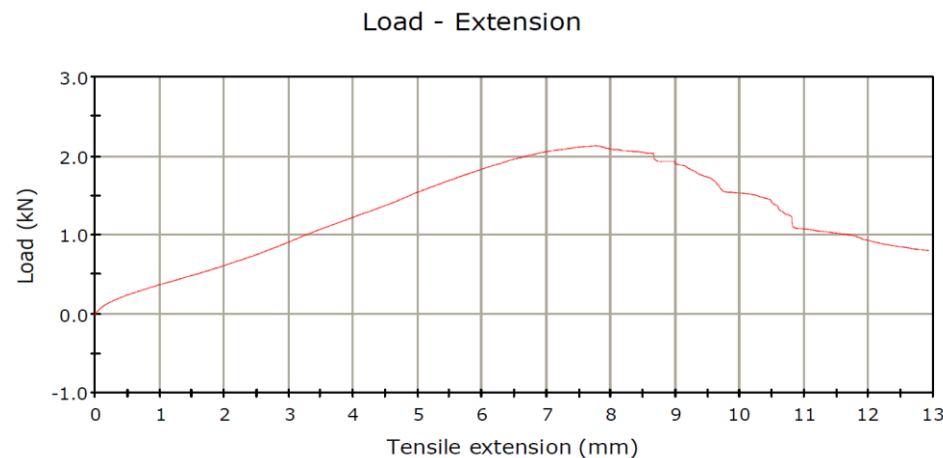


Μηχανικές δοκιμές – Εφελκυσμός (1)

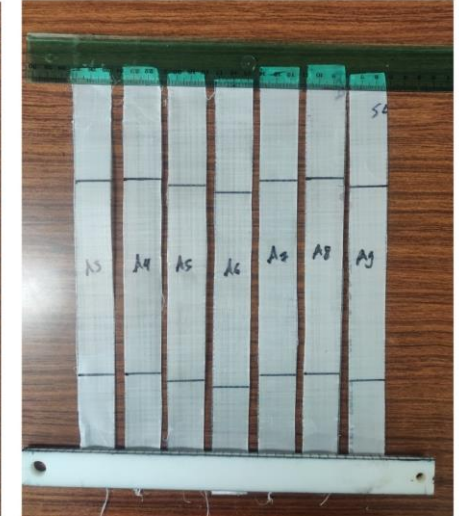
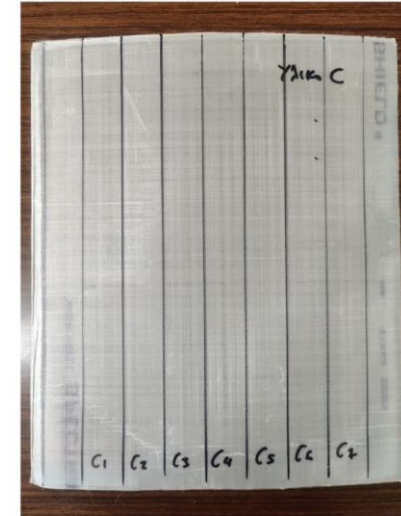
- Οι μηχανικές μας δοκιμές εφελκυσμού γίνονται σύμφωνα με το πρότυπο D3039/D3039M.
- Τα δοκίμια UHMWPE υλικών A, B και C αποτελούν λωρίδες μονών φύλλων προεμποτισμένων (pre-impregnated) ινών με διάταξη $[0^\circ/90^\circ]_2$ (συνολικά 4 στρώσεις ινών).
- Ο ελάχιστος αριθμός δοκιμών, ανά υλικό, είναι 5.
- Η περιοχή του ενεργού μήκους και του μήκους συγκράτησης, αφαιρώντας 56 mm από τις ακμές του συνολικού μήκους 254 mm των δοκιμών και τέλος τα δοκίμια κόβονται με χρήση ειδικού ισχυρού ψαλιδιού (tough fiber/special application scissors).
- Το κατασκευαστικό πάχος των φύλλων διαφέρει ανά υλικό. Πιο συγκεκριμένα τα δοκίμια διαστασιολογούνται ως :

- Υλικό A : 25.4 mm (πλάτος) x 254 mm (μήκος) x 0.139 mm (πάχος).
- Υλικό B : 25.4 mm (πλάτος) x 254 mm (μήκος) x 0.130 mm (πάχος).
- Υλικό C : 25.4 mm (πλάτος) x 254 mm (μήκος) x 0.275 mm (πάχος).

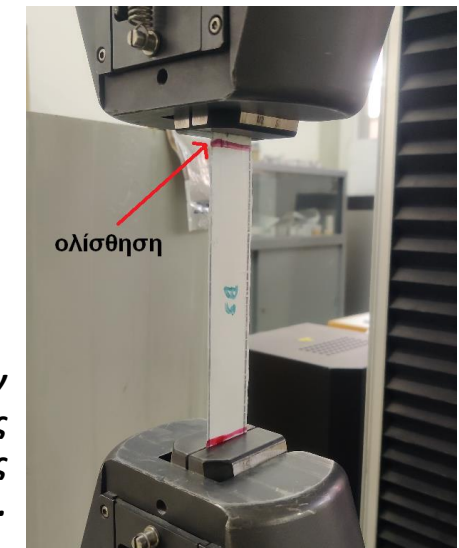
- Ο τρόπος συγκράτησης των δοκιμών κρίθηκε ανεπαρκής. Λόγω της υψηλής αντοχής των υλικών, της ολισθηρής τους επιφάνειας και της χειροκίνητης σύσφιξης των αρπαγών παρατηρήθηκε επανειλημμένη ολίσθηση με την σταδιακή αύξηση του εφελκυστικού φορτίου κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Αυξομείωση της εφελκυστικής τάσης λόγω ολίσθησης στις αρπάγεις, κατά τον εφελκυσμό μονόφυλλου δοκιμίου $[0^\circ/90^\circ]_2$ υλικού B.



