



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

**ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΜΕΛΩΝ ΜΕ
ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ**



Μεταπτυχιακή Εργασία

Μ.Δ.Ε. Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση των κατασκευών

Βασιλική Ναυρόζογλου

ΕΜΚ ΜΕ 2022/03

Επιβλέπων: Καθηγητής Ε.Μ.Π. Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Συνεπιβλέπων: κ. Ξενοφών Λιγνός, Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΜΕΛΩΝ ΜΕ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΚΑΙ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ



Μεταπτυχιακή Εργασία

Μ.Δ.Ε. Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση των κατασκευών

Βασιλική Ναυρόζογλου

ΕΜΚ ΜΕ 2022/03

Επιβλέπων: Καθηγητής Ε.Μ.Π. Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Συνεπιβλέπων: κ. Ξενοφών Λιγνός, Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022

Copyright © Βασιλική Ναυρόζογλου, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Vasiliki Navrozoglou, 2022

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Βασιλική Ναυρόζογλου (2022)
Σύγκριση Εκτίμησης Αντοχής Χαλύβδινων Μελών
με Καταστροφικές και μη Καταστροφικές Δοκιμές
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2022/03
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Vasiliki Navrozoglou (2022)
Comparison of Strength Assessment of Steel Specimens
with Destructive and Non-Destructive Testing
Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2022/03
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τις μεταπτυχιακές μου σπουδές και κατ'επέκταση τη διπλωματική μου εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους τους ανθρώπους που στάθηκαν στο πλευρό μου καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών και με οποιοδήποτε τρόπο συνέβαλαν στην ολοκλήρωσή τους.

Πρωτίστως, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Χάρη Γαντέ, καθηγητή Ε.Μ.Π. και επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, για την επιστημονική καθοδήγηση του και το χρόνο που αφιέρωσε στην επίλυση των αποριών μου καθόλο το διάστημα των μεταπτυχιακών σπουδών.

Επιπλέον, χωρίς την ουσιαστική βοήθεια και καθοδήγηση της ομάδας του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π., δηλαδή του κ. Ξενοφώντα Λιγνού, του κ. Στέλιου Κατσατσίδα και του κ. Σπύρου Παπαβιέρου, δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, και θα ήθελα να τους ευχαριστήσω ιδιαίτερα για τον χρόνο που αφιέρωσαν.

Παράλληλα, απόλυτα καθοριστική υπήρξε η υλική συμπαράσταση της εταιρείας "ΕΛΜΕΤ Ναυρόζογλου" στην οποία διαμορφώθηκαν τα χαλύβδινα δοκίμια, σύμφωνα με τις απαιτήσεις μας, και χρησιμοποιήθηκαν στο ερευνητικό σκέλος της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και στις αδερφές μου για την ενθάρρυνση τους, την υπομονή τους, την ηθική τους συμπαράσταση και την ουσιαστική υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια για την ολοκλήρωση των σπουδών μου και την επίτευξη των στόχων μου.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΜΕ 2022/03

Σύγκριση Εκτίμησης Αντοχής Χαλύβδινων Μελών με Καταστροφικές και μη Καταστροφικές Δοκιμές

Βασιλική Ναυρόζογλου

Επιβλέπων: Καθηγητής Ε.Μ.Π. Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός
Συνεπιβλέπων: κ. Ξενοφών Λιγνός, Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός
Φεβρουάριος 2022

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μεταξύ τη πληθώρας των ιδιοτήτων που παρουσιάζουν τα δομικά υλικά υψίστης σπουδαιότητας αποτελούν οι μηχανικές, καθώς αντιμετωπίζουν κύρια φαινόμενα σχετικά με τη συμπεριφορά των υλικών σε ασκούμενες εξωτερικές δυνάμεις. Η παραμόρφωση και, στη συνέχεια, η θραύση ενός υλικού υπό φόρτιση εξαρτώνται από τη δομή του. Συχνά, οι μακροσκοπικές αποκρίσεις των υλικών στις υποβαλλόμενες δυνάμεις οδηγούν σε αλλαγή του σχήματος ή ακόμη και σε αποδόμηση αυτών σε περιπτώσεις εξαιρετικά μεγάλων φορτίσεων. Για το σκοπό αυτό, είναι ωφέλιμο να πραγματοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές προκειμένου να προσδιορίζονται οι πρακτικές δυνατότητες ενός υλικού. Μία από τις χρήσιμες και απλές δοκιμές για την εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας των υλικών, και ιδιαίτερα του χάλυβα, αποτελεί η δοκιμή εφελκυσμού, η οποία συνδέει την τάση με την παραμόρφωση. Επιπλέον, η αντίσταση στην πλαστική παραμόρφωση θεωρείται μια ιδιαίτερα σημαντική πληροφορία για τους μηχανικούς, η οποία προκύπτει από τη συσχέτιση των τιμών σκληρότητας με παραμέτρους που λαμβάνονται από μηχανικές δοκιμές, κυρίως εφελκυσμού ή θλίψης. Η σκληρότητα αποτελεί μια μηχανική ιδιότητα των υλικών η οποία αντικατοπτρίζει την αντίσταση σε πλαστική παραμόρφωση, συνήθως σε διείσδυση. Τα μεγέθη και τα σχήματα των διεισδυτών που χρησιμοποιούνται για να προκαλέσουν την παραμόρφωση ποικίλλουν. Στην συνέχεια, μετρώνται οι διαστάσεις αυτών των αποτυπωμάτων στις επιφάνειες των εξεταζόμενων υλικών, ώστε να ληφθούν πληροφορίες που ενδιαφέρουν όσους εκτελούν τέτοιες δοκιμές. Τέλος, η σκληρότητα του υλικού συσχετίζεται με την αντοχή του. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, λοιπόν, παρουσιάζει τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες δοκιμές σκληρότητας για τον χαρακτηρισμό του χάλυβα και παρέχει τις κατάλληλες γνώσεις για την σύνδεση των αποτελεσμάτων με την αντοχή σε εφελκυσμό. Οι γνώσεις αυτές προκύπτουν τόσο από τυπολόγια, πίνακες και διαγράμματα από την βιβλιογραφία, όσο και από πειραματικές εφαρμογές. Έτσι, πραγματοποιείται εμβάθυνση των τεχνολογικών γνώσεων στο πεδίο των ιδιοτήτων των υλικών, ενώ γίνεται και σύγκριση των μεθόδων που προσδιορίζουν αυτές τις ιδιότητες.

Λέξεις - Κλειδιά

Σκληρότητα, Μηχανικές ιδιότητες, Χάλυβας, Δοκιμή εφελκυσμού



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

THESIS
EMK ME 2022/03

Comparison of Strength Assessment of Steel Specimens with Destructive and Non-Destructive Testing

Vasiliki Navrozoglou

Supervisor: Professor NTUA Charis Gantes, Dr. Civil Engineer
Co-supervisor: Mr. Xenofon Lignos, Dr. Electrical Engineer
February 2022

ABSTRACT

Among the variety of properties of building materials mechanical ones are of the utmost importance, as they face major phenomena related to the behavior of materials in exerted external forces. The deformation and the subsequent fracture of a material under loading depend on its structure. The macroscopic responses of building materials to the applied forces often lead to changes in their shape or even to their decomposition in cases of extremely large loads. In these cases, it is useful to carry out laboratory tests in order to determine the practical capabilities of a material. One of the useful and simple tests for assessing the bearing capacity of materials and especially of steel is the tensile test which connects the stress with the deformation. In addition, the resistance to plastic deformation is considered to be a particularly important piece of information for engineers which emerges from the correlation of hardness values with parameters obtained from mechanical tests, mainly tensile or compression. Hardness is a mechanical property of materials which reflects resistance to plastic deformation. There are many sizes and shapes of indenters used to cause deformation. The dimensions of these indentations on the surfaces of the test materials are then measured to obtain information of interest to those performing such tests. Finally, the hardness of the material is related to its strength. The present thesis, therefore, presents the most commonly used hardness tests for the characterization of steel and provides the appropriate knowledge to link the results to tensile strength. This knowledge is derived from typologies, tables and diagrams from the literature, as well as from experimental applications. Thus, technological knowledge is deepened in the field of properties of materials, while the methods that determine these properties are compared.

Keywords

Hardness, Mechanical properties, Steel, Tensile test

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Σκοπός της διπλωματικής	1
1.2	Διάρθρωση Εργασίας	1
2	ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΟΜΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ	3
2.1	Εισαγωγή	3
2.2	Μη καταστροφικές μέθοδοι δοκιμών	6
2.3	Καταστροφικές μέθοδοι δοκιμών	7
3	ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	9
3.1	Σκληρότητα χάλυβα	9
3.2	Στατικές δοκιμές σκληρότητας	11
3.2.1	Δοκιμή σκληρότητας κατά Brinell	16
3.2.2	Κανονιστικές διατάξεις	19
3.2.3	Σύγκριση προτύπων ISO, ASTM	20
3.3	Δυναμικές δοκιμές σκληρότητας	20
3.3.1	Δυναμική μέθοδος Leeb	22
3.3.2	Κανονιστικές διατάξεις	26
4	ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	27
4.1	Γενικά	27
4.2	Δοκιμή εφελκυσμού	28
4.2.1	Προετοιμασία δοκιμίων	31
4.2.2	Κανονιστικές διατάξεις	33
5	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΜΕΡΟΣ Α΄	35
5.1	Διαμόρφωση δοκιμίων	35
5.2	Στατική δοκιμή μέτρησης σκληρότητας	38
5.2.1	Αποτελέσματα δοκιμών	44
5.2.2	Εκτίμηση αβεβαιότητας	51
5.3	Δυναμική δοκιμή μέτρησης σκληρότητας	57
5.3.1	Αποτελέσματα δοκιμής	58
5.3.2	Εφαρμογή δοκιμής με διαφορετική θέση φορητού οργάνου	61
5.3.3	Εκτίμηση αβεβαιότητας	62
5.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων μη καταστρεπτικών δοκιμών	78
6	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΜΕΡΟΣ Β΄	79
6.1	Δοκιμή εφελκυσμού	79
6.1.1	Αποτελέσματα απλών δοκιμίων	84
6.1.2	Αποτελέσματα συγκολλητών δοκιμίων	89

6.1.3	Αποτελέσματα κοχλιωτών δοκιμών.....	93
6.1.4	Αποτελέσματα δοκιμών δεύτερης φάσης	99
6.2	Αποτελέσματα εφελκυστικών δοκιμών	99
7	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ	101
7.1	Βιβλιογραφική έρευνα	101
7.2	Κανονιστικές διατάξεις.....	102
8	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ.....	105
8.1	Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα των δοκιμών	105
8.2	Σύγκριση μεταξύ των δεδομένων σκληρομέτρησης κατά Brinell	106
8.3	Εκτίμηση μεθόδων με βάση την οριακή αντοχή.....	108
8.4	Εκτίμηση μεθόδων με βάση το πάχος των ελασμάτων	112
8.5	Εκτίμηση μεθόδων με βάση τη γωνία εφαρμογής της μεθόδου	112
9	ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	115
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	117

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1: Τυπικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων	4
Εικόνα 2-2: Μη καταστρεπτικός έλεγχος υλικών	6
Εικόνα 2-3: Καταστρεπτική δοκιμή κάμψης.	7
Εικόνα 3-1: Απεικόνιση της μεθόδου Brinell	12
Εικόνα 3-2: Απεικόνιση της μεθόδου Vickers	13
Εικόνα 3-3: Απεικόνιση της μεθόδου Rockwell.....	14
Εικόνα 3-4: Διεισδυτής Brinell και αποτύπωμα	17
Εικόνα 3-5: Σταθερό σκληρόμετρο πάγκου Brinell	17
Εικόνα 3-6: Χαρακτηριστικές τιμές σκληρότητας HBW	19
Εικόνα 3-7: Τυπικό φορητό όργανο σκληρομέτρησης	21
Εικόνα 3-8: Δοκιμή σκληρότητας Shore	22
Εικόνα 3-9: Οι δύο πρώτες συσκευές σκληρομέτρησης EQUOTIP	23
Εικόνα 3-10: Εφαρμογή σκληρομέτρησης Leeb	23
Εικόνα 3-11: Ταχύτητα πρόσκρουσης και ταχύτητα αναπήδησης σε συνάρτηση με τον χρόνο.....	24
Εικόνα 4-1: Δοκιμή εφελκυσμού.....	27
Εικόνα 4-2: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης όλκιμου υλικού	29
Εικόνα 4-3: Δοκίμιο εφελκυσμού πριν και κατά την διάρκεια του πειράματος.....	29
Εικόνα 4-4: Μηκυνσιόμετρο σε δοκίμιο.	30
Εικόνα 4-5: Τυπική ηλεκτρονική μηχανή εφελκυστικής δοκιμής.	31
Εικόνα 4-6: Κοπή ελάσματος με τροχό.....	32
Εικόνα 4-7: Τυπικό μικρόμετρο	32
Εικόνα 4-8: Μεταλλικά δοκίμια κατάλληλα για εφελκυστικές δοκιμές.....	33
Εικόνα 5-1: Διαστάσεις απλών, συγκολλητών και κοχλιωτών δοκιμίων.	35
Εικόνα 5-2: Μορφή απλών δοκιμίων (SUS).....	36
Εικόνα 5-3: Μορφή συγκολλητών δοκιμίων (WUS).	36
Εικόνα 5-4: Μορφή κοχλιωτών δοκιμίων (BUS).	37
Εικόνα 5-5: Λείανση δοκιμίων στο εργαστήριο.	38
Εικόνα 5-6: Δοκίμιο μετά την λείανση.	38
Εικόνα 5-7: Πραγματοποίηση δοκιμής στο σκληρόμετρο πάγκου.	39
Εικόνα 5-8: Εφαρμογή δοκιμών στο σκληρόμετρο πάγκου.	41
Εικόνα 5-9: Αποτυπώματα μετά την εφαρμογή της δύναμης στο σκληρόμετρο πάγκου.....	41
Εικόνα 5-10: Χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.	42
Εικόνα 5-11: Μέτρηση διαμέτρων με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.	43

Εικόνα 5-12: Υπολογισμός διαμέτρων αποτυπώματος στο μικροσκόπιο.....	43
Εικόνα 5-13: Φορητό όργανο σκληρομέτρησης.....	57
Εικόνα 5-14: Εφαρμογή μεθόδου αναπηδήσεως.....	58
Εικόνα 6-1: Απλό δοκίμιο.....	79
Εικόνα 6-2: Συγκολλητό δοκίμιο.....	80
Εικόνα 6-3: Δοκίμιο με κοχλίες.....	80
Εικόνα 6-4: Δοκίμια μετά την διαδικασία της λείανσης.....	80
Εικόνα 6-5: Μηχανή εφελκυσμού Instron.....	83
Εικόνα 6-6: Τοποθέτηση μηχανομετρου σε δοκίμιο.....	84
Εικόνα 6-7: Δοκίμιο SUS1 (α) πριν και (β) μετά την εφελκυστική δοκιμή.....	85
Εικόνα 6-8: Αστοχία δοκιμίου.....	85
Εικόνα 6-9: Δοκίμιο SUS2 (α) πριν και (β) μετά την εφελκυστική δοκιμή.....	87
Εικόνα 6-10: Αστοχία δοκιμίου.....	87
Εικόνα 6-11: Δοκίμιο SUS3 (α) πριν και (β) μετά την εφελκυστική δοκιμή.....	88
Εικόνα 6-12: Αστοχία δοκιμίου.....	89
Εικόνα 6-13: Δοκίμιο WUS1 (α) πριν και (β) κατά την διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής.....	90
Εικόνα 6-14: Αστοχία δοκιμίου.....	90
Εικόνα 6-15: Ατελής διείσδυση σε συγκόλληση πλήρους διείσδυσης.....	91
Εικόνα 6-16: Δοκίμιο WUS2 πριν την εφελκυστική δοκιμή.....	91
Εικόνα 6-17: Αστοχία δοκιμίου.....	92
Εικόνα 6-18: Δοκίμιο WUS3 (α) πριν και (β) μετά την εφελκυστική δοκιμή.....	92
Εικόνα 6-19: Αστοχία δοκιμίου.....	93
Εικόνα 6-20: Δοκίμιο BUS1 (α) πριν και (β) κατά την διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής.....	93
Εικόνα 6-21: Αστοχία δοκιμίου.....	94
Εικόνα 6-22: Δοκίμιο BUS2 (α) πριν και (β) κατά την διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής.....	96
Εικόνα 6-23: Αστοχία δοκιμίου.....	96
Εικόνα 6-24: Δοκίμιο BUS3 (α) πριν και (β) κατά την διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής.....	97
Εικόνα 6-25: Αστοχία δοκιμίου.....	98

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1: Ομάδες υλικών.....	25
Πίνακας 5-1: Προτεινόμενες τιμές διαμέτρου και δύναμης σε σχέση με σκληρότητα υλικών.....	39
Πίνακας 5-2: Στοιχεία δοκιμών κάθε τεμαχίου.....	40
Πίνακας 5-3: Στοιχεία δοκιμών κάθε τεμαχίου.....	40
Πίνακας 5-4: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (πρώτα δοκίμια).....	45
Πίνακας 5-5: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (πρώτα δοκίμια-συνέχεια).....	45
Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια).	46
Πίνακας 5-7: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).	46
Πίνακας 5-8: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).	47
Πίνακας 5-9: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).	47
Πίνακας 5-10: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).	48
Πίνακας 5-11: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).	48
Πίνακας 5-12: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).	49
Πίνακας 5-13: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).	49
Πίνακας 5-14: Αποτελέσματα μετρήσεων πρότυπου πλακιδίου.....	53
Πίνακας 5-15: Εκτίμηση αβεβαιότητας δοκιμών.....	54
Πίνακας 5-16: Εκτίμηση αβεβαιότητας δοκιμών (συνέχεια).	54
Πίνακας 5-17: Εκτίμηση αβεβαιότητας δοκιμών (συνέχεια).	54
Πίνακας 5-18 Εκτίμηση αβεβαιότητας δοκιμών (συνέχεια).	55
Πίνακας 5-19: Επαναληψιμότητα και σφάλμα της μηχανής δοκιμής για λόγο $F/D=30$	55
Πίνακας 5-20: Επαναληψιμότητα και σφάλμα της μηχανής δοκιμής για άλλους λόγους F/D	55
Πίνακας 5-21: Αποτελέσματα επαναληψιμότητας και σφάλματος των μετρήσεων των δοκιμίων.	56
Πίνακας 5-22: Αποτελέσματα μετρήσεων φορητού σκληρομετρητή κατά Brinell (πρώτα δοκίμια).	59
Πίνακας 5-23: Αποτελέσματα μετρήσεων φορητού σκληρομετρητή κατά Brinell (δεύτερα δοκίμια). ..	60
Πίνακας 5-24: Αποτελέσματα μετρήσεων φορητού σκληρομετρητή κατά Brinell (οριζόντια θέση οργάνου).	62
Πίνακας 5-25: Συγκριτικά αποτελέσματα σκληρομετρήσεων (πρώτα δοκίμια).....	78
Πίνακας 5-26: Συγκριτικά αποτελέσματα σκληρομετρήσεων (δεύτερα δοκίμια).	78
Πίνακας 6-1: Γεωμετρία απλών δοκιμίων για δοκιμές εφελκυσμού.....	81
Πίνακας 6-2: Γεωμετρία συγκολλητών δοκιμίων για δοκιμές εφελκυσμού.....	81
Πίνακας 6-3: Αποστάσεις οπών κοχλιωτών δοκιμίων από τα άκρα.	82
Πίνακας 6-4: Γεωμετρία κοχλιωτών δοκιμίων για δοκιμές εφελκυσμού.....	82
Πίνακας 6-5: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού για τα δεύτερα δοκίμια.	99

Πίνακας 6-6: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού για τα δεύτερα δοκίμια (συνέχεια).	99
Πίνακας 6-7: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού (απλά δοκίμια).	99
Πίνακας 6-8: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού (συγκολλητά δοκίμια).	99
Πίνακας 6-9: Ονομαστικές τιμές του ορίου διαρροής και της οριακής εφελκυστικής αντοχής (ονομαστικό πάχος στοιχείου $t \leq 40$ mm).	100
Πίνακας 7-1: Μετατροπή της σκληρότητας σε εφελκυστική αντοχή για χάλυβα και χυτοσίδηρο	103
Πίνακας 8-1: Απόκλιση τιμών HBW από εφελκυστικές αντοχές ανάλογα με τον λόγο F/D.	108
Πίνακας 8-2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών SUS, WUS, BUS.	108
Πίνακας 8-3: Διάμετροι σφάιρας και δυνάμεις οι οποίες εφαρμόστηκαν κατά τις δοκιμές Brinell.	109
Πίνακας 8-4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών T5DW-1L, T5DW-2P, T6B-1, T6W-1.	110
Πίνακας 8-5: Διάμετροι σφάιρας και δυνάμεις οι οποίες εφαρμόστηκαν κατά τις δοκιμές Brinell.	110
Πίνακας 8-6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών T6W-2, T10-B1, T15-T1, T20-T1.	110
Πίνακας 8-7: Διάμετροι σφάιρας και δυνάμεις οι οποίες εφαρμόστηκαν κατά τις δοκιμές Brinell	110

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της διπλωματικής

Ο χάλυβας ως δομικό υλικό διαθέτει υψηλή αντοχή και σε συνδυασμό με το μικρό ειδικό βάρος του προσδίδει μεγάλη ευελιξία τόσο στην ανακαίνιση υφιστάμενων κατασκευών όσο και στην ανέγερση νέων, υψηλής αισθητικής αξίας και αειφορίας. Η μηχανική συμπεριφορά του, όπως και των υπόλοιπων δομικών υλικών, προσδιορίζει την απόκριση του σε καταπονήσεις. Σημαντικές μηχανικές ιδιότητες αποτελούν η αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη, διάτμηση και κάμψη, η σκληρότητα, η δυσθραυστότητα, η δυσκαμψία, η ολκιμότητα και η αντοχή σε κόπωση. Ωστόσο, κατά την εκτίμηση αυτών των ιδιοτήτων, συχνά απαιτούνται δοκιμές οι οποίες προκαλούν βλάβες τόσο στο εσωτερικό όσο και στην επιφάνεια των εξεταζόμενων στοιχείων, με αποτέλεσμα την καταστροφή ή υποβάθμιση τους. Συνεπώς, αυτές οι καταστροφικές δοκιμές δεν μπορούν να λάβουν μέρος σε κατασκευές οι οποίες βρίσκονται σε λειτουργία.

Έτσι, προέκυψε η ανάγκη εφαρμογής εναλλακτικών μεθόδων για τον έλεγχο των υλικών, οι οποίες συμβάλλουν στην ανθεκτικότητα των κατασκευών και δεν παρουσιάζουν τους περιορισμούς των καταστροφικών μεθόδων. Οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι δοκιμών έχουν τη δυνατότητα εφαρμογής σε όλες τις φάσεις της κατασκευής και μπορούν να προσδιορίσουν πολλές ιδιότητες των υλικών, συμπεριλαμβανομένων των μηχανικών.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας με θέμα «Σύγκριση Εκτίμησης Αντοχής Χαλύβδινων Μελών με Καταστροφικές και μη Καταστροφικές Δοκιμές» είναι να παρουσιάσει τις σημαντικότερες μη καταστροφικές μεθόδους ελέγχου σκληρότητας των χαλύβδινων μελών. Επίσης, να αναλύσει την συσχέτιση της σκληρότητας με την εφελκυστική αντοχή. Τέλος, η μελέτη στοχεύει στην διερεύνηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των διαφόρων μεθόδων, έτσι ώστε να αποδειχθεί εάν μπορούν να συμβάλλουν στην σωστή κατεύθυνση αντικατάστασης των καταστρεπτικών δοκιμών, κάτι που αποτελεί στοιχείο καινοτομίας της παρούσας διπλωματικής, καθώς μετά από έρευνα διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει μεγάλο εύρος υλικού.

1.2 Διάρθρωση Εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αποτελείται συνολικά από δέκα κεφάλαια και χωρίζεται σε δύο σκέλη, το θεωρητικό και το πειραματικό.

Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφεται ο σκοπός και το βασικό αντικείμενο μελέτης της εργασίας. Επιπλέον, προσδιορίζονται τα ειδικά θέματα τα οποία αναλύονται σε κάθε κεφάλαιο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράμετροι που προσδιορίζουν την μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα. Επίσης, αναλύονται οι μη καταστροφικές και οι καταστροφικές μέθοδοι δοκιμών, συμπεριλαμβάνοντας τους ορισμούς, τις χρήσεις και τις διαφορές τους.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται διεξοδικά οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι εκτίμησης της σκληρότητας του χάλυβα με στατικές και δυναμικές δοκιμές. Παρουσιάζονται αναλυτικότερα η στατική μέθοδος Brinell και η δυναμική μέθοδος Leeb, οι οποίες εφαρμόζονται στην πράξη στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Αναφέρονται, επίσης, οι κανονιστικές διατάξεις των μεθόδων αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι καταστρεπτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, με μεγαλύτερη έμφαση στην εφελκυστική δοκιμή. Επιπλέον, αναλύονται οι κανονιστικές διατάξεις της δοκιμής εφελκυσμού.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφεται το πρώτο μέρος της πειραματική διαδικασίας. Αναλύονται οι διαδικασίες διαμόρφωσης και προετοιμασίας των δοκιμών, όπως, επίσης, και τα βήματα για την πραγματοποίηση των μη καταστροφικών δοκιμών στο σκληρόμετρο πάγκου και στο φορητό όργανο σκληρομέτρησης. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών και πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ τους.

Το έκτο κεφάλαιο αφορά τις δοκιμές εφελκυσμού, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ. Περιγράφονται αναλυτικά οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα των δοκιμών.

Στο έβδομο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία επισκόπηση της συσχέτισης του μεγέθους της σκληρότητας με την εφελκυστική αντοχή, με την καθοδήγηση και των προτύπων.

Το όγδοο κεφάλαιο σχετίζεται με την σύγκριση των τριών πειραματικών μεθόδων. Ειδικότερα, τονίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε δοκιμής και παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματά τους.

Στο ένατο κεφάλαιο παρατίθενται περιληπτικά τα συνολικά συμπεράσματα που προέκυψαν μέσα από την παρούσα εργασία.

Το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει όλες τις πηγές της εργασίας.

2 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΟΜΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

2.1 Εισαγωγή

Οι μηχανικές ιδιότητες (mechanical properties) προσδιορίζουν τη συμπεριφορά των δομικών υλικών σε καταπονήσεις λόγω εξωτερικών φορτίων ή περιβαλλοντικών επιπτώσεων και εκφράζουν τον τρόπο αντίστασής τους σε αυτά.

Ο χάλυβας αποτελεί το βασικότερο δομικό υλικό σύνθεσης του φέροντος οργανισμού, είτε αυτός κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα είτε από πρότυπες χαλύβδινες διατομές. Η μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα ποικίλει σε μεγάλο βαθμό ανάλογα με την χημική του σύνθεση και το ποσοστό προσμίξεων που διαθέτει. Ο δομικός χάλυβας είναι κράμα ενός μεταλλικού στοιχείου, του σιδήρου, με ένα μη μεταλλικό στοιχείο, τον άνθρακα με περιεκτικότητα έως 2%. Η ποσοστιαία περιεκτικότητα σε άνθρακα προσδιορίζει τις ιδιότητες του. Για παράδειγμα, με αύξηση του ποσοστού του άνθρακα στο κράμα του χάλυβα αυξάνεται η σκληρότητα και η αντοχή του σε εφελκυσμό, ενώ μειώνονται η πλαστιμότητα και η συνεκτικότητα. Παρόμοιες αλλαγές στην συμπεριφορά του παρατηρούνται και με την προσθήκη προσμίξεων όπως πυρίτιο, νικέλιο, μαγγάνιο κ.α.

