

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΑΣ
ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ**



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΤΖΟΥΜΕΡΚΙΩΤΗΣ (Α.Μ. 7326)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Δρ. ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2022

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί τη Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και αναφέρεται στο σχεδιασμό και τη κατασκευή μιας επιτραπέζιας μηχανής κρούσης τύπου Charpy από την οποία μπορούμε να βγάλουμε σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την αντοχή και τη συμπεριφορά ενός υλικού σε κρουστικά φορτία. Θεωρείται ως μία από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες πειραματικές δοκιμές για την αξιολόγηση και εκτίμηση της ικανότητας παραλαβής ενέργειας από ένα υλικό μέχρι και τη θραύση του, γνωστή και ως δυσθραυστότητα, με γρήγορο και οικονομικό τρόπο. Η δοκιμή πρόσκρουσης Charpy μετρά την ενέργεια που απορροφάται από ένα τυπικό δοκίμιο με εγκοπή ενώ σπάει κάτω από κρουστικό φορτίο. Αυτή η δοκιμή συνεχίζει μέχρι και σήμερα να χρησιμοποιείται ως οικονομική μέθοδος ποιοτικού ελέγχου για τον προσδιορισμό της ευαισθησίας και της αντοχής σε κρούση μηχανικών υλικών όπως μέταλλα, σύνθετα υλικά, κεραμικά και πολυμερή.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεώργιο Ι. Γιαννόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας.

Τζουμερκιώτης Αθανάσιος-Στέφανος

Ιούλιος 2022

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

Ο Φοιτητής

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ -ΣΤΕΦΑΝΟΣ ΤΖΟΥΜΕΡΚΙΩΤΗΣ

(Υπογραφή)



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα Διπλωματική Εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η διαδικασία κατασκευής μιας επιτραπέζιας μηχανής κρούσης τύπου Charpy από την πειραματική διαδικασία της οποίας προκύπτουν συμπεράσματα για τη σχετική αντοχή σε θραύση ενός υλικού καθώς και την αντίστασή του σε κρουστικά φορτία. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συχνά στις βιομηχανίες κατά τον ποιοτικό έλεγχο γιατί είναι αρκετά οικονομική και γρήγορη.

Η ανάπτυξη του θέματος γίνεται σε έξι (6) κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται βασικά στοιχεία για την εφεύρεση και τη λειτουργία της μηχανής κρούσης Charpy. Αναλύονται οι παράγοντες που δύναται να επηρεάζουν τη διαδικασία θραύσης ενός δοκιμίου σε κρούση καθώς και οι τρόποι που μπορεί να αστοχήσει ένα υλικό.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσεται η πειραματική διαδικασία της δοκιμής και η σχέση υπολογισμού της ενέργειας που απορροφάει ένα υλικό κατά τη κρούση. Στη συνέχεια επισημαίνονται οι διαφορές ανάμεσα στις πειραματικές διαδικασίες Charpy και Izod οι οποίες είναι παρόμοιες και τέλος παρατίθενται οι τυποποιημένες διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση.

Στο τρίτο κεφάλαιο αρχικά παρουσιάζεται η πρότυπη μηχανή πάνω στον βασικό σχεδιασμό της οποίας βασίστηκε η ιδέα σχεδιασμού της προτεινόμενης - σε αυτή τη πτυχιακή - μηχανή. Έπειτα, παρατίθενται τα σχετικά μηχανολογικά σχέδια της μηχανής. Παρουσιάζονται τα περισσότερα κομμάτια της σε ξεχωριστά τρισδιάστατα μηχανολογικά σχέδια. Τα δομικά της στοιχεία καθώς και η συναρμογή της σχεδιάστηκαν ψηφιακά στον υπολογιστή με τη βοήθεια του προγράμματος Solidworks. Θεωρώντας κατάλληλες συνθήκες επαφής και σύζευξης μεταξύ των διαφορετικών κομματιών, πραγματοποιήθηκε ψηφιακά και η συναρμολόγηση των τρισδιάστατων ψηφιακών κομματιών προκειμένου να παρουσιαστεί η ολοκληρωμένη τρισδιάστατη απεικόνιση της μηχανής. Με τον τρόπο αυτό ελέγχθηκε η λειτουργικότητα της τελικής κατασκευής καθώς και η δυνατότητα εύκολης συναρμογής αλλά και η ύπαρξη συνάφειας μεταξύ των διαφορετικών δομικών στοιχείων της μηχανής.

Το τέταρτο κεφάλαιο είναι αυτό στο οποίο αποτυπώνεται αναλυτικά όλη η διαδικασία της κατασκευής της μηχανής. Το κάθε κομμάτι της έχει υποστεί τη κατάλληλη διεργασία ώστε πριν ενωθεί με τα υπόλοιπα να πληροί τις προδιαγραφές του σχεδίου και να έχει τις απαιτούμενες ιδιότητες. Διεργασίες όπως διάτρηση, κοπή μετάλλων, συγκόλληση μεταλλικών αντικειμένων, δημιουργία σπειρωμάτων και κατεργασία σκλήρυνσης μετάλλου με τη μέθοδο της βαφής είναι οι βασικές διεργασίες που υπεβλήθησαν τα κομμάτια της κατασκευής. Παρουσιάζονται, επίσης, οι ιδέες για τη μέτρηση της γωνίας περιστροφής καθώς και το σύστημα ασφαλούς απελευθέρωσης του εκκρεμούς

από την ανώτερη θέση. Τέλος, υπολογίζεται με έναν ιδιαίτερο τρόπο η ταχύτητα της σφύρας στο κατώτερο σημείο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι δοκιμές και τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας με τη βοήθεια της κατασκευασμένης μηχανής. Η διαδικασία ξεκινάει από τη δημιουργία των δοκιμών κάθε υλικού στις επιθυμητές διαστάσεις με τη κατάλληλη εγκοπή. Στη συνέχεια εκτελούνται τρεις δοκιμές για κάθε υλικό και παρουσιάζεται το πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα των αποτελεσμάτων. Δοκιμές εκτελούνται, επίσης, και σε τυποποιημένες μηχανές του εμπορίου που βρίσκονται στο χώρο της σχολής με σκοπό τον έλεγχο σωστής λειτουργίας της κατασκευασμένης - στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής - μηχανής. Τέλος, τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ενέργειας που απορροφάει κάθε υλικό ανά μονάδα επιφάνειας.

Στο έκτο κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα των δοκιμών και συγκρίνονται με αντίστοιχα αποτελέσματα μηχανών του εμπορίου. Εξετάζεται επίσης η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων με βάση το υλικό κατασκευής κάθε δοκιμίου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	v
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	vii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. Κρούση.....	1
2. Μηχανική της Θραύσης.....	3
3. Αντοχή υλικών σε κρούση.....	4
1. ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΡΟΥΣΗΣ	5
1.1 Αναγκαιότητα δοκιμών κρούσης.....	5
1.2 Πειραματικές διατάξεις κρούσης.....	8
1.3 Παράγοντες επιρροής της κρούσης.....	10
1.4 Αστοχία λόγω κρούσης.....	13
2. ΠΕΙΡΑΜΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	15
2.1 Δοκιμή κατά Charpy (Ευρώπη).....	15
2.2 Δοκιμή κατά Izod (ΗΠΑ και Αγγλία).....	18
2.3 Διατάξεις προσπίπτοντος σώματος.....	19
2.4 Δοκίμια κατά Charpy.....	20
3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SOLIDWORKS	23
3.1 Βάσεις.....	24
3.2 Σύστημα περιστροφής.....	27
3.3 Κοχλίες σύνδεσης και περικόχλια.....	29
3.4 Σύστημα μέτρησης γωνίας περιστροφής του εκκρεμούς.....	31
3.5 Σύνδεση επιμέρους κομματιών για τη κατασκευή της μηχανής.....	32
4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ	36
4.1 Βάσεις.....	36
4.2 Σύστημα περιστροφής.....	42
4.3 Βαφή μεταλλικής σφύρας.....	45
4.4 Σύστημα μέτρησης γωνίας περιστροφής του εκκρεμούς.....	50
4.5 Συναρμολόγηση μηχανής.....	52
4.5 Τοποθέτηση συστήματος απελευθέρωσης του εκκρεμούς.....	54
5. ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	56
5.1 Δοκίμια πειράματος.....	57
5.2 Εκτέλεση δοκιμών.....	61

5.3 Πίνακας αποτελεσμάτων	77
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

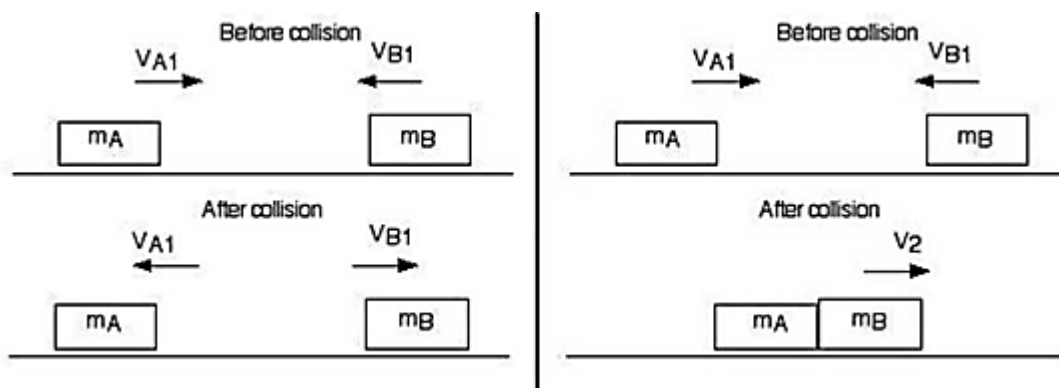
1. Κρούση

Ο όρος κρούση, συχνά συγχέεται από έναν καθημερινό άνθρωπο με τον όρο σύγκρουση και συνήθως το πρώτο πράγμα που πιθανότατα να του έρχεται στο μυαλό, είναι κάποιο αυτοκινητιστικό ατύχημα (Εικόνα 1). Ο όρος κρούση περιγράφει μια τέτοια κατάσταση, αλλά είναι ευρύτερος και περιγράφει και άλλα γεγονότα όπως είναι η σύγκρουση των σφαιρών του μπιλιάρδου, η σύγκρουση των νετρονίων μέσα σε έναν πυρηνικό αντιδραστήρα, η σφαίρα του μπόουλινγκ που συγκρούεται με τις κορύνες, όπως βέβαια και ακόμα άλλες περιπτώσεις.



Εικόνα 1: Σύγκρουση αυτοκινήτων.

Η κρούση είναι ένα φυσικό φαινόμενο που αναφέρεται στη στιγμιαία επαφή δύο σωμάτων. Με τον όρο κρούση περιγράφουμε την άσκηση δυνάμεων μεταξύ των δύο προαναφερθέντων σωμάτων, για πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αν κατά τη διάρκεια της κρούσης, οι δυνάμεις αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα δύο σώματα είναι συντηρητικές, η ολική κινητική ενέργεια του συστήματος είναι η ίδια πριν και μετά την κρούση. Μια τέτοια κρούση ονομάζεται “ελαστική κρούση”. Σε μια τέτοια κρούση, τα σώματα που συγκρούονται, αλληλοεπιδρούν στιγμιαία και αφού αλληλοεπιδράσουν, απομακρύνονται το ένα από το άλλο. Στη περίπτωση που η ολική κινητική ενέργεια μετά την κρούση είναι μικρότερη από ότι πριν, η κρούση ονομάζεται “μη ελαστική κρούση”. Σε ένα τέτοιο είδος μη ελαστικής κρούσης, όταν τα συγκρουόμενα σώματα συσσωματώνονται και κινούνται ως ένα σώμα μετά την κρούση, αυτή ονομάζεται “πλαστική” ή “πλήρως ανελαστική κρούση.” Στην Εικόνα 2 φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση των παραπάνω αναφερθέντων κρούσεων [1].



Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση της ελαστικής κρούσης (αριστερά) και της πλήρως ανελαστικής κρούσης (δεξιά) [1].

Σε κανονικές ταχύτητες, κατά τη διάρκεια μιας απολύτως ανελαστικής σύγκρουσης, ένα αντικείμενο που χτυπιέται από ένα βλήμα θα παραμορφωθεί και αυτή η παραμόρφωση θα απορροφήσει το μεγαλύτερο μέρος ή όλη τη δύναμη της σύγκρουσης. Από την άποψη της διατήρησης της ενέργειας, η κινητική ενέργεια του βλήματος μετατρέπεται σε θερμική και ηχητική ενέργεια, ως αποτέλεσμα των παραμορφώσεων και των δονήσεων που προκαλούνται στο αντικείμενο που χτυπήθηκε. Ωστόσο, αυτές οι παραμορφώσεις και οι δονήσεις δεν μπορούν να συμβούν ακαριαία. Μια σύγκρουση υψηλής ταχύτητας δεν παρέχει επαρκή χρόνο για να συμβούν αυτές οι παραμορφώσεις και οι δονήσεις. Έτσι, το υλικό που χτυπήθηκε συμπεριφέρεται σαν να ήταν πιο εύθραυστο από ό,τι θα ήταν διαφορετικά, και η πλειονότητα της ασκούμενης δύναμης πηγαίνει στη θραύση του υλικού. Ένας άλλος τρόπος για να προσεγγίσουμε το συγκεκριμένο ζήτημα είναι να σκεφτούμε ότι τα υλικά είναι στην πραγματικότητα πιο εύθραυστα σε μικρές χρονικές κλίμακες παρά σε μεγάλες χρονικές κλίμακες: Αυτό σχετίζεται με την υπέρθεση χρόνου-θερμοκρασίας. Η αντοχή στην κρούση μειώνεται με την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, πράγμα που σημαίνει ότι τα πιο άκαμπτα υλικά θα έχουν μικρότερη αντοχή στην κρούση ενώ τα ελαστικά υλικά καλύτερη.

Διαφορετικά υλικά μπορούν να συμπεριφέρονται με πολύ διαφορετικούς τρόπους στην κρούση σε σύγκριση με συνθήκες στατικής φόρτισης. Τα όλκιμα υλικά όπως ο χάλυβας τείνουν να γίνονται πιο εύθραυστα σε υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και μπορεί να προκληθεί θρυμματισμός στην πίσω πλευρά της πρόσκρουσης εάν δεν συμβεί διείδυση [2].

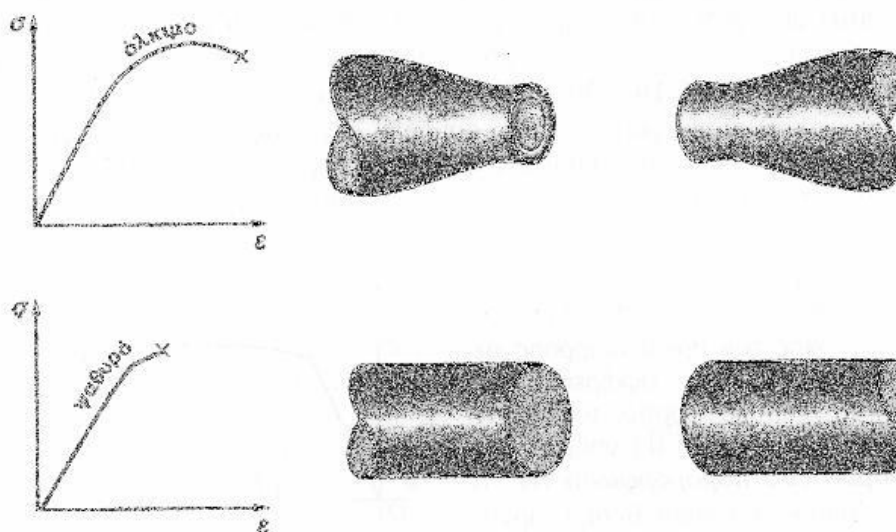
Οι δοκιμές κρούσης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Αυτές είναι οι κρούσεις χαμηλής ενέργειας (low-velocity ή low-energy) και οι κρούσεις υψηλής ενέργειας (high-velocity ή high-energy). Αν και στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διαφωνίες ως προς τον σαφή προσδιορισμό της κρούσης ως χαμηλής ενέργειας ή υψηλής, στην πλειοψηφία των περιστάσεων υπάρχει η τάση να χαρακτηρίζεται ως κρούση χαμηλής ενέργειας η δοκιμή κατά την οποία η ενέργεια που δέχεται το υπό κρούση δοκίμιο, είναι μικρότερη ή ίση

των 10 Joule, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, όταν η ενέργεια κρούσης ξεπερνά τα 10 Joule, τότε η δοκιμή χαρακτηρίζεται ως κρούση υψηλής ενέργειας.

Οι χαμηλής ενέργειας κρουστικές καταπονήσεις δεν προκαλούν στα υλικά και ειδικά στα σύνθετα, κάποια βλάβη εμφανή δια γυμνού οφθαλμού, αλλά είναι δυνατόν να προκαλέσουν δραστική υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού και ουσιαστικά να οδηγήσουν στην πρόωρη και αναπάντεχη αστοχία του. Έτσι, οι εν λόγω φορτίσεις, συγκεντρώνουν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον και ειδικά αφού με μια κρούση δεν επέρχεται άμεση αστοχία του υλικού, ένα μεγάλο μέρος της έρευνας σε αυτό το πεδίο ασχολείται με την εκτίμηση και πρόβλεψη των εναπομενουσών ιδιοτήτων μετά από την κρούση [1,3-4].

2. Μηχανική της Θραύσης

Κάθε υλικό παρουσιάζει μέγιστη αντοχή κάτω από συγκεκριμένο φορτίο που ασκείται και, μετά, σπάει ή παραμορφώνεται. Η θραύση ξεκινάει όταν η τάση που ασκείται από εξωτερικές δυνάμεις στο υλικό, είναι τέτοια που ξεπερνά την εσωτερική του αντοχή. Κατά τη διάρκεια που ασκείται το φορτίο, το υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται. Για να μπορέσει να αναλυθεί η συμπεριφορά του υλικού όταν εφαρμόζεται φορτίο, πρέπει να μελετηθεί η αντοχή του. Η αντοχή σε κρούση θεωρείται η ενέργεια που απορροφά το υλικό πριν από τη θραύση του κατά τη διάρκεια υψηλής παραμόρφωσης (M. Möser). Όταν το υλικό έχει απορροφήσει υψηλό ποσοστό ενέργειας και παρουσιάζει υψηλή πλαστική παραμόρφωση πριν τη θραύση, θεωρείται όλκιμο. Διαφορετικά, όταν απορροφά χαμηλό ποσοστό, ονομάζεται ψαθυρό. Συνεπώς, η αντοχή των υλικών που χρησιμοποιούνται σε κατασκευές πρέπει να μελετηθεί ώστε να μην υπάρξει απότομη αστοχία.



Εικόνα 3 : Όλκιμη θραύση και ψαθυρή θραύση δοκιμίου.

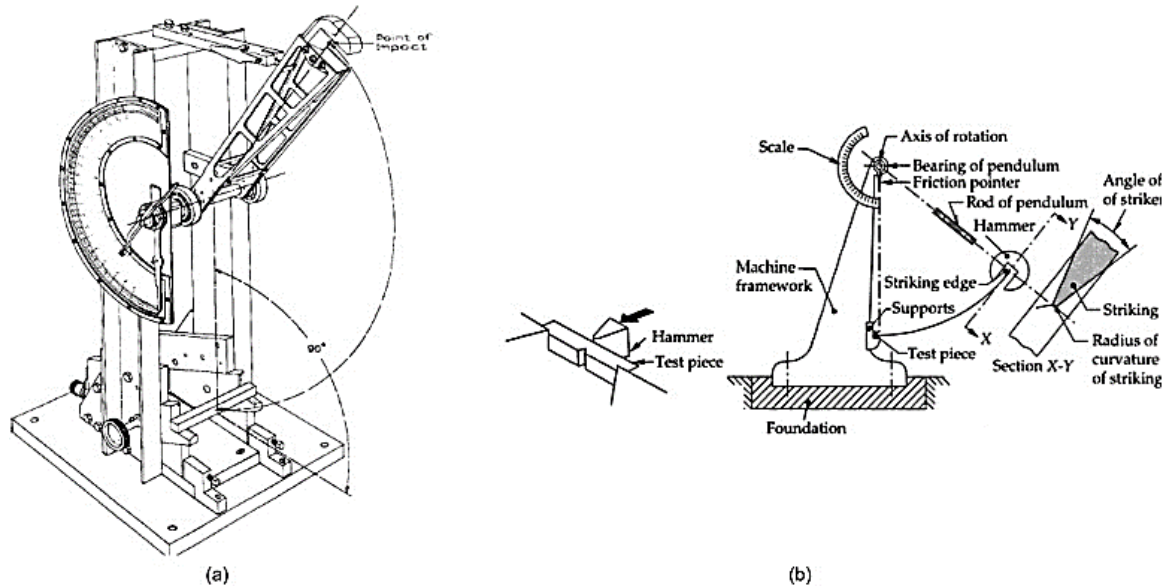
Ανάλογα με τη μικροδομή του υλικού, τη θερμοκρασία που εκτίθεται, τη χημική του σύσταση και την τάση που ασκείται, ο μηχανισμός θραύσης μεταβάλλεται. Οι δύο πιο κοινοί μηχανισμοί θραύσης είναι (α) η όλκιμη θραύση και (β) η ψαθυρή θραύση.

Σε κάθε υλικό, η διαδικασία του σχηματισμού και της ανάπτυξης των ρωγμών περιέχει τα ακόλουθα στάδια: Σχηματισμός ρωγμών, έναρξη ρωγμών και διάδοση-ανάπτυξη της θραύσης (δηλαδή αύξηση του μεγέθους των ρωγμών). Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την πυρήνωση ρωγμής στο αρχικό υλικό και το δεύτερο την έναρξη κίνησης της, λόγω στατικού ή δυναμικού φορτίου. Όταν η ρωγμή αρχίζει να αναπτύσσεται σταθερά κάτω από συνεχή κατανάλωση ενέργειας, πραγματοποιείται όλκιμη θραύση. Όταν η ενέργεια αρχίζει να απελευθερώνεται, τότε η ρωγμή αρχίζει να αναπτύσσεται μη σταθερά και η θραύση θεωρείται ψαθυρή (Wolfgang Bleck 2017) [5].

3. Αντοχή υλικών σε κρούση

Με τον έλεγχο της αντοχής των υλικών σε κρούση μελετάται η συμπεριφορά των υλικών, όταν σ' αυτά επιβάλλονται φορτία που μεταβάλλονται πολύ γρήγορα με το χρόνο. Τα φορτία αυτά ονομάζονται κρουστικά φορτία. Κρουστικά φορτία αναπτύσσονται συχνά στις κατασκευές και ιδιαίτερα στα πατώματα. Το μέγεθος της αντοχής του υλικού σε κρούση προσδιορίζεται με ειδικά όργανα, τα επονομαζόμενα κρουσίμετρα. Ο έλεγχος γίνεται σε κατάλληλα δοκίμια του εξεταζόμενου υλικού, τα οποία καταπονούνται σε κρουστική κάμψη. Η φόρτιση όσο και η ταχύτητα επιβολής του κρουστικού φορτίου είναι πολύ διαφορετικές στο εργαστήριο από τις αντίστοιχες στην πράξη, αφού στο εργαστήριο η διαδικασία επιβολής των φορτίων είναι χρονικά περιορισμένη και η περιοχή, η οποία παραμορφώνεται, είναι τυπικά περιορισμένη. Συνεπώς, η αντοχή του υλικού σε κρούση, η οποία προσδιορίζεται με το κρουσίμετρο, είναι ένα συγκριτικό μέγεθος που βοηθά στην κατάταξη των υλικών ως προς την αντοχή τους σε κρούση [6].

1. ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΡΟΥΣΗΣ



Εικόνα 4 : Μηχανή κρούσης Charpy

1.1 Αναγκαιότητα δοκιμών κρούσης

Με αφορμή τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο η κυβέρνηση των Η.Π.Α ξεκίνησε το 1942 την κατασκευή ενός νέου τύπου πολεμικών μεταφορικών πλοίων, των DWT 11000 που ονομάστηκαν “Liberty Ships”. Η παραγωγή του νέου τύπου πλοίων ήταν ταχύτατη και μέχρι το 1945 είχαν κατασκευαστεί περίπου 2700 πλοία. Σε αυτά τα πλοία όμως παρουσιάστηκαν πάρα πολλά προβλήματα και ατυχήματα με αποτέλεσμα μέχρι τον Απρίλιο του 1946 είχαν καταγραφεί 1031 ατυχήματα, μεταξύ των οποίων περισσότερα από 200 πλοία τελικώς βυθίστηκαν ή καταστράφηκαν ολοσχερώς [7]. Το πιο συνηθισμένο πρόβλημα ήταν αυτό της θραύσης του πλοίου στο μέσον όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 5.

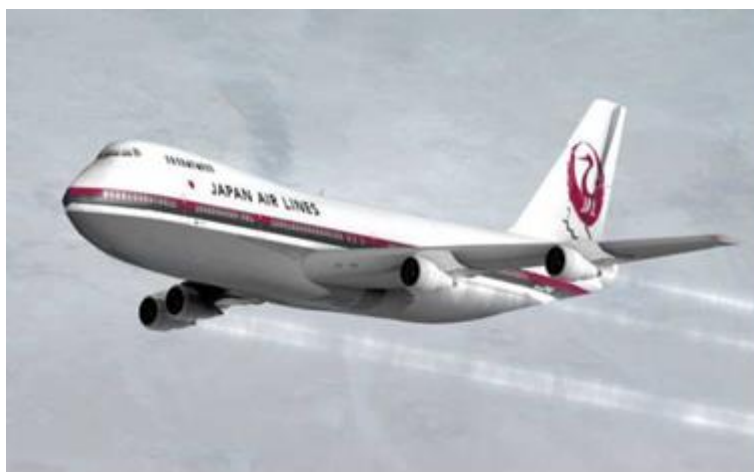


Εικόνα 5: Χαρακτηριστική φωτογραφία θραύσης πλοίου τύπου “Liberty Ships”

Η δοκιμή πρόσκρουσης Charpy, γνωστή και ως δοκιμή Charpy V-notch, είναι μια τυποποιημένη δοκιμή υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης που προσδιορίζει την ποσότητα ενέργειας που απορροφάται από ένα υλικό κατά τη διάρκεια της θραύσης. Η απορροφούμενη ενέργεια είναι ένα μέτρο της σκληρότητας της εγκοπής του υλικού. Χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία, καθώς είναι εύκολη στην προετοιμασία και τη διεξαγωγή της και τα αποτελέσματα μπορούν να ληφθούν γρήγορα και φθηνά. Ένα μειονέκτημα είναι ότι ορισμένα αποτελέσματα είναι μόνο συγκριτικά. Η δοκιμή ήταν ζωτικής σημασίας για την κατανόηση των προβλημάτων θραύσης των πλοίων κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου.