Προετοιμασία δοκιμών εφελκυσμού.



Ολίσθηση των δοκιμών στις μηχανικές αρπάγεις.

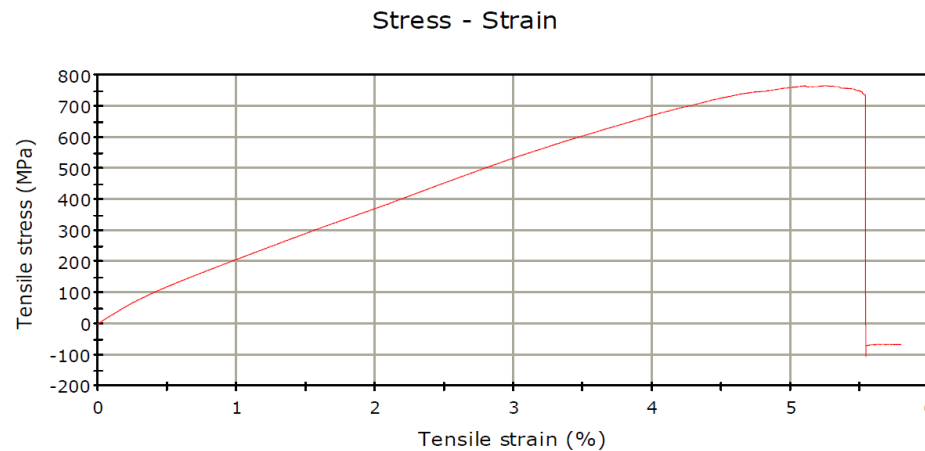
Μηχανικές δοκιμές – Εφελκυσμός (2)

- Ένα δοκίμιο κατάφερε να αστοχίσει «επιτυχώς» στο όριο του ενεργού μήκους και εξωτερικά από τις λαβές συγκράτησης.
- Δεν υπάρχει αξιοπιστία του πειράματος λόγω μη επαναληψιμότητας του αποτελέσματος, της περιοχής αστοχίας του δοκιμίου κοντά στις αρπάγεις, του τραυματισμού του από τις γλωττίδες/ραφές συγκράτησης, του πιθανού τραυματισμού του κατά την κοπή του αλλά και λόγω ενδεχόμενου ελλατώματος/ ασυνέχειας του υλικού στο σημείο αστοχίας.
- Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και απλοποιώντας τον κανόνα των μιγμάτων, αγνοώντας δηλαδή την συμβολή της μήτρας λόγω της μικρής κατ' όγκου περιεκτικότητας της και την εφελκυστική της τάση (σαφώς μικρότερη των ινών), ως : $\sigma_{c_{max}} = \sigma_{f_{max}} v_f$ όπου :

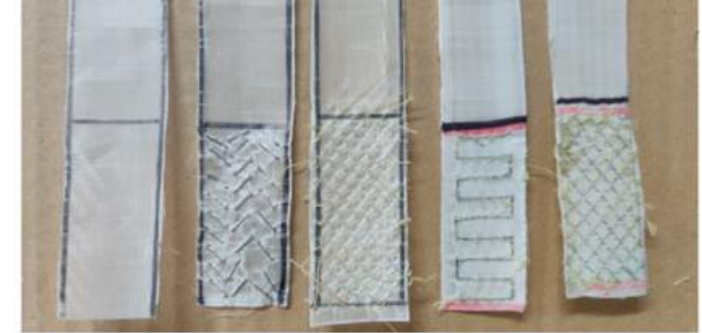
- $\sigma_{c_{max}}$: η μέγιστη εφελκυστική τάση (προ θραύσης) του συνθέτου (κατά τη διεύθυνση του εφελκυσμού) [Pa].
- $\sigma_{f_{max}}$: η μέγιστη εφελκυστική τάση των ινών [Pa].
- v_f : το κλάσμα όγκου των ινών στο σύνθετο.