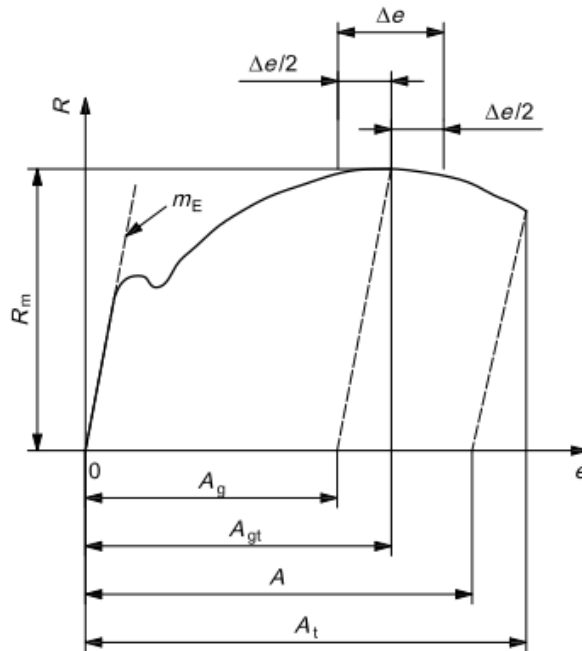
Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών, όπως και των διαφόρων δομικών χαλύβων, προσδιορίζει την απόκρισή τους ή αλλιώς την παραμόρφωση τους σε σχέση με το εφαρμοζόμενο φορτίο. Σημαντικές μηχανικές ιδιότητες κατά τον σχεδιασμό των κατασκευών από χάλυβα αποτελούν η αντοχή (σε εφελκυσμό, θλίψη, διάτμηση, κάμψη), η σκληρότητα, η δυσθραυστότητα, η δυσκαμψία, η ολκιμότητα και η αντοχή σε κόπωση. Πιο αναλυτικά:

- **Μηχανική Αντοχή** ορίζεται η ικανότητα των στερεών σωμάτων να αντέχουν στις εξωτερικές δυνάμεις που τείνουν να τα παραμορφώσουν, χωρίς αστοχία ή πλαστική παραμόρφωση. Το μέτρο της αντοχής τους προσδιορίζεται από την τιμή που παίρνουν οι τάσεις (εσωτερικές δυνάμεις) κατά τη στιγμή της θραύσης του σώματος. Τα μέταλλα γενικά παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε όλα τα είδη των καταπονήσεων (εφελκυσμός, θλίψη, κάμψη, διάτμηση, στρέψη).
- **Σκληρότητα** είναι η (επιφανειακή) αντίσταση που προβάλλει ένα υλικό σε διείσδυση ή φθορά από τριβή με άλλο υλικό.
- **Δυσθραυστότητα** λέγεται η ικανότητα του δομικού υλικού να απορροφά ενέργεια μέχρι το σημείο στο οποίο θα επέλθει η θραύση του.
- **Ολκιμότητα** είναι η ιδιότητα του χάλυβα να αποκρίνεται με ασφάλεια σε μεγάλες παραμορφώσεις. Η πλαστιμότητα ορίζεται ως η ικανότητα του στοιχείου να παραμορφώνεται πέραν της ελαστικής περιοχής χωρίς ουσιαστική μείωση της αντοχής του. Ολκιμότητα είναι

ιδιότητα του υλικού, ενώ η πλαστιμότητα είναι ιδιότητα μιας διατομής ή μιας κρίσιμης περιοχής ή ενός δομικού στοιχείου. Όσο περισσότερο όγκιμος είναι ο χάλυβας, τόσο μεγαλύτερη σεισμική ενέργεια μπορεί να απορροφήσει.

- Σε περιπτώσεις στις οποίες μια δεδομένη φόρτιση επαναλαμβάνεται πολλές φορές (χιλιάδες ή εκατομμύρια) η θραύση θα εμφανιστεί για μια τιμή της τάσης πολύ μικρότερη από το στατικό όριο θραύσης, παρόλο που οι τάσεις παραμένουν στην ελαστική περιοχή. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως **κόπωση**. Μια θραύση κόπωσης είναι ψαθυρής φύσης ακόμη και για υλικά τα οποία υπό κανονικές συνθήκες είναι όλκιμα.
- **Η δυσκαμψία** εκφράζει τη σχέση μεταξύ των δυνάμεων που ενεργούν σ' ένα μεμονωμένο στοιχείο ή σύστημα με τις παραμορφώσεις που προκαλούνται σ' αυτό. Πρόκειται ουσιαστικά για την αντίσταση στην αλλαγή του σχήματος ενός υλικού εντός της ελαστικής περιοχής. Το υλικό θα επανέλθει στην αρχική του κατάσταση όταν σταματήσει η φόρτιση.

Όσον αφορά την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς του δομικού χάλυβα, αυτή πραγματοποιείται με βάση το διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμίων υποκειμένων σε καθαρό εφελκυσμό, δηλαδή στατικό αξονικό εφελκυσμό, βαθμιαία αυξανόμενο μέχρι τη θραύση του.



Εικόνα 2-1: Τυπικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων [Πηγή: EN ISO 6892].

Σε χαμηλά φορτία η παραμόρφωση που δημιουργείται με την εφαρμογή ενός, συνεχώς, αυξανόμενου φορτίου εφελκυσμού μονοαξονικά είναι ελαστική. Αυτή η συμπεριφορά χαρακτηρίζει ψαθυρά υλικά, όπως το γυαλί. Η αποφόρτιση του δοκιμίου το οποίο έχει δεχθεί φορτίο στην ελαστική περιοχή δεν προσδίδει μόνιμες αλλαγές στις διαστάσεις του, αλλά το επαναφέρει στο αρχικό μέγεθος του. Έτσι, μπορεί κανείς να θεωρήσει την ελαστική ιδιότητα ως αναστρέψιμο χαρακτηριστικό της διαδικασίας παραμόρφωσης.

Στα μεταλλικά υλικά η σχέση τάσης/παραμόρφωσης δεν είναι γραμμική, αλλά εμφανίζει ένα τμήμα της καμπύλης στην ελαστική περιοχή η οποία εκτείνεται ελαφρώς και στην πλαστική περιοχή, υποδεικνύοντας μια μετάβαση από τον έναν τρόπο παραμόρφωσης στον άλλο. Η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή, η οποία καθορίζει το σημείο διαρροής, ήταν αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί στο παρελθόν, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνταν μηχανοσκόπια (strain gages). Σήμερα, χρησιμοποιούνται πολύ πιο ακριβείς εξοπλισμοί μέτρησης. Ωστόσο, είναι ακόμα

δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια αυτή η μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική συμπεριφορά. Η ανάγκη για έναν πρακτικό προσδιορισμό της διαρροής του υλικού οδήγησε σε μια μέθοδο για την αξιολόγησή του, γνωστή ως "ονομαστική αντοχή διαρροής-offset yield strength". Η ονομαστική αντοχή διαρροής αντιπροσωπεύει πρακτικά την αντοχή διαρροής για εφαρμογές στο πεδίο του μηχανικού. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιούνται τα αρχικά στάδια μιας εφελκυστικής δοκιμής για την αξιολόγηση της "αντοχής διαρροής". Για να βρεθεί η αντοχή διαρροής, εφαρμόζεται μια προκαθορισμένη ποσότητα μόνιμης τάσης κατά μήκος του άξονα παραμόρφωσης. Μια ευθεία γραμμή σχεδιάζεται παράλληλα με το γραμμικό τμήμα της καμπύλης τάσης/παραμόρφωσης. Το σημείο τομής αυτής της γραμμής και της καμπύλης τάσης/παραμόρφωσης προβάλλεται στον άξονα τάσης, προσδιορίζοντας έτσι την τάση διαρροής. Όταν αναφέρεται η τάση διαρροής, η ποσότητα της μετατόπισης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θα πρέπει να αναφέρεται ως "αντοχή διαρροής (σε μετατόπιση 0,2%)".

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής εφελκυσμού ενός όλκιμου υλικού, όπως του χάλυβα, υπάρχει ένα σημείο στο οποίο συγκεντρώνονται τοπικά σχετικά μεγάλες παραμορφώσεις και, ως αποτέλεσμα, προκύπτει μείωση της διατομής του. Το σημείο στο οποίο εμφανίζεται η αστάθεια είναι συνήθως κάποιο αδύναμο σημείο στο δοκίμιο. Όλη η περαιτέρω παραμόρφωση συγκεντρώνεται σε αυτό το σημείο με αποτέλεσμα μια επιταχυνόμενη παραμόρφωση του δοκιμίου, η οποία οδηγεί στην μείωση της διατομής σε αυτή την περιοχή. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται «λαιμός». Ο σχηματισμός λαιμού ή η μείωση της διατομής του δοκιμίου εμφανίζεται γρήγορα μέχρι να επέλθει η θραύση του.

Πιο συγκεκριμένα για το διάγραμμα τάσεων/παραμορφώσεων, το πρώτο σημαντικό σημείο σε μια τέτοια καμπύλη, όπως αυτή της παραπάνω εικόνας (Εικόνα 2-1), είναι το όριο διαρροής δηλαδή το σημείο που υποδεικνύει το όριο της ελαστικής συμπεριφοράς και την έναρξη της πλαστικής συμπεριφοράς του υλικού. Η αντοχή διαρροής ή τάση διαρροής είναι η ιδιότητα του υλικού που ορίζεται ως η τάση στην οποία ένα υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά, ενώ το σημείο διαρροής είναι το σημείο όπου αρχίζει η μη γραμμική παραμόρφωση. Πριν από το σημείο αυτό, το υλικό θα παραμορφωθεί ελαστικά και θα επανέλθει στο αρχικό του σχήμα όταν αφαιρεθεί η ασκούμενη τάση. Μόλις περάσει το σημείο διαρροής ένα μέρος της παραμόρφωσης θα είναι μόνιμο και μη αναστρέψιμο. Οι αντοχές διαρροής ποικίλλουν από 35 MPa για αλουμίνιο χαμηλής αντοχής έως και μεγαλύτερες από 1400 MPa για χάλυβες πολύ υψηλής αντοχής.

Το μέτρο ελαστικότητας (E) εκφράζει το βαθμό ακαμψίας του υλικού, δηλαδή την αντίσταση σε πλαστική παραμόρφωση. Το όριο διαρροής (f_y), όπως και το μέτρο ελαστικότητας, έχουν μεγάλη πρακτική σημασία, καθώς εκφράζουν την αντίσταση του υλικού σε μόνιμη παραμόρφωση και υποδεικνύουν την ευκολία με την οποία ένα μέταλλο μπορεί να διαμορφωθεί.

Η τελική αντοχή εφελκυσμού είναι η μέγιστη στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. Αυτή αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση που μπορεί να υποστεί μια κατασκευή σε εφελκυσμό. Εάν αυτή η τάση εφαρμοστεί και διατηρηθεί θα προκληθεί θραύση. Συχνά, αυτή η τιμή είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την τάση διαρροής (έως και 50 με 60 τοις εκατό). Όταν ένα όλκιμο υλικό φτάσει στην τελική του αντοχή σχηματίζεται λαιμός και το πλάτος της διατομής μειώνεται τοπικά, συνήθως σε μια περιοχή κοντά στο μέσο του δοκιμίου. Στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δεν εντοπίζεται μεγαλύτερη τάση από την τελική αντοχή. Παρόλο που οι παραμορφώσεις μπορούν να συνεχίσουν να αυξάνονται, η τάση, συνήθως μειώνεται αφού επιτευχθεί η τελική αντοχή. Η τιμή της δεν εξαρτάται από το μέγεθος του δοκιμίου, αλλά από παράγοντες όπως η προετοιμασία του δοκιμίου, η παρουσία ή όχι επιφανειακών ελαττωμάτων και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και του υλικού. Οι τελικές αντοχές σε εφελκυσμό ποικίλλουν από 50 MPa για αλουμίνιο έως και 3000 MPa για χάλυβες πολύ υψηλής αντοχής.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων διαφέρει από υλικό σε υλικό, και η καμπύλη μπορεί να παρουσιάζει πολύ διαφορετικό σχήμα.

2.2 Μη καταστροφικές μέθοδοι δοκιμών

Μη Καταστροφική Δοκιμή (NDT–Non Destructive Testing) ή Μη-Καταστροφικός Έλεγχος (NDI – Non Destructive Inspection) ονομάζεται η εξέταση και αξιολόγηση ενός αντικειμένου ή υλικού με μεθόδους οι οποίες δεν επιδρούν καθ' οποιονδήποτε τρόπο στην ακεραιότητα του υλικού ή στην καταλληλότητά του για χρήση. Αυτό σημαίνει ότι το εξεταζόμενο αντικείμενο δεν έχει καταστραφεί και μπορεί να συνεχίσει να χρησιμοποιείται.

Η NDT ορίζεται από την Αμερικανική Εταιρεία για Μη Καταστροφικές Δοκιμές (American Society for Non-destructive Testing - ASNT) ως: «Ο προσδιορισμός της φυσικής κατάστασης ενός αντικειμένου χωρίς να επηρεάζεται η ικανότητα αυτού του αντικειμένου να εκπληρώσει την προβλεπόμενη λειτουργία του. Οι μη καταστροφικές μέθοδοι δοκιμών συνήθως χρησιμοποιούν μια μορφή ενέργειας ανίχνευσης για να προσδιορίσουν τις ιδιότητες του υλικού ή για να υποδείξουν την παρουσία ασυνεχειών σε αυτό (επιφανειακές, εσωτερικές ή αφανείς)».

Στην πραγματικότητα, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στις μη καταστροφικές δοκιμές προσδιορίζουν τις φυσικές ιδιότητες των υλικών, όπως επίσης και πιθανές ανομοιομορφίες στις φυσικές τους ιδιότητες. Οι μη καταστροφικές μέθοδοι δοκιμών μπορούν να εφαρμοστούν σε δειγματοληπτική βάση για μεμονωμένες έρευνες ή μπορεί να χρησιμοποιηθούν για τον 100% έλεγχο του υλικού σε ένα σύστημα ποιοτικού ελέγχου παραγωγής.

Οι εφαρμογές των μη καταστροφικών ελέγχων καλύπτουν ένα τεράστιο φάσμα βιομηχανικών και κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και τις συναντάμε σχεδόν παντού, όπως για παράδειγμα στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροδιαστημική, στις κατασκευές, στη βιομηχανία, σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας, σε σιδηρόδρομους, σε αγωγούς αερίου και πετρελαιοαγωγούς, στην ιατρική.

Όσον αφορά τις κατασκευές, οι ΜΚΕ χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ποιότητας του υλικού από τα στάδια της πρώτης ύλης, της κατασκευής αλλά και επί τόπου στο έργο κατά τη χρήση του. Οι Μη-Καταστροφικοί Έλεγχοι μπορούν να εφαρμοστούν για να διαπιστωθεί η ύπαρξη και το μέγεθος των σφαλμάτων σε μια κατασκευή, χωρίς όμως να τη καταστρέψουν ούτε να επηρεάσουν τη λειτουργικότητά της.



Εικόνα 2-2: Μη καταστροφικός έλεγχος υλικών [Πηγή: Applus+BKW].

Εκτός από την δυνατότητα προσδιορισμού των ιδιοτήτων ενός υλικού και τον εντοπισμό σφαλμάτων που βρίσκονται στο εσωτερικό τους και είναι αδύνατο να εντοπιστούν με γυμνό μάτι, οι μη καταστροφικές δοκιμές προσφέρουν τη δυνατότητα διαστασιολόγησης μη εύκολα προσβάσιμων

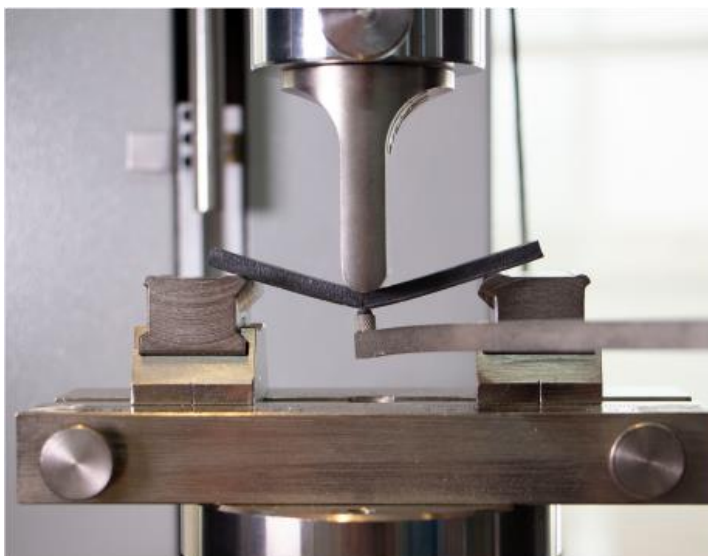
αντικειμένων, με εξασφάλιση υψηλής ποιότητας στο τελικό προϊόν και συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα (ISO, ASTM, κλπ).

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε μέθοδος ΜΚΕ έχει διαφορετικό βαθμό ακρίβειας που όμως ποτέ δεν φτάνει την απόλυτη ακρίβεια ενός Καταστροφικού Ελέγχου. Ωστόσο, οι ΜΚΕ είναι πολύ οικονομικότερες από τον καταστροφικό έλεγχο καθώς αφήνουν την κατασκευή άθικτη και διαθέσιμη για περαιτέρω έλεγχο ή λειτουργία. Παρέχει, έτσι, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο μια βέλτιστη ισορροπία μεταξύ του ποιοτικού ελέγχου και κόστους - αποτελεσματικότητας και το σημαντικότερο, χωρίς αρνητική επίδραση στη μετέπειτα χρήση τους.

2.3 Καταστροφικές μέθοδοι δοκιμών

Οι καταστροφικές δοκιμές (Destructive Testing - DT) διεξάγονται για να βρεθεί το ακριβές σημείο αστοχίας υλικών και δομικών στοιχείων. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, το εξεταζόμενο αντικείμενο υφίσταται πίεση που τελικά παραμορφώνει ή καταστρέφει το υλικό. Κατά συνέπεια, τα υπό εξέταση αντικείμενα ή υλικά δεν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε κανονική λειτουργία αφού υποβληθούν σε καταστροφικές μεθόδους δοκιμών.

Στις καταστροφικές δοκιμές το υλικό υποβάλλεται σε μηχανικές δοκιμές και τελικά απορρίπτεται. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συγκρίνονται με ορισμένα πρότυπα και προδιαγραφές. Οι κύριες καταστροφικές δοκιμές μετάλλων είναι η δοκιμή κάμψης, η δοκιμή σε κρούση, η δοκιμή σκληρομέτρησης, η δοκιμή εφελκυσμού, η δοκιμή κόπωσης και η δοκιμή αντοχής σε διάβρωση.



Εικόνα 2-3: Καταστροφική δοκιμή κάμψης [Πηγή: aimplas.net].

Ιστορικά, οι καταστροφικές δοκιμές ήταν η προτιμώμενη μέθοδος δοκιμών για τον έλεγχο των μετάλλων καθώς θεωρούνταν, σε μεγάλο βαθμό, ότι αποτελούσε τον μόνο τρόπο για εξαγωγή αποτελεσμάτων με ακρίβεια. Σε γενικές γραμμές, οι καταστροφικές μέθοδοι δοκιμών έχουν σχεδιαστεί για να κάνουν σκόπιμα ένα υλικό να αποτύχει, έτσι ώστε να μπορεί να αναλυθεί η στιβαρότητά του και να προσδιοριστεί το σημείο αστοχίας. Η ανάλυση και η καταγραφή της αστοχίας του υλικού μερικές φορές γίνεται με κάμερες υψηλής ταχύτητας, ανιχνευτές ήχου ή μετρητές πίεσης. Αυτό γίνεται για να εντοπιστεί η ακριβής στιγμή που συμβαίνει η αστοχία και να είναι δυνατή στη συνέχεια η μελέτη με μεγαλύτερη ανάλυση.

Συνήθως οι καταστροφικές μέθοδοι δοκιμών χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της απόδοσης, της αντοχής και της σταθερότητας ενός υλικού ή ενός προϊόντος προτού παραχθεί μαζικά και φτάσει στην ευρύτερη αγορά. Επίσης, οι καταστροφικές δοκιμές είναι συχνά πιο εύκολο να πραγματοποιηθούν και να ερμηνευθούν από τις αντίστοιχες μη καταστροφικές δοκιμές.

Πίνακας 2-1: Διαφορές Καταστρεπτικών και μη Καταστρεπτικών Δοκιμών [Πηγή: Limblecmms]

ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ
Τα υπό εξέταση δείγματα παραμορφώνονται ή καταστρέφονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής.	Τα υπό εξέταση δείγματα δεν καταστρέφονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής.
Διενεργούνται για την εξακρίβωση των χημικών και φυσικών ιδιοτήτων των ελεγχόμενων δοκιμίων.	Διενεργούνται για για την εύρεση ελαττωμάτων στο υλικό.
Είναι εξαιρετικά χρήσιμες για σχεδιαστικούς σκοπούς.	Είναι εξαιρετικές για τον εντοπισμό σημείων φθοράς και καταπόνησης του εξοπλισμού εργασίας.
Το υπό εξέταση αντικείμενο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον αρχικό σκοπό του.	Το αντικείμενο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κανονικά μετά τη δοκιμή (εάν διαπιστωθεί ότι δεν είναι ελαττωματικό).
Είναι πιο ακριβές και χρονοβόρες.	Είναι γρήγορες, εύκολες και σχετικά φθηνές.
Παραδείγματα: δοκιμή κάμψης, δοκιμή εφελκυσμού, έλεγχος διάβρωσης, δοκιμή θλίψης.	Παραδείγματα: Δοκιμές υπερήχων, δοκιμή με ακτινογραφίες, δοκιμή διείσδυσης, δοκιμή μαγνητικών σωματιδίων.

Το κύριο αρνητικό στοιχείο των καταστροφικών δοκιμών γίνεται προφανές από το όνομά του. Αυτό είναι ότι έχει ως αποτέλεσμα το δείγμα ή η περιοχή δοκιμής να υποστεί ανεπανόρθωτη βλάβη ή να καταστραφεί κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, κάτι που αποφεύγεται με τις μη καταστροφικές μεθόδους.

Συνεπώς, καταστροφικοί και μη καταστροφικοί έλεγχοι συνίστανται να εφαρμόζονται σε συνδυασμό κατά τον έλεγχο της αξιοπιστίας μιας μεθόδου, όπου τυχαία δείγματα ή δοκίμια ελέγχονται πρώτα με ΜΚΕ και στη συνέχεια με ΚΕ, με σκοπό να συγκριθούν τα αποτελέσματα τους και να οριστεί ή να ρυθμιστεί καλύτερα η ακρίβεια μιας μεθόδου.

3 ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Υπάρχει μεγάλο πλήθος μη καταστροφικών μεθόδων ή τεχνικών. Αυτές διαχωρίζονται σε στατικές και δυναμικές. Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζονται εκτενώς δύο μη καταστροφικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο σκληρότητας διαφόρων υλικών, συμπεριλαμβανομένου του χάλυβα. Επίσης, αναφέρονται οι περιορισμοί κάθε μεθόδου και οι κανονιστικές διατάξεις οι οποίες κατευθύνουν την εφαρμογή τους.

3.1 Σκληρότητα χάλυβα

Σύμφωνα με τους φιλόσοφους Δημόκριτο και Αριστοτέλη, η σκληρότητα αποτελεί καθοριστικό χαρακτηριστικό των στοιχείων της φύσης. Στην αρχαιότητα και στο Μεσαίωνα ο μόνος τρόπος για να ελεγχθεί η σκληρότητα των υλικών ήταν μέσω πρόχειρων δοκιμών με χρήση χαλύβδινων όπλων και εργαλείων. Μετά το τέλος του Μεσαίωνα οι ποσοτικές δοκιμές σκληρότητας αναπτύχθηκαν βήμα-βήμα, αρχικά στον τομέα της ορυκτολογίας. Στο δεύτερο μισό του 19ου αιώνα, με την κατασκευή των σιδηροδρόμων και την ανάπτυξη στον μηχανολογικό τομέα, προέκυψε η ανάγκη για έλεγχο της σκληρότητας των μετάλλων.

Ο όρος σκληρότητα δεν είναι μια νέα επιστημονική λέξη, αλλά προέρχεται από την καθημερινή γλώσσα. Τα ανθρώπινα δάχτυλα διαθέτουν αισθητήρες για την αξιολόγηση της σκληρότητας των αντικείμενων. Ως αποτέλεσμα, αναπτύσσεται ένας ασυνείδητος συσχετισμός της σκληρότητας με χαρακτηριστικά όπως η ανθεκτικότητα και η αντοχή στην τριβή, ένας συσχετισμός που δεν επιβεβαιώνεται πάντα από την επιστήμη των υλικών.

Η ταξινόμηση των υλικών ως προς τη σκληρότητά τους ξεκινά με τον βαθμό παραμόρφωσης που μπορεί να δημιουργηθεί σε ένα αντικείμενο με το χέρι ή με ένα σκληρό και αιχμηρό αντικείμενο. Το είδος της παραμόρφωσης (πλαστικό ή ελαστικό), μέσω αυτής της καθημερινής εμπειρίας, δεν είναι σημαντικό. Αυτό που είναι κρίσιμο είναι ότι συνδέεται με τον όρο σκληρότητα η ικανότητα ενός σώματος να αντιμετωπίσει τη διείσδυση ενός άλλου σώματος με μια συγκεκριμένη αντίσταση. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση στην παραμόρφωση, τόσο πιο σκληρό εμφανίζεται το σώμα. Από αυτή την καθημερινή εμπειρία προκύπτει ένας ορισμός της σκληρότητας που χρησιμοποιείται γενικά στην επιστήμη των υλικών. Η μέτρηση της σκληρότητας πολύ σκληρών, και πιο χρήσιμων τεχνικά, υλικών είναι δυνατή μόνο με κατάλληλες συσκευές δοκιμών.

Στην επιστήμη των υλικών, η σκληρότητα (hardness) ορίζεται ως η ικανότητα να αντέχει ένα σώμα σε επιφανειακή διείσδυση (τοπική πλαστική παραμόρφωση) και χάραξη κάποιου άλλου, σκληρότερου

εισβολέα, υπό φορτίο. Η σκληρότητα είναι ίσως η πιο κακώς καθορισμένη ιδιότητα του υλικού επειδή μπορεί να υποδηλώνει αντοχή σε εγχάραξη, αντοχή στην τριβή, αντοχή σε δεισδυση, αντοχή σε λείανση ή ακόμα και αντοχή σε παραμένουσα ή τοπική πλαστική παραμόρφωση.

«Σκληρότητα είναι η ορθή τάση που αναπτύσσεται στο κέντρο της κυκλικής επιφάνειας επαφής δύο συνθλιβομένων σφαιρών τη στιγμή που αρχίζει να εμφανίζεται η πλαστική παραμόρφωση», σύμφωνα με τον Hertz. Ο Martens αναφέρθηκε στη σκληρότητα ως «την αντίσταση με την οποία ένα σώμα αντισταθμίζει τη δεισδυση ενός άλλου (λιγότερο παραμορφώσιμου) σώματος».

Ως σκληρότητα του χάλυβα θεωρείται η αντίσταση που προβάλλει η επιφάνεια ενός μετάλλου στην προσπάθεια κάθετης παραμόρφωσης της επιφάνειάς του και εξαρτάται από τη φύση του μετάλλου, την κρυσταλλική του δομή και τις τεχνικές κατασκευής και κατεργασίας του. Μεγαλύτερη σκληρότητα συνεπάγεται μεγαλύτερη αντοχή σε παραμόρφωση.

Οι χάλυβες αποτελούν κράματα σιδήρου με άνθρακα τα οποία μπορεί να περιέχουν αξιόλογες συγκεντρώσεις και άλλων στοιχείων. Η προσθήκη μικρής ποσότητας μη μεταλλικού άνθρακα στο σίδηρο ανταλλάσσει τη μεγάλη ολκιμότητα του με μεγαλύτερη αντοχή. Λόγω της πολύ υψηλής αντοχής, αλλά και της σημαντικής σκληρότητάς του και της ικανότητάς του να μεταβάλλεται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμική επεξεργασία, ο χάλυβας είναι ένα από τα πιο χρήσιμα και κοινά κράματα σιδήρου στη σύγχρονη εποχή. Υπάρχουν χιλιάδες κράματα που παρουσιάζουν διαφορετικές συνθέσεις ή/και θερμικές επεξεργασίες.

Είναι γενικά γνωστό ότι η σκληρότητα των μεταλλικών κραμάτων είναι μεγαλύτερη από τη σκληρότητα των επιμέρους στοιχείων τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι δυνάμεις σύνδεσης μεταξύ μορίων που διαφέρουν μεταξύ τους είναι μεγαλύτερες από εκείνες μεταξύ μορίων που είναι παρόμοια μεταξύ τους. Αυτός είναι ο λόγος που η προσθήκη ξένων στοιχείων σε ένα μέταλλο οδηγεί, επιπλέον, σε αύξηση της σκληρότητας. Έτσι, η σκληρότητα ενός μετάλλου εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων του. Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των κόκκων, τόσο μεγαλύτερη είναι η σκληρότητα.

Μέσω της σκληρομέτρησης προσφέρεται η δυνατότητα προσδιορισμού της σκληρότητας σε οποιοδήποτε υλικό, όλκιμο ή ψαθυρό, μέταλλο ή αμέταλλο. Οι περισσότερες μέθοδοι προσδιορισμού της σκληρότητας χρησιμοποιούν έναν κατάλληλο δεισδυτή, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από διαμάντι ή χάλυβα υψηλής αντοχής. Κατά τη δοκιμή της σκληρομέτρησης ο δεισδυτής παραμορφώνεται ελαστικά, ενώ δημιουργεί στο υπό εξέταση δοκίμιο τοπικές πλαστικές παραμορφώσεις.

Υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγορίες μεθόδων μέτρησης της σκληρότητας:

- Οι **στατικές**, οι οποίες πραγματοποιούνται μέσω δεισδυσης και οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μέτρηση της σκληρότητας των μετάλλων.
- Οι **δυναμικές**, οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν σε δοκίμια σύνθετης γεωμετρίας αλλά και σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Μέσω **χάραξης**, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στην ορυκτολογία (σκληρότητα διαμαντιού και πολύτιμων λίθων).

Στην πραγματικότητα, υπάρχουν και άλλες μέθοδοι, λιγότερο διαδεδομένες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη σκληρομέτρηση συγκεκριμένων υλικών, όπως το γυαλί ή το ξύλο. Ωστόσο, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην σκληρότητα του χάλυβα και θα αναλυθούν οι στατικές και οι δυναμικές μέθοδοι προσδιορισμού της σκληρότητας μόνο αυτού του υλικού.

3.2 Στατικές δοκιμές σκληρότητας

Οι μετρήσεις σκληρότητας σε μέταλλα πραγματοποιούνται εδώ και πολλούς αιώνες. Οι περισσότερες από τις μεθόδους σκληρομέτρησης που τυποποιούνται σήμερα καθιερώθηκαν πριν από το 1930 και, σε μεγάλο βαθμό, παρέμειναν αμετάβλητες. Ένα μέρος αυτών των μετρήσεων αποτελούν ελέγχους στατικών δοκιμών, δηλαδή ελέγχους κατά τους οποίους η δύναμη εφαρμόζεται στο υπό εξέταση δοκίμιο χωρίς κραδασμούς και κατά τη διάρκεια ενός προκαθορισμένου ελάχιστου χρόνου. Αυτή η έννοια περιέχει μια περιγραφή των πιο σημαντικών χαρακτηριστικών και προδιαγραφών των στατικών δοκιμών που χρησιμοποιούνται ευρέως σε μεγάλο βαθμό λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν.

Η απλότητα με την οποία πραγματοποιούνται οι στατικές δοκιμές σκληρότητας, καθώς επίσης και ο μικρός χρόνος που απαιτείται για την εξαγωγή μίας μέτρησης, είχαν ως αποτέλεσμα να εφαρμόζονται οι δοκιμές αυτές ευρύτερα στον κόσμο. Στις στατικές μεθόδους μέτρησης της σκληρότητας ένας διεισδυτής πολύ σκληρού υλικού και κατάλληλης γεωμετρικής μορφής πιέζεται με προκαθορισμένη δύναμη κάθετα στην επιφάνεια του υπό εξέταση δοκιμίου. Το υλικό του δοκιμίου είναι πάντα λιγότερο σκληρό από αυτό του διεισδυτή. Ο διεισδυτής είναι είτε ένας κατάλληλος κυκλικός κώνος με στρογγυλεμένη αιχμή από διαμάντι (κυκλικός κώνος με ακτίνα καμπυλότητας 120°, 0.2 mm), είτε μια σφαίρα από σκληρό μέταλλο (διάμετρος σφαίρας 1.5875 mm ή 3,175 mm ή, εάν απαιτείται από τις προδιαγραφές του προϊόντος ακόμα και 6.350 mm ή 12.70 mm).

Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι χαρακτηρισμού της σκληρότητας στα μέταλλα, δηλαδή οι Brinell, Vickers και Rockwell αναπτύχθηκαν μεταξύ 1900 με 1925. Οι μέθοδοι αυτοί είναι απλοί, γρήγοροι, σχετικά εύκολοι και μπορούν να συσχετιστούν άμεσα με την αντοχή σε εφελκυσμό. Δεδομένου ότι η σκληρότητα αποτελεί μια μηχανική ιδιότητα, οι μέθοδοι αυτοί σχετίζονται, επίσης, με την αντοχή του υλικού έναντι φθοράς, πλαστικών ή μόνιμων παραμορφώσεων και με την ικανότητα του να προκαλεί εσοχές ή να φθείρει άλλα υλικά.

Πιο αναλυτικά, η σκληρότητα κατά **Brinell** υποδηλώνει την ικανότητα ενός μετάλλου να αντιστέκεται σε μόνιμη παραμόρφωση από διείσδυση. Αποτελεί μία οπτική μέθοδο καθώς για να προσδιοριστεί η τιμή σκληρότητας του υπό εξέταση δοκιμίου χρησιμοποιείται το μέγεθος του αποτυπώματος που απομένει από τον διεισδυτή.

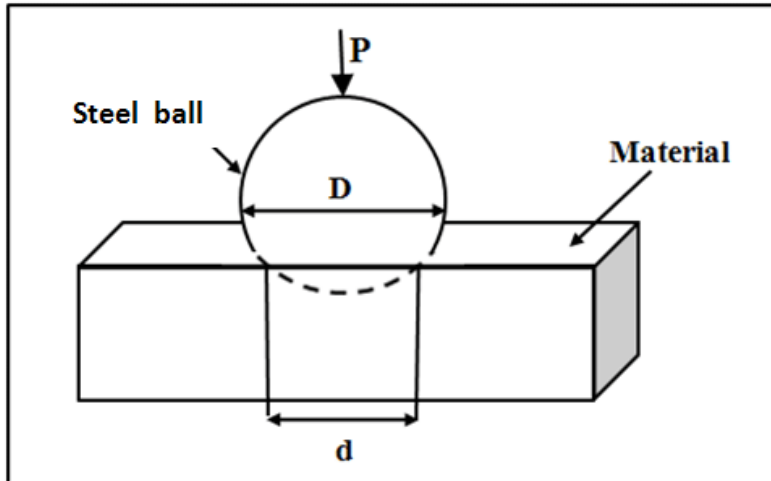
Το σχήμα του διεισδυτή είναι σφαιρικό με διάμετρο 1, 2.5, 5 ή 10 mm, ενώ το υλικό του από καρβίδιο βολφαρμίου είναι τρεις φορές πιο σκληρό από ότι ο χάλυβας. Η μικρή σφαίρα πιέζεται με σταθερό φορτίο και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, από 10 έως 30 δευτερόλεπτα, κάθετα στο δοκίμιο. Μετά το πέρας του πειράματος, μετρώνται οι διαστάσεις του αποτυπώματος που απομένει και η σκληρότητα υπολογίζεται με έναν προκαθορισμένο τύπο (3-1). Προκύπτει, έτσι, ο αριθμός Brinell (HBW) ο οποίος προσδιορίζει την σκληρότητα του δοκιμίου. Όσο σκληρότερο είναι το υλικό, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός HBW.

Ο αριθμός σκληρότητας κατά Brinell (HBW) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$HBW = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right)} \quad (3-1)$$

Όπου:

- F (N) = η δύναμη που εφαρμόζεται
- D (mm) = η διάμετρος της σφαίρας
- d (mm) = η μέση τιμή της διαμέτρου του αποτυπώματος ($d = \frac{d_1 + d_2}{2}$)



Εικόνα 3-1: Απεικόνιση της μεθόδου Brinell [Πηγή: researchgate.net].

Στη μέθοδο **Vickers** ο διεισδυτής είναι μια ισόπλευρη πυραμίδα (με τετραγωνική βάση) από διαμάντι, με επίπεδη γωνία 136° . Αυτή η μορφή διεισδυτή έχει το ιδιαίτερο πλεονέκτημα να ισχύει ο νόμος των αναλογικών αντιστάσεων. Αυτός ο νόμος υποδηλώνει ότι η δύναμη εφαρμογής της δοκιμής και η επιφάνεια εσοχής είναι ανάλογες μεταξύ τους. Έτσι, η τιμή σκληρότητας, σύμφωνα με τον Vickers, είναι ανεξάρτητη από την επιλεγμένη δύναμη δοκιμής. Η γωνία μεταξύ των απέναντι όψεων της πυραμίδας του διεισδυτή προσδιορίστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε, σε ένα σχετικά μεγάλο εύρος, οι τιμές σκληρότητας Vickers να πλησιάζουν πολύ τις τιμές σκληρότητας Brinell. Αυτή η μέθοδος ενδείκνυται για δοκιμές σε όλα τα μέταλλα.

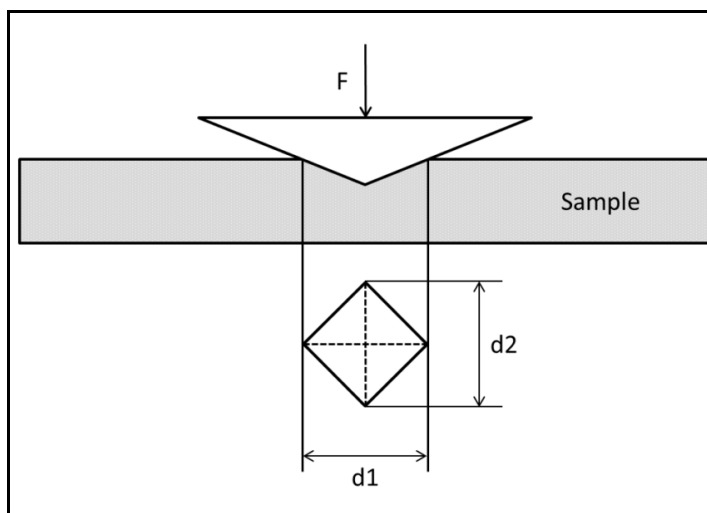
Η μέθοδο Vickers αποτελεί, επίσης, μια οπτική μέθοδο, καθώς μετράται το μέγεθος της εσοχής που απομένει από το διεισδυτή στο δοκίμιο για να προσδιοριστεί η τιμή της σκληρότητας του. Κατά την δοκιμή ο εισβολέας διεισδύει στο δοκίμιο υπό σταθερό φορτίο, το οποίο παραμένει για σταθερό χρονικό διάστημα. Η διάρκεια εφαρμογής της δύναμης δοκιμής, συνήθως, ανέρχεται σε 10 έως 15 δευτερόλεπτα. Διαφορετικά πρέπει να αναγράφεται στον αριθμό σκληρότητας. Η δύναμη η οποία επιβάλλεται στο δοκίμιο πρέπει να αυξηθεί από το μηδέν στην τελική της τιμή σε 2 έως 8 δευτερόλεπτα. Για να μειωθεί η αβεβαιότητα της μέτρησης, συνιστάται ο περιορισμός του χρόνου εφαρμογής μεταξύ 5 και 8 δευτερολέπτων.

Από την διείσδυση δημιουργείται ένα τετραγωνικό αποτύπωμα με διαγωνίους μήκους d_1 και d_2 . Αν d είναι η μέση τιμή των δύο διαγωνίων, η επιφάνεια του αποτυπώματος δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$A = \frac{d^2}{2 \times \sin 68^\circ} \quad (3-2)$$

Η σκληρότητα κατά Vickers (HV) ορίζεται ως το ηγλικό του μέγιστου φορτίου διείσδυσης (F) προς την επιφάνεια της εναπομένουσας εσοχής (A), μετά την αφαίρεση της δύναμης δοκιμής.

$$HV = \frac{0.102 \times F}{A} \quad (3-3)$$



Εικόνα 3-2: Απεικόνιση της μεθόδου Vickers [Πηγή: <https://swissproficiency.com>].

Από αυτό προκύπτει ότι:

$$HV = \frac{0.102 \times 1.854 \times F}{d^2} \quad (3-4)$$

Όπου:

- F (N) = το φορτίο διείσδυσης
- d (mm) = η μέση τιμή των διαγωνίων του αποτυπώματος

Η μεγαλύτερη δυνατή δύναμη εφαρμογής στη δοκιμή είναι αυτή των F=980.7 N (100 kgf). Μετά από αυτήν οι δυνάμεις δοκιμής μειώνονται βαθμιαία σε 980.7 N, 490.3 N, 294.2 N, 196.1 N, 98.07 N, 49.03 N και ούτω καθεξής.

Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο ISO 6507 κατά την δοκιμή Vickers επιτρέπονται μόνο διεισδυτές με διάμετρο μεταξύ 20 μm και 1,4 mm. Το πάχος του δοκιμίου πρέπει να είναι τουλάχιστον 1,5 φορές τη διαγώνιο του αποτυπώματος το οποίο προκύπτει μετά την εφαρμογή της δύναμης, δηλαδή το ελάχιστο πάχος του δοκιμίου πρέπει να είναι μεταξύ 0.085 και 6.5 mm.

Η δήλωση της τιμής σκληρότητας, σύμφωνα με τον Vickers, πρέπει να περιέχει το μέγεθος της δύναμης που εφαρμόζεται και την χρονική διάρκεια εφαρμογής της στη δοκιμή, σε περίπτωση που δεν βρίσκεται εντός του διαστήματος από 10 έως 15 sec. Για παράδειγμα, η τιμή 510 HV 10/30 υποδηλώνει ότι η σκληρότητα Vickers 510 μετρήθηκε με δύναμη δοκιμής 98,07 N (10 kgf) και χρόνο εφαρμογής της δύναμης 30 sec.

Πλεονεκτήματα της δοκιμής Vickers θεωρούνται:

- Η μη ύπαρξη περιορισμών σε σχέση με τη σκληρότητα του δοκιμίου ή το μέγεθος της επιφάνειας δοκιμής.
- Η πρόκληση ελαφριών, μόνο, βλαβών στο υπό εξέταση δοκίμιο από την επιβολή της δύναμης.
- Η εφαρμογή έως και πολύ μικρών δυνάμεων κατά την δοκιμή, εάν ληφθούν υπόψη οριακές συνθήκες.

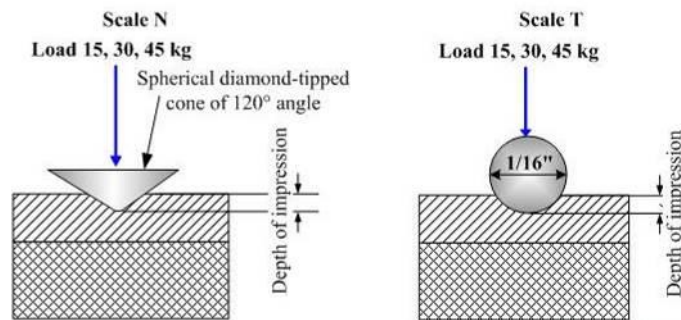
Ενώ, μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν:

- Η σημαντική δαπάνη χρόνου για την προετοιμασία των δοκιμίων και τη μέτρηση του αποτυπώματος.

- Η μεγάλη ευαισθησία σε κρούσεις και κραδασμούς.

Τέλος, η δοκιμή **Rockwell** είναι, γενικά, πιο εύκολη στην εκτέλεση και πιο ακριβής από άλλες στατικές μεθόδους μέτρησης της σκληρότητας. Ο διεισδυτής είναι είτε ένας κώνος διαμαντιού (με γωνία κώνου 120°), είτε μια σφαίρα από σκληρό μέταλλο (με $1/16$ -inch ακτίνας). Στη μέθοδο αυτή, η συνολική δύναμη δοκιμής εφαρμόζεται σε δύο φάσεις και μετριέται το βάθος διείσδυσης του εισβολέα.

Αρχικά, ο κώνος ή η σφαίρα τοποθετούνται χωρίς φορτίο στην επιφάνεια του δοκιμίου. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η αρχική δύναμη (δύναμη προφόρτισης ή μικρό φορτίο) με σκοπό να διαπεραστεί το επιφανειακό υλικό του υπό εξέταση αντικειμένου και να μην επιδράσει στο αποτέλεσμα της σκληρομέτρησης. Καθορίζεται, έτσι, ένα επίπεδο αναφοράς (h_0). Στην δεύτερη φάση εφαρμόζεται μία επιπλέον δύναμη (κύριο φορτίο), ώστε να επιτευχθεί το συνολικό απαιτούμενο φορτίο δοκιμής. Αυτή η δύναμη διατηρείται για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα (χρόνος παραμονής) με αποτέλεσμα ο διεισδυτής να φτάσει σε ένα βάθος h_1 . Στο πέρας αυτού του διαστήματος απελευθερώνεται το κύριο φορτίο, επιστρέφοντας στο προκαταρκτικό φορτίο, για ένα καθορισμένο χρόνο παραμονής, με αποτέλεσμα ο διεισδυτής να κινηθεί προς τα πάνω σε ένα ψηλότερο επίπεδο σε βάθος h_2 .



Εικόνα 3-3: Απεικόνιση της μεθόδου Rockwell [Πηγή: SubsTech].

Τα αρχικά φορτία της δοκιμής (προφορτίσεις) κυμαίνονται από 3 kgf έως 10 kgf, ενώ οι συνολικές δυνάμεις κυμαίνονται από 15 kgf έως 150 kgf (επιφανειακή και κανονική). Τέλος, ο αριθμός σκληρότητας Rockwell (HR) προκύπτει χρησιμοποιώντας το υπολειπόμενο βάθος ($h = h_2 - h_1$) της εσοχής. Η σκληρότητα Rockwell ορίζεται ως:

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad (3-5)$$

Όπου:

- N = αριθμητική τιμή (σταθερή)
- h = υπολειπόμενο βάθος διείσδυσης (σε mm)
- S = διαίρεση κλίμακας (σε mm)

Στις περισσότερες περιπτώσεις, η τιμή σκληρότητας υποδεικνύεται απευθείας στο μηχάνημα σκληρομετρήσεων. Ουσιαστικά, η σκληρότητα Rockwell ορίζεται αυθαίρετα και, ως εκ τούτου, θα πρέπει να θεωρείται μόνο ως χαρακτηριστικό του υλικού, χωρίς καμία πρόσθετη επεξήγηση. Οι αριθμητικές τιμές, N , ορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το αποτέλεσμα της δοκιμής να μπορεί να υπολογιστεί εύκολα, και η διαίρεση κλίμακας, S , να μπορεί να υπολογιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνεται η απαιτούμενη ανάλυση. Για να προκύψει όσο το δυνατόν ευρύτερο φάσμα εφαρμογής της διαδικασίας, αναπτύχθηκαν αρκετές δοκιμές Rockwell οι οποίες δηλώνονται με ένα πρόσθετο κεφαλαίο γράμμα μετά το HR. Οι διάφορες διαδικασίες διαφέρουν:

- Στον διεισδυτή

- Στο μέγεθος της δύναμης δοκιμής ή της προκαταρκτικής δύναμης δοκιμής
- Στην αριθμητική τιμή (N)
- Στη διαίρεση κλίμακας (S)

Μία διαίρεση κλίμακας της σκληρότητας Rockwell αντιστοιχεί σε βάθος διείσδυσης 1 ή 2 μm, το οποίο θέτει αντίστοιχες απαιτήσεις στη συσκευή μέτρησης της διείσδυσης. Όταν χρησιμοποιούνται κωνικές αιχμές διαμαντιού πρέπει να λαμβάνεται αυστηρή προσοχή για τη βαθμονόμηση και την πιστοποίησή τους εκ των προτέρων. Διαφορετικοί διεισδυτές μπορεί να οδηγήσουν σε πολύ διαφορετικά αποτελέσματα.

Όσον αφορά τη χρήση του διεισδυτή, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη ότι ανάλογα με την ποσότητα της δύναμης δοκιμής και τη σκληρότητα του δοκιμίου θα πρέπει να χρησιμοποιούνται διεισδυτές διαφορετικού μεγέθους για την εξαγωγή του μεγέθους της σκληρότητας. Για το ελάχιστο πάχος του δοκιμίου τα κανονιστικά πρότυπα ISO και ASTM ορίζουν μόνο ότι δεν πρέπει να είναι ορατή καμία παραμόρφωση στην κάτω πλευρά του δοκιμίου μετά την εφαρμογή των δυνάμεων. Όσον αφορά τις αποστάσεις μεταξύ των εσοχών και την άκρη του δοκιμίου, τα πρότυπα ορίζουν ως προαπαιτούμενη απόσταση την τετραπλάσια απόσταση της διαμέτρου που προκύπτει κατά την δοκιμή, και σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη ή ίση από 2 mm.

Επιπλέον, σημασία έχει η επίδραση του χρόνου κατά τον οποίο η δύναμη δοκιμής αυξάνεται από το μηδέν στην τελική της τιμή και η επίδραση της διάρκειας εφαρμογής της δύναμης στο αποτέλεσμα της δοκιμής. Οι χρόνοι καθορίζονται στα πρότυπα ISO και ASTM. Έχουν θεσπιστεί οι παρακάτω κατευθυντήριες γραμμές:

1. Ο χρόνος εφαρμογής της προκαταρκτικής δύναμης δοκιμής δεν προσδιορίζεται λεπτομερώς, αλλά ως άθροισμα συνάρτησης. Για μηχανές σκληρομετρήσεων με ηλεκτρονικό έλεγχο:

$$T_p = T_a/2 + T_{pm} = (3 \pm 1) \text{ s}$$

Όπου:

T_p = συνολικός χρόνος της προκαταρκτικής δύναμης δοκιμής

T_a = χρόνος εφαρμογής της προκαταρκτικής δύναμης δοκιμής

2. Ο χρόνος της δοκιμής καθορίζεται σε $4 \pm 2\text{s}$.
3. Η διάρκεια εφαρμογής της δύναμης πριν από την εφαρμογή της πρόσθετης δύναμης ανέρχεται σε 3 δευτερόλεπτα κατ' ανώτατο όριο.
4. Ο χρόνος εφαρμογής της πρόσθετης δύναμης δοκιμής υποδεικνύεται σε 1 έως 8 δευτερόλεπτα.
5. Οι χρόνοι αφαίρεσης της δύναμης δοκιμής και η διάρκεια της προκαταρκτικής δύναμης δοκιμής πριν από την ανάγνωση του υπολειπόμενου βάθους διείσδυσης, h , δεν έχουν καθοριστεί αριθμητικά.

Συνοψίζοντας, οι δοκιμές σκληρομέτρησης με τη μέθοδο Rockwell παρουσιάζουν κάποια βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Πλεονεκτήματά της θεωρούνται:

- Η χαμηλή δαπάνη χρόνου για τις δοκιμές (χωρίς περίπλοκη προετοιμασία δοκιμίων, άμεση ένδειξη της τιμής σκληρότητας).
- Η, σχετικά, οικονομική μηχανή δοκιμών σκληρότητας.
- Η αυτοματοποίηση της διαδικασίας.

Ενώ, μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν:

- Η κακή διαφοροποίηση των υλικών με αυξανόμενη σκληρότητα.
- Οι άγνωστες επιδράσεις του διεισδυτή στο αποτέλεσμα της δοκιμής. Οι επιδράσεις αυτές μειώνονται με διεισδυτές που έχουν βαθμονομηθεί σε προηγούμενες δοκιμές.

Τέλος, τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων με τις διάφορες στατικές μεθόδους δοκιμών παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με χαρακτηριστικά των υλικών. Τέτοιες πληροφορίες είναι:

- Ο προσδιορισμός του υλικού.
- Ο έλεγχος ορθής διαδικασίας της θερμικής κατεργασίας.
- Ο έλεγχος ποιότητας των επιφανειακών κατεργασιών.
- Η συμπεριφορά και η αντοχή του υλικού κατά τη διάρκεια του χρόνου.
- Η συμπεριφορά του υλικού σε συνθήκες φθοράς και καταπόνησης.
- Ο έλεγχος μείωσης της αντοχής μετά από θερμική κατεργασία.
- Η αντοχή σε εφελκυσμό.

3.2.1 Δοκιμή σκληρότητας κατά Brinell

Ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς ενός μεταλλικού υλικού είναι εφικτός μόνο όταν είναι γνωστά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του. Δηλαδή, θα πρέπει να είναι γνωστό από ποιο φορτίο και έπειτα το υλικό θα παραμορφωθεί κατά τρόπο μη αντιστρεπτό, προκαλώντας αλλαγές στη γεωμετρία του και ποιο είναι το οριακό φορτίο που είναι δυνατόν να αντέξει πριν την θραύση του.

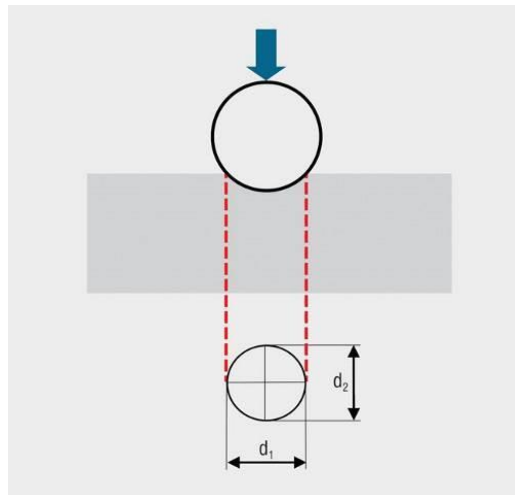
Η σκληρότητα, όπως και η αντοχή σε εφελκυσμό είναι ενδείξεις της αντίστασης ενός μετάλλου στην πλαστική παραμόρφωση. Ο J.A. Brinell πρότεινε την πρώτη ευρέως αποδεκτή και τυποποιημένη δοκιμή σκληρότητας το 1900. Η μέθοδος Brinell, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελεί μία μη καταστρεπτική στατική μέθοδο δοκιμής σκληρότητας. Πρόκειται για μια μέθοδο μέτρησης της σκληρότητας που υπαγορεύεται από τα πρότυπα ISO 6506-1, ASTM E10-15, JIS Z 2243.

Κατά την δοκιμή χρησιμοποιείται εξειδικευμένο μηχάνημα, γνωστό ως σκληρόμετρο πάγκου, για να εξαναγκάσει έναν διεισδυτή, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, μέσα στην επιφάνεια του υπό δοκιμή υλικού. Η διάμετρος του προκύπτοντος κυκλικού αποτυπώματος (d) μετράται μετά την αποφόρτιση.

Η μέθοδος Brinell εφαρμόζεται με ένα προκαθορισμένο δοκιμαστικό φορτίο (F), εύρους από 1 έως 3000 kgf. Το φορτίο αυτό συγκρατείται για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (10-15 sec) και στη συνέχεια αφαιρείται. Το χρονικό διάστημα απαιτείται να είναι αρκετό ώστε να ολοκληρώνεται η δημιουργούμενη πλαστική παραμόρφωση. Το σχήμα του διεισδυτή είναι σφαιρικό (συνήθεις διάμετροι: 2.5, 5, 10 mm), ενώ το υλικό του απαιτείται να είναι αρκετά σκληρότερο από αυτό του δοκιμίου. Ένα αρκετά σκληρό μέταλλο το οποίο χρησιμοποιείται συχνά είναι το βολφράμιο (tungsten).

Η σκληρότητα κατά Brinell (HBW=Hardness Brinell Wolfram carbide) προκύπτει από το πηλίκο της εφαρμοζόμενης δύναμης δοκιμής (F σε N) προς την επιφάνεια του αποτυπώματος πάνω στο δοκίμιο μετά την αφαίρεση της δύναμης. Για τον υπολογισμό της επιφάνειας του κυκλικού αποτυπώματος χρησιμοποιείται η διάμετρος της προκύπτουσας διείσδυσης (αποτύπωσης). Για μεγαλύτερη ακρίβεια, μετράται η διάμετρος σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις. Η τιμή της σκληρότητας, όπως ορίζεται με τη μέθοδο Brinell (HBW), προκύπτει από τη μέση τιμή των παραπάνω μετρήσεων της διαμέτρου.

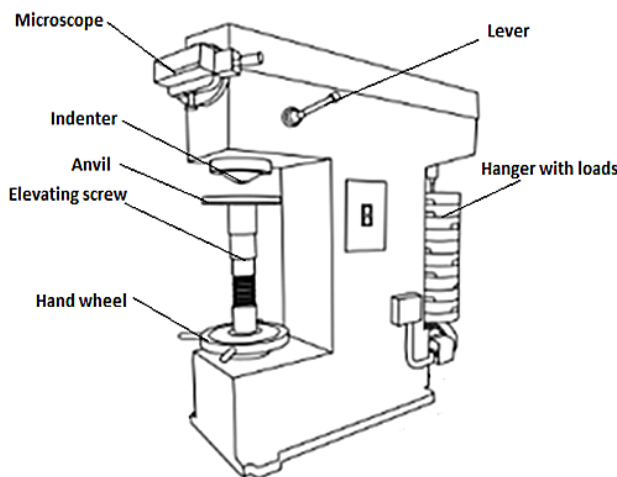
Το αποτύπωμα που προκύπτει μετράται με ένα ειδικά σχεδιασμένο μικροσκόπιο Brinell ή ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο στις δύο διαμέτρους (d_1 , d_2), οι οποίες βρίσκονται, κατά προτίμηση, σε ορθή γωνία μεταξύ τους (Εικόνα 3-4).



Εικόνα 3-4: Διεισδυτής Brinell και αποτύπωμα [Πηγή: struers.com].

Το μηχάνημα δοκιμών σκληρότητας Brinell ή σκληρόμετρο πάγκου (Εικόνα 3-5) αποτελείται από ένα σύστημα επιβολής φορτίου που περικλείεται στο σώμα του μηχανήματος. Το εξεταζόμενο δοκίμιο συγκρατείται στο ρυθμιζόμενο αμόνι. Χρησιμοποιώντας το μοχλό η σφαίρα-διεισδυτής κατεβαίνει προς το υλικό με μια προαποφασισμένη δύναμη η οποία αναγράφεται στην οθόνη. Οι δυνάμεις δοκιμής κυμαίνονται από 500 kgf, οι οποίες χρησιμοποιούνται, συνήθως, για μη σιδηρούχα υλικά έως 3000 kgf για χάλυβες και χυτοσίδηρο.