Η βασική αιτία για αυτά τα ατυχήματα ήταν οι χαμηλές μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα μετά από την συγκόλλησή του. Επιπρόσθετα, δευτερεύουσες αιτίες συνετέλεσαν στην μεγιστοποίηση του προβλήματος, όπως ο ελλιπής σχεδιασμός (μη κατανεμημένος επιμερισμός των φορτίων στις κατασκευές) καθώς και η παρουσία αρκετών ελαττωμάτων στην συγκόλληση. Τέλος, στις μέρες μας είναι πλέον γνωστό ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες ο χάλυβας παρουσιάζει μετάπτωση της όλκιμης συμπεριφοράς του σε ψαθυρή. Επομένως, η χρησιμοποίηση των πλοίων αυτών στον Βόρειο Ατλαντικό (πολύ χαμηλές θερμοκρασίες), επέτεινε το πρόβλημα των ήδη προβληματικών συγκολλήσεων. Η δοκιμή κρούσης κατά Charpy μπορεί να προσομοιώσει αυτές τις συνθήκες λειτουργίας καθώς μπορεί να πραγματοποιηθεί σε συνθήκες με υψηλό ρυθμό αύξησης φορτίου και ενδεχομένως σε θερμοκρασίες λειτουργίας (από πολύ χαμηλές έως υψηλές θερμοκρασίες). Στην δοκιμή κρούσης κατά Charpy η ενέργεια που δίδεται από την σφύρα κρούσης απορροφάται από το υλικό και ονομάζεται δυσθραυστότητα κρούσης. Η συγκόλληση του χάλυβα οδήγησε σε μείωση της δυσθραυστότητας του, στην περίπτωση των Liberty

Ships [7]. Με αφορμή τα ατυχήματα που συνέβησαν σε αυτά τα πλοία, άρχισαν να εκτελούνται και να χρησιμοποιούνται εκτενέστερα τα πειράματα κρούσης κατά Charpy. Με την βοήθεια των πειραμάτων αυτών έγιναν κατανοητά διάφορα άλλα προβλήματα όπως η δυσθραυστότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες, προβλήματα συγκολλήσεων καθώς και ο λόγος που κάποιες κατασκευές με συγκόλληση δεν μπορούσαν να αποτρέψουν την διάδοση ρωγμών. Η απλότητα και η ευκολία της δοκιμής κρούσης συνετέλεσε στην ευρύτατη χρήση του καθ' όλη την διάρκεια του 20ου αιώνα. Στις μέρες μας, η χρήση του πειράματος κρούσης κατά Charpy έχει επεκταθεί ευρύτατα στην αεροναυπηγική. Ο λόγος που συνετέλεσε στην διάδοση του πειράματος είναι ότι προσομοιώνει τις δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στο αεροσκάφος κατά την προσγείωση του, καθώς και το λεγόμενο "tail-strike event", το οποίο συμβαίνει όταν το αεροσκάφος συγκρούεται κατά την προσγείωση ή απογείωση του με την ουρά στο έδαφος, όπως συνέβη και στην πτήση του αεροσκάφους τύπου Boeing 747SR-46 της εταιρίας Japan Airlines [8] τον Αύγουστο του 1985.

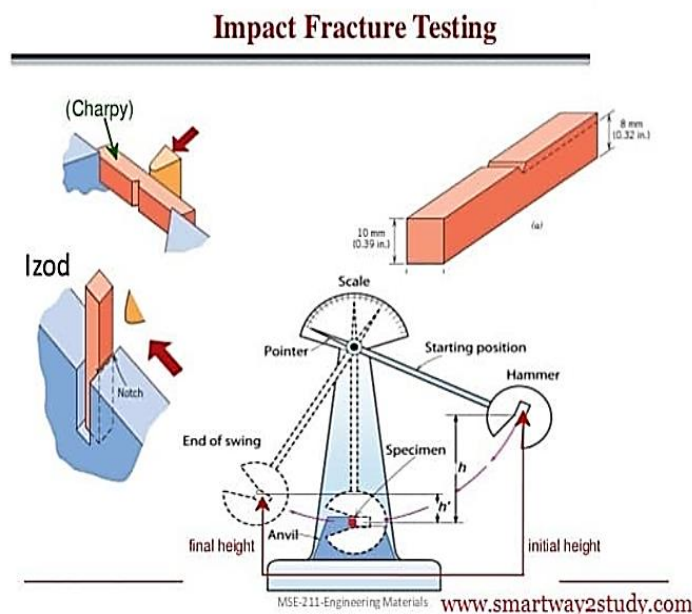


Εικόνα 6: Χαρακτηριστική αναπαράσταση φαινομένου "tail-strike event"

Το τεστ αναπτύχθηκε γύρω στο 1900 από τους SB Russell (1898, Αμερικανός) και Georges Charpy (1901, Γάλλος). Το τεστ έγινε γνωστό ως τεστ Charpy στις αρχές του 1900 λόγω των τεχνικών συνεισφορών και των προσπαθειών τυποποίησης από τον Charpy [9].

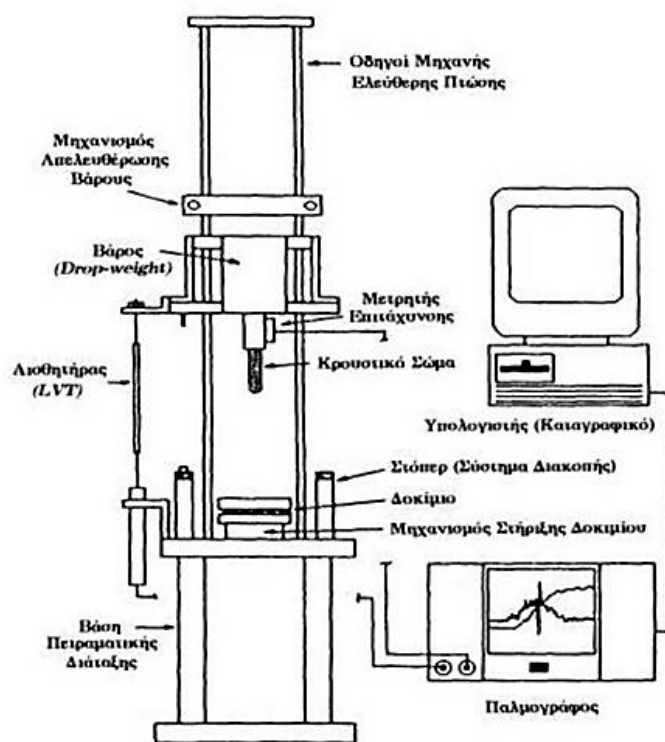
1.2 Πειραματικές διατάξεις κρούσης

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων κρούσης υπάρχουν δύο ειδών πειραματικές διατάξεις. Αυτές είναι οι διατάξεις εκκρεμούς (pendulum testers) και οι διατάξεις προσπίπτοντος σώματος (drop-weight testers). Τις διατάξεις εκκρεμούς χρησιμοποιούν τα κλασσικά πειράματα κρούσης Izod και Charpy, τα οποία μας δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για την ανθεκτικότητα των ισότροπων υλικών – κυρίως των μετάλλων - στη διάδοση των ρωγμών κατά την κρούση, αλλά και για την επίδραση των εγχοπών και άλλων χαρακτηριστικών ατελειών στην συμπεριφορά του υλικού. Στα πειράματα κρούσης Izod και Charpy, η κρούση πραγματοποιείται όταν το κρουστικό σώμα συγκεκριμένου βάρους, το οποίο είναι τοποθετημένο στην κορυφή ενός εκκρεμούς, απελευθερώνεται να πέσει από συγκεκριμένο ύψος (h), διαγράφοντας τροχιά τόξου. Καθώς πέφτει το εκκρεμές και προσεγγίζει το υπό κρούση δοκίμιο, η δυναμική του ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική, η οποία παίρνει μέγιστη τιμή, τη στιγμή που η απόσταση του δοκιμίου με το κρουστικό σώμα είναι η ελάχιστη δυνατή. Αυτή η ενέργεια, περιγράφεται και σαν ενέργεια κρούσης (impact energy). Αφού το κρουστικό σώμα έρθει σε επαφή με το δοκίμιο και αφότου επέλθει αστοχία του δοκιμίου, το εκκρεμές συνεχίζει την τροχιά του έως ένα νέο ύψος (h'), μικρότερο του αρχικού. Η διαφορά της αρχικής και τελικής δυναμικής ενέργειας του εκκρεμούς, είναι η ενέργεια που απορρόφησε το δοκίμιο κατά την κρούση. Τα πειράματα κρούσης Izod και Charpy, αν και είναι ίδιας φιλοσοφίας και μοιράζονται πολλά κοινά χαρακτηριστικά κατά την εκτέλεσή τους, έχουν επίσης και μερικές βασικές διαφορές μεταξύ τους. Στη τεχνική Izod, το υπό κρούση δοκίμιο τοποθετείται σε κατακόρυφη θέση, ενώ στην τεχνική Charpy τοποθετείται οριζόντια. Η εγχοπή στη δοκιμή Izod είναι στην πλευρά του δοκιμίου, η οποία έρχεται σε επαφή με το κρουστικό σώμα, ενώ στη δοκιμή Charpy, είναι από την αντίθετη πλευρά [1].



Εικόνα 7 : Διαδικασία κρούσης και τρόποι συγκράτησης του δοκιμίου κατά Charpy και κατά Izod

Οι διατάξεις προσπίπτοντος σώματος είναι διατάξεις κρούσης οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνότερα στη μελέτη σύνθετων υλικών. Με τη διάταξη της ελεύθερης πτώσης σώματος (falling dart impact system) γίνεται εξομοίωση μιας κρουστικής καταπόνησης χαμηλής ενέργειας, στην οποία η μάζα του κρουστικού σώματος είναι αρκετά μεγάλη, ενώ η ταχύτητα κρούσης είναι αρκετά χαμηλή. Σε αυτή την περίπτωση το κρουστικό σώμα πέφτει κάθετα στο υπό κρούση δοκίμιο. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων χρησιμοποιούνται οδηγοί ή ράγες για να κατευθύνουν σωστά το προσπίπτον σώμα, να καταπονήσει κρουστικά το δοκίμιο στο επιθυμητό σημείο, το οποίο εντοπίζεται συνήθως στο κέντρο του. Το κρουστικό σώμα αφήνεται να πέσει από προκαθορισμένο ύψος και προσκρούει κατακόρυφα στο δοκίμιο με συγκεκριμένη ταχύτητα, η οποία αναφέρεται ως ταχύτητα κρούσης. Εάν η ενέργεια κρούσης, δηλαδή η ενέργεια που αντιστοιχεί στην ταχύτητα κρούσης, δεν υπερβαίνει την τιμή της ενέργειας που απαιτείται για να αστοχήσει ή να σπάσει το δοκίμιο, τότε δίνεται η ευκαιρία και η δυνατότητα να μελετηθούν οι εναπομένουσες μηχανικές ιδιότητες του υλικού, μετά την κρούση. Με αυτού του είδους την κρούση μπορεί να εξομοιωθεί η κρουστική καταπόνηση μιας επιφάνειας πάνω στην οποία πέφτει ένα αντικείμενο ή ένα εργαλείο [1].



Εικόνα 8 : Πειραματική διάταξη ελεύθερης πτώσης σώματος, συνδεδεμένη με τα αισθητήρια όργανα που τη συνοδεύουν.

1.3 Παράγοντες επιρροής της κρούσης

Συντελεστής Δυσθραυστότητας (toughness)

Ο συντελεστής δυσθραυστότητας αποτελεί μέτρο της ενέργειας που απορροφά ένα υλικό πριν τη θραύση του και αποτελεί χαρακτηριστικό του υλικού. Οι στατικές δοκιμές δεν αναφέρονται σε ενέργεια αλλά σε τιμή τάσης για το συντελεστή δυσθραυστότητας (αντοχή). Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του συντελεστή δυσθραυστότητας του υλικού, τόσο πιο όλκιμο είναι. Η τιμή αυτή μεταβάλλεται ανάλογα με τις αλλαγές της κατάστασης της ύλης, όπως για παράδειγμα αυτές που συμβαίνουν με την επίδραση μικρής θερμικής κατεργασίας ή μερικής σφυρηλάτησης [10].

Αντοχή σε κρούση

Πέρα από τους μηχανισμούς αστοχίας που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια ενός πειράματος κρούσης, υπάρχει και μια σειρά παραμέτρων η οποία επηρεάζει κι αυτή με τη σειρά της τα πειραματικά αποτελέσματα. Μερικές από τις πιο σημαντικές παραμέτρους, που μπορεί να επηρεάσουν καθοριστικά τα αποτελέσματα κατά τη διάρκεια της κρουστικής καταπόνησης, θα περιγράψουν εν συντομία παρακάτω. Μεγάλης σημασίας για το πείραμα της κρούσης είναι η σωστή πάκτωση του δοκιμίου στην προβλεπόμενη θέση της πειραματικής διάταξης. Με τη σωστή στήριξη του δοκιμίου δίνεται η δυνατότητα απορρόφησης της μέγιστης δυνατής ενέργειας κατά την κρούση, σε σχέση με την περίπτωση της απλής έδρασης του δοκιμίου στη διάταξη, με αποτέλεσμα να υπάρχει η καλύτερη δυνατή μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού υπό συνθήκες κρούσης.

Σημαντικό ρόλο για την σωστή διεξαγωγή του πειράματος παίζει η φύση του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το κρουστικό σώμα, αλλά και η γεωμετρία του. Κατά τη διάρκεια του πειράματος της κρούσης, είναι απαραίτητο το κρουστικό σώμα να μεταβιβάζει στο δοκίμιο όλη την κινητική ενέργεια που έχει αποκτήσει κατά την πτώση του. Έτσι, είναι αναγκαίο το κρουστικό σώμα να είναι κατασκευασμένο από τέτοιο υλικό που να δέχεται τις μικρότερες δυνατές πλαστικές παραμορφώσεις, ούτως ώστε να μην χάνεται μέρος της ενέργειας κρούσης σε αυτές. Η γεωμετρία του κρουστικού σώματος έχει επίσης τη δική της σημασία, μιας και ανάλογα με τη γεωμετρία του κρουστικού σώματος, μπορεί να ενεργοποιηθεί διαφορετικός μηχανισμός αστοχίας κατά τη διάρκεια του πειράματος, αφού η γεωμετρία επηρεάζει άμεσα τον τύπο των τάσεων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της επαφής του κρουστικού σώματος με το δοκίμιο.

Η γωνία κρούσης είναι ακόμη μια παράμετρος που μπορεί να επηρεάσει τα πειραματικά αποτελέσματα που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια ενός πειράματος κρούσης. Ως γωνία κρούσης ορίζεται η σχηματιζόμενη γωνία μεταξύ της κάθετης διεύθυνσης του δοκιμίου, με τη διεύθυνση κρούσης, που αντιστοιχεί

στη διεύθυνση κίνησης του κρουστικού σώματος. Η γωνία κρούσης επιδρά στη πορεία του πειράματος, ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που επιδρά και η γεωμετρία του κρουστικού σώματος, επηρεάζοντας τον τύπο της βλάβης και του μηχανισμού αστοχίας που μπορεί να ενεργοποιηθεί.

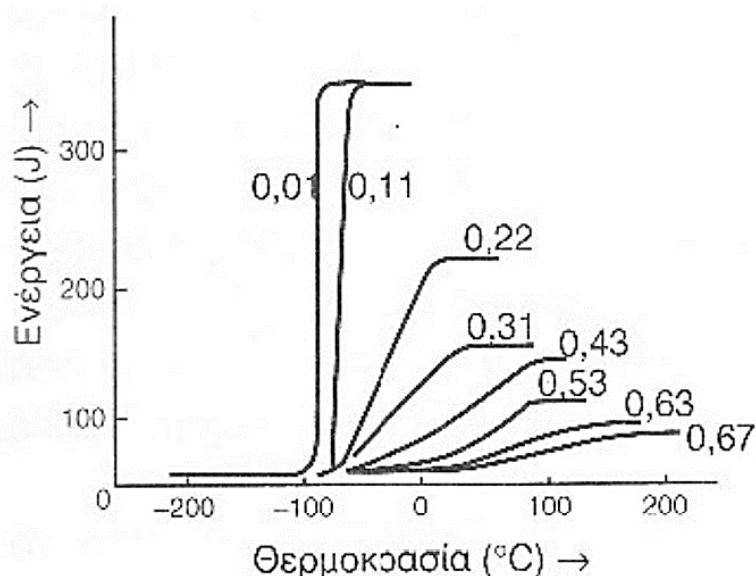
Μια άλλη σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τα αποτελέσματα ενός πειράματος κρουστικής καταπόνησης είναι η γεωμετρία του δοκιμίου. Αυξάνοντας το πάχος ενός δοκιμίου υπάρχει αξιόλογη επίδραση στο κατώφλι ενέργειας, κάτω από το οποίο δεν παρατηρείται κάποια φθορά στο δοκίμιο. Ειδικά σε πολύστρωτες πλάκες σύνθετου υλικού, το κατώφλι ενέργειας αυξάνεται σημαντικά, αυξανόμενου του πάχους του δοκιμίου και πιο συγκεκριμένα του πάχους της κάθε στρώσης, βελτιώνοντας εν τέλει και τις εναπομένουσες μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες διεξαγωγής ενός πειράματος κρούσης είναι επίσης μια παράμετρος που μπορεί να επηρεάσει τα τελικά αποτελέσματα, με τη θερμοκρασία και την υγρασία να επιδρούν η καθεμία με τον τρόπο της στα πειραματικά αποτελέσματα. Αυξανόμενης της θερμοκρασίας, αυξάνεται και η αντοχή του δοκιμίου σε κρούση, μιας και το υλικό προσεγγίζει περισσότερο την περιοχή υαλώδους μετάβασης, με τα μακρομόρια να αποκτούν μεγαλύτερη κινητικότητα και το υλικό να γίνεται πιο όλκιμο και να μπορεί να λάβει μεγαλύτερες παραμορφώσεις, όπως και να απορροφά μεγαλύτερα ποσά ενέργειας κρούσης. Ανάλογη συμπεριφορά έχει το υλικό και στην απορρόφηση υγρασίας, μιας και τα μακρομόρια αποκτούν αυξημένη κινητικότητα και σε αυτή την περίπτωση, αλλά όχι από την απορρόφηση ενέργειας λόγω ανόδου της θερμοκρασίας. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός πως και στις δύο περιπτώσεις που μόλις περιεγράφηκαν, παρά την αύξηση της αντοχής σε κρούση, παρατηρείται εμφάνιση παραμενουσών πλαστικών παραμορφώσεων στο υλικό [11-14].

Επίδραση θερμοκρασίας στη δυσθραυστότητα

Γενικά, σε χαμηλές θερμοκρασίες η θραύση των μετάλλων πραγματοποιείται με ψαθυρό τρόπο και μικρή απορρόφηση ενέργειας, ενώ σε υψηλές με όλκιμο τρόπο και υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας. Γι' αυτό το λόγο η δοκιμή κρούσης συχνά χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στη ψαθυρή συμπεριφορά ενός μεταλλικού υλικού. Στα μέταλλα που κρυσταλλώνονται στο χωροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (BCC), π.χ. οι χάλυβες, η μετάβαση είναι εμφανής, ενώ στα μέταλλα που κρυσταλλώνονται στο εδροκεντρωμένο κυβικό σύστημα (FCC), π.χ. τα κράματα αλουμινίου η μετάβαση συμβαίνει βαθμιαία. Η μετάβαση από την όλκιμη στη ψαθυρή συμπεριφορά εξηγείται με βάση τη θεωρία των διαταραχών. Σε υψηλές θερμοκρασίες η κίνηση των διαταραχών είναι δυνατή, επιτρέποντας την πλαστική παραμόρφωση του υλικού, οδηγώντας σε όλκιμη θραύση, ενώ αντίθετα σε χαμηλές θερμοκρασίες κάποια συστήματα ολίσθησης αδρανοποιούνται, οδηγώντας σε ψαθυρή θραύση. Στην Εικόνα 9

παρουσιάζεται η επίδραση της περιεκτικότητας σε άνθρακα στις καμπύλες μετάβασης ανοπτημένων χαλύβων. [16]



Εικόνα 9 : Επίδραση της περιεκτικότητας σε άνθρακα στη θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στη ψαθυρή συμπεριφορά ανοπτημένων χαλύβων.

Οι κοινοί χάλυβες παρουσιάζουν υψηλές τιμές συντελεστή δυσθραυστότητας σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ για $T < 0$ η τιμή του είναι πολύ χαμηλή. Οι υψηλές τιμές δυσθραυστότητας συνδέονται με μεγάλη πλαστική παραμόρφωση (όλκιμη θραύση), ενώ σε χαμηλές τιμές η θραύση είναι ψαθυρή. Στην ενδιάμεση περιοχή, παρουσιάζονται φαινόμενα μεικτής θραύσης και εμφανίζεται η μεταβατική θερμοκρασία T_m .

Η μεταβατική θερμοκρασία αυξάνεται ανάλογα με το πάχος και το πλάτος του δοκιμίου, την αιχμηρότητα της διατομής και την ταχύτητα κρούσης. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση της απόστασης των εδράσεων του δοκιμίου μειώνει την T_m . Η T_m επηρεάζεται αν το υλικό έχει υποστεί γήρανση, εν ψυχρώ παραμόρφωση, οποιαδήποτε θερμική κατεργασία ή εμφανίζει ανομοιογένειες δομής και μεγέθους κόκκων [10].

Εάν η θερμοκρασία του δοκιμίου αποκλίνει από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος που πραγματοποιείται η δοκιμή, τότε δεν επιτρέπεται να περάσουν περισσότερα από 5 δευτερόλεπτα από τη στιγμή που θα αφαιρεθεί το δοκίμιο από τον χώρο ψύξης ή θέρμανσής του και τη στιγμή που θα τοποθετηθεί στη μηχανή και θα χτυπηθεί από το εκκρεμές.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένας πίνακας μετρήσεων απορροφούμενης ενέργειας σε διαφορετικές θερμοκρασίες για μέταλλο χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα με το πείραμα κρούσης Charpy.

<i>Temperature (°C)</i>	<i>Impact Energy (J)</i>
50	76
40	76
30	71
20	58
10	38
0	23
-10	14
-20	9
-30	5
-40	1.5

Εικόνα 10 : Απορροφούμενη ενέργεια σε διαφορετικές θερμοκρασίες για μέταλλο χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα με το πείραμα κρούσης Charpy.

1.4 Αστοχία λόγω κρούσης

Ένα υλικό μπορεί να αστοχήσει

1. Κατ' αποχωρισμό
2. Κατ' ολίσθηση (πλαστική παραμόρφωση)
3. Με μεικτό τρόπο.



Εικόνα 11 : Αστοχία μεταλλικού υλικού μετά τη κρούση κατ' ολίσθηση και κατ' αποχωρισμό αντίστοιχα.

Ο τρόπος αστοχίας του εξαρτάται από την ολκιμότητά του. Για παράδειγμα σε περίπτωση μικρής ή αμελητέας ολκιμότητας το υλικό αστοχεί κατ' αποχωρισμό (ψαθυρή θραύση) ενώ στα υλικά με μεγάλη τιμή ολκιμότητας το υλικό αστοχεί χωρίς διάδοση ρωγμών. Οι ενδιάμεσες καταστάσεις θραύσης αντιστοιχούν στην όλκιμη θραύση και σ' αυτές παρατηρείται ταυτόχρονη διάδοση ρωγμών και πλαστικές ζώνες

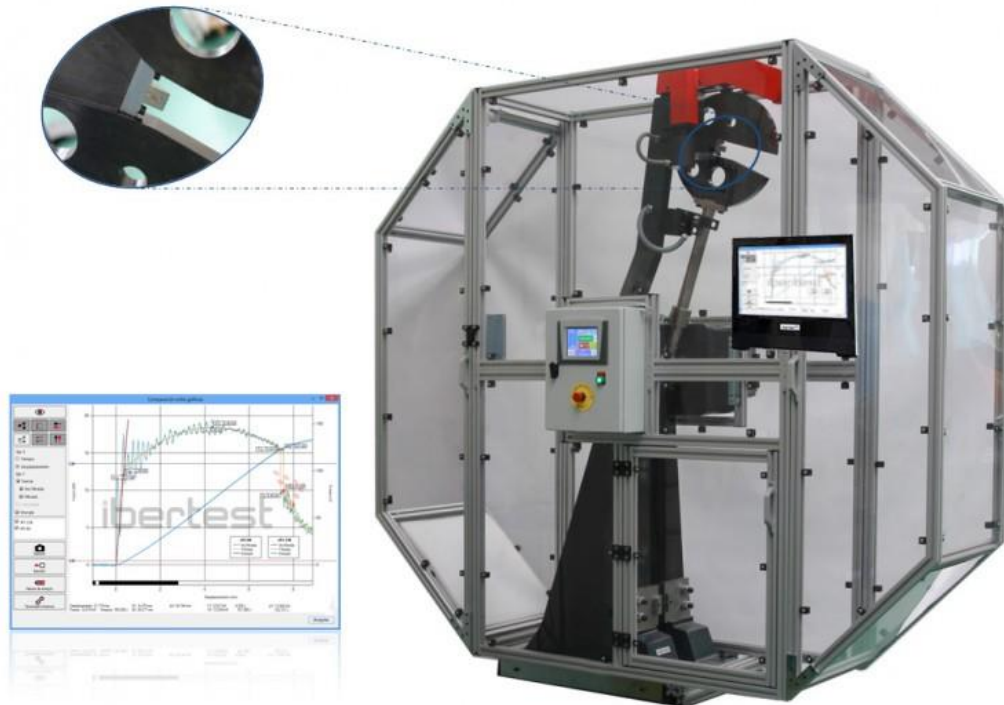
Κατά τη θραύση ενός υλικού από την επίδραση κρουστικών φορτίων εμφανίζονται οι παρακάτω ιδιαιτερότητες:

(α) Οι μηχανικές ιδιότητές του διαφέρουν από αυτές που μετριοούνται σε στατικές καταπονήσεις,

(β) αναπτύσσεται έντονα ανομοιογενές και χρονικά ασταθές εντατικό πεδίο, λόγω ανάκλασης των τασικών κυμάτων στα όρια του δοκιμίου με αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών εστιών αστοχίας συγχρόνως,

(γ) η τοπική αστοχία προκαλεί διάδοση ρωγμών η οποία άλλοτε σταματά και άλλοτε όχι, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εστίες αστοχίας σε διαφορετικά σημεία και να υπάρχει θρυμματισμός σε όλη την έκταση του δοκιμίου [10].

2. ΠΕΙΡΑΜΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ



Εικόνα 12 : Μηχανή κρούσης Charpy μέγιστης ενέργειας 750 Joule.

2.1 Δοκιμή κατά Charpy (Ευρώπη)

Η μηχανή εκτέλεσης δοκιμών κρούσης Charpy είναι ένα μηχανικό εκκρεμές του οποίου η αιωρούμενη μάζα αφήνεται από καθορισμένο ύψος έτσι ώστε στο κατώτερο σημείο της τροχιάς της να έχει την ταχύτητα που ορίζουν οι κανονισμοί.

Κατά τη δοκιμή, το δοκίμιο στηρίζεται ως αμφιέριστη δοκός, με απόσταση 40 mm μεταξύ των εδράσεων. Η ακμή της σφύρας προσκρούει στην πλευρά του δοκιμίου απέναντι από εκείνη που έχει την εγκοπή, έτσι ώστε η εγκοπή να βρίσκεται στην περιοχή των εφελκόμενων ινών.

Το δοκίμιο θραύεται και η ενέργεια απορρόφησης διαβάζεται απευθείας στη μηχανή ή υπολογίζεται από τον τύπο με βάση τη διαφορά αρχικού και τελικού ύψους. Η ταχύτητα κρούσης της σφύρας κυμαίνεται από 3 m/s έως 6 m/s και αυτή εξαρτάται από το μέγεθος της μηχανής το βάρος της σφύρας, καθώς και από τη γωνία που αφήνεται να κινηθεί το εκκρεμές.

Η μηχανή είναι εφοδιασμένη με αντύγα, ο δείκτης της οποίας παρασύρεται από το βραχίονα του εκκρεμούς και δίνει την απορροφούμενη ενέργεια σε Joule [10].