υπολογίζονται διαισθητικά οι τάσεις θραύσης των συνθέτων υλικών A, B και C :

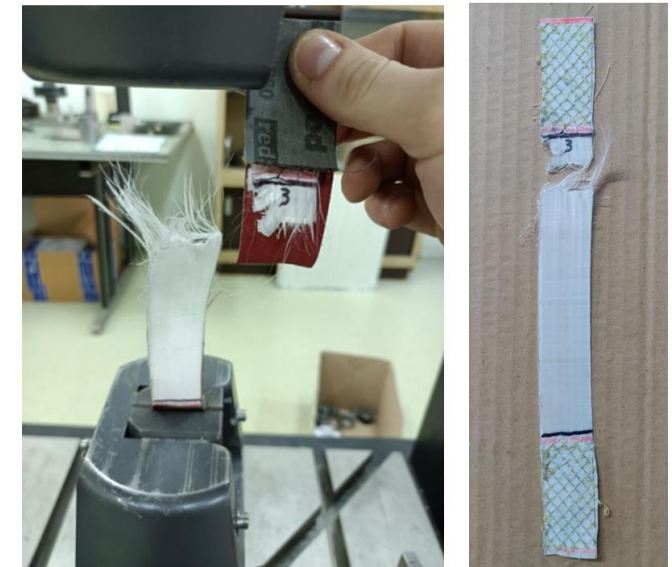
- $\sigma_{c_{max,A}} \approx 1.25 \text{ GPa}$
- $\sigma_{c_{max,B}} \approx 1.7 \text{ GPa}$
- $\sigma_{c_{max,C}} \approx 1.1 \text{ GPa}$



Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης με τάση θραύσης 0.767 GPa.



Δοκίμια εφελκυσμού με διαφοροποιήσεις ραφών στις ακμές συγκράτησης.



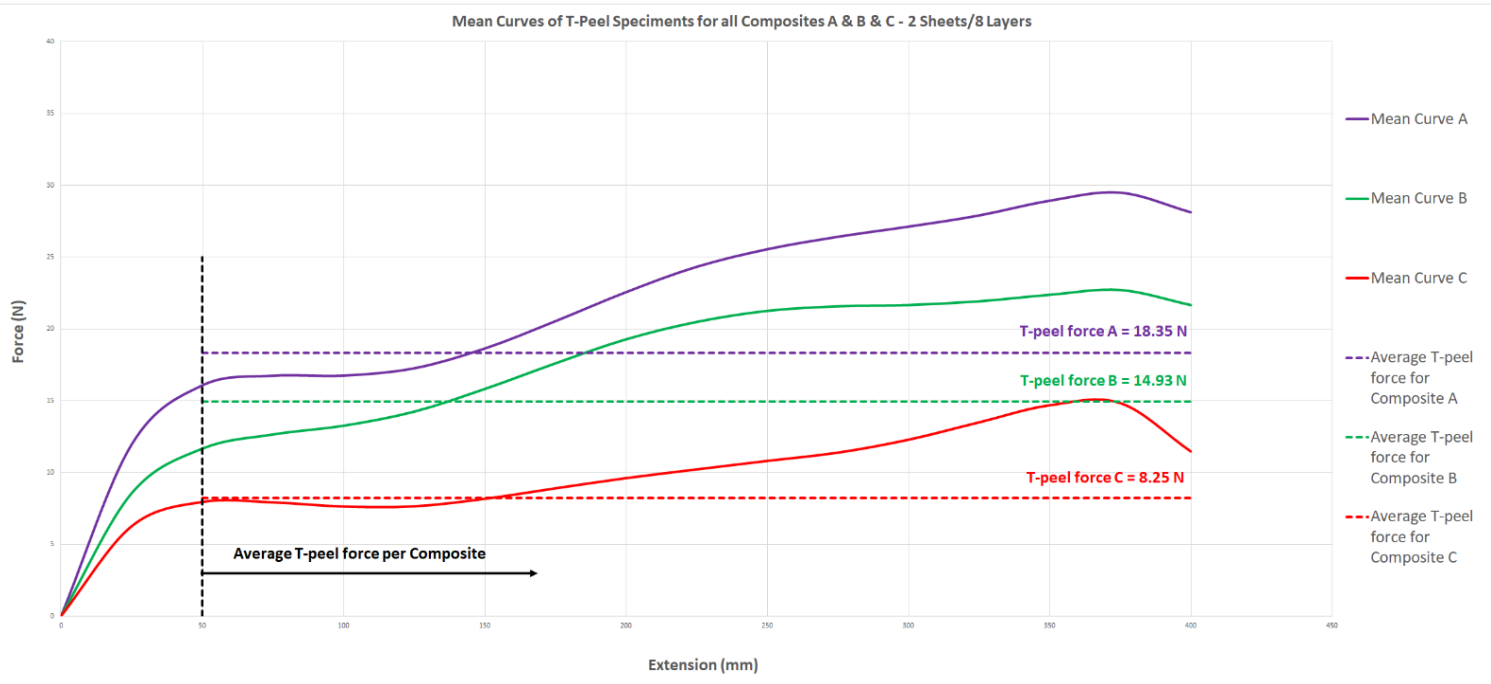
Δοκίμιο 2 φύλλων σύνθετου υλικού A κατόπιν εφελκυστικής δοκιμής.