Υπάρχουν τέσσερα μεγέθη σφαιράς που χρησιμοποιούνται κατά τη δοκιμή (1 mm, 2,5 mm, 5 mm και 10 mm). Για να ληφθεί το ίδιο HBW με διαφορετικές διαμέτρους σφαιράς, πρέπει να δημιουργηθούν γεωμετρικά παρόμοιες εσοχές. Αυτό συμβαίνει εφόσον ο λόγος F/D διατηρείται σταθερός.



(α)



(β)

Εικόνα 3-5: Σταθερό σκληρόμετρο πάγκου Brinell [Πηγή: sinowon.com].

Μόλις μετρηθεί η μέση διάμετρος του αποτυπώματος, υπολογίζεται ο αριθμός σκληρότητας Brinell (HBW) χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$HBW = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right)} \quad (3-6)$$

Σε περίπτωση που το φορτίο δίνεται σε kgf, τότε από την παραπάνω σχέση παραλείπεται η σταθερά 0,102.

Ο χαρακτηρισμός στην κλίμακα HBW δίνεται με τη μορφή, για παράδειγμα "600 HBW 1/30/20". Αυτό ερμηνεύεται ως σκληρότητα 600 Brinell, με χρήση σφαίρας διαμέτρου 1 mm, υπό φορτίο 30 kgf (294,2 N) και για χρόνο εφαρμογής της δύναμης 20 δευτερολέπτων. Στην περίπτωση όπου ο χρόνος εφαρμογής είναι εντός των ορίων 10-15 sec, τότε δεν αναγράφεται.

Αντί της παραπάνω εξίσωσης, η σκληρότητα Brinell μπορεί να υπολογιστεί και με την βοήθεια πινάκων. Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο πιο μαλακό είναι το υλικό που εξετάζουμε, τόσο μεγαλύτερο και βαθύτερο αποτύπωμα θα προκύψει μετά την δοκιμή και τόσο μικρότερος ο αριθμός σκληρότητας.

Υπάρχουν ορισμένες προδιαγραφές για την ακριβή σκληρομέτρηση κατά Brinell. Αρχικά, πριν από την έναρξη της διαδικασίας, το δοκίμιο θα πρέπει να έχει καθαριστεί επιμελώς και κατά προτίμηση να έχει λειανθεί και γυαλιστεί, διότι τυχόν επιφανειακές μικροανωμαλίες επιφέρουν αλλοίωση στην εκτίμηση των διαστάσεων του αποτυπώματος. Επιπλέον, κατά την δοκιμή το φορτίο θα πρέπει να επιβάλλεται κάθετα προς τη σκληρομετρούμενη επιφάνεια και με αργό ρυθμό. Είναι απαραίτητο να έχει επιλεγθεί ο κατάλληλος διεισδυτής (σφαίρα από χάλυβα ή σφαίρα καρβιδίου) σύμφωνα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε δοκιμίου. Λόγω κινδύνου πλαστικής παραμόρφωσης του διεισδυτή, η μέθοδος περιορίζεται στη σκληρομέτρηση υλικών σκληρότητας μέχρι HBW650, σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται διεισδυτής από καρβίδιο βολφραμίου. Η δύναμη εφαρμογής πρέπει να έχει καθοριστεί εκ των προτέρων, όπως και ο χρόνος επιβολής του φορτίου. Τέλος, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή ώστε να είναι επαρκής η απόσταση του διεισδυτή από τις άκρες του δοκιμίου, αλλά και μεταξύ δύο γειτονικών σημείων δοκιμής, ώστε να μην επηρεάζεται το αποτέλεσμα.

Στην συνέχεια, αναφέρονται κάποια από τα βασικότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου. Αρχικά, με τη μέθοδο Brinell είναι δυνατόν να προσδιορισθεί με μεγάλη ακρίβεια το όριο θραύσης του υλικού σε εφελκυσμό. Επιπλέον, η δοκιμή είναι μη καταστροφική, άρα το δοκίμιο μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Η μέθοδος έχει μεγάλη ευελιξία καθώς υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί φορτίου-διαμέτρου διεισδυτή που δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα. Τέλος, ολόκληρο το φάσμα σκληροτήτων των διάφορων υλικών καλύπτεται από μία ενιαία κλίμακα, αν και για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα πρέπει να υπάρχει σταθερή σχέση φορτίου-διαμέτρου.

Από την άλλη πλευρά, τα μειονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου μπορούν να εντοπιστούν στα πιθανά σφάλματα μέτρησης λόγω λαθών στη χρήση των οπτικών οργάνων από τους χειριστές, στο ότι επηρεάζεται το αποτέλεσμα της δοκιμής από τις ατέλειες της επιφάνειας του υπό εξέταση δοκιμίου, αλλά και στην αναγκαιότητα για επίπεδη και λεία επιφάνεια, κάτι που καθιστά τη δοκιμή Brinell απαγορευτική για κυλινδρικές επιφάνειες. Συνήθως, η μεγαλύτερη πηγή σφάλματος στη δοκιμή Brinell είναι η μέτρηση των διαμέτρων των αποτυπωμάτων. Λόγω των διαφορών στους χειριστές που κάνουν τις μετρήσεις τα αποτελέσματα διαφέρουν ακόμη και υπό τέλειες συνθήκες. Η απουσία τέλειων συνθηκών μπορεί να προκαλέσει μεγάλη αύξηση της διακύμανσης.

Τέλος, στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές τιμές σκληρότητας Brinell (HBW) για διάφορα υλικά.

Material	Brinell Hardness Number - HB
Lead	5.0
Pure Aluminium	15
Copper	35
Soft brass	60
Hardened Aluminium	75
Mild steel	130
Annealed chissel steel	235
White cast iron	415
Nitrided surface	750
Glass	1550
Rhenium diboride	4600

Εικόνα 3-6: Χαρακτηριστικές τιμές σκληρότητας HBW [Πηγή: material-properties.org].

3.2.2 Κανονιστικές διατάξεις

Οι μηχανικές μέθοδοι δοκιμών πρέπει να είναι απλές και τα αποτελέσματα ερμηνεύσιμα και αξιοποιήσιμα, κατά τον ίδιο τρόπο από όλους. Για τον λόγο αυτό, εθνικοί οργανισμοί όπως ο ISO (International Standardization Organization) και η ASTM (American Society for Testing and Materials) κανονικοποιούν τις δοκιμές τους. Η κανονικοποίηση αυτή των δοκιμών αφορά στη γεωμετρία των δοκιμών και των ενδείξεων, στις συσκευές των δοκιμών και τη βαθμονόμηση τους, στις πειραματικές τεχνικές και στην αξιοποίηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Όσον αφορά την δοκιμή σκληρομέτρησης Brinell για μεταλλικά υλικά, τα πρότυπα ISO 6506-1 και ASTM E10-15 παρέχουν τις απαιτήσεις για τις συσκευές των σκληρομετρήσεων και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθούνται κατά την διεξαγωγή των δοκιμών.

Σύμφωνα με τις παραπάνω κανονιστικές διατάξεις, δεν υπάρχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις για το σχήμα ή το μέγεθος του εξεταζόμενου δοκιμίου κατά τη δοκιμή Brinell. Ωστόσο, το πάχος του σκληρομετρούμενου δοκιμίου πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μην δημιουργούνται ορατές παραμορφώσεις στην αντίθετη πλευρά του δοκιμίου μετά την εφαρμογή της δύναμης δοκιμής. Το ελάχιστο πάχος του υπό εξέταση δείγματος πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 φορές το βάθος της διείσδυσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM, και το ίδιο να είναι τουλάχιστον 8 φορές το βάθος της διείσδυσης σύμφωνα με το πρότυπο ISO.

Η δοκιμή θα πρέπει να διεξάγεται σε επιφάνεια λεία και ομοιόμορφη, απαλλαγμένη από άλατα οξειδίων, ξένες ύλες και ιδίως απαλλαγμένη από λιπαντικά. Το δοκίμιο πρέπει να έχει τελική επιφάνεια (φινίρισμα) που θα επιτρέπει την ακριβή μέτρηση της διαμέτρου της διείσδυσης. Επιπλέον, το εξεταζόμενο δοκίμιο απαιτείται να είναι απόλυτα στερεωμένο (rigid support), και η επιφάνεια επαφής να είναι και αυτή καθαρή.

Η δύναμη εφαρμογής της δοκιμής συνίσταται να επιλέγεται με τέτοιον τρόπο ώστε η διάμετρος του αποτυπώματος (d) να βρίσκεται μεταξύ του 24% και 60% της διαμέτρου του διεισδυτή ($0,24D \leq d \leq 0,60D$), έτσι ώστε να επιτρέπεται η ακριβής εκτίμηση των διαστάσεων της. Στις κανονιστικές διατάξεις προσφέρονται πίνακες με συνιστώμενες τιμές σκληρότητας σε σύγκριση με τη διάμετρο της σφαίρας που χρησιμοποιείται στην εκάστοτε δοκιμή. Η απόσταση του διεισδυτή από τις άκρες του δοκιμίου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 2,5 φορές την μέση τιμή της διαμέτρου του αποτυπώματος, ενώ τα σημεία δοκιμής θα πρέπει να απέχουν τουλάχιστον 3 διαμέτρους μεταξύ τους.

Η δοκιμή σκληρότητας κατά Brinell είναι απαραίτητο να εκτελείται σε ένα περιβάλλον με θερμοκρασία από 10 έως 35°C. Ωστόσο, επειδή οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τις μετρήσεις, είναι καλύτερο να περιορίζεται εντός ενός εύρους θερμοκρασίας 23°C ± 5°C.

Τέλος, σύμφωνα με τα πρότυπα, μετά το πέρας της δοκιμής συνίσταται να μελετάται η εκτίμηση της αβεβαιότητας, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που επιδρούν στο αποτέλεσμα με τη βοήθεια των στατιστικών αναλύσεων.

3.2.3 Σύγκριση προτύπων ISO, ASTM

Η πρώτη βασική διαφορά μεταξύ των προτύπων ISO 6506-1 και ASTM E10-15 εντοπίζεται στο ελάχιστο πάχος του δείγματος δοκιμής. Σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο (ASTM) το πάχος αυτό συνίσταται να είναι τουλάχιστον 10 φορές το βάθος του αποτυπώματος, ενώ σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο (ISO) το ελάχιστο πάχος πρέπει να είναι τουλάχιστον 8 φορές το βάθος του αποτυπώματος.

Στην αμερικάνικη κανονιστική διάταξη υπάρχει ένας πίνακας για τα όργανα μέτρησης των αποτυπωμάτων της δοκιμής. Σε αυτόν παρουσιάζονται ανάλογα με το μέγεθος του διεισδυτή ποια πρέπει να είναι η ελάχιστη ανάλυση (σε mm) εάν χρησιμοποιείται μικροσκόπιο με κινητές γραμμές μέτρησης, ενώ αν χρησιμοποιείται μικροσκόπιο χειρός την μέγιστη διαδοχική απόσταση (σε mm). Στο ευρωπαϊκό πρότυπο δεν υπάρχει κάποια αναφορά για τα χρησιμοποιούμενα όργανα μέτρησης.

Επιπλέον, στον πίνακα στον οποίο συνοψίζονται οι διάφορες συνθήκες δοκιμών ανάλογα με το μέγεθος της σφαίρας του διεισδυτή και της δύναμης που εφαρμόζεται σε N και kgF, υπάρχει και μία στήλη συνιστώμενης προκύπτουσας σκληρότητας HBW στο ίδιο πρότυπο. Οι συνιστώμενες αυτές τιμές προκύπτουν από την απαίτηση της διαμέτρου του προκύπτοντος αποτυπώματος να βρίσκεται εντός των ορίων 24-60% της διαμέτρου του διεισδυτή.

Από την άλλη πλευρά, το πρότυπο ISO δεν διαθέτει αυτή την στήλη, όπως, επίσης, δεν αναφέρει την δύναμη εφαρμογής της δοκιμής σε kgF. Οι συνιστώμενες τιμές σκληρότητας HBW, σε αυτή την κανονιστική διάταξη, διαχωρίζονται σε πίνακα ανάλογα με το υλικό που έχει το υπό εξέταση δοκίμιο και τον λόγο δύναμης προς διάμετρο που εφαρμόζεται. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που το δοκίμιο είναι από χυτοσίδηρο με σκληρότητα μικρότερη των 140HBW προτείνεται να εφαρμόζεται δοκιμή με λόγο διαμέτρου προς δύναμη ίσο με 10, ενώ εάν έχει σκληρότητα μεγαλύτερη η ίση των 140HBW να εφαρμόζεται δοκιμή με λόγο διαμέτρου προς δύναμη ίσο με 30.

Σε γενικές γραμμές, το αμερικάνικο πρότυπο δίνει περισσότερη πληροφορία και είναι πιο αναλυτικό, κάτι που βοηθάει τον χρήστη να κατανοήσει καλύτερα την διαδικασία στο σύνολό της, και να επιλέξει, ίσως, ορθότερα τις κατάλληλες διαμέτρους διεισδυτή ή δυνάμεις εφαρμογής της σκληρομέτρησης. Για αυτό τον λόγο, κατά την πειραματική διαδικασία της παρούσας εργασίας αντλήθηκαν πληροφορίες, τόσο από το ευρωπαϊκό, όσο και από το αμερικάνικο πρότυπο. Αυτό συνέβη διότι το τελευταίο πρότυπο δίνει κάποια παραπάνω κατεύθυνση ως προς τις συνιστώμενες συνθήκες του πειράματος (διάμετρος σφαίρας, λόγος δύναμης προς διάμετρο), έχοντας υπόψη ότι το μεταλλικό υλικό που χρησιμοποιείται έχει σκληρότητα έως 200 HBW.

3.3 Δυναμικές δοκιμές σκληρότητας

Οι δοκιμές σκληρότητας αποτελούν σημαντικά εφόδια στην έρευνα των υλικών και στη βιομηχανική παραγωγή καθώς η εύρεση των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών προκύπτει μία γρήγορη και, σχετικά, οικονομική διαδικασία. Για παράδειγμα, σε ειδικές, για τη βιομηχανική παραγωγή, επεξεργασίες υλικών (κραμάτωση, ψυχρή και θερμή κατεργασία, θερμική επεξεργασία) έχουν ισχυρή επίδραση στις τελικές συνθήκες των προϊόντων και στις μηχανικές τους ιδιότητες. Οι δοκιμές σκληρότητας παρέχουν ένα πρακτικό και αξιόπιστο μέσο για τη βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων των

υλικών ή της παραγωγικής διαδικασίας και για τον ποσοτικό προσδιορισμό των καθορισμένων προδιαγραφών σε έναν τελικό ποιοτικό έλεγχο.

Η σκληρότητα ενός υλικού μπορεί να χαρακτηριστεί και από την ελαστική επαναφορά του υλικού. Οι μέθοδοι με δεισδυση εισβολέα (στατικές μέθοδοι) καθορίζουν τη σκληρότητα βάσει της πλαστικής παραμόρφωσής του. Από την άλλη πλευρά, οι δυναμικές μέθοδοι συσχετίζουν τη σκληρότητα με την ελαστική απόκρισή του.

Οι κλασικές, σταθερές δοκιμές σκληρότητας κατά Brinell, Vickers και Rockwell καθιερώθηκαν πρώτες. Ωστόσο, μόλις χρειάστηκε να δοκιμαστούν πολύ μεγάλα τμήματα ή τμήματα υλικού τα οποία δεν είναι δυνατό να μετακινηθούν για να δοκιμαστούν στους συνήθεις τύπους μηχανών σκληρομέτρησης, προέκυψε η ανάγκη εύρεσης εναλλακτικών λύσεων. Η δοκιμή τμημάτων σταθερών κατασκευών ή η δοκιμή υπό οποιοσδήποτε συνθήκες οι οποίες απαιτούν την εφαρμογή της δύναμης δεισδυσης σε κατεύθυνση διαφορετική από την κατακόρυφη, κατέστησε απαραίτητη την αναζήτηση φορητών λύσεων.

Η αρχή των δυναμικών δοκιμών συνίσταται στην αναπήδηση ενός σώματος, ορισμένου σχήματος και βάρους, στο υπό εξέταση υλικό. Κριτήριο για τον προσδιορισμό της σκληρότητας αποτελεί το ύψος της αναπήδησης (μέθοδος Shore) ή η απώλεια ενέργειας (μέθοδος Leeb).

Στις στατικές μεθόδους σκληρομετρήσεων, το φορτίο επιβάλλεται αργά, με ομοιόμορφα αυξανόμενο ρυθμό στο υλικό δοκιμής (μέθοδοι Brinell, Vickers, Rockwell, Knoop). Αντίθετα, στις δυναμικές μεθόδους, το φορτίο αυξάνεται ξαφνικά και κρουστικά (μέθοδος Leeb).

Στις εργαστηριακές δοκιμές χρησιμοποιούνται, συνήθως, επιτραπέζιες μέθοδοι δοκιμών σκληρότητας με την χρήση στατικών μεθόδων. Στις εξωτερικές δοκιμές χρησιμοποιούνται, περισσότερο, οι φορητές συσκευές (portable hardness testers), οι οποίες εντάσσονται στις δυναμικές μεθόδους. Αυτές οι συσκευές επιτρέπουν τη μετατροπή της μετρούμενης σκληρότητας σε όλες τις κοινές κλίμακες σκληρότητας (HB, HV, HRB, HRC, HS). Η χρήση των φορητών ελεγκτών σκληρότητας, αρχικά, περιορίστηκε σε δοκιμές πεδίου όπου το δοκίμιο δεν μπορούσε να μεταφερθεί στο όργανο δοκιμής. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη της τεχνολογίας, αποδεικνύονται κατάλληλα όργανα ακόμη και για εργαστηριακή χρήση.



Εικόνα 3-7: Τυπικό φορητό όργανο σκληρομέτρησης [Πηγή: Direct Industry].

Σε αντίθεση με το σκληρόμετρο πάγκου, οι φορητές συσκευές σκληρομετρήσεων έχουν μικρά μεγέθη, μικρό βάρος και είναι συμπαγείς συσκευές (Εικόνα 3-7). Επιπλέον, οι δυναμικές δοκιμές προσφέρουν τα πλεονεκτήματα της γρήγορης και εύκολης χρήσης και υψηλής ακρίβειας. Οι πιο διαδεδομένες

μέθοδοι δυναμικής μετρήσης της σκληρότητας είναι η μέθοδος Martel, η μέθοδος του σκληροσκοπίου Shore, η μέθοδος Helbert και η μέθοδος Leeb ("Equotip").

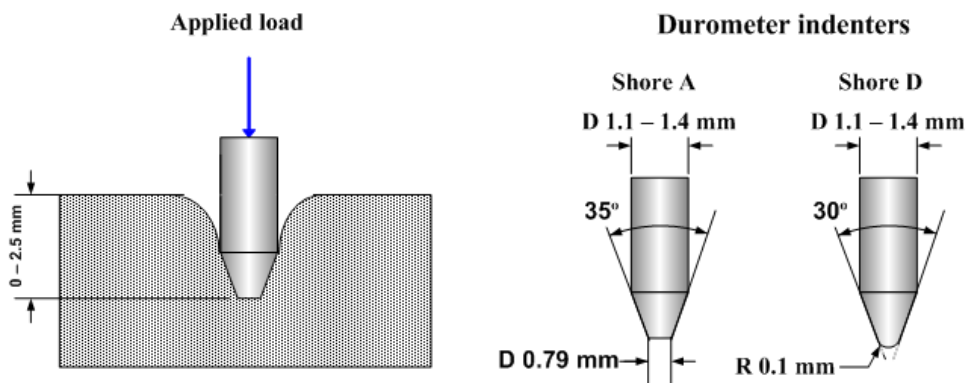
Πιο αναλυτικά, η δυναμική σκληρότητα συστήθηκε από τον **Martel** το 1895 [1]. Ο Martel χρησιμοποίησε μια χαλύβδινη σφαίρα που έπεφτε από ύψος (h_1) σε μια λεία μεταλλική επιφάνεια και δημιουργούσε μια σφαιρική εσοχή στην επιφάνεια του δείγματος. Αποδείχθηκε ότι ο λόγος A/V ήταν σταθερός, όπου A είναι η κινητική ενέργεια της σφαίρας και V είναι ο όγκος της εσοχής. Εφόσον αυτή η σχέση έχει τις ίδιες διαστάσεις με την πίεση [Pa], θεωρήθηκε ως η δυναμική σκληρότητα των μετάλλων. Έτσι, η σκληρότητα κατά Martel (HMR) προσδιορίστηκε από τη σχέση:

$$\text{HMR} = \frac{A}{V} \quad (3-7)$$

Όπου:

- A = το έργο για τη δημιουργία της εσοχής
- V = ο όγκος της εσοχής

Η σκληρότητα κατά **Shore** αποτελεί μια τυποποιημένη δοκιμή που χρησιμοποιείται σε ολόκληρη τη βιομηχανία. Αποτελεί μέτρο της αντίστασης ενός υλικού σε διείσδυση μιας βελονοειδούς εσοχής με ελατήριο. Η σκληρότητα Shore ελέγχεται με ένα όργανο που ονομάζεται Durometer. Το σκληρόμετρο χρησιμοποιεί έναν διεισδυτή που δέχεται φορτίο από ένα βαθμονομημένο ελατήριο. Η μετρούμενη σκληρότητα καθορίζεται από το βάθος διείσδυσης της εσοχής υπό καθορισμένες συνθήκες δύναμης και χρόνου. Δύο διαφορετικά σχήματα διεισδυτή (Εικόνα 3-8) και δύο διαφορετικά φορτία ελατηρίου χρησιμοποιούνται για δύο κλίμακες Shore (A και D). Η κλίμακα Shore A χρησιμοποιείται για τη δοκιμή μαλακών ελαστομερών (λάστιχα) και άλλων μαλακών πολυμερών. Η σκληρότητα των σκληρών ελαστομερών και άλλων πολυμερών υλικών μετράται με την κλίμακα Shore D.



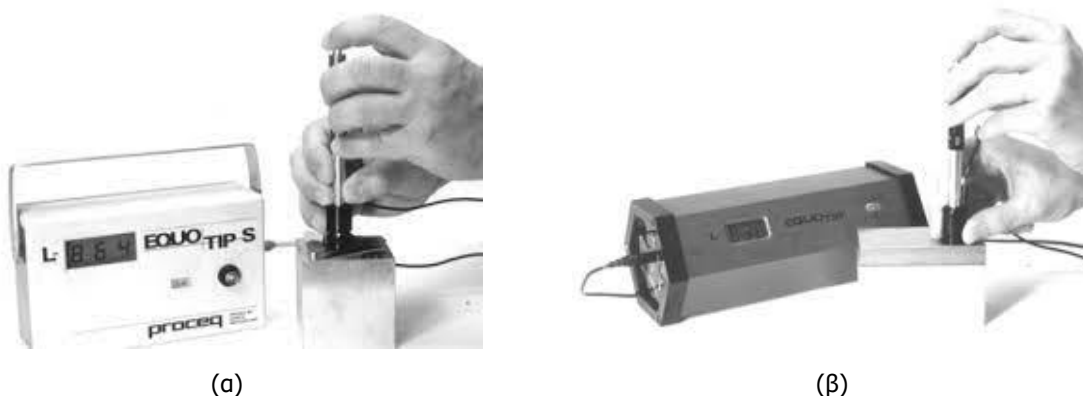
Εικόνα 3-8: Δοκιμή σκληρότητας Shore [Πηγή: SubsTech].

Στη συνέχεια, θα μελετηθεί περαιτέρω η δυναμική μέθοδος Leeb, η οποία θα αποτελέσει και μέρος του πειραματικού σκέλους της εργασίας.

3.3.1 Δυναμική μέθοδος Leeb

Ο Dietmar Leeb μελέτησε στις αρχές της δεκαετίας του '70 τις διάφορες μεθόδους δοκιμών σκληρότητας με κύρια εστίαση σε φορητές λύσεις, όπως η μέθοδος των Baumann-Steinrück, Schmidt και Shore [2]. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι φορητοί ελεγκτές σκληρότητας είναι δυναμικού τύπου, όπου το δοκιμαστικό φορτίο εφαρμόζεται με ορμή. Κατά την μελέτη προέκυψε το ερώτημα, πώς γίνεται, χωρίς απώλεια στην ακρίβεια μέτρησης, να επεκταθεί το κοινό εύρος σκληρότητας και η

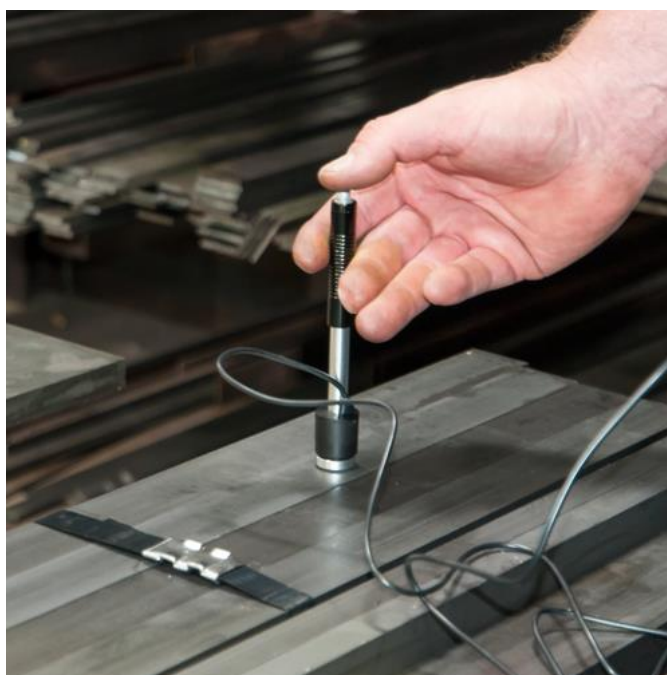
λειτουργία να γίνει πιο ευέλικτη, δηλαδή ανεξάρτητη από την κατεύθυνση της δοκιμής, πιο γρήγορη, ανεξάρτητη από τον χρήστη και άνετη.



Εικόνα 3-9: Οι δύο πρώτες συσκευές σκληρομέτρησης EQUOTIP [Πηγή: Hardmeko].

Το ιδιοφυές αποτέλεσμα ήταν η εφεύρεση και επιτυχημένη παραγωγή του EQUOTIP το 1975 (Εικόνα 3-9). Αυτή η μέθοδος είναι, επίσης, γνωστή από το όνομα του εφευρετή ως μέθοδος δοκιμής σκληρότητας Leeb ή δοκιμή αναπήδησης (rebound method) κατά τον D. Leeb. Το EQUOTIP αποτελεί, σήμερα, τον πιο συχνά χρησιμοποιούμενο φορητό μετρητή σκληρότητας. Οι χρήστες εκτιμούν ιδιαίτερα την ευελιξία, την ευκολία χρήσης και τη γρήγορη και ακριβή μέτρηση για μεγάλο χρονικό διάστημα χρήσης.

Η μέθοδος Leeb είναι μια σύγχρονη μέθοδος που εξελίχθηκε ώστε να προσφέρει φορητότητα και ταχύτητα στη μέτρηση της σκληρότητας μεγάλων δειγμάτων. Κατά την εφαρμογή της δοκιμής, μία συσκευή (Εικόνα 3-10) πυροδοτεί ένα σώμα κρούσης που περιέχει έναν μόνιμο μαγνήτη και μία πολύ σκληρή σφαίρα διείσδυσης προς την επιφάνεια του υπό εξέταση υλικού. Η μέτρηση πραγματοποιείται πάντα με το αισθητήριο να βρίσκεται σε θέση 90° σε σχέση με το δοκίμιο. Σε περίπτωση όπου ο χειριστής σκληρομετρήσει με διαφορετική γωνία θα προκύψουν λανθασμένα αποτελέσματα.