Κατά τη δοκιμή κρούσης, ένα δοκίμιο απορροφά ενέργεια ίση με:

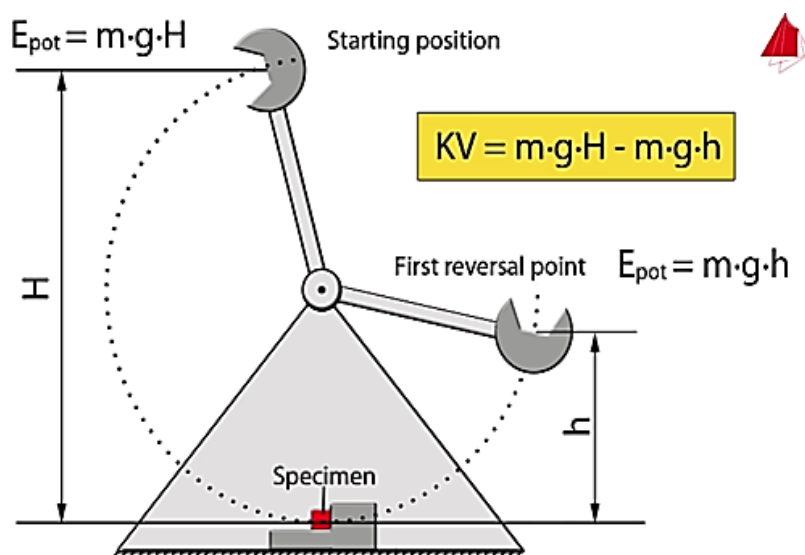
$$E = mg(H-h) \quad (2.0)$$

Όπου:

- mg το βάρος της σφύρας που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή του φορτίου,
- H το ύψος από το οποίο ξεκινά η σφύρα και
- h το ύψος στο οποίο καταλήγει μετά την θραύση του δοκιμίου.

Η ενέργεια αυτή ανάγεται στην εγκάρσια διατομή του δοκιμίου που απομένει μετά την αφαίρεση της επιφάνειας της εγκοπής (F) και ο λόγος αυτός ονομάζεται συντελεστής δυσθραυστότητας και ισούται με:

$$a = \frac{E}{F} = \frac{mg(H-h)}{F} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right) \quad (2.1)$$

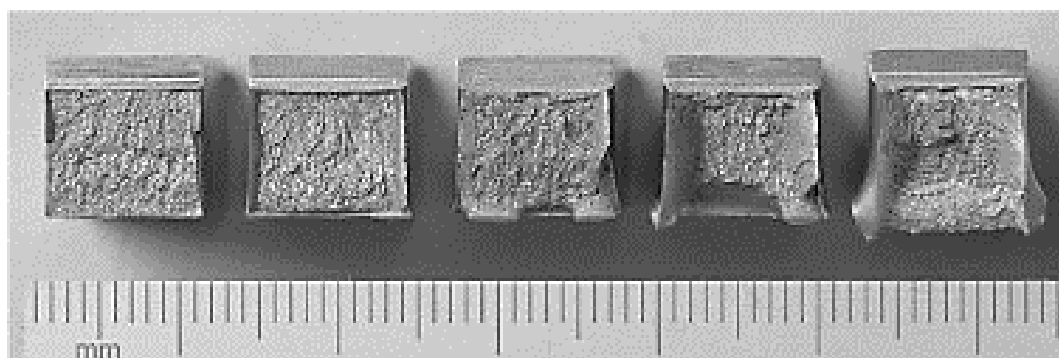


Εικόνα 13 : Σχεδιαστική αναπαράσταση διαδικασίας με το τύπο της ενέργειας.

Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και στη δοκιμή κρούσης κατά Izod με τις κυριότερες διαφορές να εντοπίζονται στη μορφή του δοκιμίου και τον τρόπο στήριξής του.

Στις δοκιμές κρούσης η εντατική κατάσταση, το φορτίο και η ταχύτητα καταπόνησης είναι προκαθορισμένες από τη γεωμετρική μορφή του δοκιμίου και την πειραματική διάταξη. Σύμφωνα με τους κανονισμούς εκτελούνται τουλάχιστον τρεις δοκιμές κρούσης με τη μία ή την άλλη μέθοδο

Ως συντελεστής δυσθραυστότητας του υλικού λαμβάνεται ο μέσος όρος της απορροφούμενης ενέργειας ανά μονάδα ελαχίστης διατομής ενώ η δοκιμή ολοκληρώνεται με τον έλεγχο της μορφής της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου ώστε να καθοριστεί το είδος της θραύσης (ψαθυρή ή όλκιμη) αναλόγως με το αν επικρατούν λείες και στιλπνές ή ανώμαλες και κοκκώδεις επιφάνειες.



Εικόνα 14 : Διαφορετικές επιφάνειες θραύσης.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένας πίνακας με τα αποτελέσματα μετρήσεων που έγιναν σε πρωτότυπα δοκίμια διαφορετικών υλικών με τη μέθοδο Charpy. Στα αποτελέσματα φαίνεται η ενέργεια που απορρόφησαν τα δοκίμια σε Joule .

	Alloy	Impact energy [J (ft·lb)]
1.	1040 carbon steel	180 (133)
2.	8630 low-alloy steel	55 (41)
3.	c. 410 stainless steel	34 (25)
4.	L2 tool steel	26 (19)
5.	Ferrous superalloy (410)	34 (25)
6.	a. Ductile iron, quench	9 (7)
7.	b. 2048, plate aluminum	10.3 (7.6)
8.	a. AZ31B magnesium	4.3 (3.2)
	b. AM100A casting magnesium	0.8 (0.6)
9.	a. Ti-5Al-2.5Sn	23 (17)
10.	Aluminum bronze, 9% (copper alloy)	48 (35)
11.	Monel 400 (nickel alloy)	298 (220)
13.	50:50 solder (lead alloy)	21.6 (15.9)
14.	Nb-1 Zr (refractory metal)	174 (128)

Εικόνα 15 : Αποτελέσματα μετρήσεων που έγιναν σε πρωτότυπα δοκίμια διαφορετικών υλικών με τη μέθοδο Charpy.

2.2 Δοκιμή κατά Izod (ΗΠΑ και Αγγλία)



Εικόνα 16 : Μηχανή κρούσης Izod.

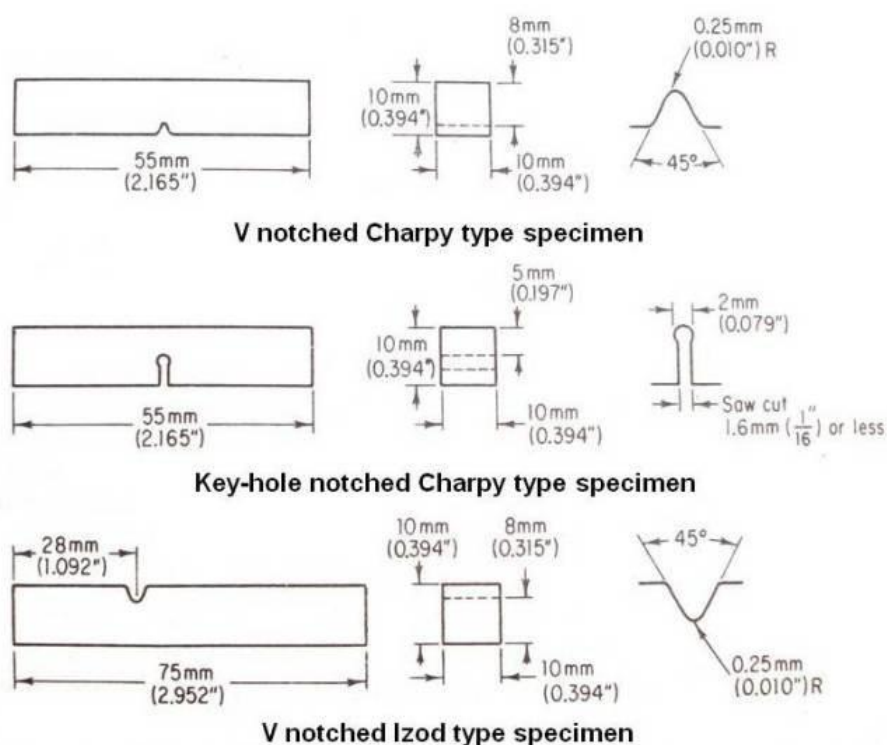
Η δοκιμή αντοχής σε κρούση Izod είναι μια τυπική μέθοδος για τον προσδιορισμό της αντοχής σε κρούση των υλικών. Ένας περιστρεφόμενος βραχίονας ανυψώνεται σε ένα συγκεκριμένο ύψος και στη συνέχεια απελευθερώνεται. Ο βραχίονας ταλαντεύεται προς τα κάτω χτυπώντας και σπάζοντας ένα δείγμα με εγκοπή. Η ενέργεια που απορροφάται από το δείγμα υπολογίζεται από το μέγιστο ύψος που ταλαντεύεται ο βραχίονας μετά το χτύπημα του δείγματος. Ένα δείγμα με εγκοπή χρησιμοποιείται γενικά για τον προσδιορισμό της ενέργειας κρούσης και της ευαισθησίας των εγκοπών.

Η δοκιμή είναι παρόμοια με τη δοκιμή πρόσκρουσης Charpy, αλλά χρησιμοποιεί διαφορετικές διαστάσεις δείγματος και διαφορετικό τρόπο συγκράτησης του. Στη δοκιμή πρόσκρουσης Izod το δείγμα διατηρείται σε διάταξη δοκού με πρόβολο σε αντίθεση με τη διαμόρφωση κάμψης τριών σημείων (Charpy).

Το τεστ πήρε το όνομά του από τον Άγγλο μηχανικό Edwin Gilbert Izod (1876–1946), ο οποίος το περιέγραψε στην ομιλία του το 1903 στη Βρετανική Ένωση, που δημοσιεύτηκε στη συνέχεια στο Engineering [15].

Στη δοκιμή κατά Izod το δοκίμιο πακτώνεται σε κατάλληλο σύστημα αρπαγών έτσι ώστε το κέντρο της εγκοπής του να συμπίπτει με το όριο πάκτωσης. Η σφύρα προσκρούει σε μια τομή του δοκίμιου που βρίσκεται 22 mm πάνω από την πάκτωση, με ταχύτητα 3.75 m/s.

Στη δοκιμή κατά Izod η επιφάνεια επαφής σφύρας-δοκιμίου βρίσκεται στην ίδια πλευρά του δοκιμίου που βρίσκεται και η εγκοπή, ώστε πάλι να καταπονείται εφελκυστικά η περιοχή της εγκοπής. Οι τυποποιημένες διαστάσεις του δοκιμίου κατά ASTM D256 είναι 63.5 mm × 12.7 mm × 3.2 mm αλλά συχνά χρησιμοποιούνται και οι κατά ASTM E25 75 mm × 10 mm × 10 mm [10].



Εικόνα 17 : Τύποι δοκιμίων και εγκοπών από τα οποία τα δυο πρώτα είναι για δοκιμή Charpy ενώ το τελευταίο κατά Izod.

2.3 Διατάξεις προσπίπτοντος σώματος

Σε διατάξεις ελεύθερης πτώσης σώματος είναι δυνατό να ελέγχεται η ενέργεια κρούσης μέσω της μάζας ή του ύψους πτώσης του σώματος, οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο υπό δοκιμή υλικό αλλά και να μετράται ένα πλήθος παραμέτρων μεταξύ των οποίων η ταχύτητα πρόσκρουσης, η ταχύτητα αναπήδησης και η δύναμη επαφής μεταξύ των δύο σωμάτων. Αυτές οι διατάξεις είναι εφοδιασμένες επίσης από μια σειρά αισθητήριων οργάνων, τα οποία επιτρέπουν στο χειριστή να καταγράψει κάποια από τα προαναφερθέντα μεγέθη, όπως επίσης να ελέγχει την κίνηση του κρουστικού σώματος μετά το πέρας της καταπόνησης, έτσι ώστε να μην υπάρξει αναπήδησή του πάνω στο δοκίμιο, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητες φορτίσεις στο υλικό. Στην Εικόνα 15 απεικονίζεται μια πειραματική διάταξη κρούσης ελεύθερης πτώσης σώματος.



Εικόνα 18 : Πειραματική διάταξη κρούσης ελεύθερης πτώσης σώματος.

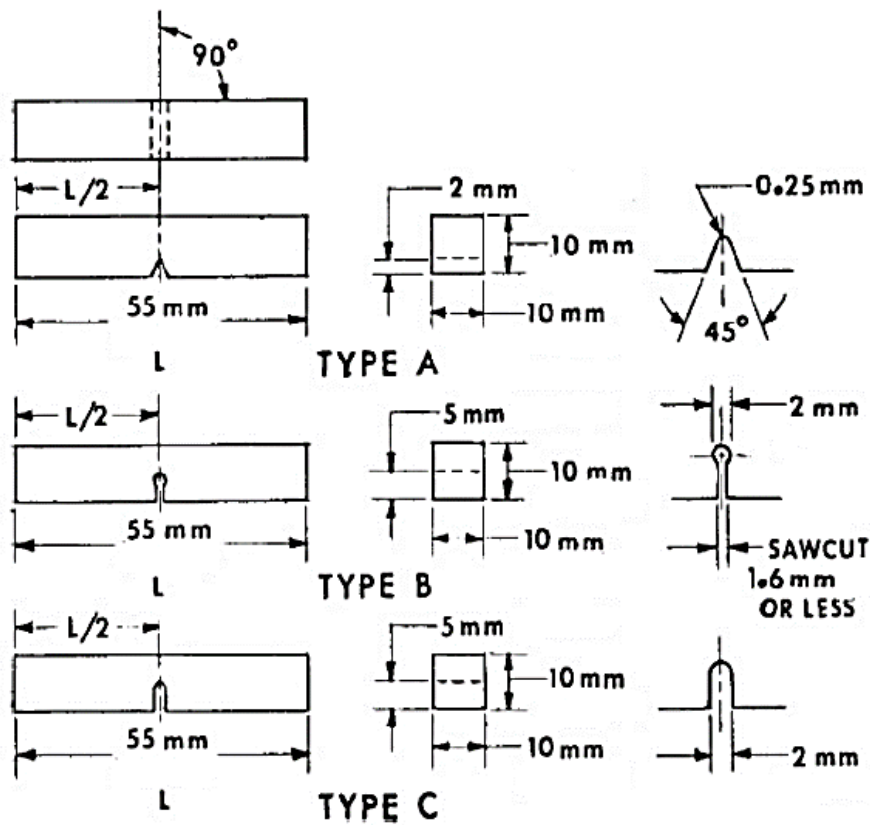
Στην κατηγορία των πειραματικών διατάξεων κρούσης προσπίπτοντος σώματος, ανήκει επίσης και το σύστημα της βαλλιστικής κρούσης (air gun impact system), όπου γίνεται εκτόξευση ενός βλήματος πολύ μικρής μάζας και μεγάλης ταχύτητας κρούσης, στο δοκίμιο που καταπονείται. Συνήθως, τα πειράματα βαλλιστικής κρούσης οδηγούν σε μεγάλης έκτασης βλάβη στα δοκίμια, ακόμα και σε πλήρη διάτρησή τους. Με τα βαλλιστικά πειράματα μπορούν να εξομοιωθούν περιπτώσεις όπου αιωρούμενα αντικείμενα συγκρούονται με ένα αεροπλάνο κατά τη διάρκεια της απογείωσης ή της προσγείωσης [11-14].

2.4 Δοκίμια κατά Charpy

Σύμφωνα με τη προδιαγραφή ASTM E23 [7] τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται για τη δοκιμή κρούσης είναι τριών τύπων Type A, B, C και παρουσιάζονται στην Εικόνα 19. Τα δοκίμια είναι πρισματικές ράβδοι τετραγωνικής διατομής, και το τυπικό μέγεθος δείγματος για τη δοκιμή πρόσκρουσης Charpy είναι 10 mm × 10 mm × 55 mm. Οι διαστάσεις αυτές σε κάποιες περιπτώσεις μπορούν να αλλάξουν με βάση το είδος του υλικού, την ελάχιστη ενέργεια που απαιτεί η θραύση του καθώς και τη μέγιστη ενέργεια κρούσης της μηχανής ώστε να πραγματοποιηθεί με επιτυχία η πειραματική διαδικασία.

Τα δοκίμια αυτά φέρουν στο κέντρο της μίας πλευράς τους εγκοπή βάθους 2 mm. Οι εγκοπές έχουν σχήμα οπής κλειθρού, Π, V ή U από τις οποίες η τελευταία έχει το σχετικό πλεονέκτημα ότι παρουσιάζει περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή του τασικού πεδίου στην περιοχή της. Ο σκοπός της

ύπαρξης της εγκοπής είναι η δημιουργία συγκέντρωσης τάσης στην περιοχή αυτή έτσι ώστε αφενός να υπάρχουν συνθήκες σχετικά ψαθυρής θραύσης και αφετέρου να είναι προκαθορισμένη η θέση της διατομής θραύσης.



Εικόνα 19 : Τύποι δοκιμίων κρούσης V-notch (Type A), Key-hole (Type B) και U-notch (Type C) .

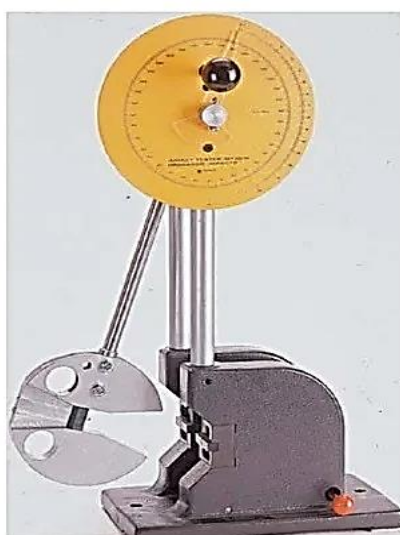
3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SOLIDWORKS

Για το σχεδιασμό και τη κατασκευή της μηχανής κρούσης χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο η MT3016 Impact Tester της εταιρείας TERCO. Η μηχανή αυτή παρουσιάζει μέγιστη ενέργεια κρούσης τα 15 J και έχει μήκος εκκρεμούς 358mm. Για 15 J ενέργεια κρούσης, η ταχύτητα που θα έχει η σφύρα κατά τη κρούση είναι ίση με 3,8 m/s.

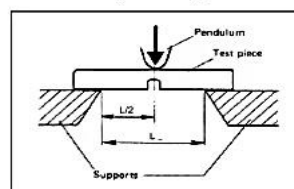
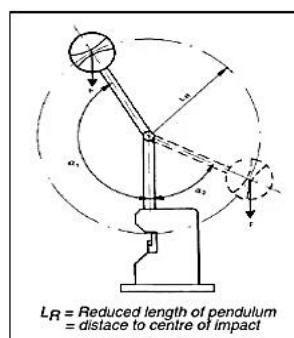


Material Testing Laboratory

MT 3016 Impact Tester



MT 3016 Impact Tester



MT 3016 is a robust, easily handled bench impact tester (Charpy) made to standard specifications. It demonstrates in a simple and reliable manner how the impact strength characteristics of a material are affected at, for example, low temperature. This is of great importance for the choice of material in applications subjected to heavy temperature fluctuations. It is also useful when a teacher wishes to demonstrate how the impact strength of a material is affected by different kinds of heat treatments, e.g. hardening, tempering, and normalizing. With MT 3016 the student can do his laboratory exercises without difficulty.

Description

The machine has a heavy and stable cast iron mounting with holes for bench attachment. The stand consists of two robust steel bars. The pendulum is mounted in ball bearings and precision balanced. The test piece supports are hardened and ground. The distance between supports can easily be adjusted. The scale is graduated in joules and shows directly the energy required to break off the test piece. The pendulum is braked with a friction brake.

Examples of experiments

- Investigate the effect of carbon content on impact strength
- Investigate the effect of temperature on impact strength
- Investigate the effect of normalization on impact strength

The equipment

- Impact Tester
- 5 sets test pieces of 3 different steel qualities (Tot 15 pieces)
- Laboratory Manual

Test pieces for MT 3016

- MT 3027-1, Impact Test Piece 1, red (construction steel)
- MT 3027-2, Impact Test Piece 2, yellow (engineering steel)
- MT 3027-3, Impact Test Piece 3, green (tooling steel)

Technical data	
Max. impact energy	15 joule (1 J=Nm)
	1 Scale graduation = 0.1 joule
Dimensions of test pieces	6x6x44 mm
Dimensions	170x290x615 mm
Weight	30 kg

Please contact Terco for more information. Phone +46 8 506 855 12. Fax. +46 8 506 855 01, export@terco.se
Terco reserves the right to make changes in the design and modifications or improvements of the products at any time without incurring any obligations.

Εικόνα 20 : Πρότυπη μηχανή κρούσης.

Πρωταρχικός σκοπός κατά τον σχεδιασμό ήταν η μηχανή να κατασκευαστεί και να λειτουργήσει με όσο το δυνατόν πιο απλό και οικονομικό τρόπο, αποδεικνύοντας ότι με δημιουργικές ιδέες και χρησιμοποιώντας κατά βάση μηχανήματα και εργαλεία που βρίσκονται στο χώρο της σχολής μπορεί να κατασκευαστεί μια μηχανή που να ανταποκρίνεται άψογα στις προδιαγραφές πολύ ακριβότερων αγοραστικά μηχανών κρούσης.

Οι διαστάσεις των επιμέρους δομικών στοιχείων της μηχανής εκτός από το μήκος του εκκρεμούς υπολογίστηκαν και σχεδιάστηκαν με βάση την πυκνότητα του χάλυβα ($\rho=7850 \text{ kg/m}^3$) και κατά συνέπεια με βάση τη μάζα του χάλυβα ανά μονάδα όγκου. Σκοπός ήταν η κατασκευή να φτάσει και να ξεπεράσει το συνολικό βάρος της πρωτότυπης μηχανής, εξασφαλίζοντας με αυτό το τρόπο μια πιο ασφαλή και στιβαρή μετρητική μηχανή. Γενικά οι ενεργές διατομές των δομικών στοιχείων της παρούσας μηχανής δοκιμών επιλέχθηκαν λίγο μεγαλύτερες σε σχέση με τις αντίστοιχες διαστάσεις της πρότυπης εμπορικής μηχανής, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η απαραίτητη αντοχή τους υπό την επίδραση των αναπτυσσόμενων φορτίων κατά τις δοκιμές κρούσης, αποφεύγοντας έτσι αναλυτικούς και λεπτομερείς υπολογισμούς.

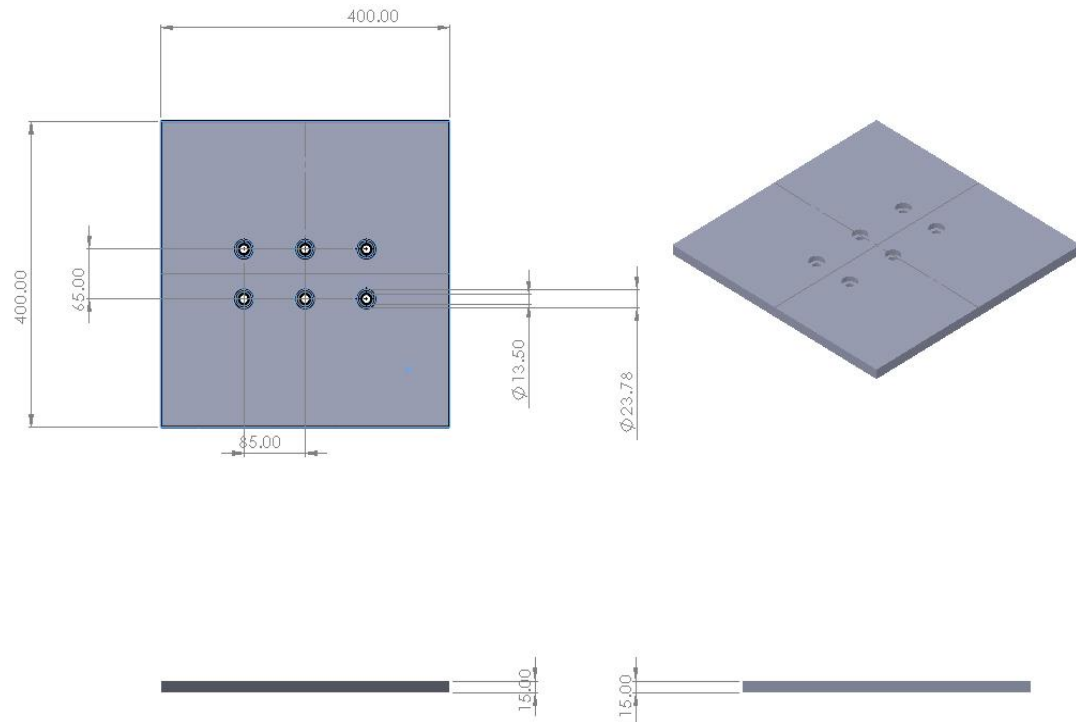
Οι διαστάσεις τη μηχανής και των επιμέρους στοιχείων της, προσδιορίζονται ξεκάθαρα στα ηλεκτρονικά σχέδια της μηχανής που υλοποιήθηκαν μέσω του προγράμματος Solidworks, τα οποία και παρατίθενται παρακάτω σε εικόνες με τη σειρά που σχεδιάστηκαν.

Στη πράξη η κατασκευή μπορεί να διαφέρει ελαφρώς σε λεπτομέρειες κάποιων σημείων για λειτουργικούς λόγους.

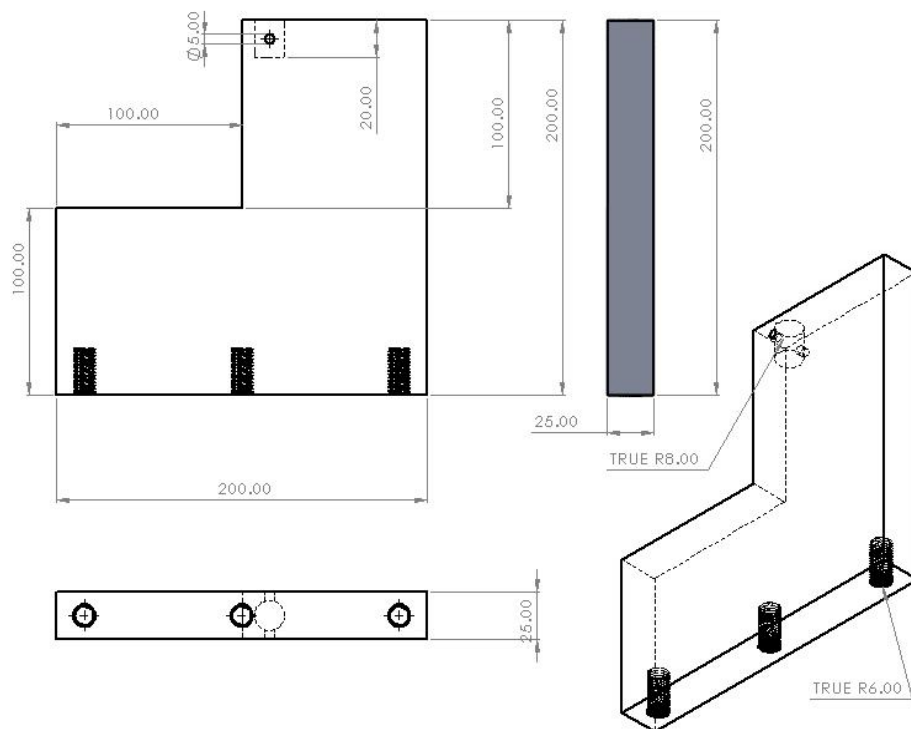
Να σημειωθεί ότι τα ηλεκτρονικά σχέδια που αφορούν τους κοχλίες, τα περικόχλια και τα έδρανα κύλισης έχουν ληφθεί νόμιμα από το διαδίκτυο και δεν σχεδιάστηκαν εξ αρχής καθόσον είναι τυποποιημένα στοιχεία (οι σύνδεσμοι των ιστοσελίδων αναφέρονται στη βιβλιογραφία στο τέλος της εργασίας [22, 23]).