Μηχανικές δοκιμές – Αποφλοίωση

- Οι μηχανικές δοκιμές αποφλοίωσης γίνονται σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM D1876**.
- Τα δοκίμια **UHMWPE υλικών A, B και C** αποτελούν **συγκόλληση 2 φύλλων** με διάταξη $[0^\circ/90^\circ]_4$ (συνολικά 8 στρώσεις ινών).
- Ο ελάχιστος αριθμός δοκιμών, ανά υλικό, είναι 10.
- Τα δοκίμια διαστασιολογούνται ως :
 - **Υλικό A** : 25.4 mm (πλάτος) x 305 mm (μήκος) x 0.278 mm (πάχος).
 - **Υλικό B** : 25.4 mm (πλάτος) x 305 mm (μήκος) x 0.260 mm (πάχος).
 - **Υλικό C** : 25.4 mm (πλάτος) x 305 mm (μήκος) x 0.550 mm (πάχος).



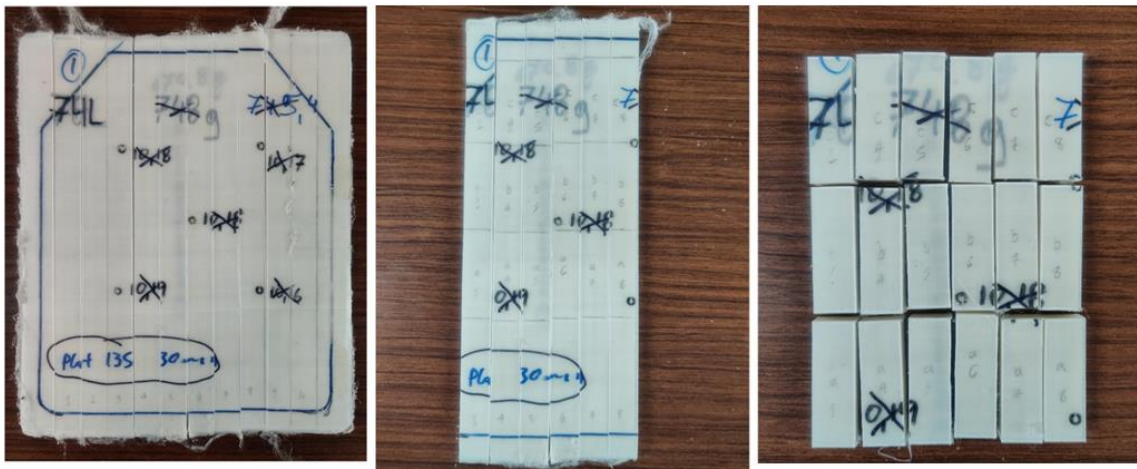
Προετοιμασία δοκιμών αποφλοίωσης.



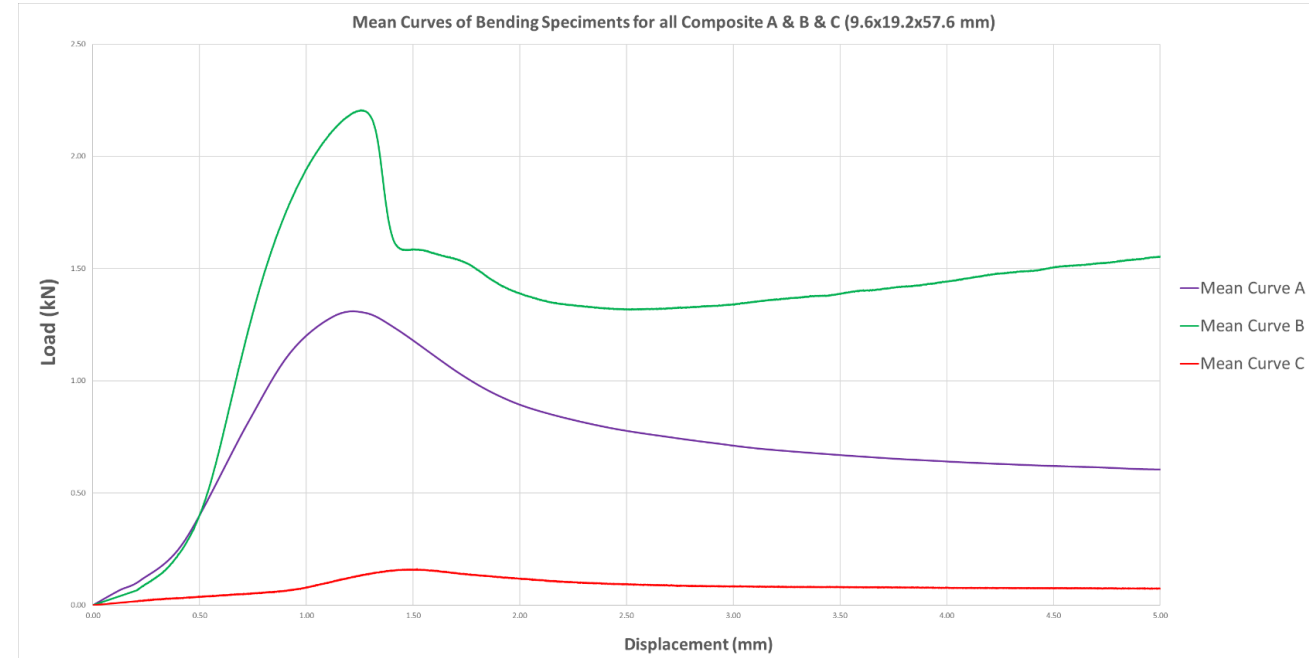
- Η **μέση δύναμη αποκόλλησης**, υπολογίζεται για τα πρώτα 127 mm της συγκολλημένης περιοχής μετά την εμφάνιση της πρώτης κορυφής της εκάστοτε μέσης καμπύλης (και των 10 δοκιμών ανά υλικό), περί τα 50 mm ως :
 - $F_{T-peel,A} = 18.35 \text{ N}$
 - $F_{T-peel,C} = 8.25 \text{ N}$
 - $F_{T-peel,B} = 14.93 \text{ N}$
- Τα υλικά **A και B** φαίνεται να κατέχουν ίδιας τάξης και ταυτόχρονα **υψηλότερη συγκολλητική** (διαφυλλική και ενδοφυλλική) **ικανότητα από το υλικό B**.