Εικόνα 3-10: Εφαρμογή σκληρομέτρησης Leeb [Πηγή: pce-instruments.com]

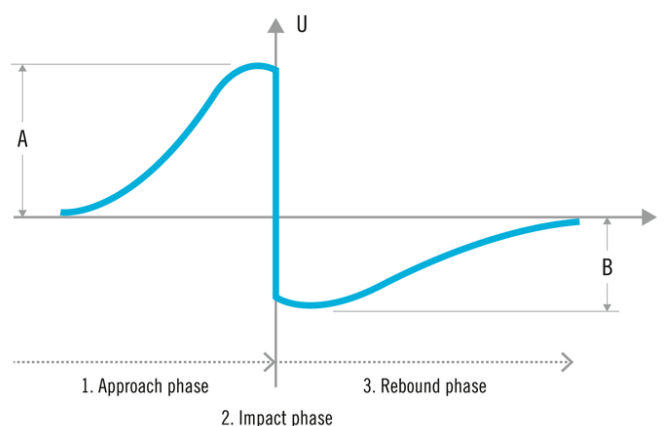
Η ταχύτητα του σώματος κρούσης καταγράφεται σε τρεις κύριες φάσεις:

- I. Τη φάση προσέγγισης (approach phase) πριν από την πρόσκρουση, όπου το σώμα κρούσης επιταχύνεται προς την επιφάνεια του δοκιμίου μέσω της δύναμη του ελατηρίου.
- II. Τη φάση κρούσης (impact phase), όπου το σώμα κρούσης και το δοκίμιο βρίσκονται σε άμεση επαφή. Το σκληρό άκρο του διεισδυτή παραμορφώνει το υλικό δοκιμής ελαστικά και πλαστικά και παραμορφώνεται το ίδιο ελαστικά. Αφού ακινητοποιηθεί το σώμα κρούσης, πραγματοποιείται ελαστική ανάκτηση του υλικού δοκιμής και του σώματος και προκαλεί την αναπήδηση του κρουστικού σώματος.
- III. Τη φάση αναπήδησης (rebound phase), όπου το σώμα κρούσης επιταχύνεται με υπολειπόμενη ενέργεια η οποία δεν καταναλώνεται κατά τη φάση κρούσης και αφήνει το δοκίμιο.

Πιο αναλυτικά, η μέθοδος αναπήδησης βασίζεται στη μέτρηση των τάσεων για να υποδείξει την απώλεια ενέργειας ενός αποκαλούμενου σώματος κρούσης μετά την πρόσκρουση στο δοκίμιο. Σε ένα όργανο που χρησιμοποιεί την αρχή της επαναφοράς, ένα ελατήριο ωθεί ένα σώμα κρούσης μέσω ενός σωλήνα-οδηγού προς το δοκίμιο. Καθώς το σώμα κρούσης ταξιδεύει ανεμπόδιστα προς το δοκίμιο, ένας μαγνήτης που περιέχεται δημιουργεί μια τάση σε ένα σύστημα πηνίου που περιβάλλει τον σωλήνα-οδηγό.

Συνήθως, ένας διεισδυτής από καρβίδιο βολφραμίου ή σφαίρα διαμαντιού, ο οποίος βρίσκεται στο άκρο του σώματος κρούσης, χτυπά το υλικό, προκαλώντας την αναπήδηση του σώματος κρούσης από την επιφάνεια με μικρότερη ταχύτητα. Όσο πιο μαλακό είναι το υλικό, τόσο μεγαλύτερη είναι η εσοχή, προκαλώντας μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας και μικρότερη ταχύτητα αναπήδησης. Η ταχύτητα με τη σειρά της παράγει αναλογικά χαμηλότερη τάση καθώς ο μαγνήτης επιστρέφει μέσω του πηνίου. Η τιμή σκληρότητας (HL) υπολογίζεται από την αναλογία της κρούσης και της ταχύτητας v_r . Αυτή η τιμή μπορεί στη συνέχεια να μετατραπεί από το λογισμικό για να εμφανίσει τις συμβατικές κλίμακες HRC, HRB, HV, HB ή HS [3].

Συνοψίζοντας, οι ταχύτητες μετρώνται χωρίς επαφή μέσω μιας επαγόμενης τάσης, που παράγεται από έναν κινούμενο μαγνήτη σε ένα καθορισμένο πηνίο στη συσκευή κρούσης. Το σήμα επαγόμενης τάσης καταγράφεται ηλεκτρονικά και οι μέγιστες τιμές, το σημείο της κρούσης και το σημείο της αναπήδησης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της σκληρότητας Leeb (Εικόνα 3-11) [4].



Εικόνα 3-11: Ταχύτητα πρόσκρουσης και ταχύτητα αναπήδησης σε συνάρτηση με τον χρόνο [Πηγή: emcotest.com].

Όπου:

- A: Μέγιστη τιμή της φάσης προσέγγισης
- B: Μέγιστη τιμή της φάσης αναπήδησης
- t: Χρόνος
- U: Τάση

Η τιμή της σκληρότητας Leeb είναι ίση με τον λόγο της ταχύτητας αναπήδησης (v_r) προς την ταχύτητα πρόσκρουσης (v_i) πολλαπλασιαζόμενη επί 1000, όπως φαίνεται στην Εξ. (3-8). Η τιμή αυτή μπορεί να συσχετιστεί με άλλες κλίμακες σκληρότητας όπως π.χ. η Brinell, η Rockwell και η Vickers. Επειδή η συσκευή είναι ηλεκτρονική, η μετατροπή γίνεται αυτόματα.

$$HL = \frac{v_r}{v_i} \times 1000 \quad (3-8)$$

Οι μετρήσεις ταχύτητας, σύμφωνα με την αρχή Leeb, επηρεάζονται από το μέτρο ελαστικότητας (E) του εξεταζόμενου υλικού. Συνεπώς, δύο διαφορετικά υλικά με την ίδια «πραγματική» σκληρότητα ενδέχεται να εμφανίζουν διαφορετικές τιμές HL, λόγω της διαφοράς στα μέτρα ελαστικότητας τους.

Για τον παραπάνω λόγο, δεν μπορεί να προσδιοριστεί ένας καθολικά έγκυρος πίνακας μετατροπής για όλα τα υλικά. Έτσι, προσδιορίστηκαν πειραματικά πίνακες μετατροπής της μετρούμενης τιμής Leeb (HL) σε διάφορες κλίμακες σκληρότητας για συγκεκριμένες ομάδες υλικών (Πίνακας 3-1). Για να πραγματοποιηθεί η μέτρηση είναι απαραίτητο να επιλεγεί η επιθυμητή ομάδα υλικού, ώστε να διασφαλιστεί η σωστή μετατροπή στην επιλεγμένη κλίμακα σκληρότητας [5].

Πίνακας 3-1: Ομάδες υλικών.

1	Steel-Χάλυβας
2	Alloy Steel-Κραματοποιημένος Χάλυβας
3	Stainless Steel-Ανοξειδωτος Χάλυβας
4	Grey Iron-Γκριζος Χυτοσίδηρος
5	Nodular Iron-Χυτοσίδηρος Σφαιροειδούς Γραφίτη
6	Aluminum-Αλουμίνιο
7	Brass-Ορείχαλκος
8	Bronze-Μπρούντζος
9	Copper-Χαλκός

Οι πιο κρίσιμες μεταβλητές οι οποίες επηρεάζουν τη δοκιμή είναι το πάχος και η μάζα του δοκιμίου. Όπως περιγράφηκε παραπάνω, υπάρχει ένα σώμα κρούσης που απελευθερώνεται με δεδομένη ταχύτητα στην επιφάνεια του αντικειμένου. Εάν το πάχος του υλικού είναι πολύ λεπτό, με μικρή μάζα, τότε το υλικό κάμπτεται κατά την κρούση. Αυτό επηρεάζει την ταχύτητα ανάκαμψης και με τη σειρά του επηρεάζει την ένδειξη που προκύπτει. Επιπλέον, άλλος ένας περιορισμός της μεθόδου είναι ότι το προς εξέταση δοκίμιο είναι απαραίτητο να έχει λεία και καθαρή επιφάνεια, κάτι που απαιτεί αρκετό

χρόνο προετοιμασίας. Τέλος, οι συσκευές Equotip είναι φορητές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπό διαφορετικές γωνίες, αρκεί να βρίσκονται κάθετα στην εξεταζόμενη επιφάνεια.

Η Leeb είναι μια πολύ γνωστή μέθοδος σχεδόν σε όλες τις βιομηχανίες όπου κατασκευάζονται μεταλλικά εξαρτήματα και υπόκεινται σε θερμική επεξεργασία, μηχανική κατεργασία και συντήρηση. Μεγάλα, ογκώδη και παχιά αντικείμενα όπως βαριά ρολά, βαφές και καλούπια, ράγες και τροχιές σε μηχανές εργαλείων, γερανοί, δοχεία πίεσης και αγωγοί αποτελούν συνήθεις εφαρμογές της μεθόδου.

3.3.2 Κανονιστικές διατάξεις

Όσον αφορά την δοκιμή σκληρομέτρησης Equotip Leeb για προϊόντα από χάλυβα, τα πιο ευρέως διαδεδομένα πρότυπα αποτελούν το ISO 16859: "Μεταλλικά υλικά — Δοκιμή σκληρότητας Leeb" και το ASTM A956: "Τυπική μέθοδος δοκιμών για τη μέτρηση σκληρότητας Leeb σε προϊόντα από χάλυβα". Αυτά αφορούν τον προσδιορισμό της σκληρότητας του χάλυβα και του χυτοσιδήρου (HL), συμπεριλαμβανομένων των μεθόδων για την επαλήθευση των οργάνων δοκιμών σκληρότητας Leeb και τη βαθμονόμηση των πρότυπων πλακιδίων.

Αρχικά, το ευρωπαϊκό πρότυπο ISO 16859 καλύπτει τον προσδιορισμό της σκληρότητας Leeb μεταλλικών υλικών χρησιμοποιώντας επτά διαφορετικές κλίμακες (HLD, HLS, HLE, HLDL, HLD+15, HLC, HLG). Βασίζεται στο πρότυπο DIN 50156, το οποίο έχει αποσυρθεί. Αποτελείται από τρία διαφορετικά μέρη, στα οποία περιγράφεται η μέθοδος δοκιμής, η διαδικασία επαλήθευσης και βαθμονόμησης των συσκευών και των πρότυπων πλακιδίων συγκεκριμένης σκληρότητας που τις συνοδεύουν.

Όσον αφορά το αμερικάνικο πρότυπο, εγκρίθηκε, αρχικά, και δημοσιεύθηκε το 1996, ενώ η επόμενη τελευταία έκδοση δημοσιεύθηκε το 2012. Η μέθοδος Leeb μετρά τον λόγο της ταχύτητας αναπήδησης ενός καθορισμένου σώματος κρούσης που εκτοξεύεται σε μια επιφάνεια με καθορισμένη ταχύτητα. Επομένως, αυτή η μέθοδος μετρά την απώλεια της κινητικής ενέργειας κατά την κρούση, αποτελώντας μία δυναμική τεχνική. Η ακρίβεια μιας δοκιμής Leeb εξαρτάται από τις κατάλληλες συνθήκες δοκιμής, την τραχύτητα της επιφάνειας, το πάχος του δοκιμίου και τη μάζα. Όλα τα παραπάνω ορίζονται στο πρότυπο A956.

4 ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι καταστροφικές μέθοδοι οι οποίες εφαρμόζονται για τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, δίνοντας έμφαση στην πιο σημαντική καταστρεπτική δοκιμή του χάλυβα, την εφελκυστική δοκιμή.

4.1 Γενικά

Οι μηχανικές δοκιμές, γνωστές και ως καταστροφικές δοκιμές, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού υπό δυναμικές ή στατικές φορτίσεις. Μέσω αυτών διασφαλίζεται η καταλληλότητα των υλικών για τις προβλεπόμενες εφαρμογές τους. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία μηχανικών δοκιμών οι οποίες μπορούν να εκτελεστούν κατά την αξιολόγηση ενός υλικού. Μερικές από αυτές είναι η δοκιμή σε εφελκυσμό ή θλίψη, η δοκιμή προστασίας έναντι διάβρωσης, η δοκιμή κόπωσης κ.α..



Εικόνα 4-1: Δοκιμή εφελκυσμού [Πηγή: Getty Images/iStockphoto].

Ορισμένες μηχανικές δοκιμές παρέχουν πληροφορίες για περισσότερες από μία μηχανικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, μια δοκιμή εφελκυσμού παρέχει πληροφορίες όχι μόνο σχετικά με την τελική εφελκυστική αντοχή του υλικού, αλλά εξάγει, επίσης, ποσοτικά δεδομένα σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή διαρροής του. Επιπλέον, μια δοκιμή εφελκυσμού παρέχει πληροφορίες σχετικά με το πόσο όλκιμο ή εύθραυστο είναι ένα υλικό με βάση την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που προκύπτει από τη δοκιμή.

Οι καταστροφικές δοκιμές αποτελούν αναπόσπαστο μέρος κάθε διαδικασίας σχεδιασμού και παραγωγής. Το πεδίο των μηχανικών δοκιμών συμβάλλει στην ταυτοποίηση των ιδιοτήτων των υλικών, την πιστοποίηση της ακεραιότητας των τελικών προϊόντων και την τεχνολογική καινοτομία. Ο βασικότερος στόχος είναι να εξασφαλίζεται η ασφάλεια κατά την ανάπτυξη ενός προϊόντος, ωστόσο οι μηχανικές δοκιμές παίζουν, επίσης, σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη οικονομικά αποδοτικών μελετών σχεδιασμού. Συνοψίζοντας, οι μηχανικές δοκιμές επιτρέπουν στους υπεύθυνους ενός προϊόντος να κατανοήσουν καλύτερα το προϊόν, να εντοπίσουν τα τρωτά σημεία και να δημιουργήσουν ισχυρότερο ποιοτικό έλεγχο.

4.2 Δοκιμή εφελκυσμού

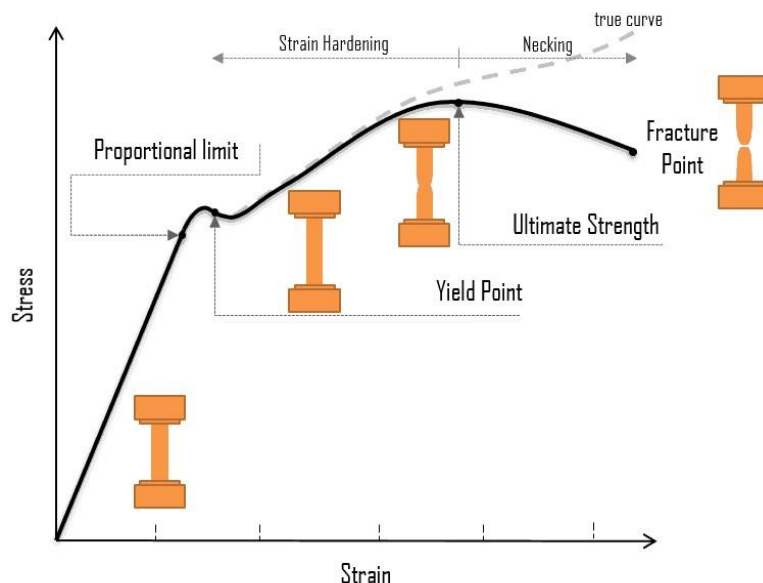
Η δοκιμή του εφελκυσμού αποτελεί μία από τις σημαντικότερες και πιο χρήσιμες δοκιμές της Πειραματικής Αντοχής των Υλικών. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών χρησιμοποιούνται κατά την επιλογή των υλικών στο πεδίο του μηχανικού. Οι εφελκυστικές ιδιότητες περιλαμβάνονται συχνά στις προδιαγραφές των υλικών ώστε να διασφαλίζεται η ποιότητα τους. Επιπλέον, είναι απαραίτητες κατά την ανάπτυξη νέων υλικών και διεργασιών.

Η εφελκυστική δοκιμή συγκαταλέγεται στις καταστροφικές δοκιμές και παρέχει πληροφορίες σχετικά με σημαντικά μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών και ιδιαίτερα του χάλυβα. Τέτοια χαρακτηριστικά αποτελούν η μέγιστη αντοχή, το όριο αναλογίας, το όριο ελαστικότητας, το όριο διαρροής και το όριο θραύσης. Επιπλέον, προσδιορίζονται οι ελαστικές σταθερές του υλικού. Οι πληροφορίες αυτές προκύπτουν μέσω του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων το οποίο εξάγεται από την δοκιμή. Πιο αναλυτικά:

- **Όριο αναλογίας** είναι η τιμή της τάσης μέχρι την οποία το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά. Αντιστοιχεί σε τάση η οποία προσδιορίζει το τέλος της γραμμικής περιοχής, επομένως το γράφημα τάσης-παραμόρφωσης είναι μια ευθεία γραμμή, μέχρι αυτό το σημείο, και η κλίση είναι ίση με το μέτρο ελαστικότητας του υλικού.
- **Όριο διαρροής** είναι το σημείο σε μια καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που υποδεικνύει το όριο της ελαστικής συμπεριφοράς και την αρχή της πλαστικής συμπεριφοράς. Η αντοχή διαρροής ή η τάση διαρροής είναι η ιδιότητα του υλικού που ορίζεται ως η τάση στην οποία ένα υλικό αρχίζει να παραμορφώνεται πλαστικά, ενώ το σημείο διαρροής είναι το σημείο όπου αρχίζει η μη γραμμική παραμόρφωση. Πριν από το σημείο διαρροής, το υλικό θα παραμορφωθεί ελαστικά και θα επανέλθει στο αρχικό του σχήμα όταν αφαιρεθεί η ασκούμενη τάση. Μόλις περάσει το σημείο διαρροής, ένα μέρος της παραμόρφωσης θα είναι μόνιμο και μη αναστρέψιμο. Το υλικό χάνει τη συνοχή του, επιμηκύνεται σε μεγάλο βαθμό και σχηματίζει λαιμό.
- Η **τελική αντοχή εφελκυσμού** είναι η μέγιστη στην καμπύλη μηχανικής τάσης-παραμόρφωσης. Εάν αυτή η τάση εφαρμοστεί και διατηρηθεί, θα προκληθεί θραύση. Παρόλο που οι παραμορφώσεις μπορούν να συνεχίσουν να αυξάνονται, η τάση συνήθως μειώνεται αφού επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή.
- **Όριο θραύσης ή όριο αντοχής** είναι το σημείο καταπόνησης όπου το δοκίμιο σχηματίζει λαιμό και τελικά σπάει. Σε αυτό το σημείο, η παραμόρφωση φτάνει στη μέγιστη τιμή της και το υλικό θραύεται πραγματικά, παρόλο που η αντίστοιχη τάση μπορεί να είναι μικρότερη από την μέγιστη αντοχή σε αυτό το σημείο.
- **Μέτρο ελαστικότητας** είναι η σχέση υλικού και επιμήκυνσης για κάθε υλικό και εκφράζεται με μια χαρακτηριστική σταθερά (E) [N/cm²].

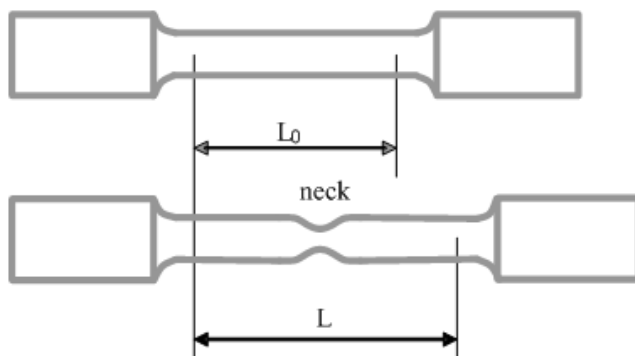
Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων του χάλυβα (Εικόνα 4-2), στο οποίο μπορούμε να διακρίνουμε τα τέσσερα σημεία που παρέχουν τις απαραίτητες

πληροφορίες για το εξεταζόμενο δοκίμιο (όριο αναλογίας, όριο διαρροής, μέγιστη αντοχή, όριο θραύσης) [6].



Εικόνα 4-2: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης όλκιμου υλικού [Πηγή: material-properties.org].

Κατά την εφαρμογή της δοκιμής ένα κατάλληλα διαμορφωμένο δοκίμιο υποβάλλεται σε εφελκυστική μονοαξονική φόρτιση, στη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη αύξηση (επιμήκυνση) του μήκους του υλικού, μέχρι το σημείο θραύσης του (Εικόνα 4-3). Η διατομή των δοκιμίων συνήθως είναι κυκλική, τετράγωνη, ορθογώνια ή δακτυλιοειδής.



Εικόνα 4-3: Δοκίμιο εφελκυσμού πριν και κατά την διάρκεια του πειράματος [Πηγή: substech.com].

Τα τυπικά χαλύβδινα δοκίμια τα οποία υπόκεινται σε δοκιμές εφελκυσμού διαθέτουν διευρυμένα άκρα, ώστε να μπορούν να αγκυρωθούν στις αρπάγες της μηχανής. Είναι απαραίτητο να μετράται η μετατόπιση σε μία περιοχή του δοκιμίου απομακρυσμένη από τα άκρα για να απαλείφονται οι εξωτερικές πηγές μετατόπισης. Η περιοχή αυτή ονομάζεται «ενεργή» περιοχή (gage length) του δοκιμίου.

Πολλοί τύποι διατάξεων μέτρησης μετατόπισης έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς. Οι πιο γνωστοί είναι τα μηκυσιόμετρα (μηχανικά, οπτικά) και τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα. Η αρχή λειτουργίας είναι ίδια σε όλα: οι βραχίονες των μηκυσιομέτρων «αγκαλιάζουν» το δοκίμιο και διαβάζουν την επιμήκυνση του δοκιμίου. Οι μετρήσεις γίνονται στην «ενεργή» περιοχή του δοκιμίου.

Κατά την διαδικασία της δοκιμής, το δοκίμιο στερεώνεται στις αρπάγες της μηχανής (Εικόνα 4-5), τοποθετείται προσεκτικά το μηκυσιόμετρο και αρχίζει η φόρτιση. Για τα διάφορα φορτία

καταγράφονται οι αντίστοιχες ενδείξεις παραμόρφωσης που αντλούνται από το μηκυνσιόμετρο. Το φορτίο μετατρέπεται σε τιμή τάσης και η μετατόπιση μετατρέπεται σε τιμή παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-4: Μηκυνσιόμετρο σε δοκίμιο [Πηγή: daksystem.com].

Η μηχανική τάση (stress) ορίζεται ως:

$$s = \frac{F}{A_0} \quad (4-1)$$

Όπου:

- F = η δύναμη εφελκυσμού
- A_0 = το εμβαδό της επιφάνειας που εφαρμόζεται το φορτίο

Η μηχανική παραμόρφωση (strain), ορίζεται ως:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \quad (4-2)$$

Όπου:

- Δl = η αλλαγή στο μήκος της ενεργής περιοχής του δοκιμίου
- L_0 = το αρχικό μήκος της ενεργής περιοχής του δοκιμίου

Τα δεδομένα δύναμης-επιμήκυνσης μετατρέπονται σε μηχανική τάση και παραμόρφωση και έτσι μπορεί να σχεδιαστεί η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που έχει το ίδιο σχήμα με την καμπύλη δύναμης-επιμήκυνσης. Προτιμάται να χρησιμοποιείται η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης διότι διαθέτει το πλεονέκτημα να μην εξαρτάται από τις διαστάσεις του δοκιμίου.

Η προετοιμασία των δοκιμίων εφελκυσμού γίνεται με διάφορους τρόπους ανάλογα με τις προδιαγραφές. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες κανονιστικές διατάξεις είναι αυτές των ISO 6892-1 και ASTM E8M. Η δοκιμή, σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρότυπο, πρέπει να πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου μεταξύ 10 °C και 35 °C, εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά.

Τέλος, όσον αφορά τις μηχανές εφελκυστικών δοκιμών, αυτές είναι είτε ηλεκτρομηχανικές είτε υδραυλικές. Η κύρια διαφορά είναι η μέθοδος με την οποία επιβάλλεται το φορτίο. Οι ηλεκτρομηχανικές διατάξεις διαθέτουν συνήθως μία κινούμενη κυλινδρική κεφαλή (crosshead), η οποία

κινείται προς τα πάνω ή προς τα κάτω, πάνω σε δύο περιστρεφόμενους κοχλίες οι οποίοι κινούνται με ηλεκτρικό μοτέρ. Το φορτίο καταγράφεται με ηλεκτρονικές κυψέλες (load cell) το οποίο συνδέεται με καταγραφικό ή Η/Τ. Αυτές οι μηχανές μπορούν να λειτουργούν με έλεγχο του φορτίου, της μετατόπισης ή της παραμόρφωσης. Σε δοκιμές ελέγχου του φορτίου εφαρμόζεται ένας συγκεκριμένος ρυθμός μεταβολής του μέσω ηλεκτρονικής ανάδρασης μεταξύ κυψέλης φορτίου και μοτέρ. Με παρόμοιο τρόπο εφαρμόζεται και ο ρυθμός παραμόρφωσης με ηλεκτρονική ανάδραση μεταξύ της κεφαλής του κυλίνδρου και ενός μηκυσιομέτρου, ή οποιασδήποτε συσκευής χρησιμοποιείται για την μέτρηση της παραμόρφωσης.



Εικόνα 4-5: Τυπική ηλεκτρονική μηχανή εφελκυστικής δοκιμής [Πηγή: instron.com].

Οι υδραυλικές μηχανές δοκιμών διαθέτουν σερβοβαλβίδες με ηλεκτρονική ανάδραση και έχουν μεγάλη ακρίβεια στον έλεγχο του ρυθμού φόρτισης, παραμόρφωσης ή μετατόπισης. Συνηθίζεται να εγκαθίσταται το υδραυλικό έμβολο στην βάση της μηχανής. Παρομοίως η κεφαλή του κυλίνδρου σταθεροποιείται στις κολόνες του πλαισίου. Παρόλα αυτά η κεφαλή μπορεί να τοποθετείται σε μεγαλύτερο ή μικρότερο ύψος για να επιτρέπει σε διαφορετικού τύπου διαμορφωμένα δοκίμια να μπορούν να τοποθετηθούν στην μηχανή. Αυτό είναι απαραίτητο αφού το υδραυλικό έμβολο έχει συγκεκριμένο μήκος κίνησης, μεταξύ 100-200 mm [7].

Γενικά, οι ηλεκτρομηχανικές μηχανές είναι χρήσιμες για μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων δοκιμής και μεγαλύτερες μετατοπίσεις της κεφαλής, ενώ οι υδραυλικές μηχανές είναι κατάλληλες όταν εφαρμόζονται υψηλότερες δυνάμεις.

4.2.1 Προετοιμασία δοκιμών

Ένα "δείγμα" είναι μια ποσότητα υλικού που αντιπροσωπεύει μια μεγαλύτερη παρτίδα. Τα δείγματα δοκιμής πρέπει να προετοιμάζονται κατάλληλα ώστε να προκύπτουν ακριβή αποτελέσματα κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων. Το ίδιο ισχύει και για τα δοκίμια των εφελκυστικών δοκιμών. Η προετοιμασία τους συμπεριλαμβάνει τις διεργασίες κοπής των δοκιμίων από ένα μεγαλύτερο τεμάχιο, της ακριβούς μέτρησης των διαστάσεων τους και της εγκατάστασης των ηλεκτρομηκυσιομέτρων ή οποιασδήποτε άλλης διάταξης.

Αρχικά, όσον αφορά την διαδικασία κοπής των δοκιμίων, αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με τραχεία τομή με κάποιον κοπτικό τροχό. Συνήθως χρησιμοποιούνται τροχοί από οξείδιο του αλουμινίου ή άλλο παρόμοιο υλικό, αν και η χρήση διαμαντοτροχών προσφέρει καλύτερο αποτέλεσμα. Μερικές φορές μπορεί να χρησιμοποιηθεί και πριονοκορδέλα με συνεχόμενη οδοντωτή λεπίδα μετάλλου για να κόψει το υλικό. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και άλλες, πιο σύγχρονες, μέθοδοι όπως η κοπή με laser. Μετά τη διαδικασία της κοπής, οι άκρες των δοκιμίων θα πρέπει να επεξεργαστούν για να προκύψουν οι τελικές διαστάσεις. Αυτό γίνεται με τρίψιμο (λείανση) χρησιμοποιώντας λειαντικούς τροχούς.



Εικόνα 4-6: Κοπή ελάσματος με τροχό [Πηγή: trotec.com].

Όπως προαναφέρθηκε, η τάση, είναι ανάλογη της δύναμης που ασκείται στο δοκίμιο και αντιστρόφως ανάλογη του εμβαδού της επιφάνειας που ασκείται το φορτίο, ενώ η παραμόρφωση ορίζεται ως η αλλαγή στις διαστάσεις του δοκιμίου διαιρεμένη με την αρχική διάσταση. Έτσι, γίνεται φανερό ότι οι διαστάσεις του δοκιμίου πρέπει να μετρώνται με μεγάλη ακρίβεια, καθώς επιδρούν στο τελικό αποτέλεσμα. Συνήθως, η μέτρηση των διαστάσεων γίνεται με μικρόμετρο και παχύμετρο με ακρίβεια μέτρησης εκατοστού του χιλιοστού (0.01mm) (Εικόνα 4-7).



Εικόνα 4-7: Τυπικό μικρόμετρο [Πηγή: e-metallon.gr].

Εκτός από την ακριβή μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων, υπάρχουν και άλλες παράμετροι οι οποίες θα πρέπει να ελέγχονται. Για παράδειγμα, οι τραχιές επιφάνειες που μπορεί να δημιουργηθούν κατά την διαμόρφωση των δοκιμίων μπορεί να οδηγήσουν σε τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων οι οποίες προκαλούν πρόωμη αστοχία. Επιπλέον, κενά, περιοχές με πλεόνασμα ρητίνης ή υστέρηση σε ρητίνη και μεταβολές στο πάχος της πλάκας μπορεί, επίσης, να οδηγήσουν σε πειραματικά δεδομένα τα οποία δεν είναι αντιπροσωπευτικά.