3.1 Βάσεις

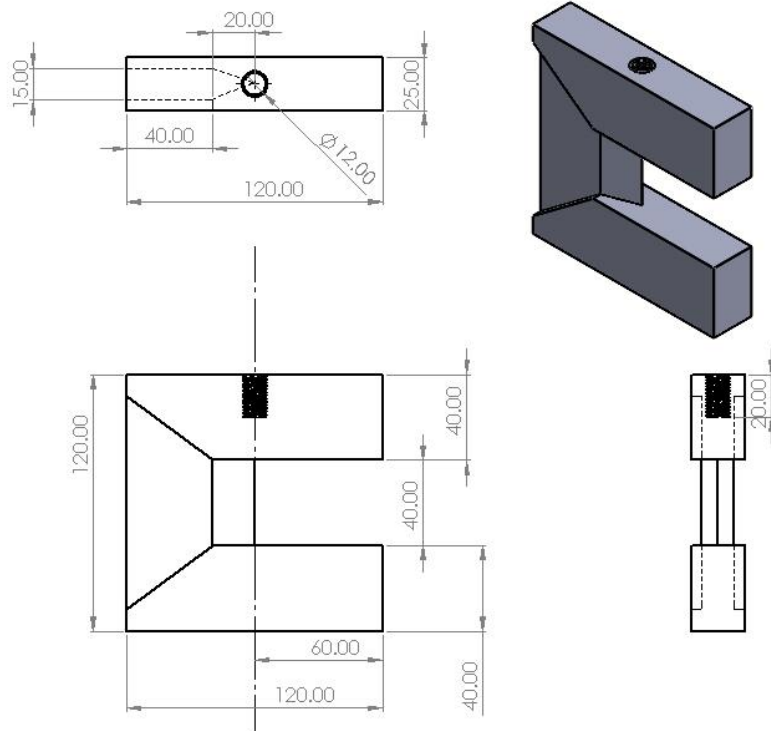
Η σχεδίαση της μηχανής ξεκίνησε από τη βάση (Εικόνα 21), ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο στο οποίο βιδώνονται με κοχλίες τύπου Allen οι δύο παράλληλες βάσεις συγκράτησης του δοκιμίου (Εικόνα 22). Οι βάσεις αυτές απέχουν 40mm μεταξύ των εσωτερικών τους πλευρών. Η απόσταση αυτή είναι η απόσταση στήριξης του δοκιμίου. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η σφύρα κρούσης του εκκρεμούς (Εικόνα 23) η οποία συνδέεται με σπείρωμα στον κεντρικό άξονα του εκκρεμούς (Εικόνα 25). Επιπλέον δύο εξαρτήματα, υπεύθυνα για τη στήριξη του συστήματος περιστροφής είναι οι δοκοί συγκράτησης (Εικόνα 24) . Αυτοί συνδέονται στις οπές 16 mm που υπάρχουν στις δύο παράλληλες βάσεις και σταθεροποιούνται με κοχλία και περικόχλιο στο κάτω μέρος ενώ στο πάνω τους συνδέει ο κεντρικός άξονας του συστήματος περιστροφής.



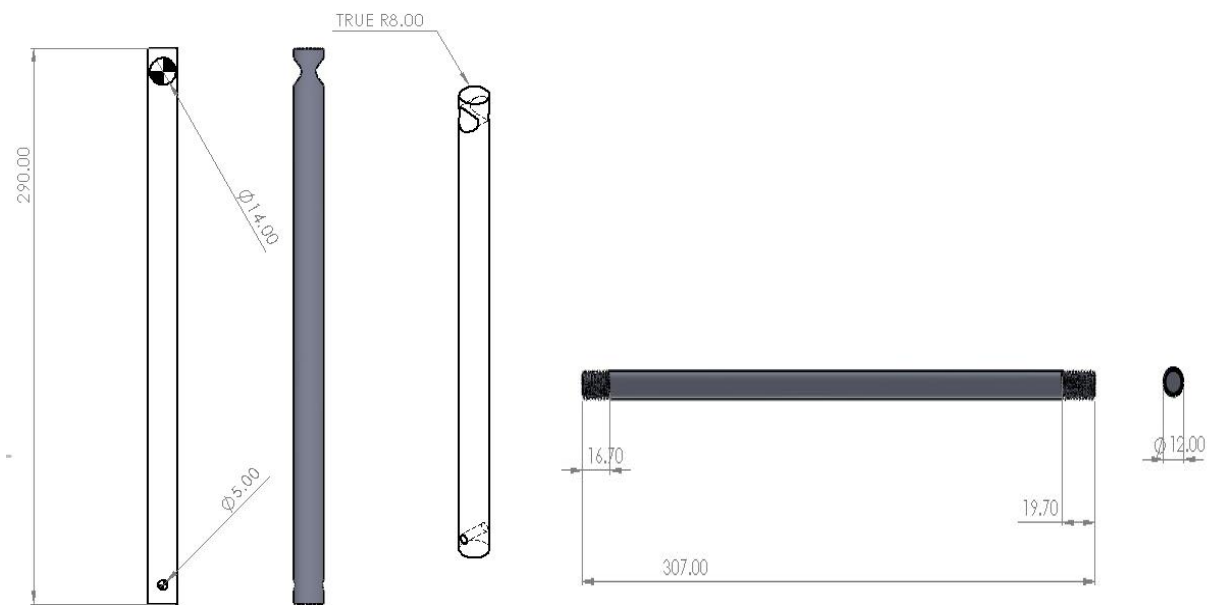
Εικόνα 21 : Κάτω βάση (ποσότητα 1).



Εικόνα 22 : Παράλληλες βάσεις συγκράτησης δοκιμίου (ποσότητα 2).



Εικόνα 23 : Σφύρα κρούσης (ποσότητα 1).



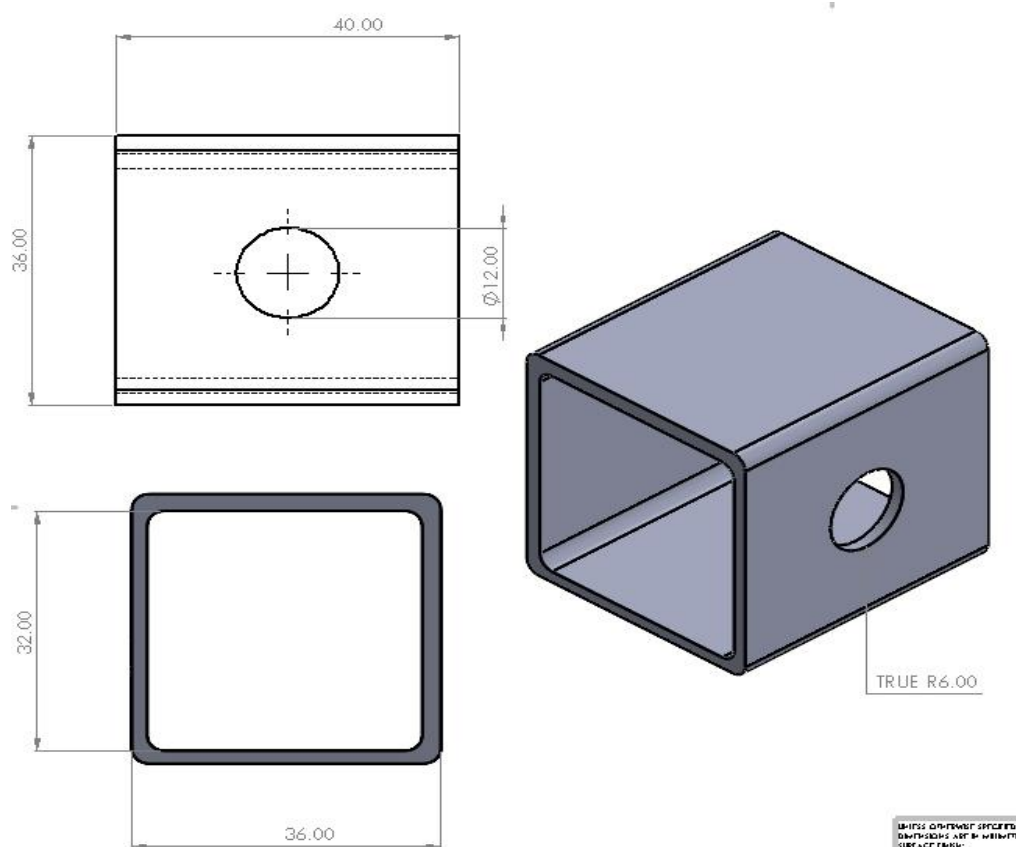
Εικόνα24 : Δοκοί συγκράτησης
συστήματος περιστροφής (Ποσότητα 2).

Εικόνα 25 : Κεντρικός άξονας εκκρεμούς
(Ποσότητα 1).

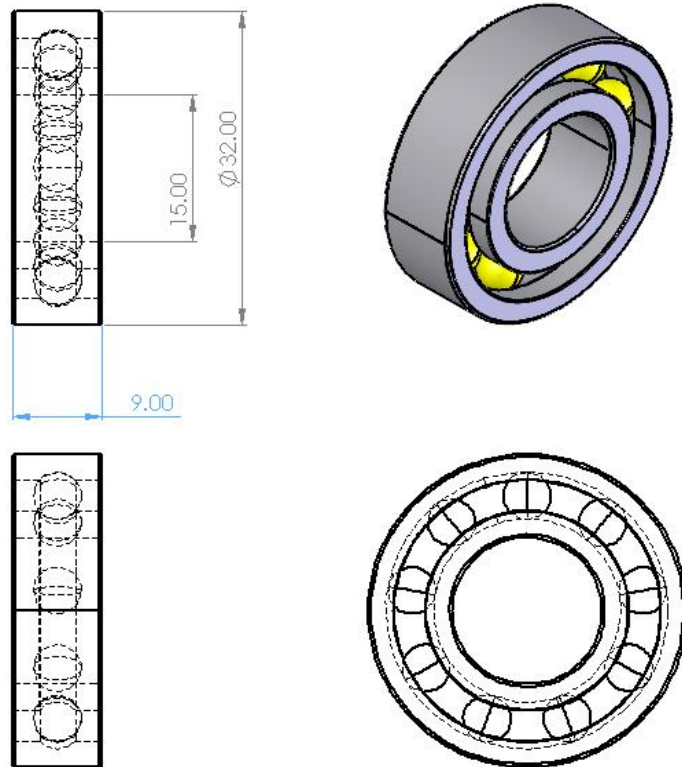
3.2 Σύστημα περιστροφής

Το σύστημα περιστροφής αποτελείται αρχικά από ένα κομμάτι τετραγωνικού σωλήνα (Εικόνα 26) το οποίο παίζει το ρόλο της βάσης στην οποία συνδέονται τα δύο έδρανα περιστροφής (Εικόνα 27) καθώς και το ένα περικόχλιο ρύθμισης της απόστασης του εκκρεμούς (Εικόνα 28) το οποίο μένει σταθερό. Το δεύτερο περικόχλιο παραμένει ελεύθερο στην εξωτερική πλευρά του σωλήνα με σκοπό να συγκρατεί στην επιθυμητή απόσταση το κεντρικό άξονα του εκκρεμούς.

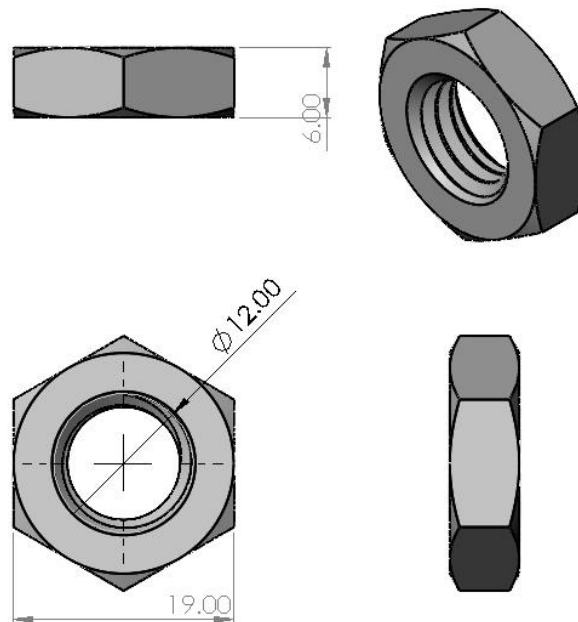
Ο κεντρικός άξονας του συστήματος περιστροφής (Εικόνα 29) είναι ουσιαστικά ένας κοχλίας ο οποίος με τη βοήθεια των εδράνων εξασφαλίζει την ελεύθερη περιστροφή του εκκρεμούς γύρω από αυτόν.



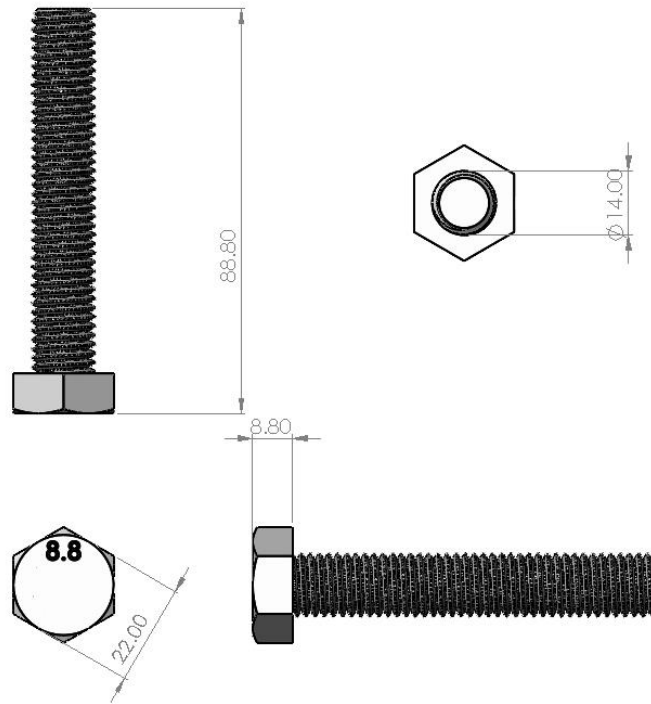
Εικόνα 26 : Τετραγωνικός σωλήνας που αποτελεί βάση του συστήματος περιστροφής για το εκκρεμές (ποσότητα 1).



Εικόνα 27 : Έδρανα κύλισης (ρουλεμάν) σειράς 6002 (ποσότητα 2).



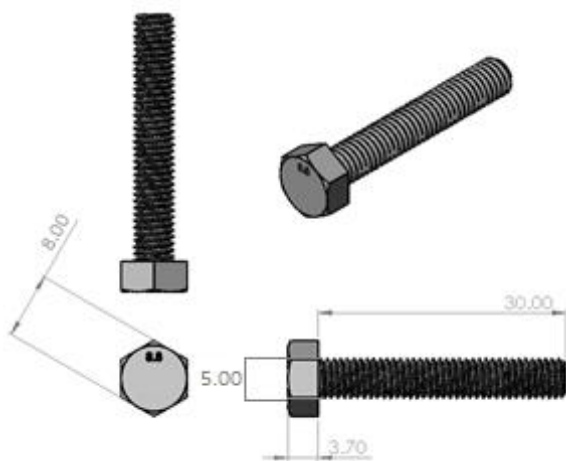
Εικόνα 28 : Περικόχλια ρύθμισης της απόστασης εκκρεμούς (ποσότητα 2).



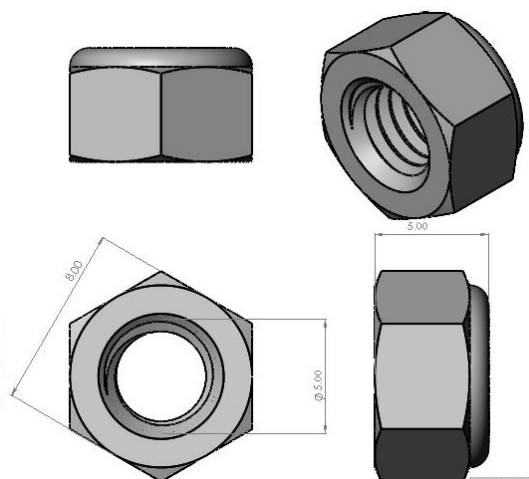
Εικόνα 29 : Κεντρικός άξονας συστήματος περιστροφής .

3.3 Κοχλίες σύνδεσης και περικόχλια

Στις Εικόνες 30 και 31 παρουσιάζεται ο κοχλίας διαμέτρου 5mm και των αντίστοιχων διατάσεων περικόχλιο τα οποία ενώνουν τις δοκούς συγκράτησης του συστήματος περιστροφής με τις παράλληλες βάσεις συγκράτησης του δοκιμίου.

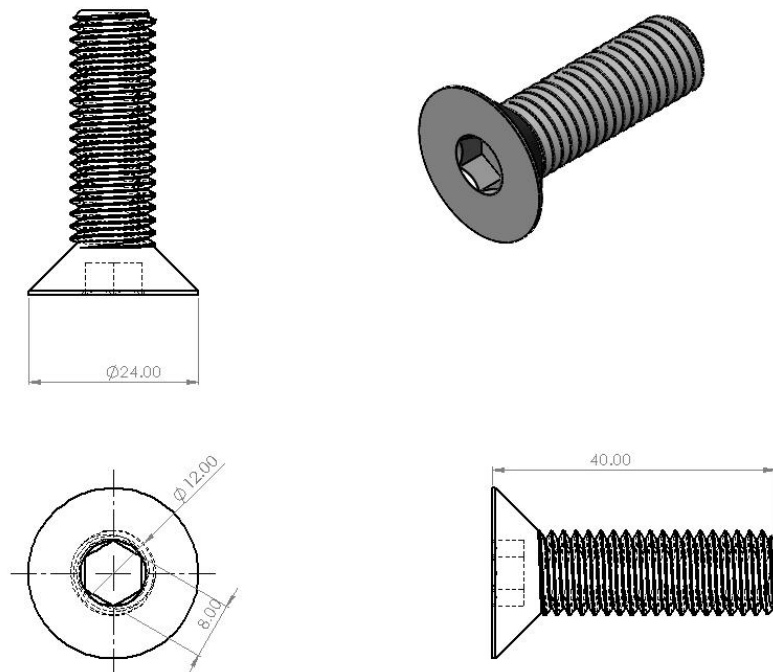


Εικόνα 30 : Κοχλίας M5 Δοκών συγκράτησης
(ποσότητα 2) .

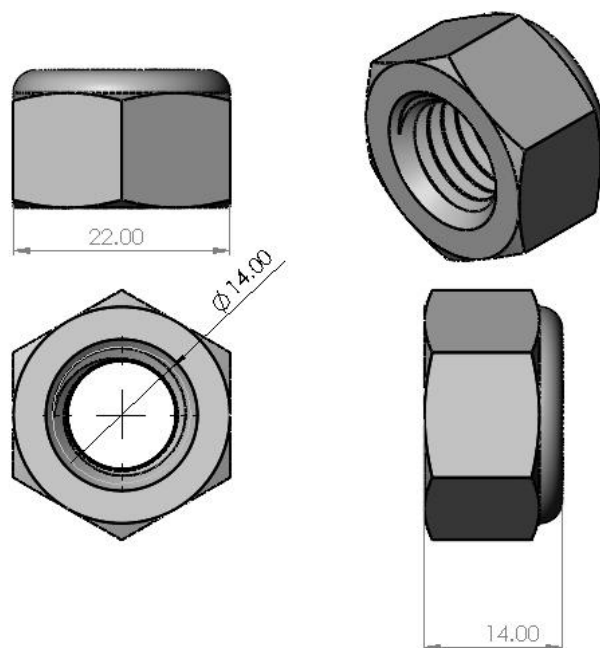


Εικόνα 31 : Περικόχλιο ασφαλείας M5
δοκών συγκράτησης (ποσότητα 2).

Στην Εικόνα 32 φαίνονται οι κοχλίες τύπου Allen που συνδέουν τις παράλληλες βάσεις με τη κάτω βάση και στην Εικόνα 33 το περικόχλιο ασφαλείας που σταθεροποιεί το κεντρικό άξονα του συστήματος περιστροφής.



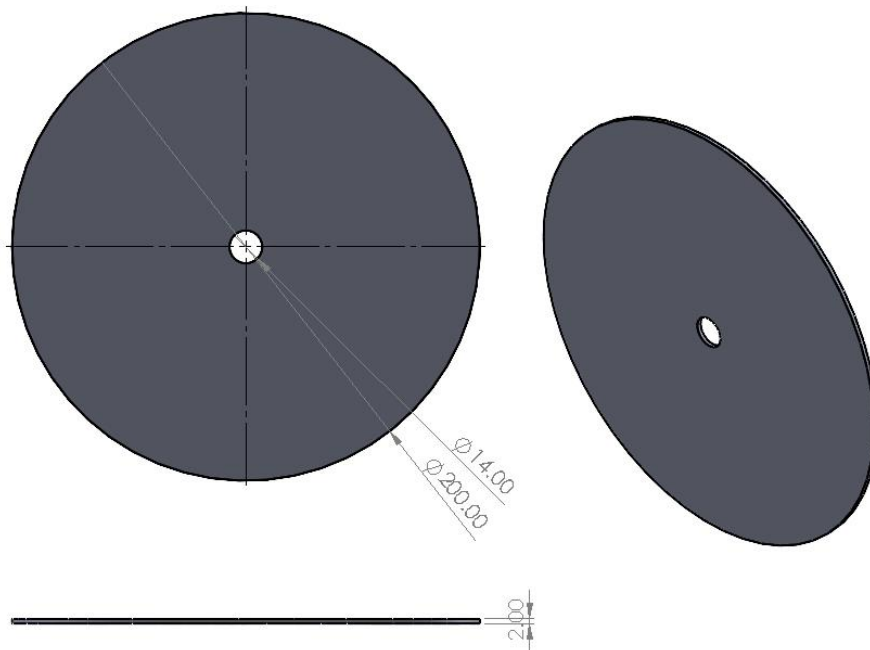
Εικόνα 32 : Κοχλίες τύπου Allen για τη σύνδεση των παράλληλων βάσεων με τη κάτω βάση (ποσότητα 6) .



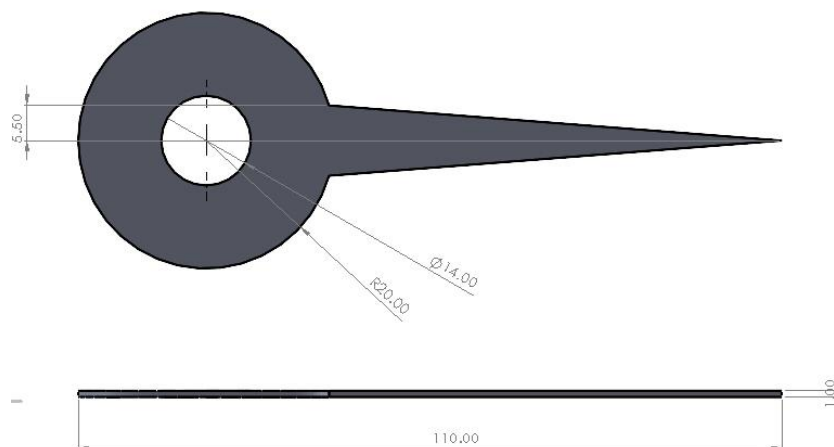
Εικόνα 33 : Περικόχλιο ασφαλείας κεντρικού άξονα περιστροφής (ποσότητα 1) .

3.4 Σύστημα μέτρησης γωνίας περιστροφής του εκκρεμούς

Το σύστημα μέτρησης της γωνίας περιστροφής του εκκρεμούς αποτελείται από ένα κυκλικό μοιρογνωμόνιο 360° (Εικόνα 34) και ένα δείκτη της γωνίας περιστροφής (Εικόνα 35) τα οποία διαθέτουν στο κέντρο τους οπή διαμέτρου 14mm ώστε να συνδέονται μαζί με το περικόχλιο στον άξονα περιστροφής του εκκρεμούς.



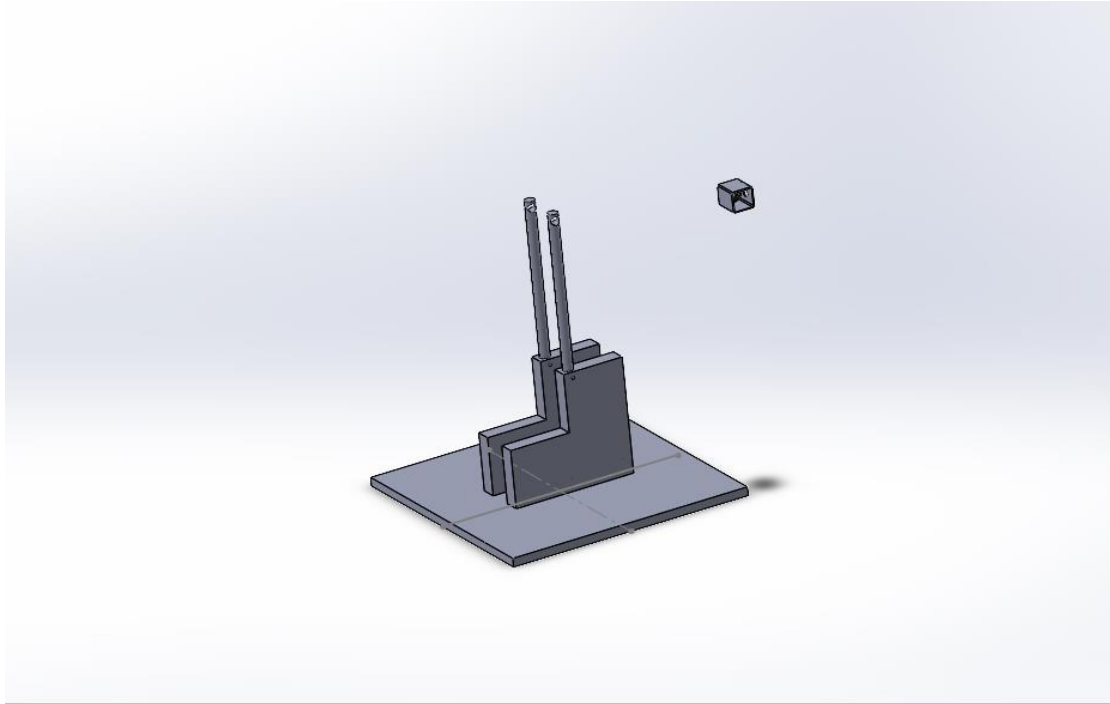
Εικόνα 34 : Μοιρογνωμόνιο 360° .



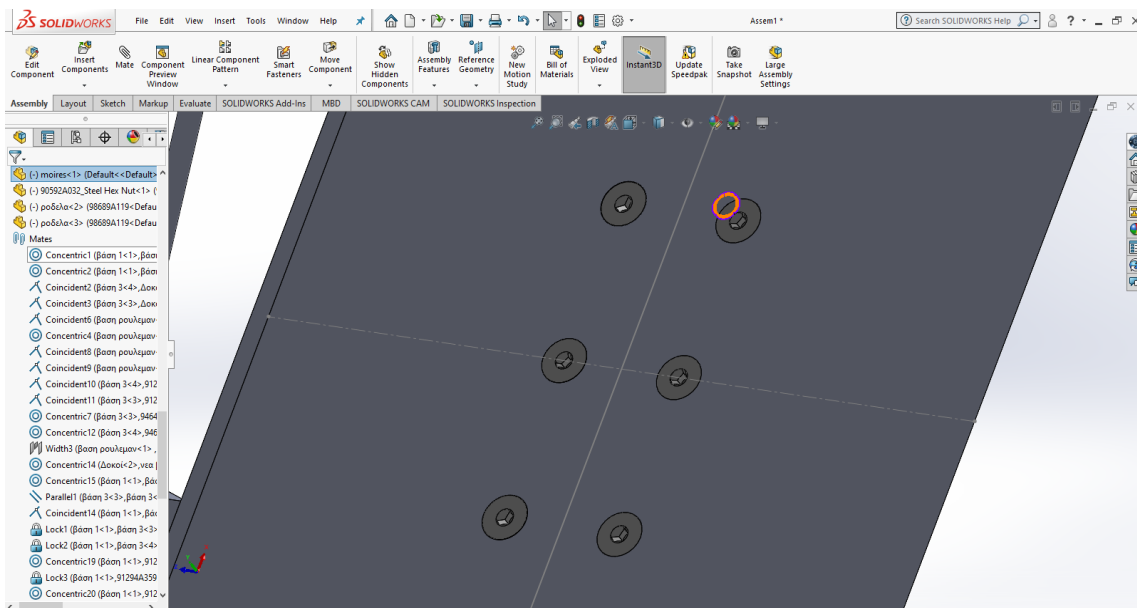
Εικόνα 35 : Δείκτης μοιρών περιστροφής του εκκρεμούς.