Μηχανικές δοκιμές – Κάμψη τριών σημείων (1)

- Οι μηχανικές δοκιμές κάμψης τριών σημείων γίνονται σύμφωνα με το πρότυπο **ASTM D2344M**.
- Τα δοκίμια **UHMWPE** υλικών **A, B και C** αποτελούν συγκόλληση **69, 74 και 35 φύλλων** αντίστοιχα.
- Ο ελάχιστος αριθμός δοκιμών, ανά υλικό, είναι 5.
- Οι διαστάσεις των δοκιμών αλλά και την απόσταση μεταξύ των στηρίξεων της διάταξης είναι :
 - πάχος : **9.6 mm**
 - μήκος : 6 x πάχος = **57.6 mm**
 - απόσταση μεταξύ στηρίξεων (span length) : 4 x πάχος = **38.4 mm**
 - πλάτος : 2 x πάχος = **19.2 mm**



Προετοιμασία δοκιμών κάμψης.

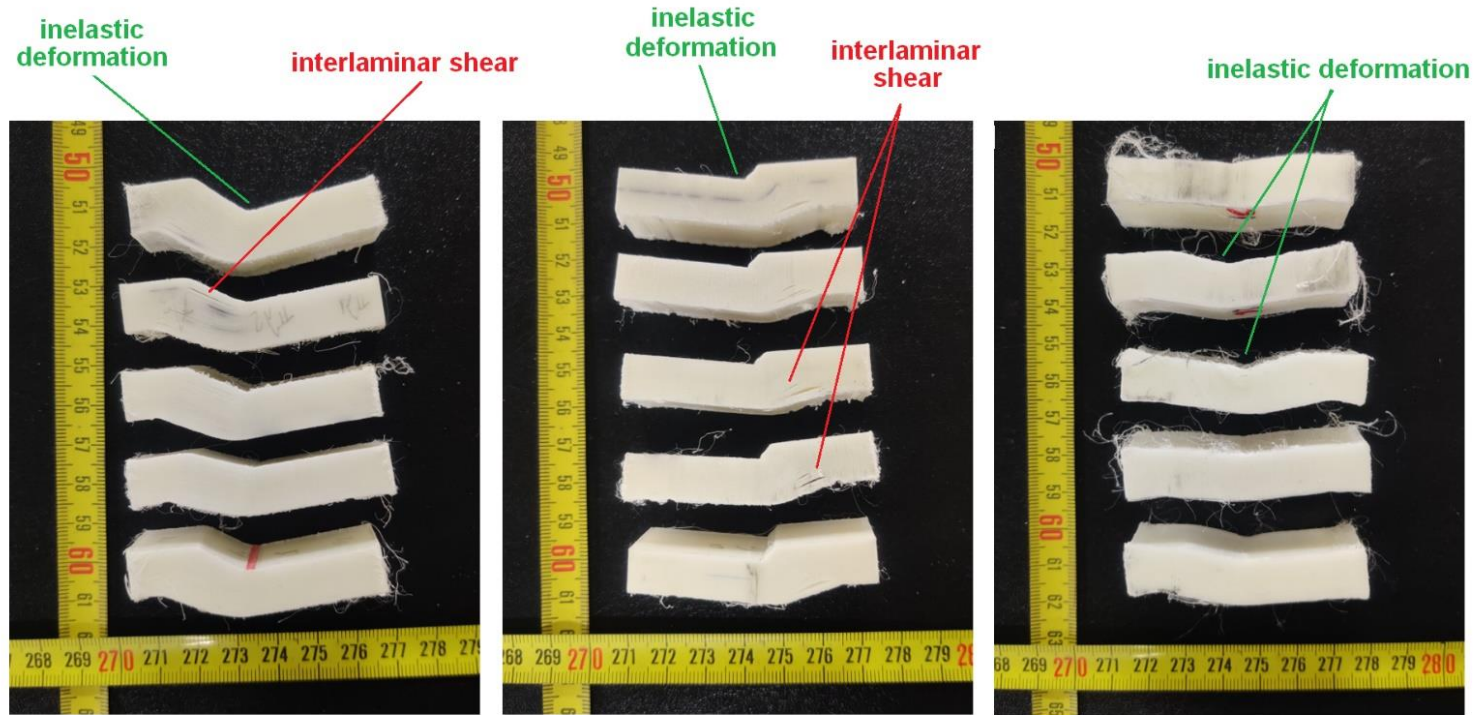


- Με βάσει το μέγιστο εμφανιζόμενο καμπτικό φορτίο P_{max} υπολογίζεται η μέγιστη διατμητική τάση (shear stress) των δοκιμών, υλικών A, B και C, για γνωστό πλάτος, $b = 19.2$ mm και πάχος, $h = 9.6$ mm, από την σχέση :

$$\sigma_s = 0.75 \frac{P_{max}}{bh}, \text{ ως :}$$

- $\sigma_{s,A} \approx 5.30$ MPa
- $\sigma_{s,B} \approx 8.98$ MPa
- $\sigma_{s,C} \approx 0.66$ MPa