4.2.2 Κανονιστικές διατάξεις

Οι δοκιμές εφελκυσμού διεξάγονται συνήθως σε εργαστήρια δοκιμών υλικών. Διεθνείς οργανισμοί όπως οι ASTM, BSI, DIN, ISO, EN και MIL έχουν αναπτύξει ένα ευρύ φάσμα προτύπων για τις εφελκυστικές δοκιμές.

Το αμερικανικό πρότυπο ASTM E8 / E8M αποτελεί μια από τις πιο κοινές προδιαγραφές δοκιμών για τον προσδιορισμό των εφελκυστικών ιδιοτήτων των μεταλλικών υλικών. Αυτή η δοκιμή, όπως προαναφέρθηκε, προσδιορίζει σημαντικές μηχανικές ιδιότητες όπως η αντοχή διαρροής, η τελική αντοχή εφελκυσμού, η παραμόρφωση και η μείωση της επιφάνειας. Έτσι, προσδιορίζεται η ολκιμότητα και η αντοχή διαφόρων μετάλλων τα οποία υφίστανται μονοαξονικές εφελκυστικές τάσεις, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (μεταξύ 10 και 38 βαθμών Κελσίου).

Για τη διεξαγωγή της εφελκυστικής δοκιμής είναι απαραίτητο ένα ηλεκτρομηχανικό ή υδραυλικό μηχάνημα δοκιμών εξοπλισμένο με τις κατάλληλες αρπάγες, ένα επιμηκυνσιόμετρο και ένα λογισμικό ικανό να ελέγχει τον ρυθμό παραμόρφωσης και να καταγράφει τα δεδομένα τάσεων – παραμορφώσεων. Το ASTM E8 / E8M προδιαγράφει πολλούς διαφορετικούς τύπους δοκιμίων και ορίζει κατάλληλες γεωμετρίες και διαστάσεις για τον καθένα. Κυλινδρικά, ράβδοι, χαλυβδόφυλλα, κοχλιωτά, στρογγυλά δοκίμια αποτελούν κάποιες από τις επιλογές. Ωστόσο, το πιο κοινό είναι ένα ορθογώνιου σχήματος δοκίμιο με λαιμό (dogbone-shaped) με πλάτος 12,5 mm και μήκος μετρητή (gauge length) 50 mm. Όπως και στα περισσότερα πρότυπα δοκιμών μετάλλων, περιγράφονται τρεις τύποι ελέγχων δοκιμής: με έλεγχο ρυθμού τάσης, με έλεγχο ρυθμού παραμόρφωσης και με έλεγχο μετατόπισης των σταυροειδών κεφαλών. Στο αμερικάνικο πρότυπο αυτοί οι τύποι ελέγχων αναφέρονται ως Μέθοδοι Α, Β και Γ.



Εικόνα 4-8: Μεταλλικά δοκίμια κατάλληλα για εφελκυστικές δοκιμές [Πηγή: hill-engineering.com].

Το ευρωπαϊκό πρότυπο DIN EN ISO 6892-1: «Μεταλλικά υλικά - Δοκιμές εφελκυσμού - Μέθοδος δοκιμής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος» προδιαγράφει τη μέθοδο εφελκυστικής δοκιμής μεταλλικών υλικών και ορίζει τις μηχανικές ιδιότητες που μπορούν να προσδιοριστούν σε θερμοκρασία δωματίου (μεταξύ 10 και 35 βαθμών Κελσίου). Και σε αυτό το πρότυπο καθορίζονται οι γεωμετρίες των δοκιμίων.

Οι διαδικασίες βαθμονόμησης και ιδιαίτερα τα αποτελέσματα και οι ορισμοί των ταξινομήσεων, περιγράφονται στα πρότυπα για τη μέτρηση της δύναμης και της επιμήκυνσης. Από το 2009, τόσο το ISO όσο και το ASTM, έχουν προσαρμόσει εξίσου τον λεγόμενο έλεγχο ρυθμού παραμόρφωσης στο πρότυπό τους για δοκιμές εφελκυσμού σε μέταλλα προκειμένου να βελτιώσουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων στον εντοπισμό των σημείων διαρροής [8].

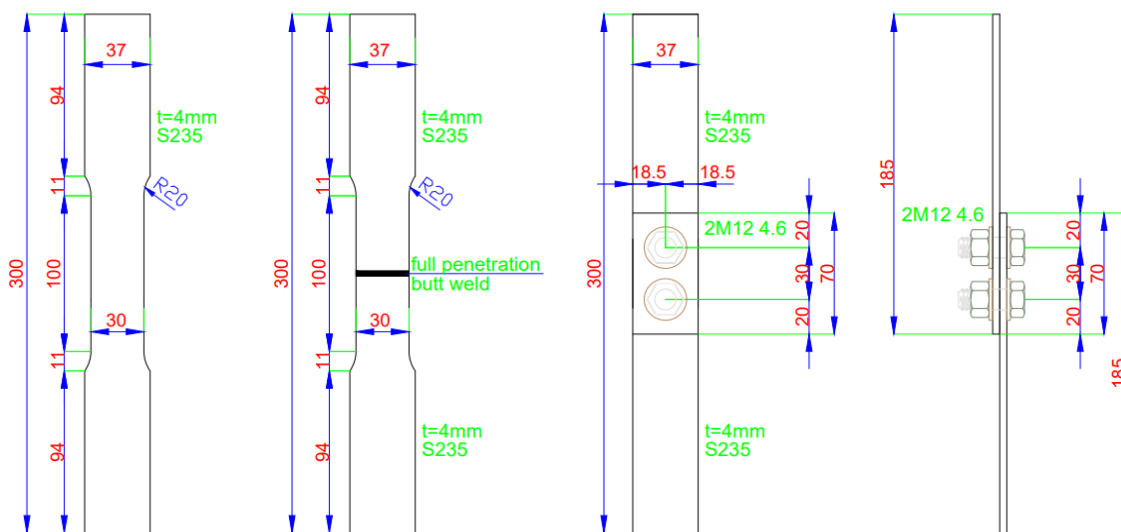
5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΜΕΡΟΣ Α'

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία διαμόρφωσης και προετοιμασίας των δοκιμών, καθώς, επίσης, και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την πραγματοποίηση των μη καταστροφικών δοκιμών στο σκληρόμετρο πάγκου και στο φορητό όργανο σκληρομέτρησης. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών και πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ τους.

5.1 Διαμόρφωση δοκιμών

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύθηκαν διεξοδικά τα πρότυπα και οι διαδικασίες οι οποίες πρέπει να ακολουθούνται κατά την διεξαγωγή των δοκιμών. Με την βοήθεια αυτών προχωρήσαμε στις μετρήσεις σκληρότητας και στην καταγραφή των αποτελεσμάτων μέσω πιστοποιημένων σκληρομέτρων τα οποία χορηγήθηκαν από το προσωπικό του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ.

Για τις ανάγκες του πειραματικού σκέλους της εργασίας, αρχικά, απαραίτητη ήταν η διαμόρφωση και η συγκέντρωση των δοκιμών. Για το λόγο αυτό, μετά από κατάλληλη σκέψη και σύμφωνα με τις διατάξεις των προτύπων, διαμορφώθηκαν τρία διαφορετικά είδη χαλύβδινων δοκιμών τα απλά (Simple-S), τα συγκολλητά (Welded-W) και τα κοχλιωτά (Bolted-B). Και στις τρεις κατηγορίες χρησιμοποιήθηκε χάλυβας κατηγορίας S235.



Εικόνα 5-1: Διαστάσεις απλών, συγκολλητών και κοχλιωτών δοκιμών.

Τα δοκίμια κόπηκαν σε εξωτερικό μηχανουργείο, ενώ η τελική τους διαμόρφωση έγινε στους χώρους του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ. Απαραίτητη ήταν η χρήση του ίδιου ελάσματος σε όλα τα δοκίμια, ώστε να είναι βέβαιο ότι θα διαθέτουν την ίδια ποιότητα χάλυβα. Στο σύνολο διαμορφώθηκαν τρία δοκίμια από κάθε κατηγορία, δηλαδή τρία απλά, τρία συγκολλητά και τρία κοχλιωτά. Το πάχος των δοκιμίων ήταν ίσο με 4mm. Στην Εικόνα 5-1 φαίνονται οι επιθυμητές διαστάσεις των δοκιμίων όπως σχεδιάστηκαν αρχικά, ενώ στις Εικόνες 5-2, 5-3 και 5-4 η τελική τους μορφή.

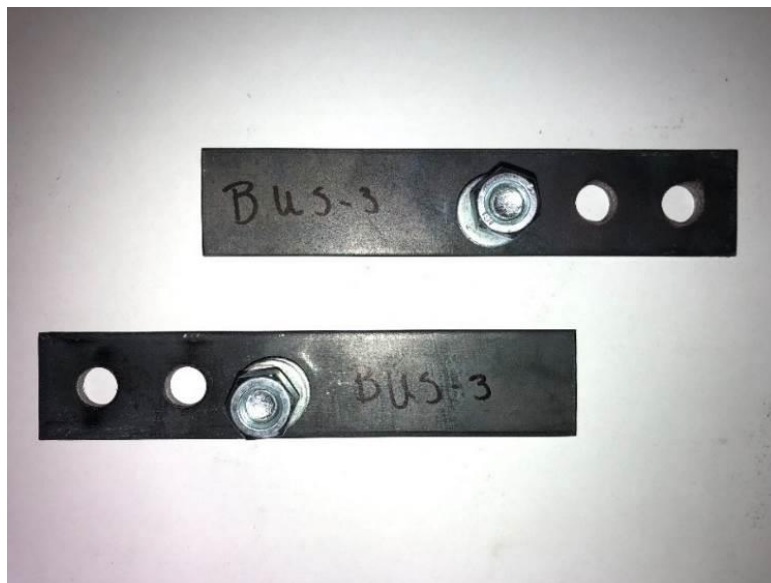


Εικόνα 5-2: Μορφή απλών δοκιμίων (SUS).

Σχετικά με τις ονομασίες των δοκιμίων, θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα SUS δοκίμια προέκυψαν από τα αρχικά των λέξεων Simple, Un-corroded, Static, τα WUS από τις λέξεις Welded, Un-corroded, Static και τέλος τα κοχλιωτά δοκίμια από τα αρχικά των λέξεων Bolted, Un-corroded, Static.



Εικόνα 5-3: Μορφή συγκολλητών δοκιμίων (WUS).



Εικόνα 5-4: Μορφή κοχλιωτών δοκιμίων (BUS).

Εκτός από από αυτές τις τρεις κατηγορίες δοκιμίων, και για να υπάρχει μεγαλύτερο και πιο αντιπροσωπευτικό δείγμα, χρησιμοποιήθηκαν και δοκίμια τα οποία βρίσκονταν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, και τα οποία είχαν, ήδη, υποβληθεί σε δοκιμές εφελκυσμού.

Πιο συγκεκριμένα, τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμές σε δεύτερη φάση ήταν στο σύνολο οχτώ. Δύο από αυτά είχαν πάχος κοντά στα 5mm (5.06mm, 5.08mm), τρία είχαν πάχος σχεδόν 6mm (6.09mm, 6.08mm, 6.19mm), ενώ τα τρία τελευταία διέθεταν πάχοι 10.09mm, 14.89mm και 19.94mm αντίστοιχα. Η ποιότητα χάλυβα προέκυψε S275 για τα περισσότερα δοκίμια.

Στη συνέχεια, απαραίτητη ήταν η προετοιμασία των δοκιμίων. Πριν από την εφαρμογή διεισδυτικού υλικού, η επιφάνεια που εξετάζεται πρέπει να είναι στεγνή και απαλλαγμένη από βρωμιά, γράσο, χνούδια, ίχνη συγκόλλησης, σκουριά, μπογιά, λάδια ή οποιαδήποτε άλλη ξένη ύλη που θα μπορούσε να θολώσει τα ανοίγματα της επιφάνειας ή να επηρεάσει με άλλο τρόπο την δοκιμή, αποτρέποντας τη διείσδυση της σφαίρας στο υλικό. Ανεξαρτήτως της μεθόδου που χρησιμοποιείται για το κόψιμο και την διαμόρφωση των δοκιμίων, η δομή της επιφάνειας αλλοιώνεται σε κάποιο βαθμό. Έτσι, το μη αντιπροσωπευτικό επιφανειακό στρώμα είναι απαραίτητο να απομακρυνθεί και, αντίθετα, να προκύψει ένα λείο και γυαλιστερό φινίρισμα.

Κατά την διαδικασία του γυαλίσματος δεν παράγονται θραύσματα και δεν αφαιρείται υλικό από την επιφάνεια των δοκιμίων. Αυτό είναι δυνατό με τη χρήση λειαντικών χαρτιών (γυαλόχαρτα) με λεπτότερους λειαντικούς κόκκους. Για τα σιδηρούχα υλικά χρησιμοποιούνται χαρτιά καρβιδίου του πυριτίου (SiC). Τα γυαλόχαρτα τοποθετούνται πάνω σε έναν περιστρεφόμενο δίσκο λείανσης. Η λείανση ξεκινά με γυαλόχαρτα με μεγάλους κόκκους (π.χ. 180 grit) και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται γυαλόχαρτα με όλο και μικρότερους κόκκους (240, 320, 400 και 600 grit). Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνονται οι επιθυμητές φυσικές αλλαγές της επιφάνειας λόγω ολισθαίνουσας επαφής με άλλο αντικείμενο.

Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 5-5) φαίνεται η προετοιμασία των μεταλλικών δοκιμίων μέσω της διαδικασίας της λείανσης, όπως πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο. Τα γυαλόχαρτα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτά των 80 και 120 grit.



Εικόνα 5-5: Λείανση δοκιμίων στο εργαστήριο.

Επιπλέον, παρακάτω παρουσιάζεται ένα δοκίμιο μετά την διαδικασία της λείανσης (Εικόνα 5-6).



Εικόνα 5-6: Δοκίμιο μετά την λείανση.

5.2 Στατική δοκιμή μέτρησης σκληρότητας

Σαν πρώτο βήμα πριν την πραγματοποίηση των δοκιμών στο σκληρόμερο πάγκου, απαραίτητη ήταν η εκ των προτέρων επιλογή των διαμέτρων του διεισδυτή και των δυνάμεων που επρόκειτο να εφαρμοστούν. Με την βοήθεια των προτύπων ISO και ASTM (Πίνακας 5-1), και λαμβάνοντας υπόψη ότι τα διαθέσιμα χαλύβδινα δοκίμια παρουσιάζουν σκληρότητα έως 200 HBW, προέκυψε το συμπέρασμα ότι σφαίρες διεισδυτή οι οποίες μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ήταν αυτές των διαμέτρων 2.5, 5 και 10mm. Επιπλέον, οι πιο κατάλληλοι λόγοι δύναμης προς διάμετρο ήταν ίσοι με 10, 15 και 30.

Πίνακας 5-1: Προτεινόμενες τιμές διαμέτρου και δύναμης σε σχέση με σκληρότητα υλικών [Πηγή: ASTM].

Brinell Hardness Scale	Ball Diameter, D [mm]	Force-Diameter Ratio	Nominal Value of Test Force, F [kgf]	Recommended Hardness Range [HBW]
HBW 10/3000	10	30	3000	95.5 to 650
HBW 10/1500	10	15	1500	47.7 to 327
HBW 10/1000	10	10	1000	31.8 to 218
HBW 5/750	5	30	750	95.5 to 650
HBW 5/250	5	10	250	31.8 to 218
HBW 2.5/187.5	2.5	30	187.5	95.5 to 650
HBW 2.5/62.5	2.5	10	62.5	31.8 to 218

Κατά την πραγματοποίηση της πρώτης φάσης δοκιμών στο σκληρόμετρο πάγκου, όπου υποβλήθηκαν σε μετρήσεις τα δοκίμια SUS, WUS, BUS, έλαβαν μέρος 10 σκληρομετρήσεις ανά τεμάχιο-δοκίμιο. Αναλυτικότερα, ένα δοκίμιο δοκιμάστηκε με σφαίρα διαμέτρου 2,5mm, με τον λόγο δύναμης προς διάμετρο να ισούται με 10. Σε δύο δοκίμια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με σφαίρα διαμέτρου 5mm, και λόγους δύναμης-διαμέτρου 10 και 30. Τέλος, τρία δοκίμια δοκιμάστηκαν με σφαίρα διαμέτρου 10mm, με λόγους δύναμης προς διάμετρο ίσους με 10, 15 και 30 αντίστοιχα.



Εικόνα 5-7: Πραγματοποίηση δοκιμής στο σκληρόμετρο πάγκου.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα πάχη των δοκιμίων, οι διάμετροι σφαιρας και οι δυνάμεις εφαρμογής της κάθε δοκιμής.

Πίνακας 5-2: Στοιχεία δοκιμών κάθε τεμαχίου.

ΔΟΚΙΜΙΟ	SUS1	WUS1	WUS2	WUS3	BUS1	BUS2
Πάχος δοκιμίου (mm)	3.99	3.99	3.98	3.98	3.98	4.00
Διάμετρος Σφαιρας (mm)	5	5	10	10	2.5	10
Δύναμη δοκιμής (kgf)	750	250	1000	3000	62.5	1500

Κατά τη πραγματοποίηση της δεύτερης φάσης δοκιμών στο σκληρόμετρο πάγκου, με τα δοκίμια πάχους από 5mm μέχρι 20mm, έλαβαν μέρος 10 σκληρομετρήσεις ανά τεμάχιο-δοκίμιο για κάθε επιλεγόμενη διάμετρο σφαιρας και δύναμη εφαρμογής. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα πάχη των δοκιμίων, οι διαμέτροι σφαιρας και η δύναμη εφαρμογής της κάθε δοκιμής.

Πίνακας 5-3: Στοιχεία δοκιμών κάθε τεμαχίου.

ΔΟΚΙΜΙΟ	T5DW-1L	T5DW-2P	T6B-1	T6W-1
Πάχος δοκιμίου (mm)	5.06	5.08	6.19	6.09
Διάμετρος Σφαιρας 1 (mm)	10	10	10	10
Δύναμη δοκιμής 1 (kgf)	1500	1000	1000	3000
Διάμετρος Σφαιρας 2 (mm)	5	5	5	5
Δύναμη δοκιμής 2 (kgf)	250	750	125	250
Διάμετρος Σφαιρας 3 (mm)	2.5	2.5		2.5
Δύναμη δοκιμής 3 (kgf)	187.5	62.5		187.5

ΔΟΚΙΜΙΟ	T6W-2	T10-B1	T15-T1	T20-T1
Πάχος δοκιμίου (mm)	6.08	10.09	14.89	19.94
Διάμετρος Σφαιρας 1 (mm)	10	10	10	10
Δύναμη δοκιμής 1 (kgf)	1500	1000	3000	1500
Διάμετρος Σφαιρας 2 (mm)	5	5	5	5
Δύναμη δοκιμής 2 (kgf)	750	250	750	125
Διάμετρος Σφαιρας 3 (mm)	2.5	2.5		2.5
Δύναμη δοκιμής 3 (kgf)	62.5	62.5		187.5

Η δύναμη εφαρμογής διατηρήθηκε για 15 δευτερόλεπτα σε κάθε ένα τεμάχιο και στη συνέχεια ο δεισδυτής απομακρύνθηκε. Πολύ σημαντικό ήταν να εξασφαλίζεται επαρκής απόσταση μεταξύ των "χτυπημάτων" της σφαίρας στα εξεταζόμενα δοκίμια, αλλά και από τα άκρα αυτών. Στην Εικόνα 5-8 παρουσιάζεται το σκληρόμετρο πάγκου στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές.



(a)



(β)

Εικόνα 5-8: Εφαρμογή δοκιμών στο σκληρόμετρο πάγκου.

Μετά την εφαρμογή της δύναμης για τη μέτρηση της σκληρότητας σε διείσδυση, στην επιφάνεια των δοκιμίων δημιουργήθηκαν αποτυπώματα σχήματος σφαιρικού τμήματος, όπως φαίνονται στην Εικόνα 5-9.



Εικόνα 5-9: Αποτυπώματα μετά την εφαρμογή της δύναμης στο σκληρόμετρο πάγκου.

Το επόμενο βήμα για την εύρεση του μεγέθους της σκληρότητας των δοκιμίων, ήταν η μέτρηση της διαμέτρου των αποτυπωμάτων d (σε mm). Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (Dino-Lite, Software DinoCapture 2.0) (Εικόνα 5-10).

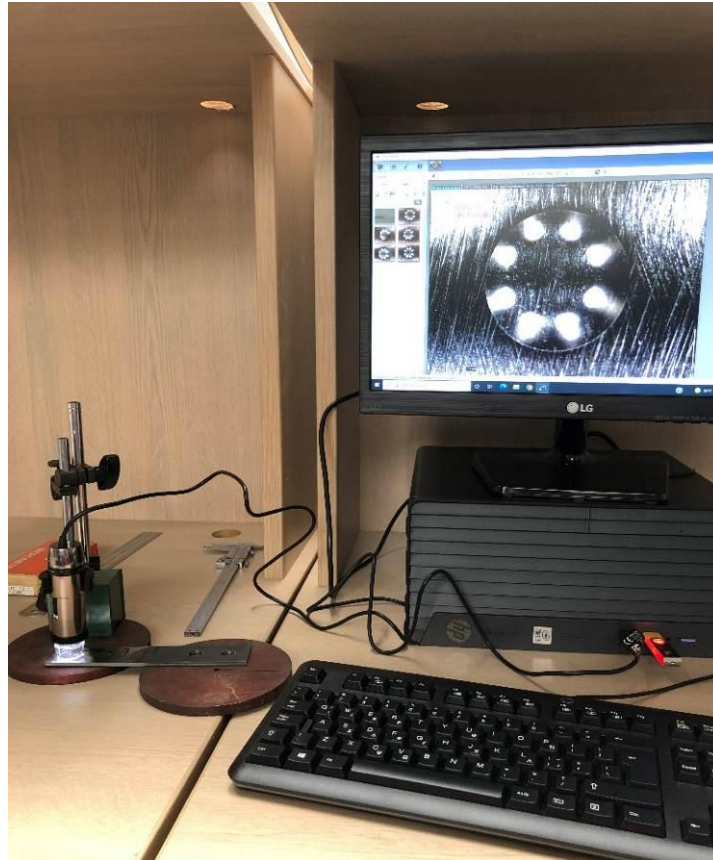


Εικόνα 5-10: Χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

Για να είναι αξιόπιστες οι πληροφορίες που λαμβάνονται από οποιοδήποτε όργανο και να εξαγονται ορθά αποτελέσματα, πρέπει πρώτου διενεργηθεί οποιοσδήποτε έλεγχος να έχει ρυθμιστεί κατάλληλα η συσκευή. Αυτή η διαδικασία λέγεται βαθμονόμηση (calibration).

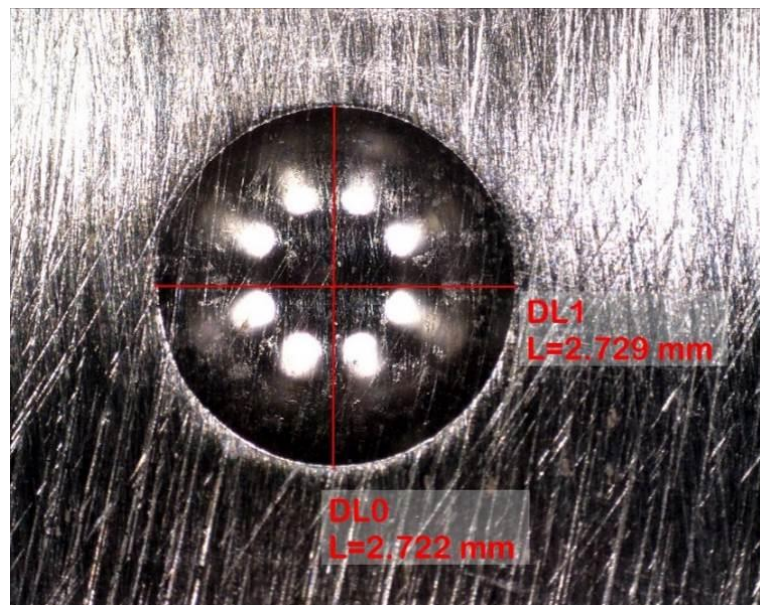
Κατά την πραγματοποίηση μετρήσεων με οπτικό μεταλλογραφικό μικροσκόπιο χρησιμοποιείται κλίμακα η οποία προσαρμόζεται στον προσοφθάλμιο φακό. Πριν από τη μέτρηση είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται βαθμονόμηση της κλίμακας αυτής, δηλαδή αντιστοίχιση των υποδιαιρέσεων της με πραγματικά μm ή mm της παρατηρούμενης επιφάνειας. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται «πρότυπες κλίμακες» οι οποίες τοποθετούνται στην ειδική υποδοχή παρατήρησης του μικροσκοπίου. Για κάθε τέτοια κλίμακα δίδεται από την κατασκευάστρια εταιρεία η απόσταση σε μm ή mm μεταξύ δύο διαδοχικών διαβαθμίσεων της. Παρατηρώντας την κλίμακα αυτή με το μικροσκόπιο, φαίνεται ότι ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη κάθε φορά μεγέθυνση η εικόνα της μεταβάλλεται. Όμως η πραγματική απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών υποδιαιρέσεων της παραμένει η ίδια. Αντίθετα, η εικόνα της προσοφθάλμιας κλίμακας δεν υφίσταται καμία μεγέθυνση ή αλλαγή, επειδή παρεμβάλλεται στο τέλος της πορείας της φωτεινής δέσμης. Παρατηρώντας, λοιπόν, ταυτόχρονα για κάθε μεγέθυνση τις δύο κλίμακες και με αντιστοίχιση μεταξύ τους, υπολογίζεται η ισοδυναμία κάθε υποδιαίρεσης της προσοφθάλμιας κλίμακας με πραγματικά μm ή mm μήκους. Η αντιστοίχιση αυτή μεταβάλλεται όταν αλλάζει η μεγέθυνση του μικροσκοπίου, οπότε η βαθμονόμηση πρέπει να γίνεται για όλες τις δυνατές μεγεθύνσεις.

Συνεπώς, ήταν αναγκαίο να πραγματοποιηθούν βαθμονομήσεις του μικροσκοπίου πριν από τις μετρήσεις των διαμέτρων σε κάθε διαφορετικό δοκίμιο.



Εικόνα 5-11: Μέτρηση διαμέτρων με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

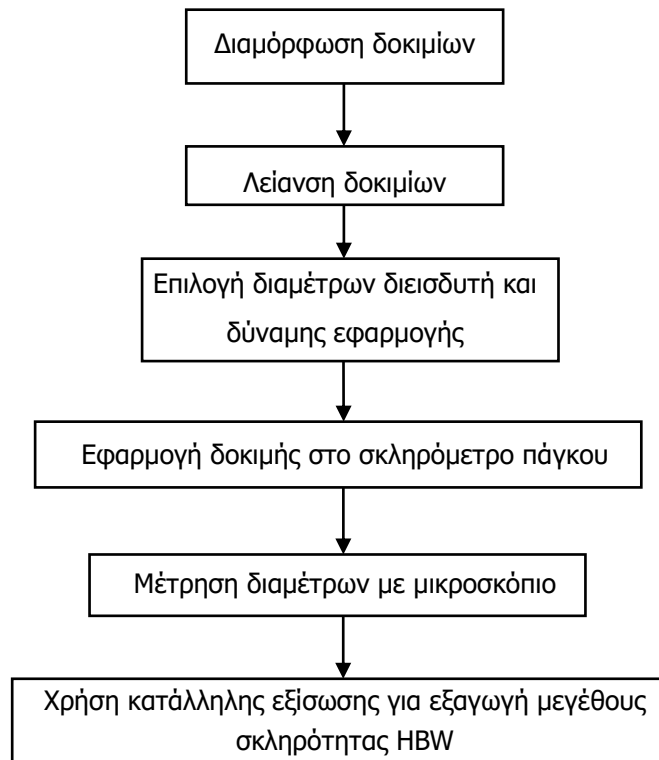
Για την εξαγωγή του μεγέθους της σκληρότητας κατά Brinell, όπως προαναφέρθηκε, είναι απαραίτητη η μέτρηση της διαμέτρου του αποτυπώματος σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Έτσι, με τη βοήθεια του μικροσκοπίου, μετρήθηκαν σε όλα τα δοκίμια δύο διάμετροι (Εικόνα 5-12).



Εικόνα 5-12: Υπολογισμός διαμέτρων αποτυπώματος στο μικροσκόπιο.

Έπειτα με την χρήση της κατάλληλης εξίσωσης (Εξ. 1-6), και ανάλογα με την δύναμη εφαρμογής (F), την διάμετρο του διεισδυτή (D) και την μετρούμενη μέση τιμή διαμέτρου του αποτυπώματος (d) για κάθε δοκίμιο, προέκυψε η σκληρότητα HBW.