3.5 Σύνδεση επιμέρους κομματιών για τη κατασκευή της μηχανής.

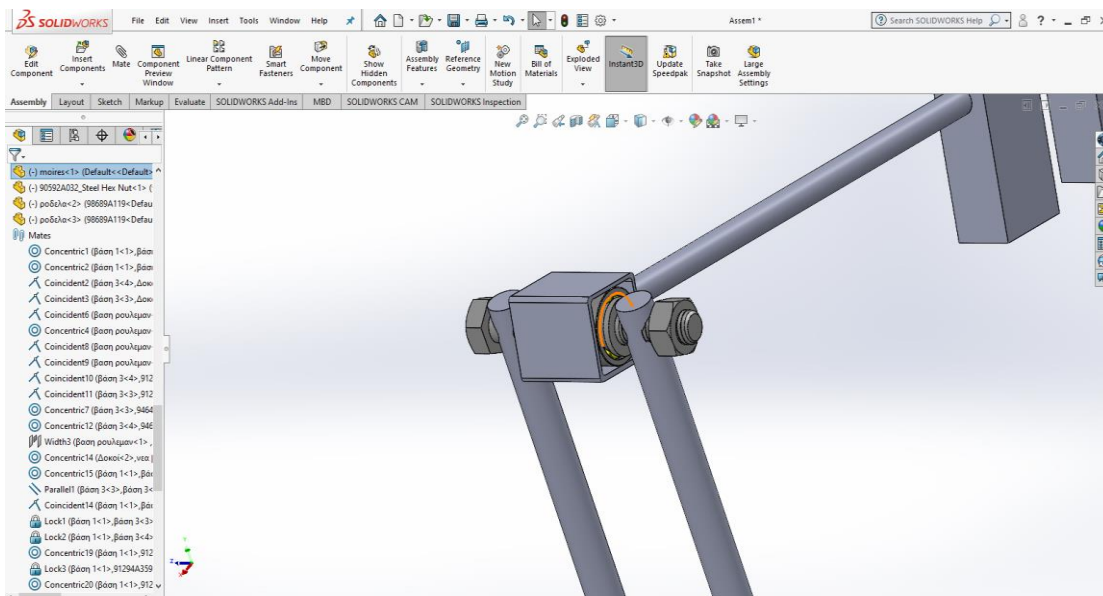
Εφόσον σχεδιάστηκαν τα κομμάτια της κατασκευής σειρά είχε η σύνδεσή τους ώστε η μηχανή να αποκτήσει τη τελική της μορφή. Οι Εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζουν τα στάδια δημιουργίας της μηχανής κρούσης.



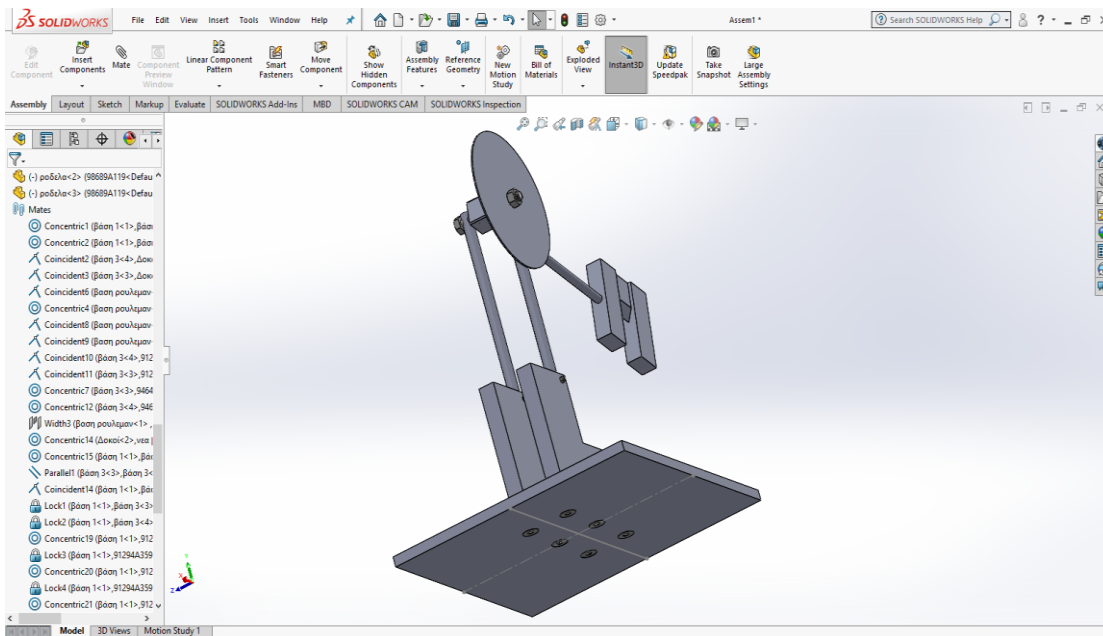
Εικόνα 36 : Οι βάσεις με τις δοκούς.



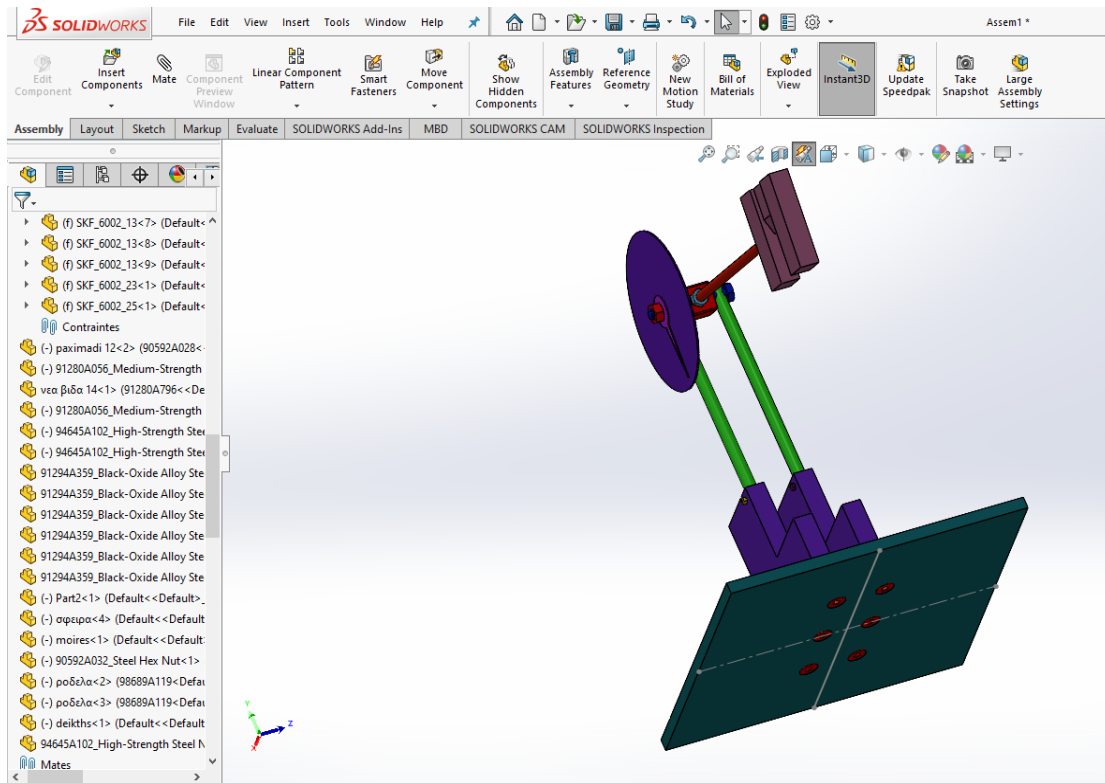
Εικόνα 37 : Κοχλίες σύνδεσης της βάσης .



Εικόνα 38 : Σύστημα περιστροφής εκκεμους.



Εικόνα 39 : Μηχανή κρούσης ένα στάδιο πριν την ολοκλήρωση .



Εικόνα 40 : Τελική μορφή σχεδίασης της μηχανής.

4. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΡΟΥΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά στα στάδια κατασκευής και τις κατεργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την κατασκευή των επιμέρους κομματιών της μηχανής κρούσης.

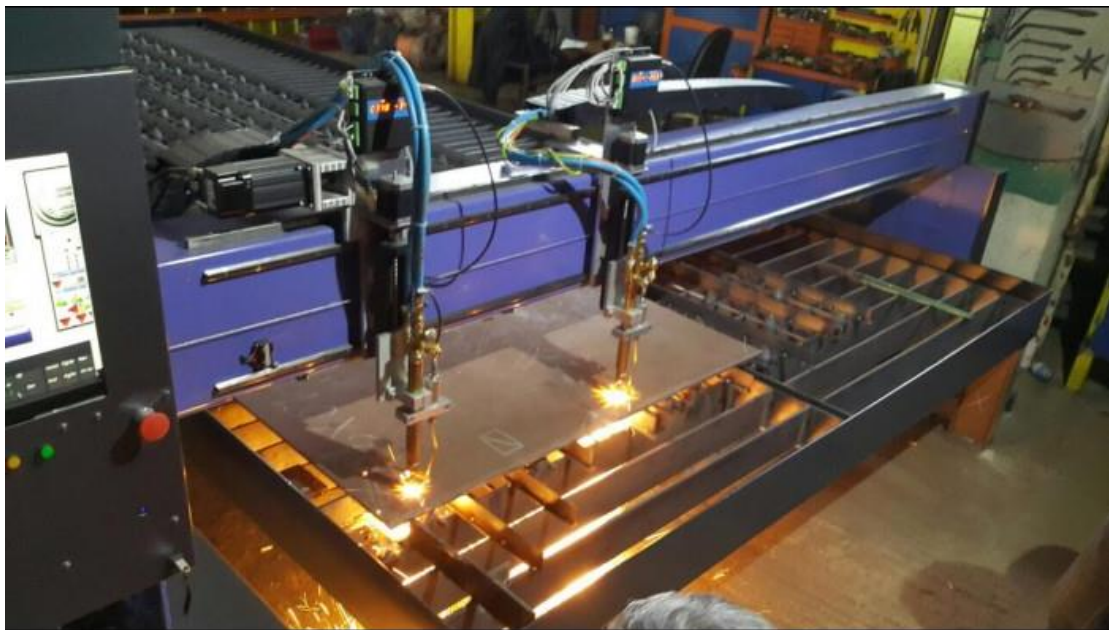
4.1 Βάσεις

Αρχικό στάδιο ήταν η κοπή κομματιών χάλυβα που θα αποτελέσουν τη βάση της μηχανής.

Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε είναι ο NST 37-2.

Τα κομμάτια αυτά κόπηκαν στον παντογράφο της εταιρείας που αγοράστηκαν σύμφωνα με τις υπολογισμένες διαστάσεις της κατασκευής.

Κοπή με παντογράφο: Ο παντογράφος είναι μηχανή κοπής μετάλλου η οποία χρησιμοποιεί σαν κοπτικό μέσο το πλάσμα ή το οξυγόνο και έχει σχετικά καλή ακρίβεια. Τα μέρη της κατασκευής που κόπηκαν με τη μέθοδο αυτή είναι η κάτω βάση η οποία επιλέχθηκε να έχει τετραγωνική διάσταση, τα δύο παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα προς τη βάση κομμάτια που θα συγκρατούν το δοκίμιο, καθώς και η σφύρα κρούσης του εκκρεμούς.



Εικόνα 41 : Παντογράφος CNC.



Εικόνα 42 : Κομμάτια βάσης.



Εικόνα 43 : Κοχλίες σύνδεσης των βάσεων.



Εικόνα 44 : Κατεργασία διάτρησης των βραχιόνων της βάσης χρησιμοποιώντας ένα κάθετο δράπανο της σχολής.

Με την ίδια ακριβώς διαδικασία έγινε διάτρηση στη τετραγωνική βάση και στα δύο επιμέρους κομμάτια συγκράτησης δοκιμίων σε έξι σημεία με σκοπό αυτά να βιδωθούν πάνω στη βάση με φρεζάτους κοχλίες τύπου Allen διατομής 12mm.

Οπή επίσης έγινε και στο πάνω μέρος της σφύρας ώστε να εισέλθει και να κολληθεί εκεί ο βραχίονας που θα ενώνει τη σφύρα με το σύστημα περιστροφής του εκκρεμούς.



Εικόνα 45 : Τετραγωνική βάση .

Για να βιδώσουν οι κοχλίες στα κομμάτια συγκράτησης των δοκιμών αρχικά διανοίχθηκαν οπές με χρήση τρυπανιού ενός νούμερου μικρότερου. Έπειτα, δημιουργήθηκε σπειρώμα με τη βοήθεια σπειροτόμου διατομής M12 με βήμα 1,7.



Εικόνα 46 : Χειρωνακτική διαδικασία διάνοιξης σπειρώματος.



Εικόνα 47 : Φρεζάρισμα οπών για να μη προεξέχουν οι κοχλίες σύνδεσης.

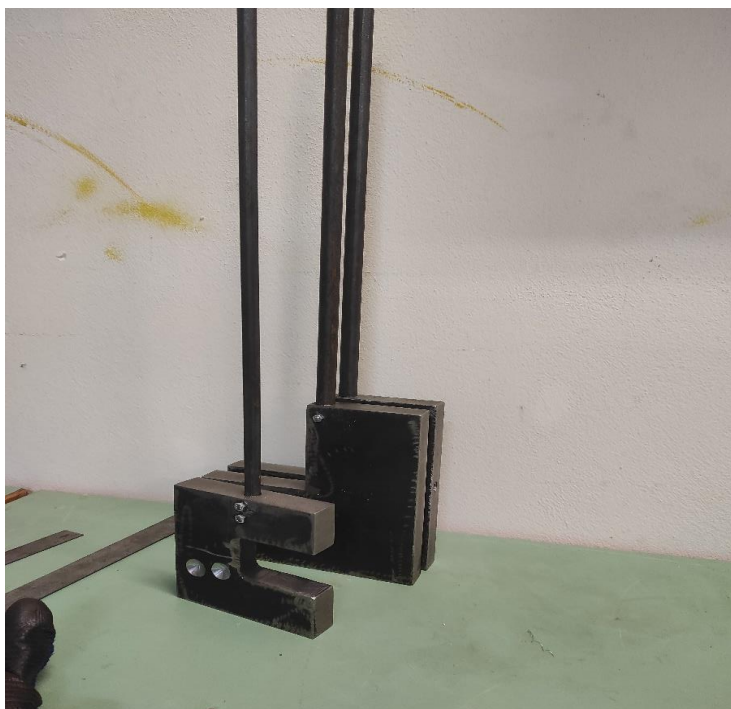


Εικόνα 48 : Δοκιμή ευστάθειας κατασκευής.

Ο μεταλλικός βραχίονας καθώς και οι 2 επιμέρους παράλληλοι βραχίονες συγκράτησης του συστήματος περιστροφής κόπηκαν στις επιθυμητές διαστάσεις με τη βοήθεια του επιτραπέζιου δυσκοπρίονου κοπής της σχολής με μεγάλη προσοχή φορώντας όπως και σε κάθε άλλη εργασία τα απαραίτητα Μέσα Ατομικής Προστασίας.



Εικόνα 49 : Διαδικασία κοπής μετάλλου με δυσκοπρίονο.



Εικόνα 50 : Μια πρώτη σύνδεση των βραχιόνων με τις βάσεις τους.

4.2 Σύστημα περιστροφής

Επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή του συστήματος περιστροφής του εκκρεμούς το οποίο ήταν και ένα από τα πιο ιδιαίτερα σημεία στη κατασκευή καθώς είναι μια πατέντα που επινοήθηκε από τον γράφοντα και υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του καθηγητή Σωτήριου Τσίρκα, υπεύθυνου για το χώρο και τις εργαλειομηχανές που χρειάστηκαν κατά τη διαδικασία κατασκευής.

Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα τετραγωνικής διατομής μεταλλικό σωλήνα με μήκος κάθε εσωτερικής πλευράς 32mm, 2 ρουλεμάν σειράς 6002 με εξωτερική διάμετρο 32 mm και εσωτερική 15 mm, δύο περικόχλια με σπείρωμα για κοχλία διατομής M12, που δύναται χάρη σε αυτά να καθορισθεί το μήκος και η κατεύθυνση του εκκρεμούς, καθώς και ένα κοχλία διατομής 15 mm και μήκους 100 mm η οποία παίζει το ρόλο του κεντρικού άξονα περιστροφής του συστήματος.

Τα εργαλεία που χρειάστηκα ήταν τα εξής: Το δυσκοπρίονο κοπής για να κοπεί ο τετραγωνικός σωλήνας στις επιθυμητές διαστάσεις, η ηλεκτροσυγκόλληση της σχολής με την απαραίτητη προστατευτική μάσκα για τα μάτια ώστε να συγκολληθούν τα επιμέρους κομμάτια μεταξύ τους και ένα σετ φιλιέρες για να δημιουργηθεί το σπείρωμα στον βραχίονα σύνδεσης της σφύρας με το σύστημα περιστροφής

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε κάθετο δράπανο για τη διάνοιξη οπής στο κέντρο της μιας πλευράς του τετραγωνικού σωλήνα.



Εικόνα 51 : Σύστημα περιστροφής πριν τη συναρμολόγηση.

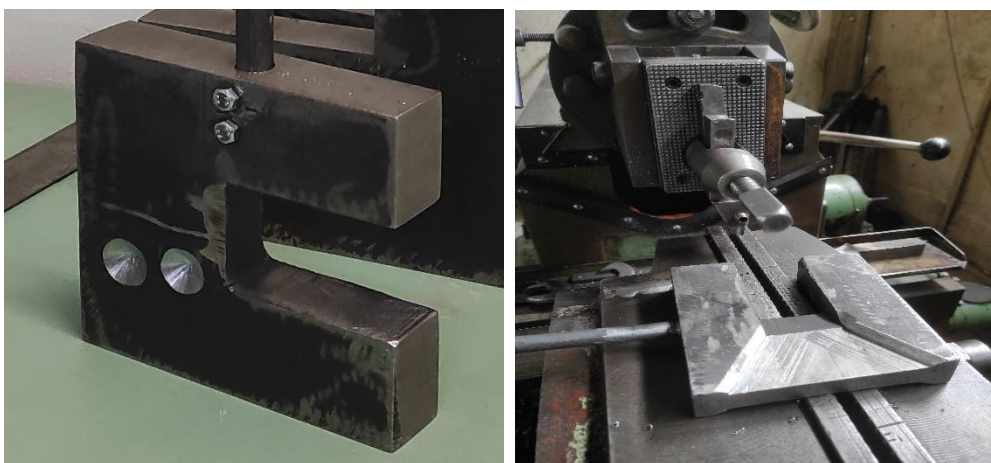


Εικόνα 52 : Δημιουργία σπειρώματος στο βραχίονα του εκκρεμούς χειροκίνητα με φιλιέρα.



Εικόνα 53 : Στάδια συγκόλλησης του συστήματος περιστροφής.

Επόμενο στάδιο της κατασκευής είναι η διαμόρφωση της σφύρας κρούσης ώστε η επιφάνεια επαφής της με το δοκίμιο να έχει αιχμηρό σχήμα και όλη η ενέργεια της να εφαρμόζεται συγκεκριμένα στο κέντρο του δοκιμίου και την αντίθετη πλευρά από αυτή που βρίσκεται η εγκοπή.



Εικόνα 54 : Η σφύρα κρούσης πριν και μετά τη κατεργασία διαμόρφωσης.

Η εργαλειομηχανή που επιλέχθηκε για τη κατεργασία αυτή είναι μια οριζόντια πλάνη μετάλλου η οποία βρίσκεται σε τοπικό μηχανουργείο. Ο έμπειρος μηχανουργός που πραγματοποίησε την κατεργασία είναι ο κος Κωνσταντίνος Μαράτος, ο οποίος εκτέλεσε άρτια την εν λόγω εργασία και τον ευχαριστώ θερμά για αυτό.

4.3 Βαφή μεταλλικής σφύρας

Επειδή η πειραματική διαδικασία προβλέπει η σφύρα να σπάει και μεταλλικά δοκίμια χωρίς η ίδια να απορροφά ενέργεια λόγω της παλαιστικής παραμόρφωσης, θεωρήθηκε ορθό να πραγματοποιηθεί θερμική κατεργασία βαφής στο μέταλλο κατασκευής της, με στόχο να πραγματοποιηθεί σκλήρυνση στην επιφάνεια επαφής με το δοκίμιο. Αποτέλεσμα της βαφής είναι η επιφάνεια αυτή της σφύρας να μη παραμορφώνεται κατά τις επαναλαμβανόμενες κρούσεις.

Βαφή

Η βαφή του χάλυβα είναι μια θερμική κατεργασία κατά την οποία ένας χάλυβας, αφού θερμανθεί σε υψηλή θερμοκρασία, ώστε να σχηματιστεί ωστενίτης (γ -Fe), κατόπιν ψύχεται απότομα έτσι ώστε να σχηματιστεί μαρτενσίτης και το κράμα να αποκτήσει μεγάλη σκληρότητα. Πιο αναλυτικά, η θερμική κατεργασία σκλήρυνσης περιλαμβάνει ένα στάδιο θέρμανσης και παραμονής του χάλυβα (ωστενιτοποίηση) σε θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη από αυτή της πλήρους ανοπτήσεως και ένα ακόλουθο στάδιο απότομης ψύξεως, με εμβάπτιση του χάλυβα σε κάποιο μέσο ψύξεως (αλατόνερο, νερό, λάδι, αέρας). Στόχος της βαφής είναι η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα (σκληρότητα, αντοχή), που απαιτούνται για τη λειτουργία του (π.χ. εργαλεία κοπής, καλούπια διαμόρφωσης, κ.λπ.). Έτσι, ένας χάλυβας με αρχική σκληρότητα 150-250 HV μπορεί να αποκτήσει σκληρότητα πάνω από 750-800 HV, έπειτα από βαφή.

Η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης κυμαίνεται μεταξύ 830 και 910° C για τους υποευτηκτοειδείς χάλυβες και σε αυτές τις θερμοκρασίες το υλικό παίρνει ένα «ανοιχτό πορτοκαλί» χρώμα λόγω πύρωσης. Ο απαιτούμενος χρόνος παραμονής του υλικού στη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως και μερικές ώρες, πράγμα που εξαρτάται από τη χημική σύσταση του χάλυβα, αλλά και από το μέγεθος του κατεργαζόμενου τεμαχίου. Η ταχύτητα απόψυξης είναι καθοριστική τόσο για βαθμό σκλήρυνσης, όσο και για τις αστοχίες (ρηγματώσεις), που μπορούν να εμφανισθούν λόγω ανάπτυξης εσωτερικών τάσεων. Όσο πιο απότομη είναι η ταχύτητα απόψυξης, τόσο αυξάνεται και η σκληρότητα του υλικού, με άμεσο όμως επακόλουθο τη δραματική μείωση της δυσθραυστότητας και με κίνδυνο την εμφάνιση ρωγμών. Η ταχύτητα απόψυξης εξαρτάται από τη δραστικότητα του μέσου απόψυξης και

αυξάνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σειρά: Αέρας < λάδι < νερό < αλατόνερο [17].

Ο χάλυβας της σφύρας της κατασκευής είναι ο υποευθηκτοειδής χάλυβας NST 37-2. Έπειτα από έρευνα στο διαδίκτυο σε πειραματικές διαδικασίες που έχουν γίνει στον χάλυβα αυτό με σκοπό την μέγιστη αύξηση της σκληρότητας του προέκυψε το συμπέρασμα ότι ο κατάλληλος συνδυασμός θέρμανσης και ψύξης είναι η θέρμανση του μετάλλου στους 910 °C (βαθμούς κελσίου) για 40 λεπτά και απότομη ψύξη σε νερό μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η θερμική κατεργασία στη σφύρα εκτελέστηκε στο χώρο της σχολής σε ειδικό φούρνο ο οποίος όπως φαίνεται και στις εικόνες που ακολουθούν έχει δυνατότητα να αναπτύξει θερμοκρασίες μέχρι και 1200°C. Η ψύξη έγινε σε μια μικρή, αυτοσχέδια, πλήρη από νερό μεταλλική δεξαμενή της σχολής.

Για να ελεγχθεί αν η κατεργασία ήταν επιτυχής χρησιμοποιήθηκε ένα φορητό σκληρόμετρο το οποίο ακολουθεί τη μέθοδο Leeb με σκοπό να διαπιστωθεί αν η σκληρότητα του μετάλλου αυξήθηκε μετά τη κατεργασία βαφής. Οι δύο μετρήσεις που ελήφθησαν πριν και μετά τη βαφή έδειξαν ότι η θερμική κατεργασία είχε θετικό αποτέλεσμα, με τη τιμή της σκληρότητας να αυξάνεται από τα 131 HB πριν στα 486 HB μετά.

Η μέθοδος Leeb είναι μια σύγχρονη μέθοδος που εξελίχθηκε μόλις το 1975, ώστε να προσφέρει φορητότητα και ταχύτητα στη μέτρηση σκληρότητας για μεγάλα τεμάχια. Χρησιμοποιεί μια σφαίρα από σκληρό καρβίδιο η οποία αναπηδά με τη δύναμη ενός προεντεταμένου ελατηρίου αντί για τη δύναμη της βαρύτητας. Συχνά αναφέρεται ως "Equotip" από την ονομασία της συσκευής σκληρομέτρησης. Ένα ηλεκτρονικό αισθητήριο μετρά την ταχύτητα της σφαίρας πριν και μετά την πρόσκρουση στο δοκίμιο. Η τιμή της σκληρότητας Leeb είναι ο λόγος της ταχύτητας μετά προς την ταχύτητα πριν την πρόσκρουση επί 1000. Η τιμή αυτή μπορεί να συσχετιστεί με άλλες κλίμακες σκληρότητας όπως π.χ. την Rockwell και την Vickers. Επειδή η συσκευή είναι ηλεκτρονική, η μετατροπή γίνεται αυτόματα και έτσι μπορούν να μελετηθούν πολλών ειδών υλικά. Ο κυριότερος περιορισμός είναι ότι το προς εξέταση τεμάχιο πρέπει να έχει σχετικά λεία επιφάνεια. Οι συσκευές Equotip είναι φορητές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές γωνίες, αρκεί να βρίσκονται κάθετα με την προς δοκιμή επιφάνεια [18].



Εικόνα 55 : Μέτρηση σκληρότητας της σφύρας πριν τη κατεργασία βαφής με το φορητό σκληρόμετρο με αποτέλεσμα 131 HB.