Μηχανικές δοκιμές – Κάμψη τριών σημείων (2)



Bending Specimens of Composite A Bending Specimens of Composite B Bending Specimens of Composite C

- Τα δοκίμια υλικού B φαίνεται «**ανακουφίζονται**» με τον μηχανισμό αστοχίας της **διαφυλλικής αποκόλλησης** (interlaminar shear-delamination) περισσότερο των A και C.
- Τόσο τα δοκίμια υλικού B όσο και τα A και C **παραμορφώνονται πλαστικά** (inelastic deformation).
- Λόγω χαμηλής διαφυλλικής πρόσφυσης και άρα καμπτικής αντοχής **το υλικό B τείνει να χρησιμοποιείται σε (αντι)βαλλιστικές διατάξεις αυξημένου πάχους και βάρους.**
- **Το υλικό B υπερτερεί μηχανικά**, των A και C καθώς παρουσιάζει αυξημένη καμπτική αντοχή και επαναφορά.

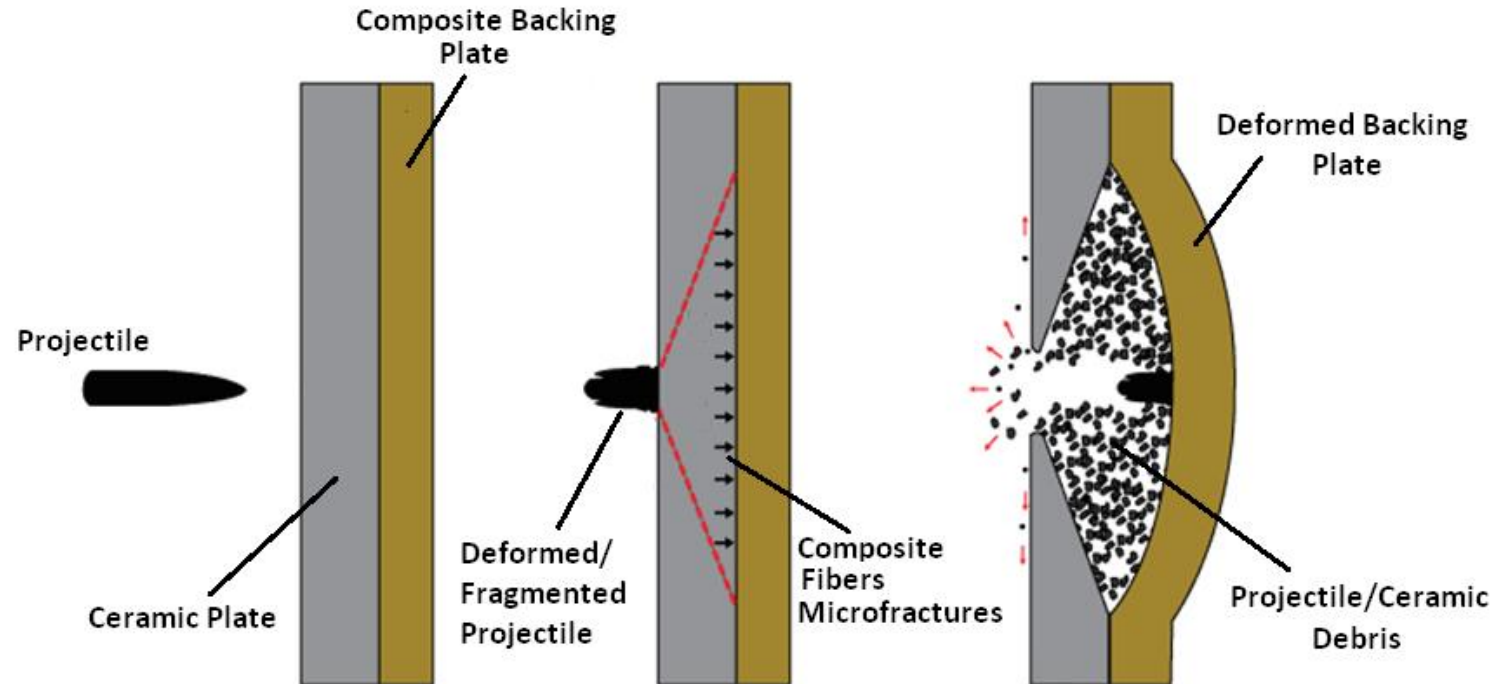
Γενικά συμπεράσματα

1. Η τελική απόδοση μιας θωράκισης είναι πολυπαραγοντική καθώς εξαρτάται αρχικά από τη συμπεριφορά του καθενός συστατικού του υβριδικού συνθέτου (κεραμικό, σύνθετη πλάκα UHMWPE, βαλλιστικός αφρός), από τον κατάλληλο και επαρκή συνδυασμό τους κατά την μορφοποίηση του τελικού προϊόντος αλλά και από τον τρόπο δοκιμής τους, δηλαδή το μοτίβο αρίθμησης των βολών και φυσικά το είδος του βλήματος.
2. Ο απώτερος σκοπός μίας θωράκισης είναι τρίπτυχος : να σταματήσει την διάτρηση (ακινητοποίηση του βλήματος), να επιφέρει το μικρότερο δυνατό αποτύπωμα BFD και να περιορίσει την θραυσματοποίηση των συντελεστών της.
3. Οι δύο βασικοί παράγοντες που χαρακτηρίζουν μία καλή θωράκιση είναι η **παροχή προστασίας και η ελαχιστοποίηση του πάχους και του βάρους της διάταξης**, για δεδομένη (αντι)βαλλιστική απόδοση (αλλά και η ανάγκη βελτιστοποίησης του σχήματος και της ευκαμψίας), από την άλλη, η οποία και επάγεται τη διατήρηση της δομής της.
4. Η **διάταξη των θέσεων των βολών (μοτίβο αρίθμησης) επηρεάζει την μεταφορά των μηχανισμών αστοχίας** και άρα (αντι)βαλλιστικά δοκίμια με διαφορετική διαταξη δεν είναι εντελώς συγκρίσιμα καθώς με την σταδιακή υποβάθμιση μιας θωράκισης αυτή σταδιακά αποκτά "μνήμη".
5. Η **καταστροφική καταπόνηση του μονοκεραμικού και του σύνθετου πάνελ είναι επιθυμητή** καθώς μειώνεται έτσι η επιρροή της βαλλιστικής κρούσης στον χρήστη (αφομείωση μηχανισμού BFD).
6. Οι **τρόποι αντιστάθμισης των διαφόρων μηχανισμών αστοχίας της εκάστοτε θωράκισης εξαρτώνται από τον τύπο και το πλήθος των απειλών που καλείται αυτή να αντιμετωπίσει**, εν ολίγοις το επίπεδο της θωράκισης. Η **αύξηση του πάχους του βαλλιστικού αφρού ή και του κεραμικού** αποτελούν γενικά ικανές μεθόδους αντιστάθμισης ιδιαίτερα ενάντια σε βλήματα υψηλής ενέργειας εξόδου (M80, MSC).