Τέλος, παρουσιάζονται συνοπτικά τα βήματα για την διαδικασία εξαγωγής του μεγέθους σκληρότητας HBW στα χαλύβδινα δοκίμια.



Σχήμα 5-1: Διάγραμμα ροής υπολογισμού μεγέθους HBW με σκληρόμετρο πάγκου.

5.2.1 Αποτελέσματα δοκιμών

Τα αποτελέσματα των δοκιμών για την εξαγωγή του μεγέθους HBW με σκληρόμετρο πάγκου για τα πρώτα δοκίμια (SUS, WUS, BUS) δίνονται στους Πίνακες 5-4 και 5-5. Εκεί αναγράφονται οι μέσες τιμές των διαμέτρων που μετρήθηκαν με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο για κάθε ένα από τα δέκα «χτυπήματα» σε κάθε δοκίμιο. Έπειτα, υπολογίστηκαν οι τιμές HBW για κάθε διάμετρο αποτυπώματος, αλλά και η μέση τιμή τους.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σκληρομέτρησης για τα δεύτερα δοκίμια δίνονται στους Πίνακες 5-6 έως 5-13. Σε κάθε δοκίμιο αναγράφονται η διάμετρος της σφαίρας που χρησιμοποιήθηκε και η δύναμη εφαρμογής της δοκιμής. Για παράδειγμα, τιμή σκληρότητας HBW5/750 υποδηλώνει ότι χρησιμοποιήθηκε σφαίρα διαμέτρου 5mm και δύναμη 750 kgf. Ο χρόνος εφαρμογής της δύναμης ήταν 15sec.

Η μετατροπή των τιμών σκληρότητας (HBW) που προέκυψαν σε τιμές εφελκυστικής αντοχής (MPa) πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια πινάκων, οι οποίοι βρίσκονται στο πρότυπο ISO 18265:2013(E) (Table A.1). Για ενδιάμεσες τιμές οι οποίες δεν υπάρχουν στον πίνακα δημιουργήθηκε το Γράφημα 5-3.

Πίνακας 5-4: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (πρώτα δοκίμια).

Specimen	SUS1		WUS1		WUS2	
Run	d (mm)	HBW 5/750	d (mm)	HBW 5/250	d (mm)	HBW 10/1000
1	2.725	118	1.712	105	3.431	105
2	2.727	118	1.697	107	3.435	105
3	2.716	119	1.714	105	3.433	105
4	2.720	119	1.713	105	3.413	106
5	2.738	117	1.715	105	3.417	106
6	2.779	113	1.700	107	3.342	111
7	2.752	116	1.703	107	3.364	109
8	2.778	113	1.702	107	3.369	109
9	2.786	113	1.701	107	3.363	109
10	2.774	114	1.697	107	3.356	110
\bar{H}	2.749	116	1.705	106	3.392	107
$f_{u,HBW}$ (MPa)		390		357		361

Πίνακας 5-5: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (πρώτα δοκίμια-συνέχεια).

Specimen	WUS3		BUS1		BUS2	
Run	d (mm)	HBW 10/3000	d (mm)	HBW 2,5/62,5	d (mm)	HBW 10/1500
1	5.844	101	0.809	119	3.972	116
2	5.835	102	0.818	116	3.913	120
3	5.852	101	0.808	119	3.942	118
4	5.800	103	0.820	115	3.940	118
5	5.765	104	0.822	115	3.954	117
6	5.732	106	0.830	112	3.909	120
7	5.714	107	0.807	119	3.905	120
8	5.710	107	0.809	119	3.900	121
9	5.703	107	0.806	119	3.885	122
10	5.685	108	0.813	117	3.876	122
\bar{H}	5.764	105	0.814	117	3.919	119
$f_{u,HBW}$ (MPa)		351		393		402

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πάχος των σκληρομετρούμενων δοκιμίων ήταν αρκετά μικρό (4mm), κάτι που είχε ως αποτέλεσμα να δημιουργηθούν ορατές παραμορφώσεις στην αντίθετη πλευρά των δοκιμίων SUS1, WUS2, WUS3, BUS2 μετά την εφαρμογή της δύναμης δοκιμής. Όπως παρατηρούμε, οι δυνάμεις που εφαρμόστηκαν σε αυτά τα δοκίμια ήταν αρκετά μεγάλες.

Πίνακας 5-6: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια).

Specimen	T5DW-1L		T5DW-1L		T5DW-1L	
Run	d (mm)	HBW 10/1500	d (mm)	HBW 5/250	d (mm)	HBW 2.5/187.5
1	3.620	141	1.494	139	1.222	150
2	3.603	142	1.487	141	1.216	151
3	3.595	143	1.481	142	1.222	150
4	3.602	142	1.477	143	1.223	149
5	3.596	143	1.477	143	1.217	151
6	3.608	142	1.458	147	1.217	151
7	3.594	143	1.461	146	1.218	151
8	3.595	143	1.462	146	1.223	150
9	3.587	144	1.464	145	1.220	150
10	3.604	142	1.467	145	1.216	151
\bar{H}	3.600	142	1.473	144	1.219	150
$f_{u,HBW}$ (MPa)		480		484		407

Πίνακας 5-7: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).

Specimen	T5DW-2P		T5DW-2P		T5DW-2P	
Run	d (mm)	HBW 10/1000	d (mm)	HBW 5/750	d (mm)	HBW 2.5/62.5
1	3.006	138	2.474	146	0.748	139
2	2.998	138	2.472	146	0.743	141
3	2.987	140	2.477	146	0.738	143
4	3.002	138	2.477	146	0.750	138
5	2.998	138	2.483	145	0.739	142
6	2.997	139	2.479	145	0.739	142
7	3.005	138	2.472	146	0.740	142
8	3.005	138	2.476	146	0.737	143
9	2.995	139	2.471	146	0.751	138
10	3.007	138	2.479	145	0.752	137
\bar{H}	3.000	138	2.476	146	0.744	141
$f_{u,HBW}$ (MPa)		466		491		474

Πίνακας 5-8: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).

Specimen	T6B-1		T6B-1	
	Run	d (mm)	HBW 10/1000	d (mm)
1	2.805	159		
2	2.811	158		
3	2.814	158		
4	2.814	158		
5	2.802	159		
6	2.808	158		
7	2.814	158		
8	2.810	158		
9	2.821	157		
10	2.812	158		
\bar{H}	2.811	158	--	--
$f_{u,HBW}$ (MPa)		533		--

Πίνακας 5-9: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).

Specimen	T6W-1		T6W-1		T6W-1	
	Run	d (mm)	HBW 10/3000	d (mm)	HBW 5/250	d (mm)
1	4.747	159	1.422	154	1.202	155
2	4.758	159	1.422	154	1.198	156
3	4.758	159	1.426	153	1.207	154
4	4.712	162	1.428	153	1.207	154
5	4.725	161	1.434	152	1.204	155
6	4.756	159	1.430	152	1.204	155
7	4.827	154	1.425	154	1.204	155
8	4.712	162	1.436	151	1.208	154
9	4.731	161	1.424	154	1.203	155
10	4.771	158	1.436	151	1.207	154
\bar{H}	4.749	159	1.428	153	1.204	155
$f_{u,HBW}$ (MPa)		537		515		521

Για την δεύτερη δοκιμή του δοκιμίου T6B-1, με διάμετρο σφαίρας 5mm και δύναμη εφαρμογής 125 kgf, δεν προέκυψαν αποτελέσματα, καθώς, σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο, αυτές οι συνθήκες δοκιμής είναι προτεινόμενες για δοκίμια σκληρότητας από 15.9 έως 109HBW. Συνεπώς, εφόσον τα συγκεκριμένα δοκίμια παρουσίασαν σκληρότητα μεγαλύτερη από 109HBW δεν μπορεί να προκύψει κάποιο αποτέλεσμα. Το ίδιο ισχύει και για την δεύτερη μέτρηση του δοκιμίου T20T-1.

Πίνακας 5-10: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).

Specimen	T6W-2		T6W-2		T6W-2	
Run	d (mm)	HBW 10/1500	d (mm)	HBW 5/750	d (mm)	HBW 2.5/62.5
1	3.495	152	2.343	164	0.725	148
2	3.491	152	2.338	165	0.724	149
3	3.506	150	2.341	164	0.719	151
4	3.557	146	2.341	164	0.722	149
5	3.534	148	2.346	163	0.724	149
6	3.539	148	2.341	164	0.720	151
7	3.526	149	2.347	163	0.734	145
8	3.528	149	2.346	163	0.726	148
9	3.535	148	2.347	163	0.733	145
10	3.522	149	2.342	164	0.725	148
\bar{H}	3.523	149	2.343	164	0.725	148
$f_{u,HBW}$ (MPa)		502		553		500

Πίνακας 5-11: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).

Specimen	T10T-1		T10T-1		T10T-1	
Run	d (mm)	HBW 10/1000	d (mm)	HBW 5/250	d (mm)	HBW 2.5/62.5
1	2.880	150	1.447	149	0.729	147
2	2.886	150	1.456	147	0.733	145
3	2.894	149	1.454	147	0.725	148
4	2.883	150	1.444	149	0.727	147
5	2.887	150	1.452	148	0.728	147
6	2.888	149	1.449	148	0.733	145
7	2.884	150	1.457	147	0.725	148
8	2.890	149	1.460	146	0.736	144
9	2.875	151	1.448	149	0.727	148
10	2.883	150	1.449	148	0.718	151
\bar{H}	2.885	150	1.451	148	0.728	147
$f_{u,HBW}$ (MPa)		505		499		496

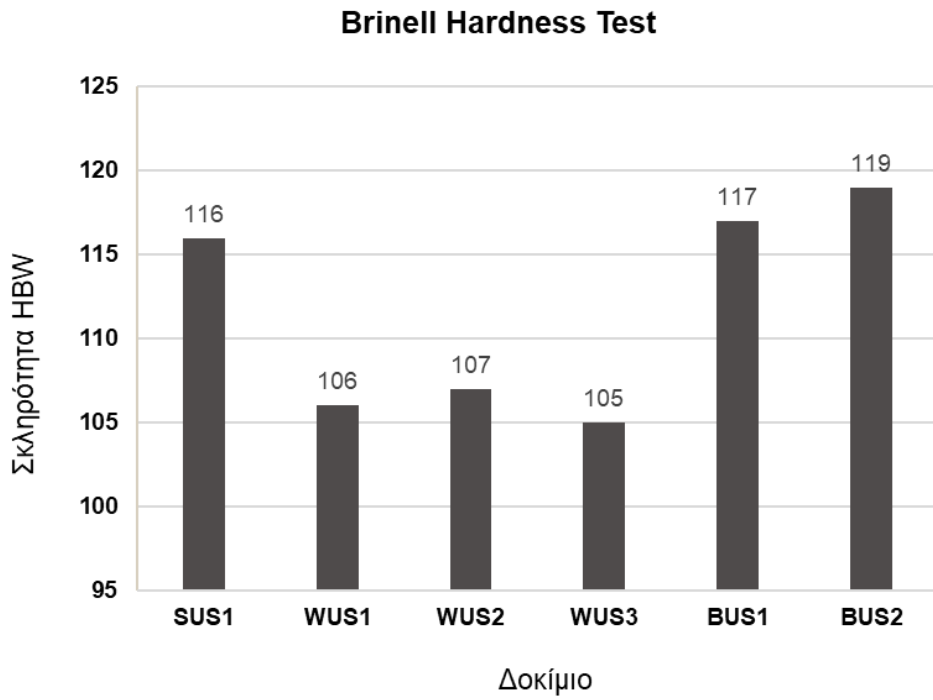
Πίνακας 5-12: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).

Specimen	T15T-1		T15T-1	
	Run	d (mm)	HBW 10/3000	d (mm)
1	4.891	150	2.455	148
2	4.901	149	2.451	149
3	4.892	149	2.455	148
4	4.907	148	2.443	150
5	4.930	147	2.452	149
6	4.926	147	2.438	151
7	4.938	147	2.446	150
8	4.933	147	2.449	149
9	4.931	147	2.458	148
10	4.940	146	2.454	148
\bar{H}	4.919	148	2.450	149
$f_{u,HBW}$ (MPa)		498		502

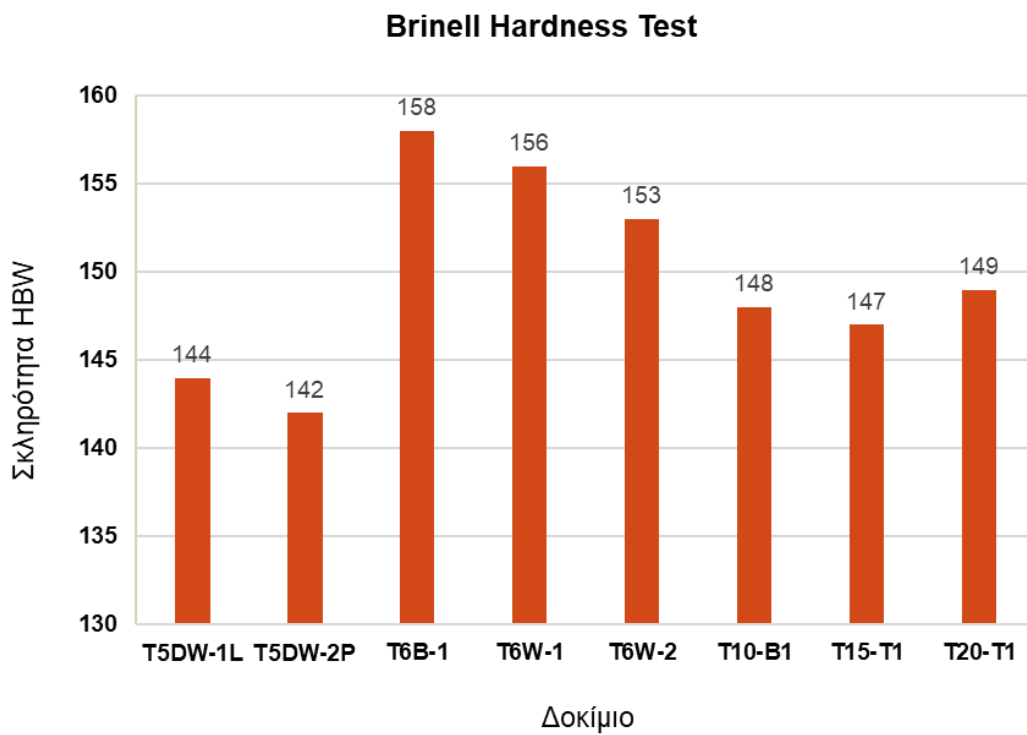
Πίνακας 5-13: Αποτελέσματα σκληρομετρήσεων σε HBW και MPa (δεύτερα δοκίμια-συνέχεια).

Specimen	T20T-1		T20T-1		T20T-1	
	Run	d (mm)	HBW 10/1500	d (mm)	HBW 5/125	d (mm)
1	3.497	151			1.202	155
2	3.507	150			1.202	155
3	3.501	151			1.207	154
4	3.499	151			1.201	156
5	3.503	151			1.217	151
6	3.498	151			1.202	155
7	3.499	151			1.203	155
8	3.506	150			1.202	155
9	3.495	151			1.203	155
10	3.501	151			1.205	154
\bar{H}	3.500	151	--	--	1.204	151
$f_{u,HBW}$ (MPa)		509		--		509

Τέλος, δημιουργήθηκαν ορατές παραμορφώσεις στην αντίθετη πλευρά από την εφαρμογή της δύναμης στα δοκίμια T5DW-1L, T6W-1, T6W-2 και στις δοκιμές με χρήση σφαίρας διαμέτρου 10mm. Όπως παρατηρούμε, το πάχος αυτών των δοκιμών ήταν αρκετά μικρό και οι δυνάμεις που εφαρμόστηκαν ήταν οι μεγαλύτερες δυνατές (1500 kgf, 3000 kgf).

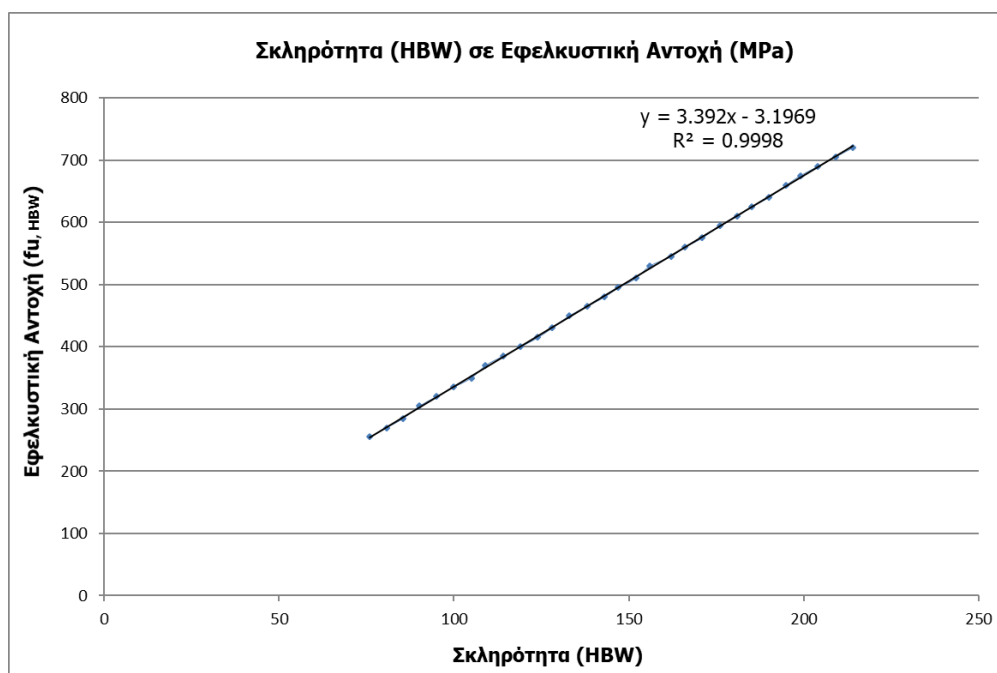


Γράφημα 5-1: Αποτελέσματα πρώτων δοκιμών.



Γράφημα 5-2: Αποτελέσματα δεύτερων δοκιμών.

Γράφημα 5-3: Μετατροπή Σκληρότητας Brinell σε Εφελκυστική Αντοχή (από Πίνακα A.1/ISO18265)



5.2.2 Εκτίμηση αβεβαιότητας

Η ποιότητα μιας μέτρησης καθορίζεται από στατιστικά στοιχεία. Κατά την αναφορά του αποτελέσματος μιας δοκιμής θεωρείται καλή πρακτική να δίνεται κάποια ποσοτική ένδειξη της ποιότητας του, ώστε όσοι το χρησιμοποιούν να μπορούν να εκτιμήσουν την αξιοπιστία του. Χωρίς μια τέτοια ένδειξη τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν μπορούν να συγκριθούν, ούτε μεταξύ τους ούτε με τιμές αναφοράς που δίνονται σε προδιαγραφές ή πρότυπα. Επομένως, είναι απαραίτητο να υπάρχει μια εύκολα κατανοητή, εφαρμόσιμη και γενικά αποδεκτή διαδικασία για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας του αποτελέσματος μιας μέτρησης, δηλαδή για την αξιολόγηση και έκφραση της αβεβαιότητάς του.

Η εκτίμηση της αβεβαιότητας αποτελεί πολύ σημαντικό στατιστικό στοιχείο. Η λέξη «αβεβαιότητα» σημαίνει αμφιβολία, και επομένως με την ευρεία της έννοια «αβεβαιότητα μέτρησης» σημαίνει αμφιβολία για την εγκυρότητα του αποτελέσματος μιας μέτρησης. Εναλλακτικά από την οδηγία της EURACHEM για την αβεβαιότητα δίνεται ο ορισμός "Η παράμετρος που συνδέεται με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης και χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που μπορούν λογικά να αποδοθούν στο μετρούμενο μέγεθος" [34]. Ουσιαστικά η αβεβαιότητα αντανάκλα την έλλειψη ακριβούς γνώσης της τιμής της μέτρησης.

Για τον προσδιορισμό του μεγέθους της αβεβαιότητας των μετρήσεων που προκύπτουν από τις δοκιμές με σταθερά σκληρόμετρα πάγκου υπάρχουν διατάξεις στα πρότυπα (ISO, ASTM). Αυτές σχετίζονται με την αβεβαιότητα λόγω βαθμονόμησης των πρότυπων πλακιδίων, λόγω βαθμονόμησης της μηχανής στην οποία εκτελούνται οι δοκιμές και του μέγιστου επιτρεπόμενου σφάλματος. Με τη βοήθεια αυτών των οδηγιών είναι δυνατό να εκπληρωθεί απλά και άμεσα η απαίτηση των διεθνών προτύπων που επιζητούν κάθε τιμή μέτρησης σκληρότητας να δηλώνει την αβεβαιότητά της.

Στην πράξη υπάρχουν πολλές πιθανές πηγές αβεβαιότητας οι οποίες επηρεάζουν, άμεσα ή έμμεσα, μια μέτρηση, όπως:

- Η μη αντιπροσωπευτική δειγματοληψία (το δείγμα που μετρήθηκε μπορεί να μην αντιπροσωπεύει την καθορισμένη μέτρηση).
- Η ανεπαρκής γνώση των επιπτώσεων των περιβαλλοντικών συνθηκών στη μέτρηση.
- Η προσωπική προκατάληψη στην ανάγνωση αναλογικών οργάνων.
- Το πεπερασμένο όριο ανάλυσης οργάνων ή διάκρισης.
- Οι ανακριβείς τιμές σταθερών και άλλων παραμέτρων που λαμβάνονται από εξωτερικές πηγές.
- Οι προσεγγίσεις και οι παραδοχές που ενσωματώνονται στη μέθοδο κατά τη διαδικασία μέτρησης.
- Οι μεταβολές στις επαναλαμβανόμενες παρατηρήσεις του μετρητή υπό ίδιες συνθήκες.

Σύμφωνα με το ISO, η εκτίμηση της αβεβαιότητας μπορεί να προσδιοριστεί με δύο μεθόδους. Η πρώτη αποτελεί μία απλοποιημένη μέθοδο η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να χρειάζεται να ληφθεί υπόψη το μέγεθος οποιουδήποτε συστηματικού σφάλματος της μηχανής σκληρομετρήσεων ($b=H-H_{CRM}$). Από την άλλη πλευρά, εάν η απόκλιση της μέτρησης της σκληρότητας (b) λαμβάνεται υπόψη στο αποτέλεσμα, τότε ακολουθείται η Μέθοδος 2. Η αβεβαιότητα μέτρησης σύμφωνα με τη Μέθοδο 1 είναι μεγαλύτερη από την αβεβαιότητα σύμφωνα με τη Μέθοδο 2.

Ο προσδιορισμός της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων βαθμονόμησης των πρότυπων πλακιδίων συγκεκριμένης σκληρότητας αναφέρεται στο τρίτο μέρος του ISO 6506-1 ("Οδηγός για την εκτίμηση της αβεβαιότητας στη μέτρηση"). Οι τύποι υπολογισμού για τις Μεθόδους 1 και 2 είναι:

$$U = k \sqrt{u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_x^2 + \left(\frac{u_{mpe}}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (5-1)$$

$$U_{corr} = k \sqrt{u_{CRM}^2 + u_H^2 + u_{ms}^2} \quad (5-2)$$

Οι εξισώσεις 1 και 2 αντιπροσωπεύουν τη διευρυμένη αβεβαιότητα (expanded uncertainty), U , η οποία βασίζεται σε μια τυπική αβεβαιότητα πολλαπλασιαζόμενη με τον συντελεστή κάλυψης (coverage factor - $k=2$), ο οποίος για μια κανονική κατανομή αντιστοιχεί σε πιθανότητα κάλυψης, p , περίπου 95%.

Η διευρυμένη αβεβαιότητα η οποία προκύπτει από το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα (U_{mpe}) υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$U_{mpe} = E_{rel} \times X_{CRM} \quad (5-3)$$

Όπου:

- E_{rel} : το αποδεκτό σφάλμα (από Πίνακα 2 του ISO 6506-2:2014)
- X_{CRM} : προκύπτει από το πιστοποιητικό βαθμονόμησης του CRM

Η τυπική αβεβαιότητα σκληρότητας του CRM (Certified Reference Material) (u_{CRM}) υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$u_{CRM} = \frac{U_{CRM}}{2} \quad (5-4)$$

Όπου:

- U_{CRM} : προκύπτει από το πιστοποιητικό βαθμονόμησης του CRM

Η τυπική αβεβαιότητα της μηχανής δοκιμών σκληρότητας κατά τη μέτρηση του CRM (u_H) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$u_H = t \times s_H \quad (5-5)$$

Όπου:

- s_H : η τυπική απόκλιση από τις μετρήσεις στο CRM
- t : από Πίνακα G2 [9]

Η τυπική αβεβαιότητα λόγω ανάλυσης του συστήματος μέτρησης διαμέτρων αποτυπώματος (u_{ms}) υπολογίζεται ως:

$$u_{ms} = \frac{\delta ms}{2\sqrt{3}} \times \frac{HBW}{d} \times \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{\sqrt{D^2 - d^2}} \quad (5-6)$$

Όπου:

- D : η διάμετρος της σφαίρας του διεισδυτή
- d : η διάμετρος του αποτυπώματος που μετρήθηκε
- δms : η ανάλυση μικροσκοπίου

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η διαδικασία εκτίμησης της αβεβαιότητας των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο σκληρόμετρο πάγκου. Χρησιμοποιήθηκε πρότυπο πλακίδιο με τιμή σκληρότητας 204 HBW. Σύμφωνα με την ευρωπαϊκή διάταξη, σε κάθε πρότυπο πλακίδιο πρέπει να εφαρμόζονται τουλάχιστον πέντε «χτυπήματα», ομοίμορφα κατανομημένα σε ολόκληρη την επιφάνεια του υλικού. Στην συγκεκριμένη δοκιμή η σφαίρα είχε διάμετρο 5 mm και η δύναμη εφαρμογής ήταν ίση με 750 kgf. Εφαρμόστηκαν έξι μετρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5-14: Αποτελέσματα μετρήσεων πρότυπου πλακιδίου.

Specimen	CRM		
	Run	d (mm)	HBW 5/750
1	2.099	207	
2	2.092	208	
3	2.111	204	
4	2.115	204	
5	2.112	204	
6	2.113	204	
\bar{H}	3.500	205	
s_H		1.87	

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν η πρώτη. Σύμφωνα με το πιστοποιητικό βαθμονόμησης το οποίο διαθέτει το σκληρόμετρο πάγκου, η διευρυμένη αβεβαιότητα του πρότυπου πλακιδίου είναι ίση με $U_{CRM}=2,53$. Συνεπώς, η τυπική αβεβαιότητα της σκληρότητάς του υπολογίζεται ως $u_{CRM}=U_{CRM}/2=1,265$.

Η διευρυμένη αβεβαιότητα που προκύπτει από το μέγιστο επιτρεπόμενο σφάλμα ισούται με $U_{\text{mpc}}=6,12$, καθώς η μέση τιμή HBW για το CRM είναι ίση με 204 και το E ίσο με 0,03 (Πίνακας 5-19). Επιπλέον, η τυπική αβεβαιότητα της μηχανής δοκιμών σκληρότητας κατά τη μέτρηση του CRM ισούται με $u_H=2,13$ ($t=1,14$ για σύνολο μετρήσεων $n=5$, $s_H=1.87$).

Στην συνέχεια, για κάθε αποτέλεσμα σκληρομέτρησης υπολογίζεται η τυπική αβεβαιότητα λόγω ανάλυσης του συστήματος μέτρησης διαμέτρων αποτυπώματος (u_{ms}) με βάση την Εξ. (5-6). Το u_{ms} θεωρήθηκε ίσο με 0,0025.

Τέλος, στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εκτίμησης της αβεβαιότητας για κάθε μία δοκιμή που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο. Αφού υπολογίστηκε η διευρυμένη αβεβαιότητα (U), τα αποτελέσματα αναφέρονται ως: $X = x \pm U$, όπου X είναι η εκτιμώμενη τιμή του δείκτη μέτρησης, x είναι το μέσο αποτέλεσμα σκληρότητας HBW μιας δοκιμής και U είναι η διευρυμένη αβεβαιότητα που σχετίζεται με το x.

Πίνακας 5-15: Εκτίμηση αβεβαιότητας δοκιμών.

Specimen	SUS1	WUS1	WUS2	WUS3	BUS1	BUS2
D (mm)	5	5	10	10	2.5	10
d (mm)	2.749	1.705	3.392	5.764	0.814	3.919
HBW	116	106	107	105	117	119
u_{ms}	0.067	0.092	0.047	0.029	0.149	0.024
U	8.632	8.633	8.631	8.631	8.636	8.631
$X=x \pm U$	116±8.6	106±8.6	107±8.6	105±8.6	117±8.6	119±8.6

Πίνακας 5-16: Εκτίμηση αβεβαιότητας δοκιμών (συνέχεια).