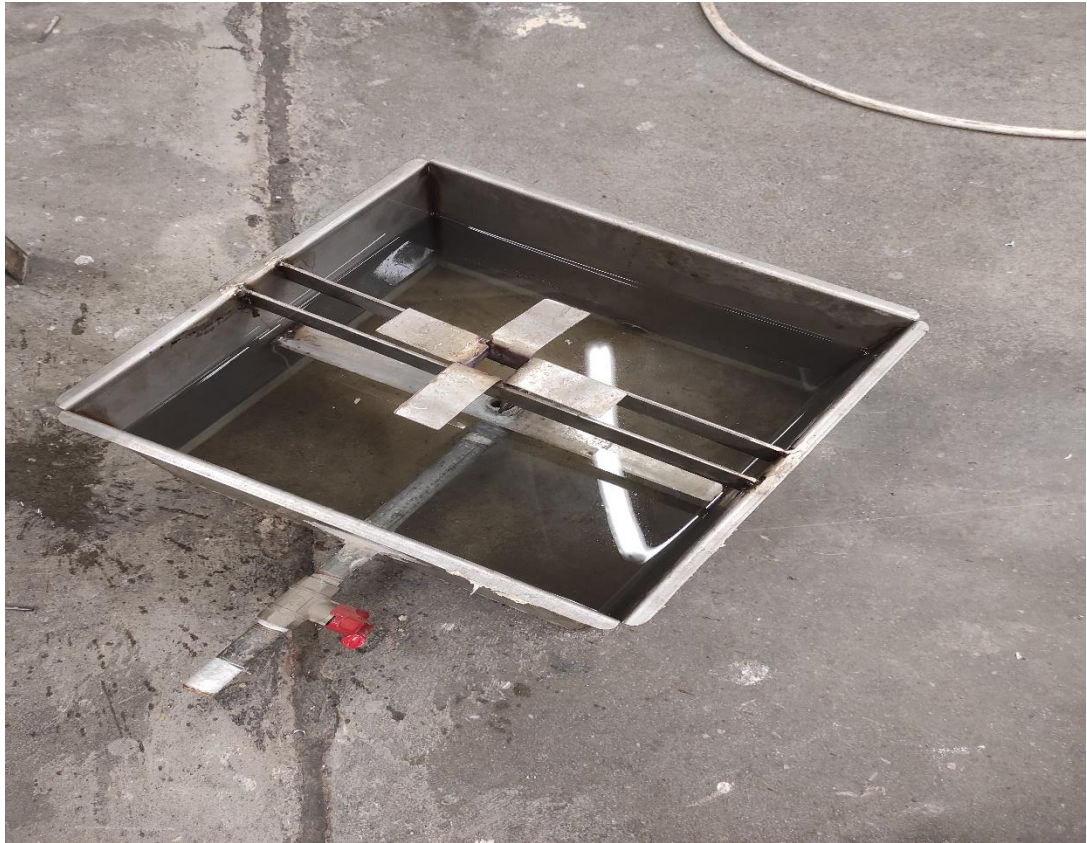
Εικόνα 56 : Ειδικός φούρνος για τη θέρμανση της σφύρας.



Εικόνα 57 : Προθέρμανση του φούρνου στην επιθυμητή θερμοκρασία .



Εικόνα 58 : Τοποθέτηση της σφύρας στο χώρο θέρμανσης.



Εικόνα 59 : Αυτοσχέδια δεξαμενή ψύξης η οποία περιέχει νερό.



Εικόνα 60 : Διαδικασία απότομης ψύξης της σφύρας.



Εικόνα 61 : Μέτρηση σκληρότητας της σφύρας μετά τη κατεργασία βαφής με θετικό αποτέλεσμα στην αύξηση της σκληρότητας στα 486 HB.

4.4 Σύστημα μέτρησης γωνίας περιστροφής του εκκρεμούς

Το σύστημα αυτό είναι μια πατέντα που επινόησε ο συγγραφέας της παρούσας πτυχιακής η οποία τελικά υλοποιήθηκε και λειτούργησε με επιτυχία. Ο μετρητής αποτελείται από ένα πλαστικό κυκλικό κομμάτι το οποίο παίζει το ρόλο του μοιρογνωμονίου, από ένα πλαστικό δείκτη και μια ελαφριά βίδα που με ένα περικόχλιο και μια ροδέλα ενώνεται με το δείκτη. Το μήκος της βίδας είναι αρκετό ώστε να παρασύρεται το σύστημα (δείκτης-βίδα) από τον άξονα του εκκρεμούς αφού αυτός περάσει το κατώτατο σημείο. Καθώς παρασύρεται το σύστημα, η τριβή που αναπτύσσεται ανάμεσα στο δείκτη, το μοιρογνωμόνιο και το περικόχλιο σύσφιξης μπορεί να είναι αμελητέα ώστε να επηρεάσει την ελεύθερη κίνηση του εκκρεμούς αλλά παρόλα αυτά ικανή να συγκρατήσει το δείκτη στη μέγιστη γωνία περιστροφής μετά τη κρούση.



Εικόνα 62 : Κατασκευή συστήματος μέτρησης της γωνίας περιστροφής.



Εικόνα 63 : Μια πρώτη εικόνα του συστήματος μέτρησης γωνίας περιστροφής.

4.5 Συναρμολόγηση μηχανής

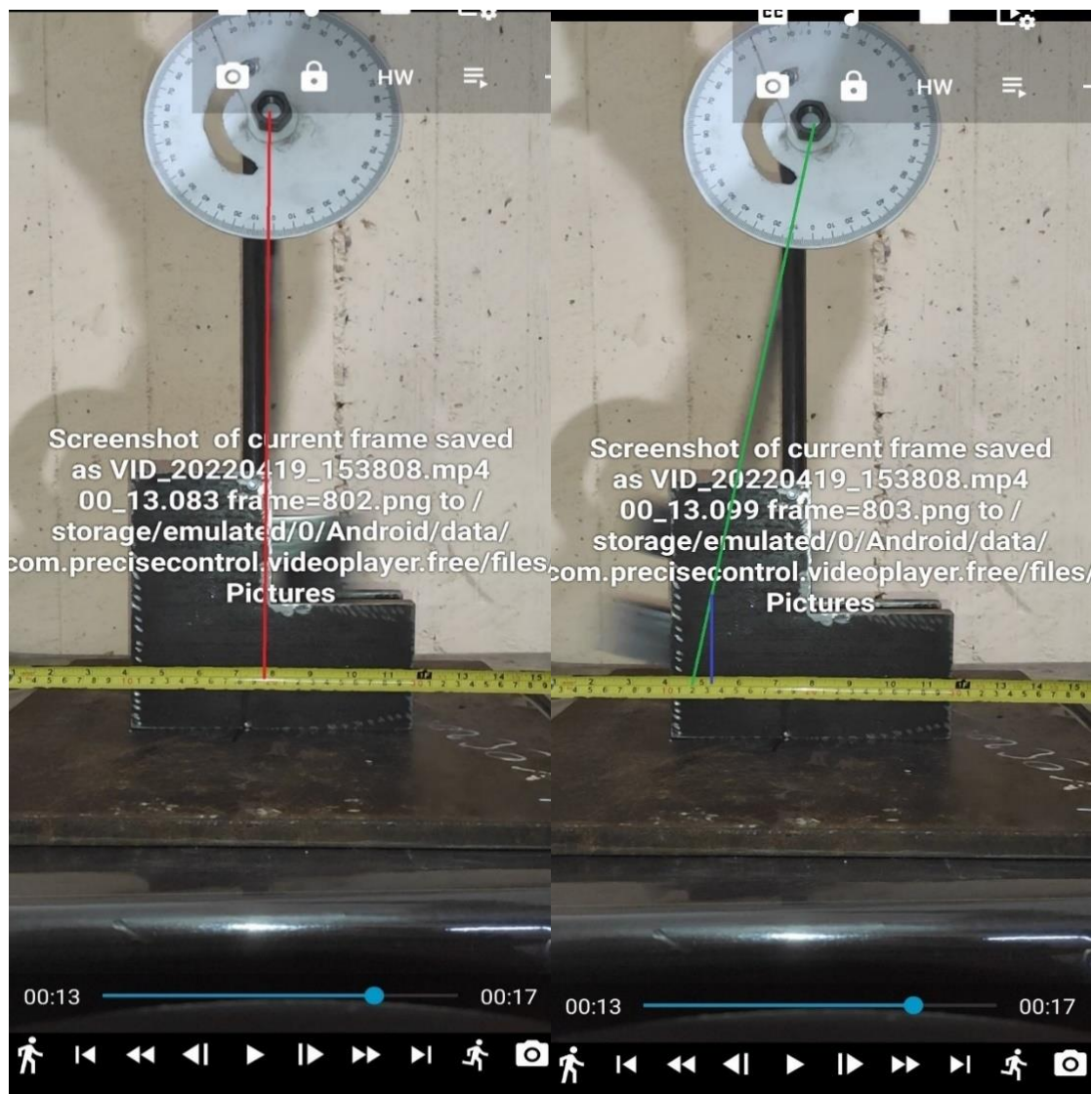


Εικόνα 64 : Συναρμολόγηση μηχανής.

Αφού συναρμολογήθηκε η μηχανή και κατέστη σίγουρο ότι το εκκρεμές είναι σταθερό στη τροχιά περιστροφής του, επιχειρήθηκε η μέτρηση της ταχύτητας της σφύρας στο σημείο που αυτή έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο, ώστε να επαληθευτεί αν η τιμή της είναι κοντά στα 3.8 m/s, τιμή που προβλέπεται για μηχανές κρούσης μέγιστης ενέργειας κρούσης 15 J. Αυτό έγινε με τη καταγραφή της ελεύθερης κίνησης της σφύρας σε βίντεο από την ώρα που αφήνεται από την ανώτερη θέση έως την ώρα που περνάει από το κατώτερο σημείο. Στο κατώτατο σημείο έχει τοποθετηθεί μια μετροταινία κατά μήκος της μηχανής. Μετά τη καταγραφή ακολούθησε η ανάλυση του βίντεο σε καρέ διαφορετικών χρονικών στιγμών με την εφαρμογή Precise Frame Seek Volume Video Player Free release .

Εστιάζοντας στις δύο πιο κοντινές χρονικά στιγμές που η σφύρα περνάει το κατώτατο σημείο χαράσσεται μια ευθεία γραμμή κατά μήκος του άξονα του εκκρεμούς και σημειώνεται πάνω στη μετροταινία η θέση της σφύρας στον οριζόντιο άξονα για τις στιγμές αυτές. Τέλος, θεωρείται ότι, για αυτό το πολύ μικρό χρονικό διάστημα, η σφύρα κάνει ευθύγραμμη ομαλή κίνηση στον οριζόντιο άξονα και επομένως η ταχύτητα ανάμεσα στις δύο αυτές στιγμές είναι σταθερή.

Με τα δεδομένα που ελήφθησαν από τις εικόνες που ακολουθούν και χρησιμοποιώντας το τύπο της ταχύτητας για την ευθύγραμμη ομαλή κίνηση ($v = \Delta x / \Delta t$, όπου Δx η μετατόπιση του σημείου κρούσης της σφύρας στον οριζόντιο άξονα και Δt η διαφορά χρόνου μεταξύ των δύο κοντινών θέσεων της σφύρας) η ταχύτητα υπολογίστηκε στα 4 m/s και είναι πολύ ικανοποιητική αν αναλογιστούμε και τα σφάλματα της διαδικασίας.



Εικόνα 65 : Διαδικασία μέτρησης ταχύτητας της σφύρας.

Δεδομένα Και Υπολογισμοί:

Χρονική στιγμή του βίντεο στο σημείο 1 $t_1 = 13,083 \text{ sec}$

Χρονική στιγμή του βίντεο στο σημείο 2 $t_2 = 13,099 \text{ sec}$

Διαφορά χρόνου μεταξύ των δύο στιγμών $\Delta t = 13,083 - 13,099 = 0,016 \text{ sec}$

Θεωρείται σημείο 0 η ένδειξη 20cm που βρίσκεται στο κέντρο της μετροταινίας και θετικές οι τιμές προς τα αριστερά του.

Απόσταση από το την ένδειξη 20cm κατά τη χρονική στιγμή t_1 : $x_1 = 5 \text{ mm}$

Απόσταση από το την ένδειξη 20cm κατά τη χρονική στιγμή t_2 : $x_2 = 69 \text{ mm}$

Μετατόπιση του σημείου κρούσης της σφύρας στον οριζόντιο άξονα :

$$\Delta x = 69 - 5 = 64 \text{ mm ή } 0,064 \text{ m}$$

Επομένως η ταχύτητα του σημείου κρούσης της σφύρας είναι :

$$v = \Delta x / \Delta t = 0,064 \text{ m} / 0,016 \text{ sec} = 4 \text{ m/s}$$

Η διαδικασία αυτή, επαναλήφθηκε αρκετές φορές με τα αποτελέσματα να είναι περίπου σταθερά με μια μικρή διακύμανση $\pm 0,2 \text{ m/s}$.

4.5 Τοποθέτηση συστήματος απελευθέρωσης του εκκρεμούς

Για λόγους ασφαλείας της διαδικασίας , τοποθετήθηκε στη μηχανή ένα σύστημα που σκοπό έχει να ασφαλίσει και να απελευθερώνει το εκκρεμές από την ανώτερη θέση εκκίνησης χωρίς αυτό να γίνεται με τη βοήθεια των χεριών. Έτσι εκτός από την ασφάλεια κατοχυρώνεται και η σταθερότητα της διαδικασίας αφού το σημείο εκκίνησης δε θα μεταβάλλεται.

Το σύστημα αποτελείται από ένα πείρο και δυο κυλίνδρους με εσωτερική διατομή ίση με τη διατομή του πείρου. Η συγκόλληση έγινε με ηλεκτροκόλληση ηλεκτροδίου (MMA) .

Για μεγαλύτερη ασφάλεια ο πείρος δέθηκε με μια κορδέλα που τραβώντας τη ελευθερώνεται το εκκρεμές.



Εικόνα 66 : Συγκόλληση συστήματος απελευθέρωσης του εκκρεμούς .

5. ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Βασικό στοιχείο που πρέπει να είναι γνωστό για να εξαχθούν πειραματικά συμπεράσματα με τη μηχανή, είναι η μέγιστη ενέργεια κρούσης που μεταφέρει η σφύρα στο δοκίμιο τη στιγμή που έρχονται σε επαφή. Αυτή είναι ίση με 15 Joule, που σε συνδυασμό με τη γωνία εκκίνησης και το μήκος του εκκρεμούς είναι και αυτή που καθορίζει το βάρος της σφύρας.

Ο τύπος που συνδέει τα μεγέθη αυτά είναι ο τύπος της δυναμικής ενέργειας $E = mg(H-h)$ που στη περίπτωση αυτή είναι ίση με τη μέγιστη ενέργεια κρούσης, δηλαδή ίση με 15 J. Το αρχικό ύψος απελευθέρωσης της σφύρας H και το τελικό μετά τη κρούση ύψος μπορούν να προσδιορισθούν με ευκολία.

Εφόσον από τα σχέδια της μηχανής είναι γνωστό ότι το μήκος του εκκρεμούς είναι $L_R = 358$ mm και η γωνία εκκίνησης επιλέχθηκε στις 30° από τον κατακόρυφο άξονα, δύνανται να υπολογισθεί το βάρος της σφύρας ως εξής:

$$E = mgh \quad (5.1)$$

$$\text{ή } m = E/Hg \quad (5.2)$$

Για 30° γωνία από την κατακόρυφο, το συνολικό ύψος H του σημείου κρούσης είναι:

$$H = L_R + \cos 30^\circ L_R = 358 \text{ mm} + 310 \text{ mm} = 668 \text{ mm} \quad (5.3)$$

Επομένως:

$$m = \frac{15\text{J}}{0.668 \text{ m} \times 9.81 \text{ m/s}^2} = 2.29 \text{ kg} \quad \text{αφού } 1 \text{ J} = 1 \text{ Kg m}^2/\text{s}^2$$



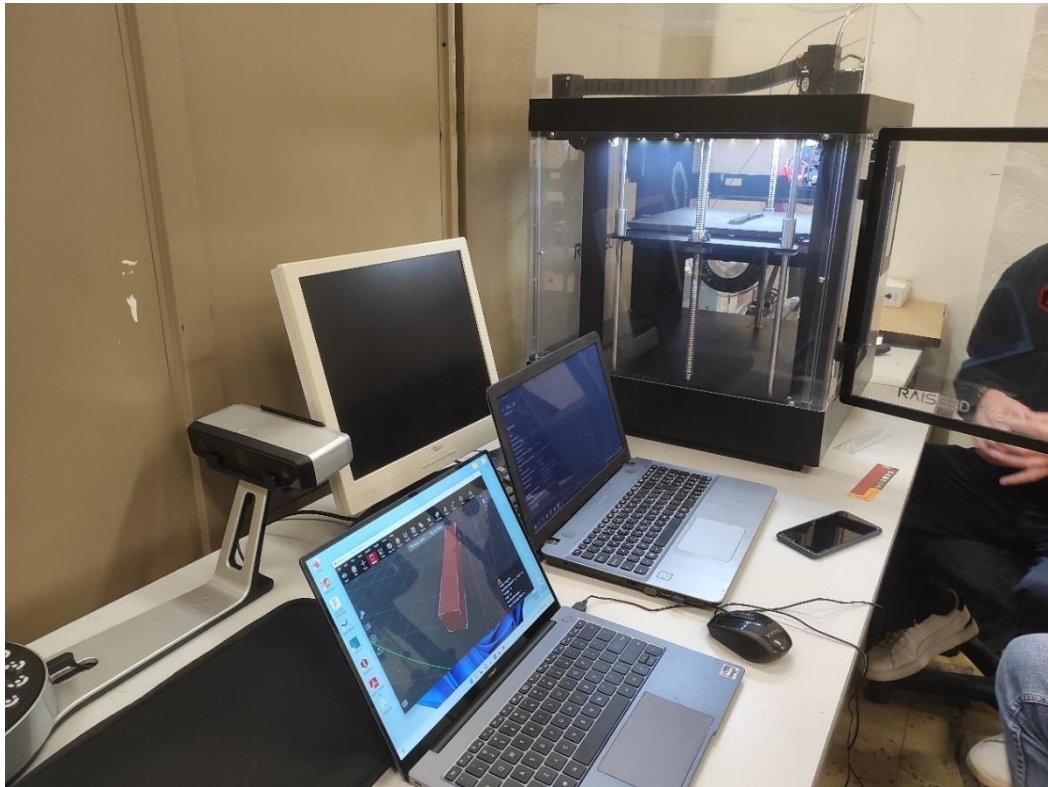
Εικόνα 67 : Η μηχανή βαμμένη και έτοιμη για τις δοκιμές.

5.1 Δοκίμια πειράματος

Για τη πειραματική διαδικασία κατασκευάστηκαν δοκίμια από 4 διαφορετικά υλικά ώστε να παρατηρηθούν οι διαφορές του κάθε υλικού και να συγκριθούν τα αποτελέσματα της κατασκευασμένης μηχανής με τα αποτελέσματα δύο τυποποιημένων μηχανών κρούσης που υπάρχουν στη σχολή και με τις ιδιότητες τις οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις δίνει ο κατασκευαστής. Τα υλικά αυτά είναι το ABS, το PLA , ο χυτοσίδηρος (cast iron) και το αλουμίνιο . Οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι δύο ειδών, αυτές που ορίζει ο κατασκευαστής της πρωτότυπης μηχανής και είναι 6mmx6mmx44 mm και οι τυποποιημένες κατά ISO 10mmx10mmx55mm.

Η κατασκευή των δοκιμίων από τα δύο πρώτα πολυμερή υλικά (PLA και ABS) έγινε με τη βοήθεια ενός 3D εκτυπωτή που βρίσκεται στο εργαστήριο CNC της σχολής. Οι διαστάσεις του δοκιμίου αποτυπώθηκαν σε ηλεκτρονικό σχέδιο με το πρόγραμμα solidworks και στη συνέχεια ο εκτυπωτής προγραμματίστηκε να κατασκευάσει τα δοκίμια αυτά.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) είναι μια μέθοδος προσθετικής κατασκευής στην οποία κατασκευάζονται αντικείμενα μέσω της διαδοχικής πρόσθεσης επάλληλων στρώσεων υλικού. Στη τρισδιάστατη εκτύπωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι υλικού, κυρίως κεραμικά και πολυμερή.



Εικόνα 68 : Τρισδιάστατη εκτύπωση δοκιμών .

Τα δοκίμια από χυτοσίδηρο κατασκευάστηκαν από δύο φύλα χυτοσιδήρου τα οποία διαμορφώθηκαν στις επιθυμητές διαστάσεις με τη βοήθεια μιας πριονοκορδέλας σιδήρου στην αίθουσα Μηχανουργικής Τεχνολογίας.



Εικόνα 69 : Πριονοκορδέλα κοπής σιδήρου .

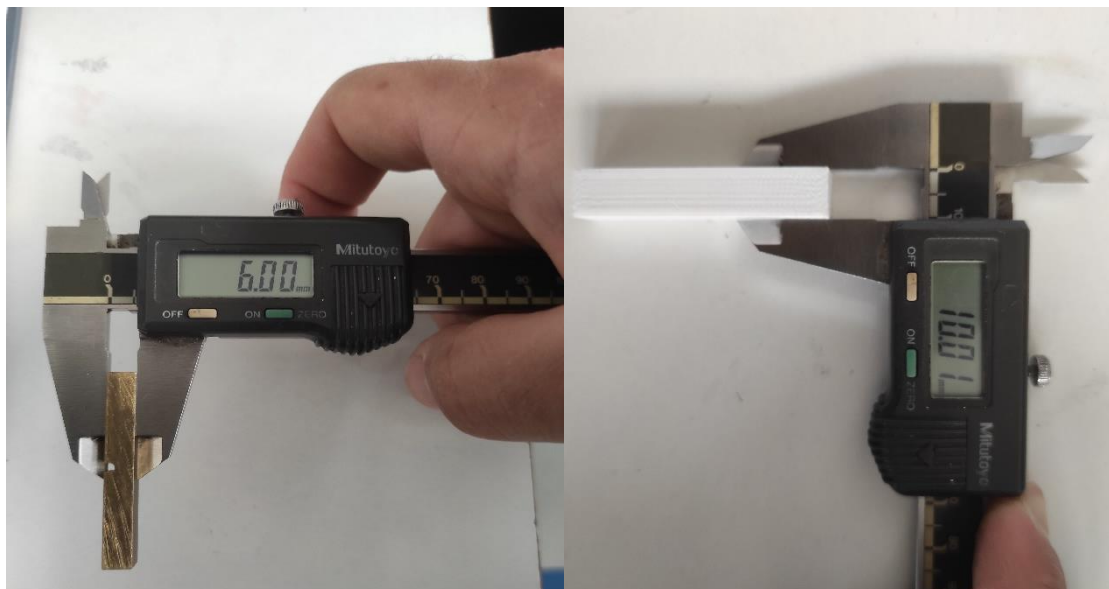


Εικόνα 70 : 1)Δοκίμιο PLA (κόκκινο χρώμα), 2)Δοκίμιο ABS (μαύρο χρώμα),
3) Δοκίμιο χυτοσιδήρου (γκρι χρώμα).

Τα δοκίμια από μαύρο ABS και λευκό PLA κατασκευάστηκαν και σε διαστάσεις 10mmx10mmx55mm ώστε να εκλεχθεί η αντοχή των υλικών σε μηχανή κρούσης της σχολής μέγιστης ενέργειας 300 Joule της οποίας ο κατασκευαστής ορίζει αυτές τις διαστάσεις για τα δοκίμια.



Εικόνα 71 : Δοκίμια αλουμινίου(γκρι χρώμα) , δοκίμια χυτοσιδήρου (χρυσό χρώμα) ,δοκίμια PLA (λευκό χρώμα), δοκίμια ABS (μαύρο χρώμα)



Εικόνα 72 : Έλεγχος διαστάσεων δοκιμίων με παχύμετρο μετά τη κατασκευή τους.

5.2 Εκτέλεση δοκιμών

Για κάθε υλικό εκτελέστηκαν 3 δοκιμές σε κάθε μηχανή από τις οποίες θα μελετηθεί και θα σχολιαστεί η πιο αντιπροσωπευτική.

Αρχικά αφέθηκε η σφύρα να κινηθεί ελεύθερα από το ανώτερο σημείο μέχρι το τελικό ώστε να ελεγχθεί αν υπάρχουν απώλειες λόγω τριβών που μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά το αποτέλεσμα κάτι το οποίο δεν διαπιστώθηκε.

Για να ελεγχθεί επίσης αν η μηχανή που κατασκευάστηκε δουλεύει σωστά χρησιμοποιήθηκαν δύο τυποποιημένες μηχανές κρούσης οι οποίες βρίσκονται στο χώρο της σχολής. Η μια μηχανή είναι της εταιρείας TERCO με κωδικό MT 220 η οποία παρουσιάζει μέγιστη ενέργεια κρούσης 15 Joule, όσο και η κατασκευασμένη μηχανή και η δεύτερη είναι της εταιρείας GALDABINI, το μοντέλο είναι το GALDABINI IMPACT 300 και η μέγιστη ενέργεια κρούσης της είναι τα 300 Joule.



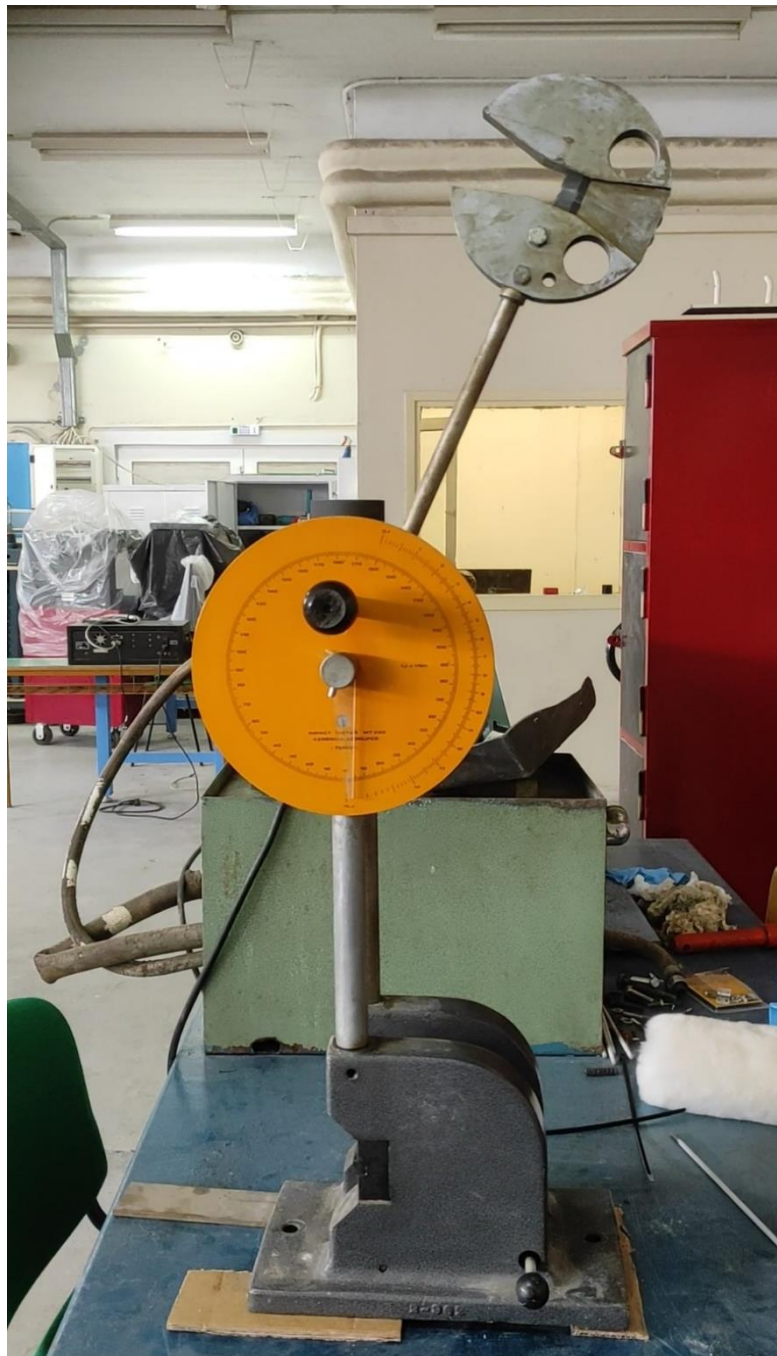
Εικόνα 73 : TERCO MT220 (αριστερή φωτογραφία) και GALDABINI IMPACT 300 (δεξιά φωτογραφία).