7. Σημαντικός παράγοντας του «κατά πλάτος» αντί για «κατά πάχος» διαμοιρασμού της ενέργειας ενός βλήματος, ανεξαρτήτως τύπου, είναι η **υψηλή ελαστικότητα των προεμποτισμένων ινών UHMWPE** σε συνδυασμό πάντα με την βέλτιστη πρόσφυσή τους στην μήτρα.
8. Η **μήτρα που συγκρατεί τις ίνες σε «ευθυγράμμιση» κατέχει μικρή περιεκτικότητα κατ'όγκο (<20%) και κυρίως τον ρόλο του «ενισχυτικού-συγκολλητικού» μέσου τους.**
9. Η **εκτενής παραμόρφωσή των βλημάτων MSC συμπαγούς πυρήνα, αντανακλά καλύτερα την υψηλή απόδοση των σύνθετων πάνελ UHMWPE** και ωφελεί την κατανόηση των ιδιοτήτων τους.
10. Είναι **προτιμότερο ένα ρηχό και ευρύ τραύμα** παρά ένα συγκεντρωμένο και βαθύ, με σκοπό την **αφομείωση του BFS** και εν δυνάμει των **τραυματισμών του χρήστη** λόγω του μηχανισμού BFD.
11. Η **θραύση της μονοκεραμικής πλάκας** εξαρτάται, πέραν της παρουσίας η μη αραμιδικής ενίσχυσης και κατά τον μεγαλύτερο βαθμό από την **γεωμετρική αντιστοιχία/επαφή της με το σύνθετο** κατά την συσσωμάτωση τους (autoclave ή απλά συνθήκες κενού), την **ποιότητα της συγκόλλησης** (ποιότητα συγκολλητικών μέσων) αλλά και την **ποιότητα του κεραμικού**.
12. Για **δεδομένο πάχος αφρού**, διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά οδηγούν σε **διαφορετική απορρόφηση ενέργειας του βλήματος**, η οποία και αποτυπώνεται στο βάθος BFS λόγω παραμόρφωσης του εκάστοτε σύνθετου πάνελ μέσω του μηχανισμού BFD.
13. Η **αντιθραυσματική επίστρωση (spall liner)** μιας θωράκισης **συγκρατεί τα θραύσματα** του κεραμικού ή και του βλήματος και καθυστερεί τον πλήρη «εκφυλισμό» της από τα βαλλόμενα πυρά.
14. Η (αντι)βαλλιστική ικανότητα των σύνθετων υλικών βασίζεται στις **διαδοχικές μικροθραύσεις (microfractures)** κατά την διείσδυση του βλήματος που έχουν σαν αποτέλεσμα την απώλεια της κινητικής ενέργειας του. Η απόδοση του εκάστοτε σύνθετου υλικού εξαρτάται από τη **μέγιστη τάση θραύσης των ινών** του. **Εδραιώνεται** έτσι η σειρά «κυριαρχίας» των ινών ως **B>>A>>C**.
15. Φαίνεται να υπάρχει **συσχέτιση της καμπτικής και της αποφλοιωτικής συμπεριφοράς των υλικών**. Υψηλή **συγκολλητική ικανότητα μπορεί να προβεί ανεπιθύμητη αποτρέποντας την διαφυλλική αποκόλληση**, έμμεσα την **«εκτόνωση» του καμπτικού φορτίου** και κατ' επέκταση την **αφομείωση του μηχανισμού BFS** (τραύματα του χρήστη), εάν θεωρήσουμε πως μία βαλλιστική κρούση αποτελεί μία ταχέως εξελισσόμενη καμπτική καταπόνηση.
16. Τα **πειραματικά αποτελέσματα συγκλίνουν με τα βαλλιστικά**, καθιστώντας το **σύνθετο υλικό ινών UHMWPE B μηχανικά στιβαρότερο** και πιο αξιόπιστο των A και C.