Να σημειωθεί ότι πριν χρησιμοποιηθούν οι δύο μηχανές έγινε έλεγχος σωστής λειτουργίας και διαπιστώθηκαν τα εξής. Στην GALDABINI IMPACT 300 λόγω φυσιολογικών φθορών στα ρουλεμάν του εκκρεμούς παρουσιάζεται μια μικρή απόκλιση στην γωνία της ελεύθερης τροχιάς της σφύρας με αποτέλεσμα ο δείκτης αντί για 0 Joule στο μέγιστο σημείο να δείχνει περίπου 3 Joule. Η λύση στο πρόβλημα αυτό ήταν σε κάθε μέτρηση να αφαιρούνται τα 3 Joule και να καταγράφεται το καθαρό αποτέλεσμα.



Εικόνα 74 : Σφάλμα γωνίας περιστροφής της μηχανής GALDABINI IMPACT 300.

Το ίδιο πρόβλημα φαίνεται να παρουσιάζεται και στην μηχανή TERCO MT220 όπου στη περίπτωση αυτή το σφάλμα που καταγράφεται είναι 0.5 Joule και η λύση αντιμετώπισης η ίδια. Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι ότι λόγω τυχών κακής μεταχείρισης της μηχανής στο παρελθόν ο δείκτης της ενέργειας ήταν σπασμένος και δεν μπορούσε να παρασυρθεί από το εκκρεμές κατά τη κίνησή του. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα κάθε μέτρηση να καταγράφεται σε βίντεο όπου αναλύοντας το σε καρέ εντοπίζεται η τελική θέση του εκκρεμούς μετά τη κρούση.



Εικόνα 75 : Σφάλμα γωνίας περιστροφής της μηχανής TERCO MT220.

Εφόσον λύθηκαν τα προβλήματα σωστής λειτουργίας των δύο μηχανών κρούσης σειρά είχαν οι δοκιμές. Για να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία της κατασκευασμένης μηχανής όπως και η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που δίνει εκτελέστηκαν δοκιμές και με τις τρεις μηχανές συγκρίνοντας τα αποτελέσματα μεταξύ τους. Για τα πολυμερή υλικά (PLA και ABS) δημιουργήθηκαν δοκίμια δύο διαφορετικών διαστάσεων με σκοπό να ελεγχθεί αν η διάσταση του δοκιμίου επηρεάζει το μέτρο της σκληρότητας του υλικού η οποία εξαρτάται από την επιφάνεια θραύσης του. Τα δοκίμια από PLA και ABS με διαστάσεις 10mm x10 mm x55mm χρησιμοποιήθηκαν και στις τρεις μηχανές. Τα υπόλοιπα με διαστάσεις 6mm x6mm x44mm χρησιμοποιήθηκαν μόνο στη κατασκευασμένη και στη TERCO MT220 οι οποίες είναι κοινές ως προς τη μέγιστη ενέργεια κρούσης (15 Joule).

1) PLA

PLA (6mm x 6mm x 44mm)

Πρώτα δοκίμια ήταν από το υλικό PLA (κόκκινα δοκίμια). Οι διαστάσεις τους είναι 6x6x44mm και στο κέντρο τους υπάρχει εγκοπή σε σχήμα V βάθους 2mm. Οι δοκιμές έγιναν στη μηχανή που κατασκευάστηκε και στη TERCO MT220.



Εικόνα 76 : Αρχική και τελική θέση εκκρεμούς στη δοκιμή PLA (6x6x44mm).

Η μέση τιμή των ενδείξεων στο μοιρογνωμόνιο για το υλικό αυτό ήταν οι 33°.

Για να υπολογιστεί την ενέργεια που απορρίφθηκε από το δοκίμιο καθώς και ο συντελεστής δυσθραυστότητας σε κάθε περίπτωση χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχοι τύποι :

Για την ενέργεια είναι:

$$E = mg(H-h_1) \quad (5.4)$$

Και για το συντελεστή δυσθραυστότητας α

$$\alpha = \frac{E}{F} = \frac{mg(H-h_1)}{F} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \right) \quad (5.5)$$

Όπου F η εγκάρσια διατομή του δοκιμίου που απομένει μετά την αφαίρεση της επιφάνειας της εγκοπής.

Τα δύο ύψη H και h υπολογίζονται με τη βοήθεια του τύπου του συνημίτονου αφού είναι γνωστό το μήκος του εκκρεμούς, η αρχική και τελική γωνία περιστροφής.

$$\text{Αρχικό ύψος: } H = L_R + \cos 30^\circ L_R = 358 + 310 = 668 \text{ mm}$$

$$\text{Τελικό ύψος: } h_1 = L_R + \cos 33^\circ L_R = 358 + 300 = 658 \text{ mm}$$

Η ενέργεια που απορρόφησε το δοκίμιο είναι:

$$E_1 = mg(H - h_1) = 2,29 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (0,668 \text{ m} - 0,658 \text{ m}) = 0,224 \text{ J}$$

Αφού οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι $6 \times 6 \times 44 \text{ mm}$ και η εγκοπή σχήματος V έχει βάθος 2 mm , η εγκάρσια διατομή του δοκιμίου που απομένει μετά την αφαίρεση της επιφάνειας της εγκοπής F θα είναι :

$$\text{Επιφάνεια αρχική: } A = 6 \times 6 = 36 \text{ mm}^2$$

$$\text{Επιφάνεια εγκοπής: } \alpha = 6 \times 2 = 12 \text{ mm}^2$$

$$\text{Άρα η επιφάνεια: } F' = A - \alpha = 36 - 12 = 24 \text{ mm}^2$$

Αντίστοιχα ο συντελεστής δυσθραυστότητας α είναι:

$$a_1 = \frac{E_1}{F} = \frac{mg(H-h_1)}{F} = \frac{0.224 \text{ J}}{24 \text{ mm}^2} = 0,0094 \text{ J/mm}^2 = 9.4 \text{ KJ/m}^2 \quad (5.10)$$

Στη συνέχεια εκτελέστηκε η ίδια δοκιμή στη μηχανή TERCO MT220 όπου στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η τελική θέση του εκκρεμούς μετά τη κρούση.



Εικόνα 77 : Τελική θέση εκκρεμούς στη δοκιμή PLA (6 mm x 6 mm x 44 mm) με τη μηχανή TERCO MT220.

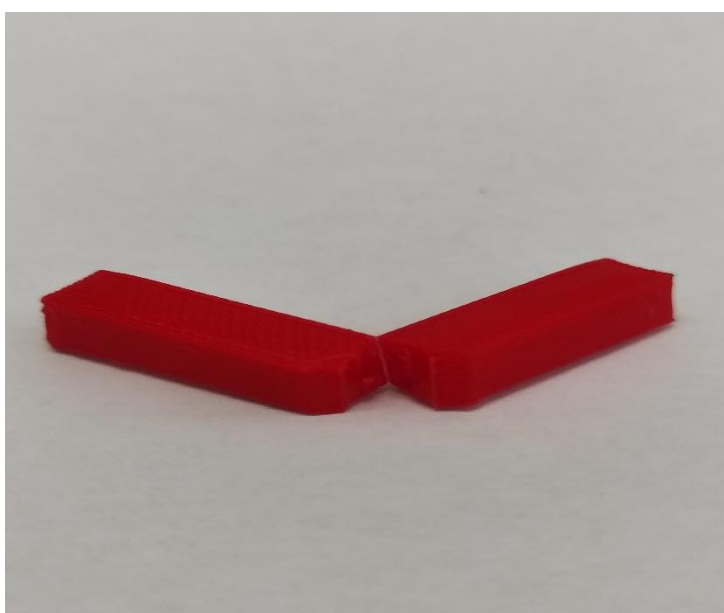
Η ένδειξη της ενέργειας που απορρόφησε το δοκίμιο PLA είναι 0.8 Joule. Αφαιρώντας λοιπόν το σφάλμα της μηχανής το οποίο είναι 0.5 Joule

καταλήγουμε ότι η πραγματική ενέργεια που απορρόφησε το δοκίμιο είναι $E_2 = 0.3 \text{ Joule}$.

Οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι ίδιες με τη προηγούμενη δοκιμή όπως και η επιφάνεια F . Επομένως ο συντελεστής δυσθραυστότητας α θα είναι :

$$\alpha_2 = \frac{E}{F} = \frac{0.3 \text{ J}}{24 \text{ mm}^2} = 12.5 \text{ kJ/m}^2 \quad (5.11)$$

Στα δοκίμια PLA όπως θα δούμε και στην εικόνα που ακολουθεί παρατηρήθηκε αστοχία κατ' αποχωρισμό πράγμα που σημαίνει ότι η θραύση ήταν ανελαστική.



Εικόνα 78 : Δοκίμιο PLA(κόκκινο) μετά τη κρούση.

PLA (10mm x 10mm x 55 mm)

Από PLA(λευκό) επίσης κατασκευάστηκαν δοκίμια διαστάσεων 10 mm x 10 mm x 55 mm όπου στη περίπτωση αυτή δοκιμάστηκαν και από τις 3 μηχανές και ακολουθούν τα αποτελέσματα.

Να σημειωθεί ότι η μηχανή GALDABINI IMPACT 300 είναι μηχανή υψηλής ενέργειας (300 Joule) κάτι που σημαίνει ότι σε υλικά όπως το PLA και το ABS που απορροφούν σχετικά μικρά ποσά ενέργειας δεν θα υπάρχει η ακρίβεια στα αποτελέσματα που υπάρχει στις άλλες δυο μηχανές μέγιστης ενέργειας 15 Joule.

Στη μηχανή TERCO MT220 το λευκό PLA έδωσε ένδειξη 1.4 Joule όπου με την αφαίρεση του σφάλματος της μηχανής 0.5Joule η πραγματική ενέργεια απορρόφησης προκύπτει $E_3 = 0.9 \text{ Joule}$.

Εφόσον οι διαστάσεις αυτών των δοκιμίων είναι 10mm x 10 mm x 55mm η επιφάνεια κρούσης θα είναι μεγαλύτερη και ίση F'. Για αυτή την περίπτωση ισχύει:

Επιφάνεια αρχική $A = 10 \times 10 = 100 \text{ mm}^2$

Επιφάνεια εγκοπής $\alpha = 10 \times 2 = 20 \text{ mm}^2$

Άρα η επιφάνεια $F' = A - \alpha = 100 - 20 = 80 \text{ mm}^2$

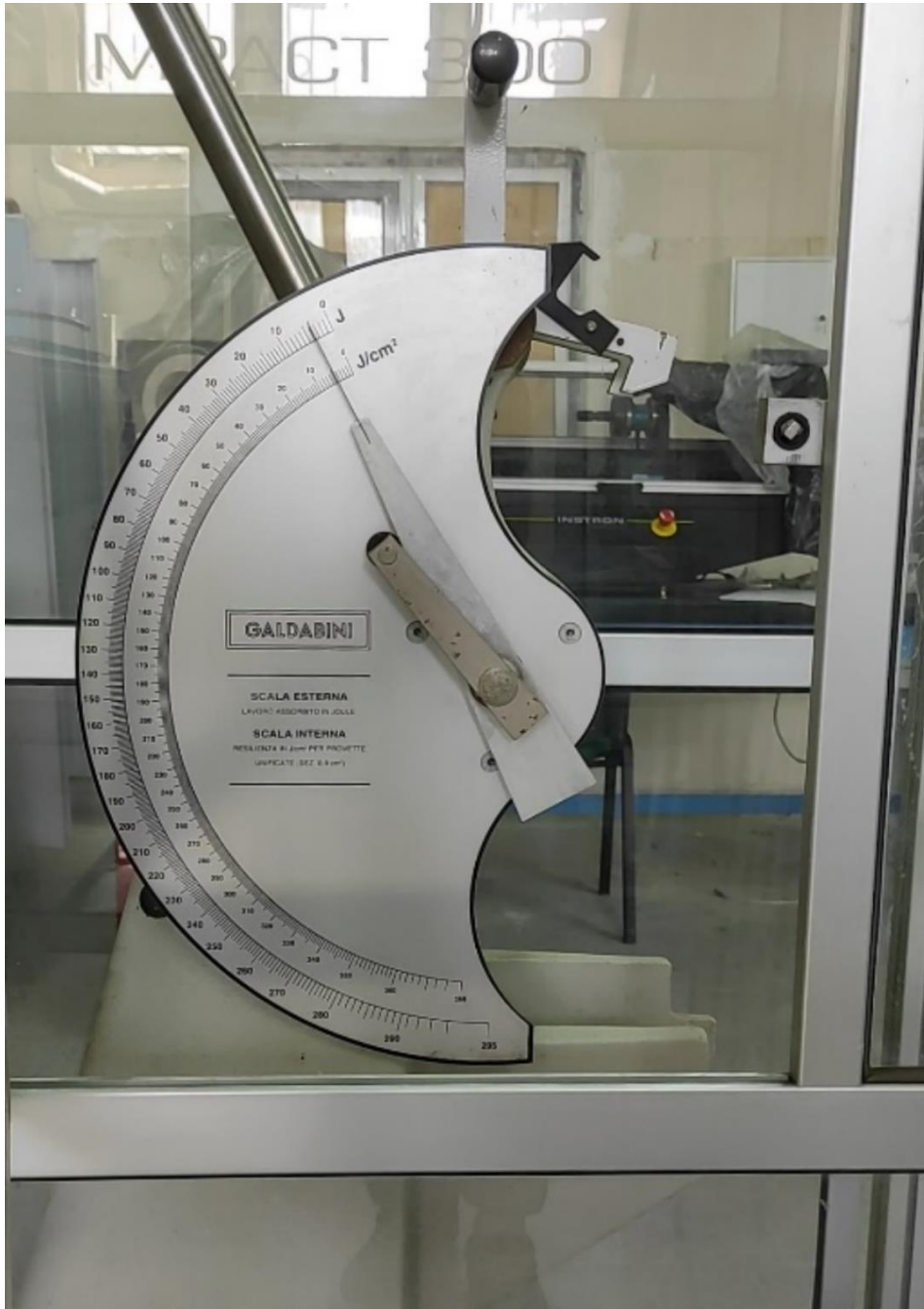
Επομένως ο συντελεστής δυσθραυστότητας στη περίπτωση αυτή θα είναι:

$$a_3 = \frac{E_3}{F'} = \frac{0.9 \text{ J}}{80 \text{ mm}^2} = 11.25 \text{ kJ/m}^2$$

Επόμενη δοκιμή πραγματοποιήθηκε στη μηχανή κρούσης GALDABINI IMPACT 300 όπου το πιο αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα απορροφούμενης ενέργειας από το δοκίμιο ήταν η ένδειξη 4 Joule (Εικόνα 79). Με την αφαίρεση των 3 Joule που είναι το σφάλμα της μηχανής προκύπτει ότι η πραγματική απορροφούμενη ενέργεια είναι $E_4 = 1 \text{ Joule}$.

Αντίστοιχα και ο συντελεστής δυσθραυστότητας θα έχει τιμή :

$$a_4 = \frac{E_4}{F'} = \frac{1 \text{ J}}{80 \text{ mm}^2} = 12.5 \text{ kJ/m}^2$$



Εικόνα 79 : Δοκιμή PLA (λευκό) στη μηχανή κρούσης GALDABINI IMPACT 300.

Τελευταία δοκιμή για το υλικό PLA πραγματοποιήθηκε με την προτεινόμενη μηχανή και η ένδειξη του δείκτη ενέργειας στο μοιρογνωμόνιο ήταν οι 42°. Κάνοντας τους υπολογισμούς η ενέργεια που αντιστοιχεί στις 42° είναι:

$$\text{Αρχικό ύψος } H = L_R + \cos 30^\circ L_R = 358 + 310 = 668 \text{ mm}$$

$$\text{Τελικό ύψος } h_5 = L_R + \cos 42^\circ L_R = 358 + 266 = 624 \text{ mm}$$

$$E_5 = mg(H - h_5) = 2,29 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (0,668 \text{ m} - 0,624 \text{ m}) = 0,988 \text{ kg m}^2/\text{s}^2 = 0.988 \text{ J}$$

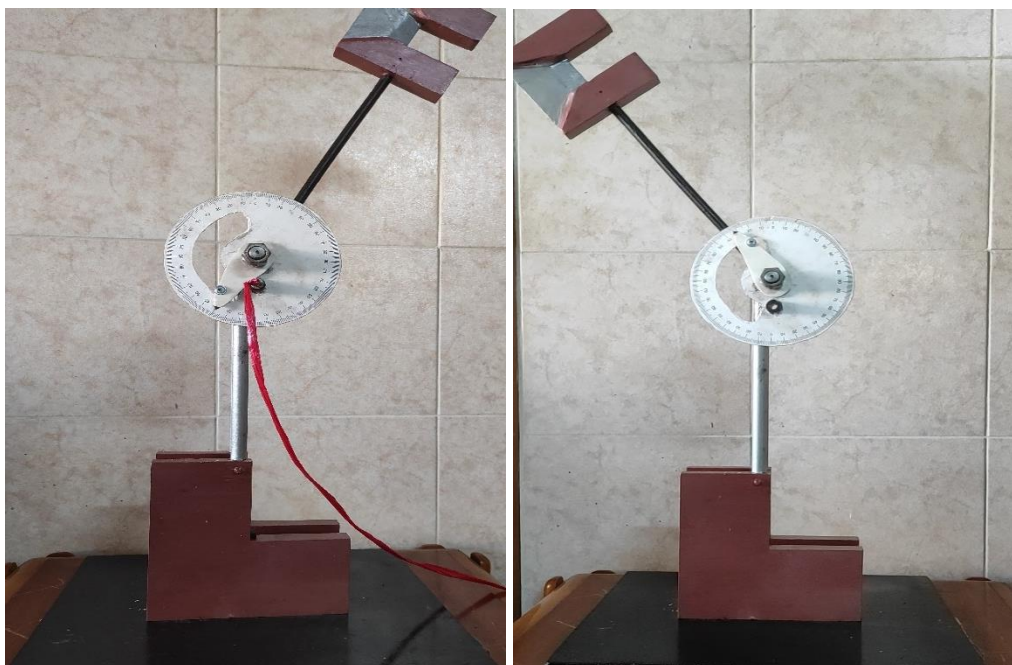
Αντίστοιχα και ο συντελεστής δυσθραυστότητας θα είναι:

$$a_5 = \frac{E_5}{F'} = \frac{0.988 \text{ J}}{80 \text{ mm}^2} = 12.35 \text{ kJ/m}^2$$

2) ABS

ABS (6mm x 6mm x 44mm)

Το επόμενο υλικό που δοκιμάστηκε ήταν το ABS. Για τα δοκίμια με διαστάσεις 6 mm x 6mm x 44mm προκύπτουν τα κάτωθι:



Εικόνα 80 : Αρχική και τελική θέση εκκρεμούς για δοκίμια ABS (6X6X44mm).

Στη μηχανή κρούσης που κατασκευάστηκε η μέση τιμή των ενδείξεων στο μοιρογνώνιο για το υλικό αυτό ήταν οι 35°.

Η ενέργεια που απορρόφησε το δοκίμιο είναι: $E_6 = mg(H-h_6)$

Όπου $h_6 = L_R + \cos 35^\circ L_R = 358 + 293.3 = 651.3 \text{ mm}$

Συνεπώς $E_6 = 2,29 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (0,668 \text{ m} - 0,6513 \text{ m}) = 0,375 \text{ J}$

Οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι ίδιες επομένως και η επιφάνεια $F = 24 \text{ mm}$.

Ο συντελεστής δυσθραυστότητας α είναι :

$$a_6 = \frac{E_6}{F} = \frac{mg(H-h_6)}{F} = \frac{0,375 \text{ J}}{24 \text{ mm}^2} = 0,0156 \text{ J/mm}^2 = 15.6 \text{ KJ/m}^2$$

Για τη μηχανή TERCO MT220 και δοκίμια ABS διαστάσεων 6x6x44mm μετά την αφαίρεση του σφάλματος 0.5 Joule παρουσιάζονται τα εξής αποτελέσματα στη δοκιμή:

Ενέργεια κρούσης: $E_7 = 0.4 \text{ Joule}$

$$\text{Συντελεστής δυσθραυστότητας: } a_7 = \frac{E_7}{F} = \frac{0,4 \text{ J}}{24 \text{ mm}^2} = 16.66 \text{ KJ/m}^2$$

ABS (10mm x 10mm x 55mm)

Σειρά έχουν τα δοκίμια ABS με διαστάσεις 10 mm x 10mm x 55mm τα οποία δοκιμάστηκαν και στις 3 μηχανές κρούσης και ακολουθούν τα αποτελέσματα των δοκιμών:

Στη μηχανή κρούσης GALDABINI IMPACT 300 το πιο αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα απορροφούμενης ενέργειας από το δοκίμιο ήταν λίγο πάνω από τα 4 Joule . Με την αφαίρεση των 3 Joule που είναι το σφάλμα της μηχανής προκύπτει ότι η πραγματική απορροφούμενη ενέργεια είναι περίπου

$$E_8 = 1.2 \text{ Joule} .$$

Επομένως ο συντελεστής δυσθραυστότητας για τη περίπτωση αυτή θα είναι:

$$a_8 = \frac{E_8}{F'} = \frac{1,2 \text{ J}}{80 \text{ mm}^2} = 15 \text{ KJ/m}^2$$

Για τη μηχανή κρούσης που κατασκεύασα η μέση τιμή των ενδείξεων στο μοιρογνώνιο για τα δοκίμια αυτά ήταν οι 45°.

Η ενέργεια που απορρόφησε το δοκίμιο είναι: $E_9 = mg(H-h_9)$

$$\text{Όπου } h_9 = L_R + \cos 45^\circ L_R = 358 + 253.1 = 611.1 \text{ mm}$$

$$\text{Συνεπώς } E_9 = 2,29 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (0,668 \text{ m} - 0,6111 \text{ m}) = 1,28 \text{ J}$$

Έτσι ο συντελεστής δυσθραυστότητας για τη περίπτωση αυτή θα είναι :

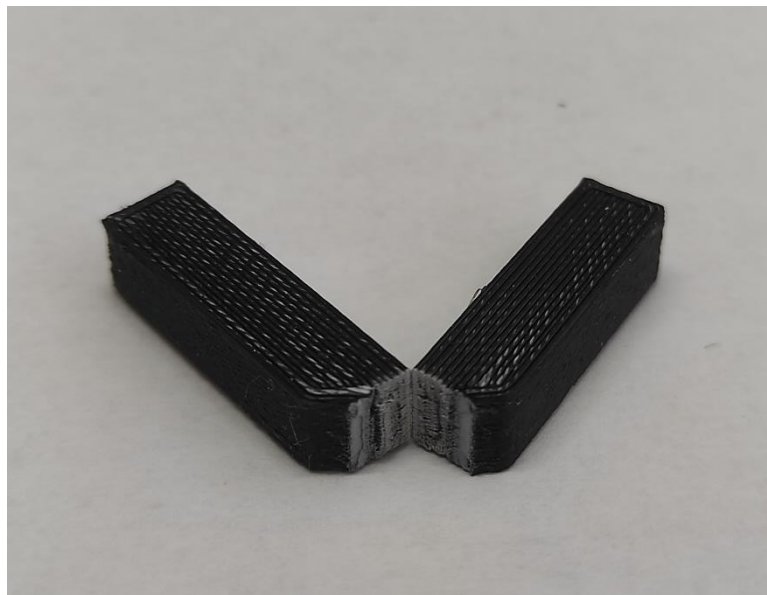
$$a_9 = \frac{E_9}{F'} = = \frac{1,28 \text{ J}}{80 \text{ mm}^2} = 16 \text{ KJ/m}^2$$

Τέλος για τη μηχανή TERCO MT220 και δοκίμια ABS διαστάσεων 10mm x 10mm x 55mm μετά την αφαίρεση του σφάλματος 0.5 Joule προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα στη δοκιμή :

Ενέργεια κρούσης $E_{10} = 1.4 \text{ Joule}$

$$\text{Συντελεστής δυσθραυστότητας } a_{10} = \frac{E_{10}}{F'} = = \frac{1,4 \text{ J}}{80 \text{ mm}^2} = 17.5 \text{ KJ/m}^2$$

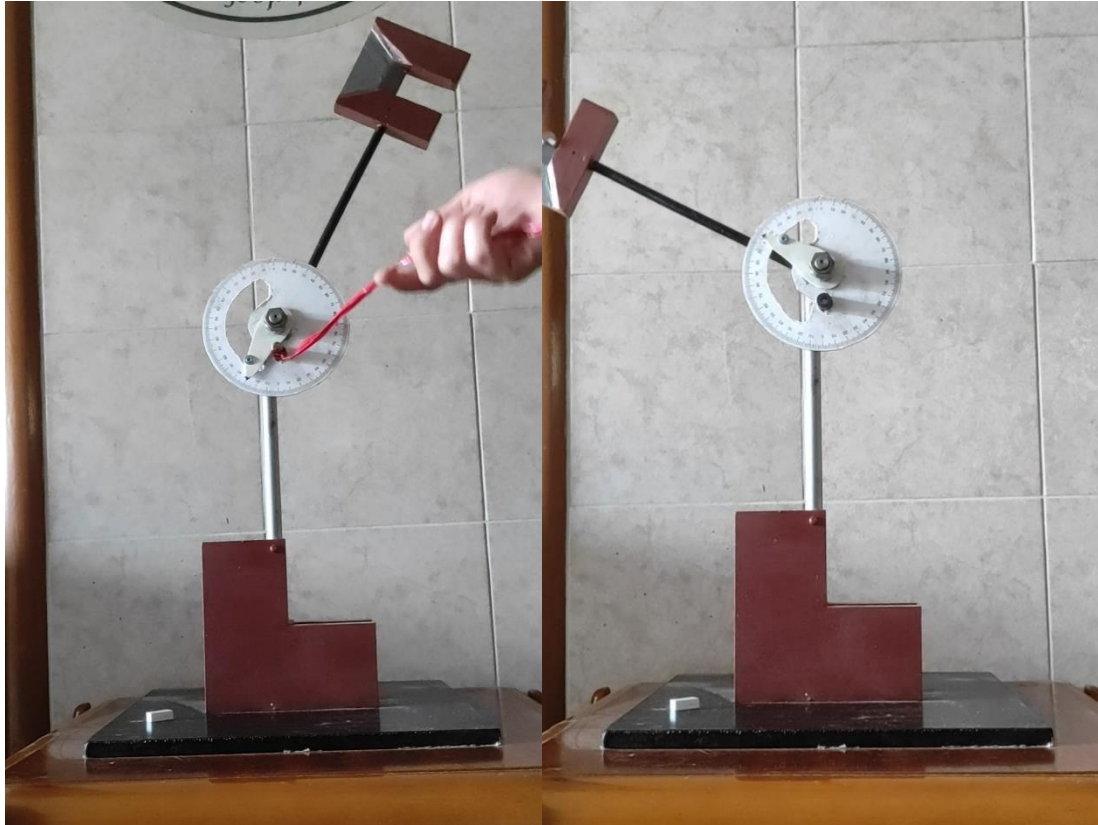
Στα δοκίμια ABS όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί παρατηρήθηκε επίσης αστοχία κατ' αποχωρισμό πράγμα που σημαίνει ότι η θραύση ήταν ανελαστική.



Εικόνα 81 : Δοκίμιο ABS μετά τη κρούση.

3) ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ

Η επόμενη δοκιμή έγινε στα δοκίμια από αλουμίνιο. Οι διαστάσεις των δοκιμίων ήταν 6mm x 6mm x 44mm.



Εικόνα 82 : Αρχική και τελική θέση εκκρεμούς στη δοκιμή του αλουμινίου.

Για τη μηχανή που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής η μέση τιμή των ενδείξεων στο μοιρογνωμόνιο για το υλικό αυτό ήταν οι 65°.

Η ενέργεια που απορρόφησε το δοκίμιο είναι: $E_{11} = mg(H-h_{11})$

Όπου $h_{11} = L_R + \cos 65^\circ L_R = 358 + 151 = 509 \text{ mm}$

Συνεπώς $E_{11} = 2,29 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (0,668 \text{ m} - 0,509 \text{ m}) = 3,6 \text{ J}$

Οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι ίδιες επομένως και η επιφάνεια $F = 24 \text{ mm}$.

Ο συντελεστής δυσθραυστότητας α είναι :

$$a_{11} = \frac{E_{11}}{F} = \frac{mg(H-h_{11})}{F} = \frac{3,6J}{24 \text{ mm}^2} = 0,15 \text{ J/mm}^2 = 150 \text{ KJ/m}^2$$

Η ίδια δοκιμή έγινε και με τη μηχανή κρούσης TERCO MT220. Η ενέργεια που απορρόφησε το δοκίμιο αλουμινίου μετά την αφαίρεση του σφάλματος 0.5 Joule είναι: $E_{12} = 3.5 \text{ Joule}$

Συνεπώς και ο συντελεστής δυσθραυστότητας έχει τιμή :

$$a_{12} = \frac{E_{12}}{F} = \frac{mg(H-h_{12})}{F} = \frac{3,5J}{24 \text{ mm}^2} = 0,146 \text{ J/mm}^2 = 146 \text{ KJ/m}^2$$

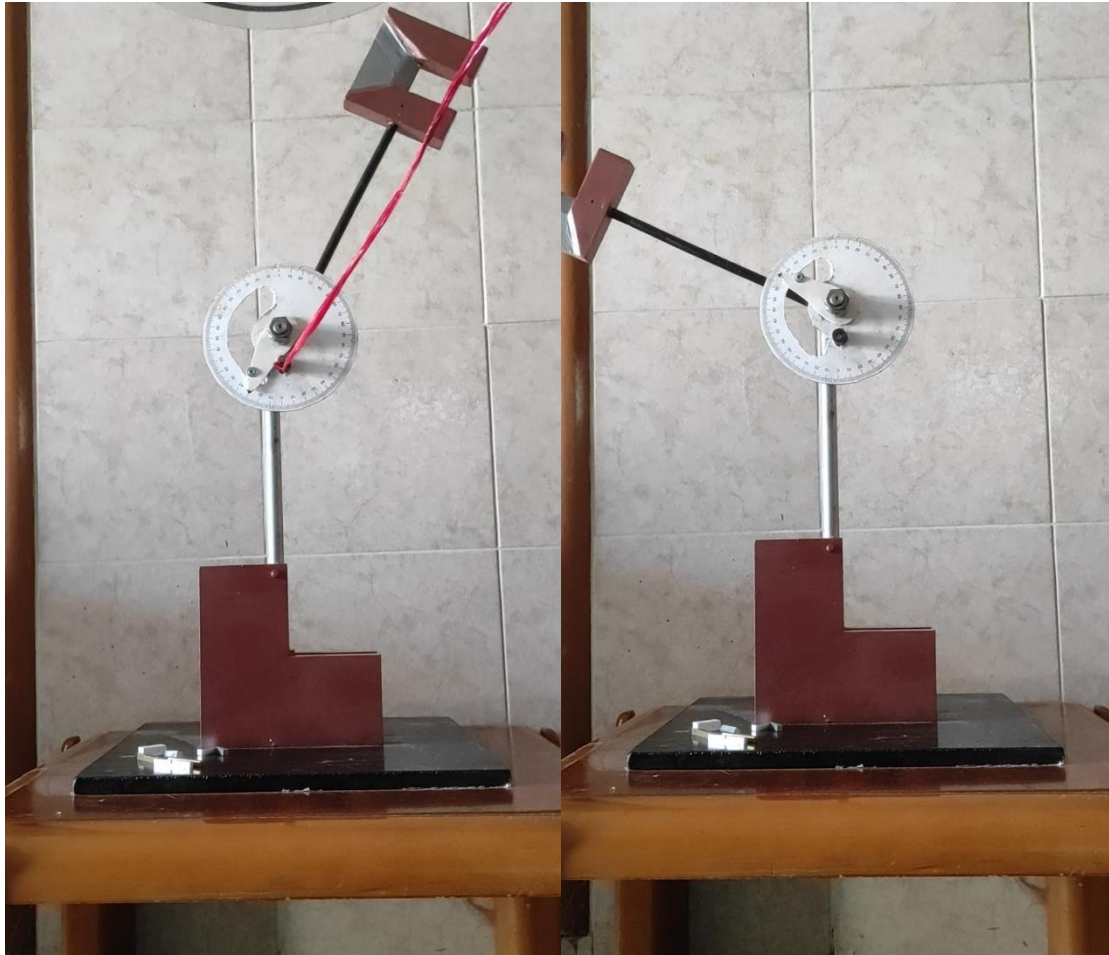
Σε αυτά τα δοκίμια όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί παρατηρήθηκε αστοχία με μεικτό τρόπο καθώς το σημείο της θραύσης φαίνεται να έχει παραμορφωθεί ελαφρώς πριν σπάσει το δοκίμιο. Επειδή λοιπόν παρατηρήθηκε σε ένα βαθμό και πλαστική παραμόρφωση θα μπορούσε κανείς να πει ότι η θραύση δεν ήταν απολύτως ανελαστική.



Εικόνα 83 : Δοκίμιο αλουμινίου μετά τη κρούση.

4) ΧΥΤΟΣΥΔΗΡΟΣ

Το τελευταίο υλικό που εξετάστηκε ήταν ο χυτοσίδηρος. Οι διαστάσεις των δοκιμίων και σε αυτή τη περίπτωση είναι 6mm x 6mm x 44mm.



Εικόνα 84 : Αρχική και τελική θέση εκκρεμούς στη δοκιμή του χυτοσιδήρου.

Για τη μηχανή που κατασκευάστηκε εδώ η μέση τιμή των ενδείξεων στο μοιρογνωμόνιο για το χυτοσίδηρο ήταν οι 70°.

Η ενέργεια που απορρόφησε το δοκίμιο είναι: $E_{13} = mg(H-h_{12})$

Όπου $h_{13} = L_R + \cos 70^\circ L_R = 358 + 132 = 490 \text{ mm}$

Συνεπώς $E_{13} = 2,29 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times (0,668 \text{ m} - 0,490 \text{ m}) = 4 \text{ J}$

Οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι ίδιες επομένως και η επιφάνεια $F = 24 \text{ mm}$.

Ο συντελεστής δυσθραυστότητας α είναι :

$$\alpha_{13} = \frac{E_{13}}{F} = \frac{mg(H-h_{13})}{F} = \frac{4\text{J}}{24 \text{ mm}^2} = 0,167 \text{ J/mm}^2 = 167 \text{ KJ/m}^2$$

Τέλος για τη μηχανή TERCO MT220 μετά την αφαίρεση του σφάλματος 0.5 Joule προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα στη δοκιμή χυτοσιδήρου :

Ενέργεια κρούσης $E_{14} = 4.1 \text{ Joule}$

$$\text{Συντελεστής δυσθραυστότητας } \alpha_{14} = \frac{E_{14}}{F'} = \frac{4.1 \text{ J}}{24 \text{ mm}^2} = 170 \text{ KJ/m}^2$$

Σε αυτά τα δοκίμια όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί παρατηρήθηκε αστοχία κατ' αποχωρισμό πράγμα που σημαίνει ότι η θραύση ήταν ανελαστική.



Εικόνα 85 : Δοκίμιο χυτοσιδήρου μετά τη κρούση.

5.3 Πίνακας αποτελεσμάτων

Εφόσον πραγματοποιήθηκαν όλες οι δοκιμές κρούσης στα υπό εξέταση δοκίμια δημιουργήθηκε ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Εικόνα 86) με τα αποτελέσματα των δοκιμών. Με το τρόπο αυτό γίνεται πιο εύκολη η σύγκριση των αποτελεσμάτων της αντοχής κάθε υλικού.

	PLA 6x6x44mm	ABS 6x6x44mm	PLA 10x10x55mm	ABS 10x10x55mm	ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ 6x6x44mm	ΧΥΤΟΣΥΔΗΡΟΣ 6x6x44mm
ΚΑΤΑΣΕΥΑΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΗ	$E_1=0.224$ J $\alpha_1=9.4$ KJ/m ²	$E_6=0.375$ J $\alpha_6=15.6$ KJ/m ²	$E_5=0.988$ J $\alpha_5= 12.35$ KJ/m ²	$E_9=1.28$ J $\alpha_9=16$ KJ/m ²	$E_{11}=3.6$ J $\alpha_{11}=150$ KJ/m ²	$E_{13}=4$ J $\alpha_{13}=167$ KJ/m ²
TERCO MT220	$E_2=0.3$ J $\alpha_2=12.5$ KJ/m ²	$E_7=0.4$ $\alpha_7= 16.66$ KJ/m ²	$E_3=0.9$ J $\alpha_3=11.25$ KJ/m ²	$E_{10}=1.4$ J $\alpha_{10}=17.5$ KJ/m ²	$E_{12}=3.5$ J $\alpha_{12}= 146$ KJ/m ²	$E_{14}=4.1$ J $\alpha_{14}=170$ KJ/m ²
GALDABINI IMPACT 300			$E_4=1$ J $\alpha_4=12.5$ KJ/m ²	$E_8=1.2$ J $\alpha_8=15$ KJ/m ²		

Εικόνα 86 : Πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμών κρούσης.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε εξ ολοκλήρου μια μηχανή κρούσης τύπου Charpy μέγιστης ενέργειας κρούσης 15 joule για τον έλεγχο της σκληρότητας πολυμερών και μεταλλικών υλικών. Για το σχεδιασμό της κατασκευής επιλέχθηκε το λογισμικό SolidWorks καθότι επιτρέπει τον απλοϊκό σχεδιασμό τρισδιάστατων και πολύπλοκων γεωμετριών όπως και την εισαγωγή κατασκευαστικών λεπτομερειών δημιουργώντας έτσι ένα ολοκληρωμένο σχέδιο της κατασκευής.

Για τη κατασκευή της μηχανής, το πρώτο βήμα ήταν η επιλογή ενός εργονομικού σχεδίου που θα έδινε τη δυνατότητα μελλοντικών παρεμβάσεων και μετεξέλιξης. Το σχέδιο που δημιουργήθηκε συνδυάζει την απλότητα κατασκευής με την άψογη λειτουργικότητα της μηχανής ενώ περιέχει κατασκευαστικές ιδέες που τη κάνουν μοναδική.

Η μηχανή κατασκευάστηκε κυρίως με εργαλεία και μηχανές κατεργασίας που βρίσκονται στο χώρο της σχολής με την άδεια και την επίβλεψη του υπεύθυνου για την εργασία καθηγητή. Η κατασκευή περιλάμβανε κατεργασίες όπως κοπή μετάλλων, διάτρηση, συγκόλληση μεταλλικών αντικειμένων, δημιουργία σπειρωμάτων και κατεργασία σκλήρυνσης μετάλλου με τη μέθοδο της βαφής σε νερό.

Με την ολοκλήρωση της κατασκευής ελέγχθηκε και διαπιστώθηκε η σωστή λειτουργία της μηχανής. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνεται ότι η μηχανή που κατασκευαστικέ στα πλαίσια της παρούσας πτυχιακής λειτουργεί με αξιοπιστία και με αρκετά καλή ακρίβεια. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τις τιμές τις ενέργειας απορρόφησης για κάθε δοκιμή. Οι τιμές που ελήφθησαν από την ιδιοκατασκευή είναι πολύ κοντά με αυτές που προέκυψαν από τις άλλες δύο μηχανές του εμπορίου.

Όσον αφορά τα υλικά των δοκιμών που εξετάστηκαν, οι διαφορές στα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενες καθώς κάθε υλικό έχει δικές του ιδιότητες. Η σειρά σκληρότητας για τα τέσσερα αυτά υλικά έδειξε ότι πιο σκληρό υλικό εξ αυτών είναι ο χυτοσίδηρος, ακολουθεί το αλουμίνιο και στη συνέχεια τα πολυμερή με πιο σκληρό εκ των δύο το ABS και τελευταίο το PLA.

Ξεκινώντας από τα πολυμερή, το PLA είναι ένα φιλικό προς το χρήστη θερμοπλαστικό με υψηλότερη αντοχή σε εφελκυσμό από το ABS. Με χαμηλή θερμοκρασία τήξης και ελάχιστη στρέβλωση, το PLA είναι ένα από τα πιο εύκολα υλικά για διαμόρφωση μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης. Δυστυχώς, το χαμηλό σημείο τήξης του προκαλεί επίσης απώλεια σχεδόν όλης της ακαμψίας και της αντοχής σε θερμοκρασίες άνω των 50 βαθμών Κελσίου. Επιπλέον, το PLA είναι εύθραυστο, οδηγώντας σε εξαρτήματα με χαμηλή αντοχή σε κρούση [19].

Η μηχανή τρισδιάστατης εκτύπωσης καθώς και τα υλικά κατασκευής των δοκιμών είναι της εταιρίας Raise3D η οποία παραθέτει στο διαδίκτυο στοιχεία και μετρήσεις για το κάθε υλικό σύμφωνα με τα τυποποιημένα πρότυπα ISO.

Raise3D Premium PLA Technical Data Sheet

Raise3D Premium PLA is a premium PLA designed for all desktop FDM/FFF printers. It ensures consistent extrusion and prevents nozzle jams.

Physical Properties¹

Property	Testing Method	Typical Value
Density (g/cm ³ at 21.5 °C)	ASTM D792 (ISO 1183, GB/T 1033)	1.2
Melt index (g/10 min)	210 °C, 2.16 kg	7.0 - 11.0
Glass transition temperature (°C)	DSC, 10 °C /min	61
Crystallization temperature (°C)	DSC, 10 °C/min	114
Softening temperature of filament (°C)	Custom method	129 - 132
Melting temperature (°C)	DSC, 10 °C/min	150

Note:

1. Tested with 3D printed specimen of 100% infill.

Mechanical Properties¹

Property	Testing Method	Typical Value
Young's modulus (MPa) (X - Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	2636 ± 330
Tensile strength (MPa) (X - Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	46.6 ± 0.9
Elongation at break (%) (X - Y)	ASTM D638 (ISO 527, GB/T 1040)	1.90 ± 0.2
Bending modulus (MPa) (X - Y)	ASTM D790 (ISO 178, GB/T 9341)	3283 ± 132
Bending strength (MPa) (X - Y)	ASTM D790 (ISO 178, GB/T 9341)	85.1 ± 2.9
Charpy Impact strength (KJ/m ²) (X - Y)	ASTM D256 (ISO 179, GB/T 1043)	2.7 ± 0.2

Note:

1. All testing specimens were printed using a Raise3D Pro2 under the following conditions:
Printing temperature=205 °C, printing speed=60 mm/s.

Εικόνα 87 : Πίνακας στοιχείων για το υλικό εκτύπωσης PLA της εταιρείας Raise3D.

Στη περίπτωση του PLA η τιμή του συντελεστή δυσθραυστότητας που δίνει ο κατασκευαστής (Charpy Impact strength = 2.7 ± 0.2 KJ/m²) είναι μικρότερη από αυτή που βρέθηκε από τις δοκιμές (περίπου 11 KJ/m²) και αυτό ίσως οφείλετε στο τρόπο που εκτυπώθηκε το δοκίμιο. Σε κάθε περίπτωση, το ότι παρουσιάζει καλύτερη αντοχή από τις προδιαγραφές δεν είναι κάτι το ανησυχητικό.

Το ABS, ενώ είναι πιο αδύναμο και λιγότερο άκαμπτο από το PLA, είναι ένα πιο σκληρό, ελαφρύ και ιδανικότερο για ορισμένες πιο επαγγελματικές εφαρμογές. Το ABS είναι πιο ανθεκτικό, είναι περίπου 25% ελαφρύτερο και έχει μέχρι και τέσσερις φορές μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση. Το ABS απαιτεί περισσότερη προσπάθεια για εκτύπωση από το PLA, επειδή είναι πιο ανθεκτικό στη θερμότητα και επιρρεπές σε στρέβλωση. Το ABS, αν και σε καμία περίπτωση δεν είναι ανθεκτικό στη θερμότητα πλαστικό. Παρόλα αυτά έχει ανώτερη θερμοκρασία εκτροπής θερμότητας σε σύγκριση με το PLA [19].

Ακολουθεί πίνακας στοιχείων για το υλικό ABS της εταιρείας Raise3D που χρησιμοποιήθηκε στη τρισδιάστατη εκτύπωση των δοκιμών.

Raise3D Premium ABS_TDS Fab.2017 Version 3.0

Bending strength (MPa)	ASTM D790 (ISO 178, GB/T 9341)	59.0 ± 1.3
Impact strength (kJ/m ²)	ASTM D256 (ISO 179, GB/T 1043)	12.6 ± 1.1

Note:

1. All testing specimens were printed using a Raise3D N2 under the following conditions:
Printing temperature = 255 °C, printing speed = 60 mm/s, number of shells = 2, and 100% infill.

Εικόνα 88 : Πίνακας στοιχείων για το υλικό εκτύπωσης ABS της εταιρείας Raise3D.

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω πίνακα η αντοχή του ABS σε κρούση που δίνει ο κατασκευαστής του υλικού (12.6 ± 1.1 KJ/m²) είναι αρκετά μεγαλύτερη από του PLA κάτι το οποίο φάνηκε εξίσου ξεκάθαρα και στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.

Το Αλουμίνιο είναι ένα μέταλλο σημαντικό για την βιομηχανία λόγω του χαμηλού του ειδικού βάρους, της υψηλής αντοχής του σε μηχανικές καταπονήσεις και της εξαιρετικής αντοχής του στη διάβρωση, η οποία οφείλεται στο φαινόμενο της παθητικοποίησης. Το καθαρό αλουμίνιο είναι αρκετά μαλακό και όλκιμο. Με την προσθήκη σιδήρου, χαλκού και άλλων κραματικών στοιχείων βελτιώνονται κατά πολύ οι μηχανικές του ιδιότητες [20]. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η αντοχή του αλουμινίου σε κρούση ήταν πολύ καλύτερη από αυτή των πολυμερών αφού τα μέταλλα είναι πιο σκληρά υλικά από τη φύση τους.

Ο χυτοσίδηρος (κοινώς μαντέμι) είναι κράμα σιδήρου με άνθρακα σε περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 2,1% κατά βάρος. Στην πραγματικότητα με τον όρο «χυτοσίδηρος» εννοείται μία οικογένεια κραμάτων τα οποία εκτός από άνθρακα, μπορεί να περιέχουν και άλλα στοιχεία όπως πυρίτιο, κ.λπ. Οι χυτοσίδηροι είναι εύθραυστοι σε σύγκριση με τον χάλυβα, αλλά παρουσιάζουν πιο καλή αντίσταση στην τριβή και την διάβρωση. Σε σχέση με τα πολυμερή, η αντοχή του σε εφελκυσμό και κρούση είναι πολύ μεγαλύτερη όπως και η δυσκαμψία του. Επίσης αν και πιο φαθυρό υλικό από το αλουμίνιο παρουσιάζει καλύτερη αντοχή σε κρούση κάτι που επιβεβαιώνεται και από τις δοκιμές που έγιναν κατά τη πειραματική διαδικασία της εργασίας [21].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. “Μελέτη της Μηχανικής Συμπεριφοράς Πολυμερών και Πολυμερικών Σύνθετων Υλικών μετά από Επαναληπτική Κρούση” Μεταπτυχιακή Εργασία Ειδίκευσης, Μπόγρης Αθανάσιος Α.Μ. 143, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010
2. https://wblog.wiki/el/Impact_%28mechanics%29
3. Young H., “Πανεπιστημιακή Φυσική, Μηχανική - Θερμοδυναμική, Τόμος Α”, Εκδόσεις Παπαζήση, 1994.
4. Richardson M.O.W., Wisheart M.J., “Review of low-velocity impact properties of composite materials”, Composites Part A, Volume 27, Issue 12, pages 1123-1131, 1996.
5. Μελέτη αστοχίας και μηχανικών ιδιοτήτων σε χάλυβα με μέση περιεκτικότητα σε μαγγάνιο, Διπλωματική Εργασία, Αγγελική Τζελέπη, Αθήνα Οκτώβριος, 2019.
6. <https://docplayer.gr/30265181-Metalla-1-genika-2-idiotites-metallon-3-eleghos-mihanikon-idiotiton.html>
7. H. Kobayashi and H. Onoue, Brittle fracture of Liberty Ships, Failure Knowledge Database 100 Selected Cases, 1943
8. Aviation Safety Network (2011), Aircraft accident Boeing 747SR-46 JA8119, [Online], <http://aviation-safety.net/database/record.php?id=19850812-1>
9. https://en.wikipedia.org/wiki/Charpy_impact_test
10. <https://docplayer.gr/4036816-Antohi-ylikon-peirama-kroysis-ergastiriakiaskisi-6-i.html>
11. Richardson M.O.W., Wisheart M.J., “Review of low-velocity impact properties of composite materials”, Composites Part A, Volume 27, Issue 12, pages 1123-1131,1996.
12. Σταυρόπουλος Χ., “Πρόβλεψη της εναπομένουσας αντοχής πολυστρώτων ινωδών συνθέτων υλικών μετά από κρούση και βελτίωση της κρουστικής συμπεριφοράς τους με την εισαγωγή ενισχυτικών πλαστικών στρώσεων”, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών & Αεροναυπηγών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 1998.
13. Zukas J.A., “Impact dynamics: Theory and experiment”, US Army Ballistic Research Laboratory, 1980. Papanicolaou G.C., “Dependence of the impact strength of particulate composites on the temperature and filler volume fraction”, Materials Chemistry and Physics, Volume 18, Issues 1-2, pages 49-56, 1987.
14. Cantwell W.J., Morton J., “The impact resistance of composite materials – a review”, Composites, Volume 22, Issue 5, pages 347-362, 1991.
15. https://en.wikipedia.org/wiki/Izod_impact_strength_test
16. Παναγιώτης Ματζινός, Επιστημονικός Συνεργάτης Χημικός Μηχανικός, Α.Τ.Ε.Ι ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ Σ.Τ.Ε.Φ. ,Τεχνολογία Υλικών Οχημάτων ,ΤΕΥΧΟΣ Ι, MPhil, PhD ,Θεσσαλονίκη 2010.
17. <https://eclass.emt.ihu.gr/modules/document/file.php/PTD158/%CE%98%CE%95%CE%A1%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3%20%CE%9A%CE%91%CE%A4%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%99%CE%95%CE%A3%20%CE%A7%CE%91%CE%9B%CE%A5%CE%92%CE%A9%CE%9D.pdf>
18. Συγγραφέας Α. Ασημακόπουλος
http://eclass.opencourses.teicm.gr/eclass/modules/document/file.php/TMA120/03_Hardness_tests.pdf

19. <https://markforged.com/resources/blog/pla-abs-nylon>
20. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CF%81%CE%B3%CE%AF%CE%BB%CE%B9%CE%BF>
21. <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A7%CF%85%CF%84%CE%BF%CF%83%CE%AF%CE%B4%CE%B7%CF%81%CE%BF%CF%82>
22. Ρουλεμάν που χρησιμοποιήθηκαν στο ηλεκτρονικό σχέδιο κατέβηκαν από την ιστοσελίδα : <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings>
23. Οι κοχλίες και τα περικόχλια που χρησιμοποιήθηκαν κατέβηκαν από την ιστοσελίδα : <https://www.mcmaster.com/>

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1 :

<https://www.empirognomon.gr/%CE%BC%CE%B5%CF%84%CF%89%CF%80%CE%B9%CE%BA%CE%AD%CF%82-%CF%83%CF%85%CE%B3%CE%BA%CF%81%CE%BF%CF%8D%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82/>

Εικόνα 2: “Μελέτη της Μηχανικής Συμπεριφοράς Πολυμερών και Πολυμερικών Σύνθετων Υλικών μετά από Επαναληπτική Κρούση” Μεταπτυχιακή Εργασία Ειδίκευσης, Μπόγγρης Αθανάσιος Α.Μ. 143, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010

Εικόνα 3: <https://docplayer.gr/108620562-Antohi-idiothtes-mihanikon-viologikon-ylikon.html>

Εικόνα 4: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/charpy-impact-test>

Εικόνα 5: <http://www-g.eng.cam.ac.uk/125/1925-1950/tipper3.html>

Εικόνα 6: Wikipedia (2011), *Japan Airlines Flight 123*, [Online], http://en.wikipedia.org/wiki/Japan_Airlines_Flight_123

Εικόνα 7: <https://www.facebook.com/440905686404294/photos/charpy-and-izod-impact-test/486851828476346/>

Εικόνα 8: “Μελέτη της Μηχανικής Συμπεριφοράς Πολυμερών και Πολυμερικών Σύνθετων Υλικών μετά από Επαναληπτική Κρούση” Μεταπτυχιακή Εργασία Ειδίκευσης, Μπόγγρης Αθανάσιος Α.Μ. 143, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010

Εικόνα 9: Richardson M.O.W., Wisheart M.J., “Review of low-velocity impact properties of composite materials”, *Composites Part A*, Volume 27, Issue 12, pages 1123-1131, 1996.

Εικόνα 10: William D. Callister, Jr. Department of Metallurgical Engineering The University of Utah , *Materials Science and Engineering An Introduction*.

Εικόνα 11: <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/charpy-impact-test/>

Εικόνα 12: <https://www.ibertest.es/en/products/instrumented-impact-testing-charpy-impact-test/>

Εικόνα 13: <https://forum.arduino.cc/t/impact-measurements-charpy-izod-impact-machine/587359>

Εικόνα 14: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/charpy-test>

Εικόνα 15: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/lmcm2_aula5.pdf

Εικόνα 16: <https://www.chinatestequipments.com/tests-on-plastic-raw-materials/pendulum-impact-tester/digital-display-izod-impact-tester.html>

Εικόνα 17: <https://www.impacttestingmachine.com/new/charpy-test-pdf.html>

Εικόνα 18: <http://it.labthink.com/product/fdi-01-falling-dart-impact-tester.html>

Εικόνα 19: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials, ASTM E23.

Εικόνα 20: <https://www.tercosweden.com/product/mt3016-impact-tester/>

Εικόνα 41 : <https://www.manioudakis-machines.gr/%CE%BA%CE%BF%CF%80%CE%AE-%CF%83%CF%85%CE%B3%CE%BA%CF%8C%CE%BB%CE%BB%CE%B7%CF%83%CE%B7-%CE%BC%CE%B5%CF%84%CE%AC%CE%BB%CE%BB%CF%89%CE%BD-cnc-%CF%80%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%BF%CE%B9-%CF%80%CE%BB%CE%AC%CF%83%CE%BC%CE%B1-%CE%BA%CE%BF%CF%80%CE%AE%CF%82/%CF%80%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%BF%CF%82-cnc-plasma-%CF%80%CE%BB%CE%B1%CF%83%CE%BC%CE%B1-cnc/%CF%80%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%AC%CF%86%CE%BF%CF%82-cnc-%CE%BF%CE%BE%CF%85%CE%B3%CE%BF%CE%BD%CE%BF-oxy7030>