Προτάσεις για μελλοντική μελέτη

1. **Βελτίωση του τρόπου συγκράτησης των δοκιμίων** στην μηχανή στατικού/δυναμικού ελέγχου Instron® 4482 του εργαστηρίου Τεχνολογίας των Κατεργασιών του ΕΜΠ, ίσως με την **προμήθεια υδραυλικών αρπάγων**, με σκοπό την **αποφυγή της ολίσθισης** και την αξιοπιστία των δεδομένων.
2. **Απόλυτα συμμετρική τοποθέτηση των δοκιμίων κάμψης ως προς το έμβολο πίεσης με σκοπό την ομοιόμορφία του τόξου βύθισης τους.**
3. Μηχανικές δοκιμές σε μεγαλύτερο εύρος σύνθετων υλικών ινών UHMWPE σε μηχανή τάξης μεγέθους αντίστοιχου της αντοχής των δοκιμίων για αποφυγή του θορύβου στα αποτελέσματα.
4. **Καταγραφή της ταχύτητα εξόδου (exit velocity) των βλημάτων (σε διαμπερείς βολές λεπτότερων πάνελ) με ειδική κάμερα υψηλής ταχύτητας** με σκοπό την ποσοστοποίηση της απορροφούμενης ενέργειας κρούσης από την εκάστοτε θωράκιση.
5. Βαλλιστικές δοκιμές με ποικίλα πάχη των βασικών συντελεστών της θωράκισης (μονοκεραμική πλάκα, σύνθετο πάνελ, βαλλιστικός αφρός) και βαλλιστικές δοκιμές συνδυασμού σκληρής με μαλακή θωράκιση (in conjunction with) με σκοπό την αφομείωση του BFS.
6. **Επέκταση του εύρους των βλημάτων** με σκοπό την βελτιστοποίηση των θωρακίσεων ως προς την ποικιλία κάλυψης/προστασίας του χρήστη από διαφορετικές απειλές.
7. **Νέες μέθοδοι αξιολόγησης** και πρωτοκόλλων για την αξιολόγηση της απόδοσης των θωρακίσεων. Αυτές οι μέθοδοι δύναται να περιλαμβάνουν πειράματα σε εργαστηριακές συνθήκες ή χρήση **προηγμένων υπολογιστικών (ψηφιακών) προσομοιώσεων (π.χ Ansys, EDAG κ.α)** που αναπαριστούν τις πραγματικές συνθήκες του δυναμικού φαινομένου μίας βαλλιστικής κρούσης. Η **τριδιάστατη μοντελοποίηση των θωρακίσεων** έχει δηλαδή ως σκοπό την θραυστομηχανική ανάλυση τους ως **πεπερασμένα στοιχεία (FEA)**.
8. Μελέτη και μελλοντική **ανάπτυξη νέων υλικών θωράκισης επιπέδου III+++ (Special Threat) Stand Alone (SA)** που μπορούν να προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη αντοχή και προστασία ενάντια σε πυρά. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί **με χρήση νέων συνθετικών υλικών (π.χ νανοϋλικών)**, κατασκευαστικών τεχνικών ή καινοτόμων μεθόδων παραγωγής.
9. **Βελτιστοποίηση της σχεδίασης**, λαμβάνοντας υπ' όψη τους **γεωμετρικούς παράγοντες**, το **πάχος** και τη **διάταξη/προσανατολισμό των επάλληλων φύλλων**.
10. **Προηγμένες τεχνολογίες** ανίχνευσης και αξιολόγησης των επιθέσεων που μπορούν να εντοπίζουν τις αδυναμίες και την επικινδυνότητα αστοχίας μιας θωράκισης, πριν καν αυτή τεθεί σε βαλλιστική δοκιμή (**μη καταστροφικός έλεγχος**), με τη χρήση προηγμένων συστημάτων απεικόνισης (**ακτινογραφίες κεραμικών πάνελ**) ή επιφανειακών αισθητήρων για τον έλεγχο διάδοσης των κρουστικών κυμάτων στο σύνθετο (και τη συνολική θωράκιση).

ΤΕΛΟΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ



ΣΑΣ ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ!