Specimen	T5DW-1L			T5DW-2P			T6B-1
	10	5	2.5	10	5	2.5	
D (mm)	10	5	2.5	10	5	2.5	10
d (mm)	3.600	1.473	1.219	3.000	2.476	0.744	2.811
HBW	142	144	150	138	146	141	158
u_{ms}	0.059	0.144	0.190	0.068	0.091	0.279	0.083
U	8.632	8.636	8.639	8.632	8.632	8.649	8.632
$X=x \pm U$	142±8.6	144±8.6	150±8.6	138±8.6	146±8.6	141±8.6	158±8.6

Πίνακας 5-17: Εκτίμηση αβεβαιότητας δοκιμών (συνέχεια).

Specimen	T6W-1			T6W-2		
	10	5	2.5	10	5	2.5
D (mm)	10	5	2.5	10	5	2.5
d (mm)	4.749	1.428	1.204	3.523	2.343	0.725
HBW	159	153	155	149	164	148
u_{ms}	0.051	0.158	0.198	0.063	0.107	0.301
U	8.632	8.637	8.640	8.632	8.634	8.652
$X=x \pm U$	159±8.6	153±8.6	155±8.6	149±8.6	164±8.6	148±8.6

Πίνακας 5-18 Εκτίμηση αβεβαιότητας δοκιμών (συνέχεια).

Specimen	T10T-1			T15T-1		T20T-1	
D (mm)	10	5	2.5	10	5	10	2.5
d (mm)	2.885	1.451	0.728	4.919	2.450	3.500	1.204
HBW	150	148	147	148	149	151	151
u_{ms}	0.076	0.150	0.209	0.046	0.094	0.064	0.193
U	8.652	8.636	8.641	8.632	8.633	8.632	8.639
X=x ± U	150±8.6	148±8.6	147±8.6	148±8.6	149±8.6	151±8.6	151±8.6

Επιπλέον, για τα αποτελέσματα κάθε δοκιμίου απαραίτητο ήταν να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα (R) των μετρούμενων διαμέτρων κάθε δοκιμής, η οποία υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$R = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{average}}} \quad (5-7)$$

Όπου:

- d_{\max} = η μέγιστη μετρούμενη διάμετρος αποτυπώματος
- d_{\min} = η ελάχιστη μετρούμενη διάμετρος αποτυπώματος
- d_{average} = η μέση τιμή των διαμέτρων

Καθώς, επίσης, και το μέγιστο αποδεκτό σφάλμα (E):

$$E = 1 - \frac{HBW - S_x}{HBW} \quad (5-8)$$

Όπου:

- HBW = η μέση τιμή σκληρότητας
- S_x = η τυπική απόκλιση

Πίνακας 5-19: Επαναληψιμότητα και σφάλμα της μηχανής δοκιμής για λόγο F/D=30 [Πηγή: ISO 6506-2].

Σκληρότητα	Μέγιστη Αποδεκτή Επαναληψιμότητα, R % της μέσης τιμής διαμέτρου	Μέγιστο Αποδεκτό Σφάλμα, E % της μέσης τιμής HBW
Hc < 250 HBW	3,0	±3,0
Hc από 250 HBW μέχρι 450 HBW	2,5	±2,5
Hc > 450 HBW	2,0	±2,0

Πίνακας 5-20: Επαναληψιμότητα και σφάλμα της μηχανής δοκιμής για άλλους λόγους F/D [Πηγή: ISO 6506-2].

Σκληρότητα	Μέγιστη Αποδεκτή Επαναληψιμότητα, R % της μέσης τιμής διαμέτρου	Μέγιστο Αποδεκτό Σφάλμα, E % της μέσης τιμής HBW
Hc < 250 HBW	3,0	±3,0
Hc από 250 HBW μέχρι 450 HBW	3,0	±3,0
Hc > 450 HBW	3,0	±3,0

Σύμφωνα με τους Πίνακες 5-19 και 5-20, οι οποίοι αντλήθηκαν από το πρότυπο ISO 6506-2:2014, ανάλογα με την σκληρότητα του εξεταζόμενου υλικού υπάρχει διαφορετική μέγιστη αποδεκτή επαναληψιμότητα και μέγιστο αποδεκτό σφάλμα της μηχανής δοκιμής.

Μετά από τους απαραίτητους υπολογισμούς, όλα τα αποτελέσματα των δοκιμών βρίσκονταν εντός ορίων σε σχέση με την επαναληψιμότητα και το σφάλμα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5-21.

Πίνακας 5-21: Αποτελέσματα επαναληψιμότητας και σφάλματος των μετρήσεων των δοκιμών.

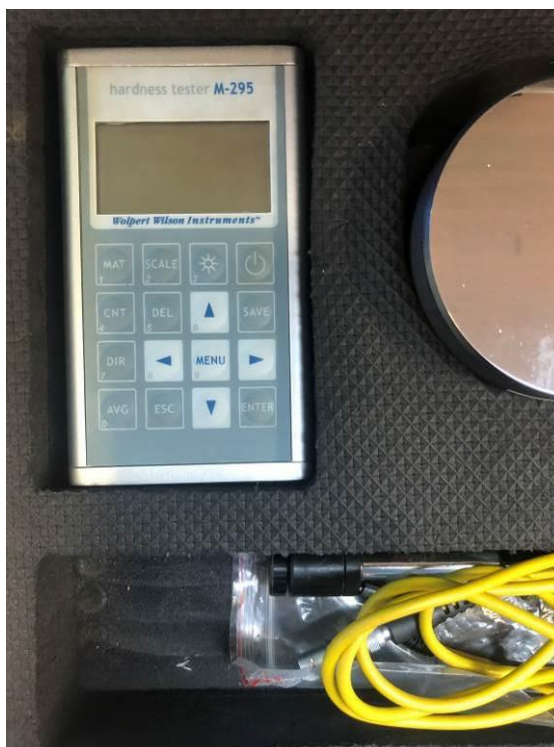
ΔΟΚΙΜΙΟ	ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ (R) %	ΣΦΑΛΜΑ (Ε) %
SUS1	2.5	2.2
WUS1	1.1	0.9
WUS2	2.8	2.2
WUS3	2.9	2.5
BUS1	2.9	2.0
BUS2	2.4	1.6
T5DW-1L	0.6	0.5
T5DW-2P	2.1	1.7
T6W-1	0.8	0.5
T6W-2	1.9	1.3
T10-B1	2.4	1.4
T20-T1	1.3	0.8
T5DW-1L	2.4	1.7
T5DW-2P	0.5	0.3
T6W-1	1.0	0.8
T6W-2	0.4	0.3
T10-B1	1.1	0.7
T15-T1	0.8	0.6
T20-T1	0.3	0.2
T5DW-1L	0.9	0.5
T5DW-2P	0.7	0.4
T6B-1	0.7	0.4
T6W-1	2.4	1.5
T6W-2	1.9	1.2
T10-B1	0.6	0.4
T15-T1	1.6	1.0
T20-T1	0.3	0.2

5.3 Δυναμική δοκιμή μέτρησης σκληρότητας

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές για τη μέτρηση της σκληρότητας σε διείσδυση με τη μέθοδο Brinell, ακολούθησαν οι δυναμικές δοκιμές με χρήση φορητού οργάνου σκληρομέτρησης Leeb (Wolpert Wilson Instrument).

Το όργανο αποτελείται από μια συσκευή κρούσης και μια ηλεκτρονική συσκευή ένδειξης. Η συσκευή κρούσης πυροδοτεί το σώμα πρόσκρουσης στο προς εξέταση υλικό. Η ταχύτητα ανάκαμψης που δημιουργείται μετατρέπεται στη συνέχεια σε ηλεκτρική τάση. Ο ηλεκτρονικός δείκτης ενισχύει αυτές τις τιμές, τις καταχωρεί και τελικά τις επεξεργάζεται στο ψηφιακά εμφανιζόμενο πηλίκο.

Αρχικά, ήταν απαραίτητο να επιλεγεί η ομάδα υλικού προς σκληρομέτρηση στο φορητό όργανο, ώστε να διασφαλιστεί η σωστή μετατροπή στην επιλεγμένη κλίμακα σκληρότητας (HB). Από τον κατάλληλο πίνακα (Πίνακας 3-1) επιλέχθηκε η κατηγορία 1 (Steel).



Εικόνα 5-13: Φορητό όργανο σκληρομέτρησης.

Συνολικά σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν πενήντα μετρήσεις. Ο αριθμός των μετρήσεων (50) δόθηκε ως δεδομένο στο φορητό σκληρόμετρο. Η θέση του οργάνου είχε κατεύθυνση προς τα κάτω. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε ώστε τα «χτυπήματα» να μην βρίσκονται κοντά το ένα με το άλλο, και ούτε κοντά στα αποτυπώματα που προέκυψαν από τις στατικές δοκιμές (Εικόνα 5-14).

Στην συνέχεια, από τις πενήντα μετρήσεις απορρίφθηκαν οι ακραίες τιμές, ώστε να προκύψουν στο τέλος οι είκοσι πιο αντιπροσωπευτικές τιμές σκληρότητας. Από αυτές, μετά την απαραίτητη στατιστική ανάλυση, προέκυψε ο μέσος όρος των τιμών της σκληρότητας για κάθε δοκίμιο, όπως και άλλα χρήσιμα στοιχεία (τυπική απόκλιση, επαναληψιμότητα, αβεβαιότητα).



Εικόνα 5-14: Εφαρμογή μεθόδου αναπηδήσεως.

5.3.1 Αποτελέσματα δοκιμής

Τα αποτελέσματα των δοκιμών με χρήση φορητού σκληρόμετρου, για τα πρώτα δοκίμια (SUS, WUS, BUS) και την εξαγωγή του μεγέθους HB δίνονται στον Πίνακα 5-22, ενώ για τα δεύτερα δοκίμια στον Πίνακα 5-23.

Επιπλέον, στις τελευταίες γραμμές των πινάκων υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των μετρήσεων σκληρότητας σε κάθε δοκίμιο και η εφελκυστική αντοχή (MPa). Η μετατροπή από τον αριθμό σκληρότητας HBW σε εφελκυστική αντοχή πραγματοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο όπως και στη μέθοδο Brinell.

Όσον αφορά τα πρώτα δοκίμια, παρατηρήθηκε μεγάλη απόκλιση της σκληρότητας στα δοκίμια WUS3 και BUS2, με το πρώτο να παρουσιάζει πολύ μικρότερη και το δεύτερο αρκετά μεγαλύτερη τιμή HBW. Στα υπόλοιπα δοκίμια η σκληρότητα βρίσκονταν εντός του εύρους 107 έως 112 HBW.

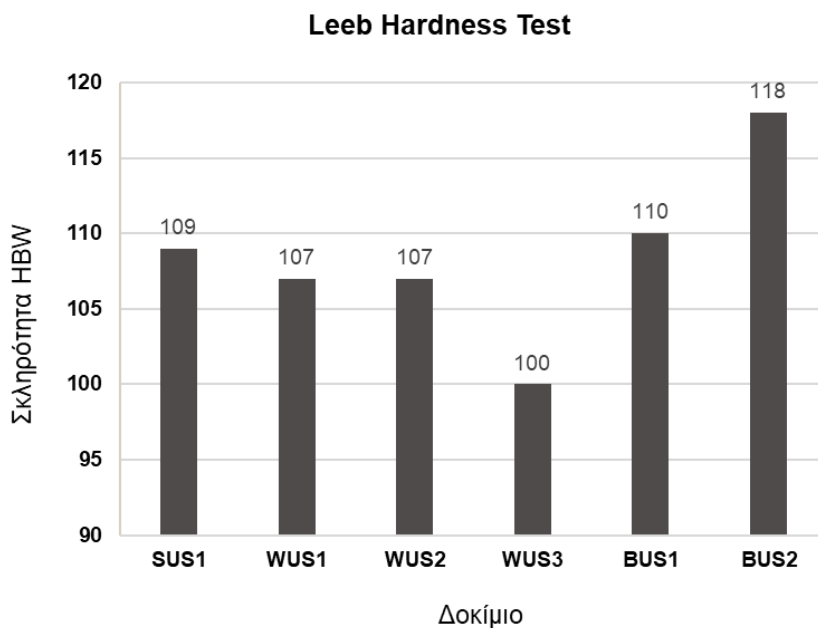
Από την άλλη πλευρά, στα δεύτερα δοκίμια υπήρχαν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ όλων των παραγόμενων τιμών σκληρότητας. Αυτό ίσως οφείλεται στις διαφορές στα πάχη των δοκιμίων ή στην ποιότητα του χάλυβα.

Πίνακας 5-22: Αποτελέσματα μετρήσεων φορητού σκληρομετρητή κατά Brinell (πρώτα δοκίμια).

Specimen	SUS1	WUS1	WUS2	WUS3	BUS1	BUS2
Run	HB	HB	HB	HB	HB	HB
1	97	97	98	93	101	105
2	99	98	98	93	104	106
3	100	99	99	93	104	109
4	101	100	102	93	107	110
5	101	101	103	95	107	112
6	101	101	104	96	108	112
7	102	102	104	96	109	113
8	102	105	104	100	109	115
9	103	105	106	101	109	118
10	104	106	106	102	110	119
11	106	109	106	102	113	121
12	106	110	107	103	113	121
13	106	111	107	104	114	122
14	110	113	107	104	115	123
15	113	113	111	104	116	127
16	119	114	111	104	117	127
17	120	115	112	105	119	128
18	125	116	117	105	120	128
19	126	117	118	106	120	128
20	129	117	120	107	121	131
\bar{H}	109	108	107	100	112	119
$f_{u,HBW}$ (MPa)	370	361	361	336	373	397

Πίνακας 5-23: Αποτελέσματα μετρήσεων φορητού σκληρομετρητή κατά Brinell (δεύτερα δοκίμια).

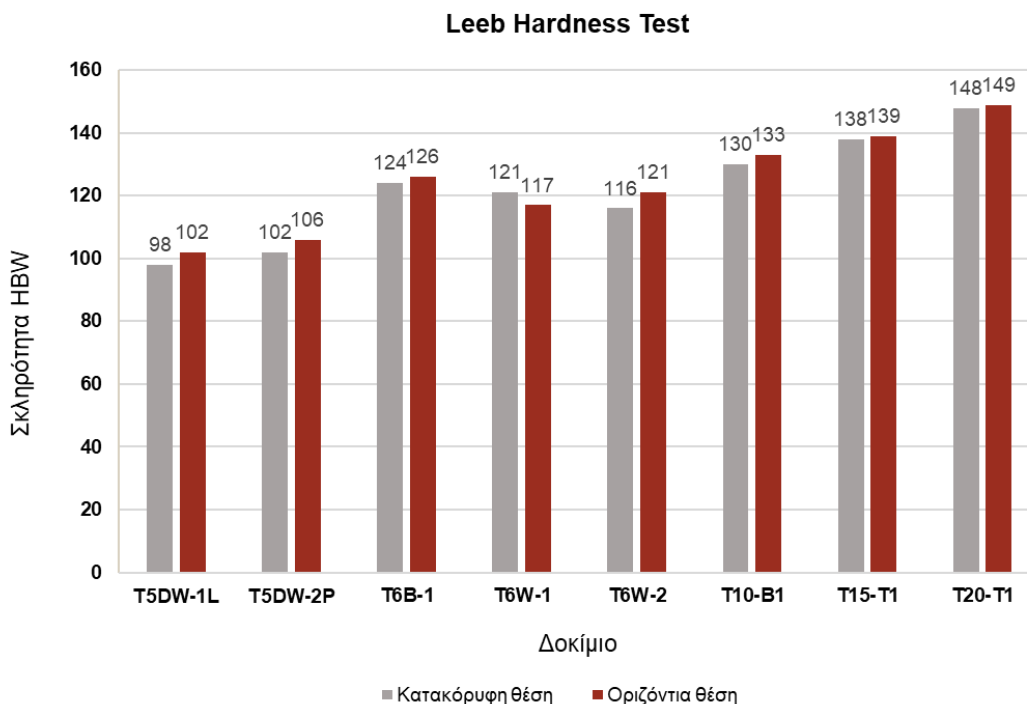
Specimen	T5DW-1L	T5DW-2P	T6B-1	T6W-1	T6W-2	T10B-1	T15T-1	T20T-1
Run	HB	HB	HB	HB	HB	HB	HB	HB
1	96	98	120	117	113	129	135	143
2	96	98	120	117	113	129	135	143
3	96	98	120	118	113	129	135	145
4	96	99	121	119	113	129	136	145
5	96	99	121	119	115	130	136	145
6	97	99	123	119	115	131	136	145
7	97	99	123	120	115	131	137	146
8	97	100	123	120	115	131	137	146
9	97	100	123	121	116	131	137	147
10	97	100	125	121	116	133	137	147
11	98	102	125	121	116	134	138	148
12	98	102	126	122	116	134	139	149
13	98	102	126	122	117	135	139	149
14	98	102	126	123	117	136	139	149
15	99	102	128	123	117	136	140	149
16	99	104	128	123	117	136	140	150
17	99	104	129	124	117	136	141	150
18	99	104	129	124	117	137	142	153
19	100	104	129	125	117	137	142	154
20	100	105	129	125	119	137	142	154
\bar{H}	98	102	124	121	116	130	138	148
$f_{u,HBW}$ (MPa)	329	343	417	407	390	438	465	499



Γράφημα 5-4: Αποτελέσματα πρώτων δοκιμών.

5.3.2 Εφαρμογή δοκιμής με διαφορετική θέση φορητού οργάνου

Πολλές φορές στις επιτόπου μετρήσεις σκληρότητας είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί η μέτρηση με το αισθητήριο του οργάνου κατακόρυφα και προς τα κάτω σε σχέση με το εξεταζόμενο στοιχείο. Έτσι, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί η δοκιμή και με οριζόντια θέση επιβολής του κρουστικού φορτίου από το όργανο. Συνεπώς, στο φορητό σκληρόμετρο επιλέχθηκε η ομάδα υλικού (Κατηγορία 1-Steel) και η θέση του οργάνου (οριζόντια). Συνολικά σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν πενήντα μετρήσεις. Στον πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενώ στο γράφημα τα αποτελέσματα των δύο διαφορετικών θέσεων χρήσης του οργάνου για τα δεύτερα δοκίμια.



Γράφημα 5-5: Αποτελέσματα δεύτερα δοκίμια.

Πίνακας 5-24: Αποτελέσματα μετρήσεων φορητού σκληρομετρητή κατά Brinell (οριζόντια θέση οργάνου).

Specimen	T5DW-1L	T5DW-2P	T6B-1	T6W-1	T6W-2	T10B-1	T15T-1	T20T-1
Run	HB	HB	HB	HB	HB	HB	HB	HB
1	100	103	120	113	114	129	132	144
2	100	103	123	113	115	129	132	144
3	100	103	123	113	116	129	132	144
4	101	104	124	114	116	129	133	145
5	101	104	124	115	117	130	134	145
6	101	105	124	115	117	131	134	146
7	102	105	125	116	118	131	136	147
8	102	105	126	117	119	131	137	147
9	102	106	126	117	119	131	138	147
10	102	106	126	117	119	133	138	148
11	102	106	126	118	120	134	140	150
12	103	106	127	118	120	134	141	152
13	103	107	127	119	123	135	141	152
14	103	107	128	119	123	136	142	152
15	104	107	128	119	124	136	142	152
16	104	107	128	119	124	136	143	152
17	104	108	128	120	125	136	144	152
18	104	108	128	120	126	137	145	153
19	104	109	129	120	127	137	145	153
20	104	109	129	120	127	137	146	153
\bar{H}	102	106	126	117	121	133	139	149
$f_{u,HBW}$ (MPa)	343	356	424	394	407	450	468	502

Και με την χρήση διαφορετικής θέσης στο φορητό όργανο προέκυψαν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των τιμών σκληρότητας των δοκιμίων.

5.3.3 Εκτίμηση αβεβαιότητας

Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την εκτίμηση της αβεβαιότητας μίας μέτρησης είναι τα συστηματικά και τα τυχαία σφάλματα, καθώς και οι πιθανές επιρροές στην μέτρηση από τον χρήστη. Πιο αναλυτικά:

α) Απόλυτη ακρίβεια, συστηματικά λάθη ή «Συγκρισιμότητα»

Η απόλυτη ακρίβεια είναι η ικανότητα του οργάνου να εμφανίζει τη σωστή ένδειξη. "Σωστό" σε αυτή τη σχέση σημαίνει αληθές σε σχέση με μια απόλυτη κλίμακα. Αυτή η απαίτηση βασίζεται στη βαθμονόμηση μέσω πιστοποιημένων προτύπων αναφοράς. Για την αναγνώριση συστηματικών αποκλίσεων χρειάζονται δείγματα αναφοράς. Συνήθως αυτά είναι τυποποιημένα μπλοκ αναφοράς καθορισμένου μεγέθους, πάχους και σκληρότητας. Η απόλυτη ακρίβεια του εξοπλισμού μπορεί να ελέγχεται.

β) Επαναληψιμότητα, Τυχαία σφάλματα ή "Ακρίβεια"

Τυχαίες επιδράσεις (π.χ. μηχανική τριβή, θόρυβοι, συνθήκες περιβάλλοντος) οδηγούν σε τυχαία σφάλματα του οργάνου μέτρησης. Οι μετρούμενες τιμές ποικίλουν ή έχουν μεγάλη διασπορά, ακόμα και όταν χρησιμοποιούνται σωστά βαθμονομημένοι ελεγκτές σκληρότητας για μετρήσεις σε ένα ιδανικό αντικείμενο δοκιμής με τέλεια τραχύτητα επιφάνειας και ομοιογένεια σκληρότητας στην επιφάνεια. Αυτά τα σφάλματα δεν μπορούν να διορθωθούν γιατί συμβαίνουν τυχαία. Όσο μικρότερη είναι η διακύμανση ή η διασπορά, τόσο καλύτερη είναι η επαναληψιμότητα. Η επαναληψιμότητα (ακρίβεια) είναι χαρακτηριστικό του οργάνου και τυπικά είναι κάτω από 1 % με τους ελεγκτές σκληρότητας.

γ) Υποκειμενική επιρροή από τον χρήστη ή «Αναπαραγωγιμότητα»

Ο χρήστης αντιπροσωπεύει, επίσης, μια πιθανή πηγή σφάλματος. Ο διαφορετικός χειρισμός του οργάνου μπορεί περιστασιακά να οδηγήσει σε αποκλίνοντα αποτελέσματα. Όσο λιγότερο εξαρτάται ένα όργανο από τον τρόπο λειτουργίας του από διαφορετικά άτομα, τόσο καλύτερη είναι η επαναληψιμότητά του.

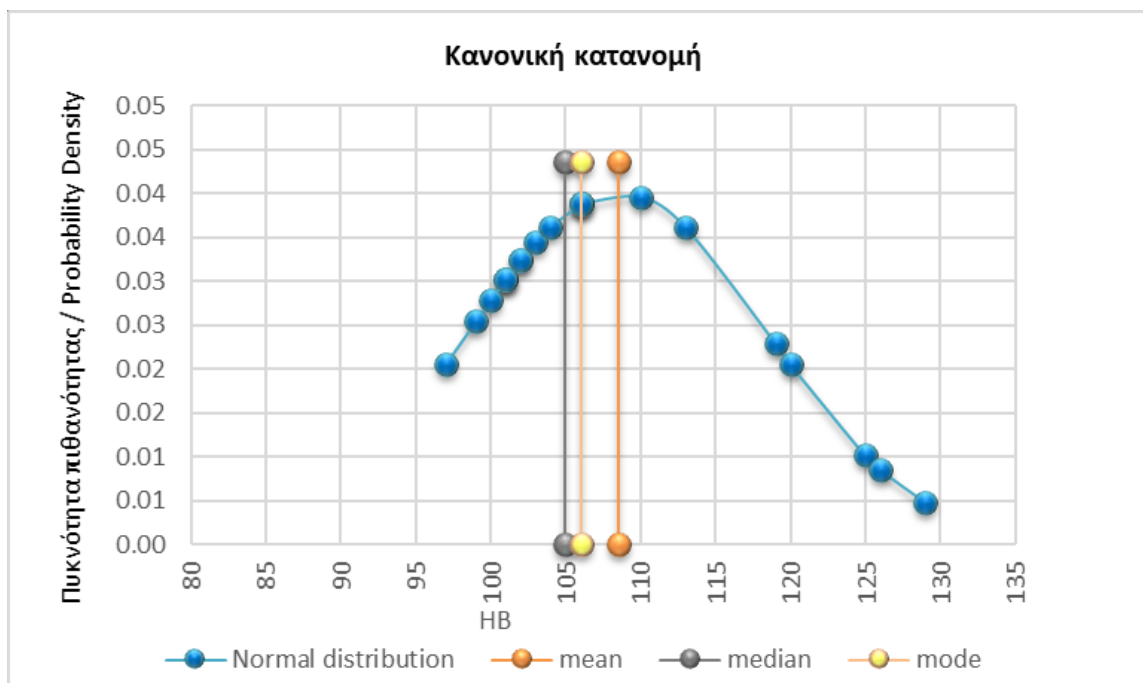
δ) Σφάλματα που προκαλούνται από το αντικείμενο δοκιμής

Φυσικά δεν υπάρχει το "ιδανικό αντικείμενο δοκιμής". Η τραχύτητα της επιφάνειας, η κρυσταλλική δομή και η ομοιογένεια σχετικά με την σκληρότητα στην επιφάνεια δοκιμής επηρεάζουν σημαντικά τη μέτρηση, ανεξάρτητα από τη μέθοδο δοκιμής.

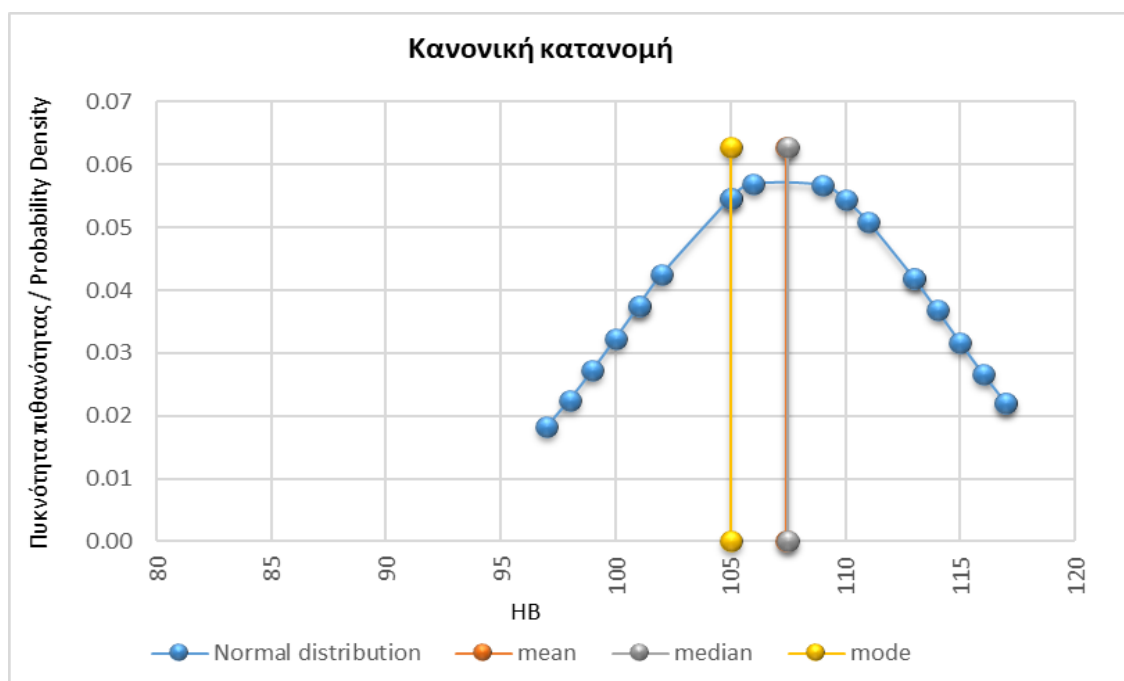
Εάν χρησιμοποιούνται περισσότερες μεμονωμένες μετρήσεις για να ληφθεί το τελικό αποτέλεσμα, θεωρείται ότι ο υπολογισμένος μέσος όρος είναι πιο κοντά στην πραγματική σκληρότητα του δοκιμίου. Ωστόσο, η εκτέλεση περισσότερων μετρήσεων απαιτεί επιπλέον προσπάθεια και η συνολική βελτίωση των δεδομένων θα είναι οριακή κάποια στιγμή.

Για να ληφθούν αξιόπιστες τιμές σκληρότητας και να αναλυθεί η επίδραση της αβεβαιότητας των μετρήσεων, τα στατιστικά στοιχεία μπορούν να βοηθήσουν προς την σωστή κατεύθυνση. Έτσι, στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των στατιστικών αναλύσεων για τις μετρήσεις με φορητό σκληρόμετρο για κάθε ένα δοκίμιο. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι κατανομές των μετρούμενων τιμών κάθε δοκιμής.

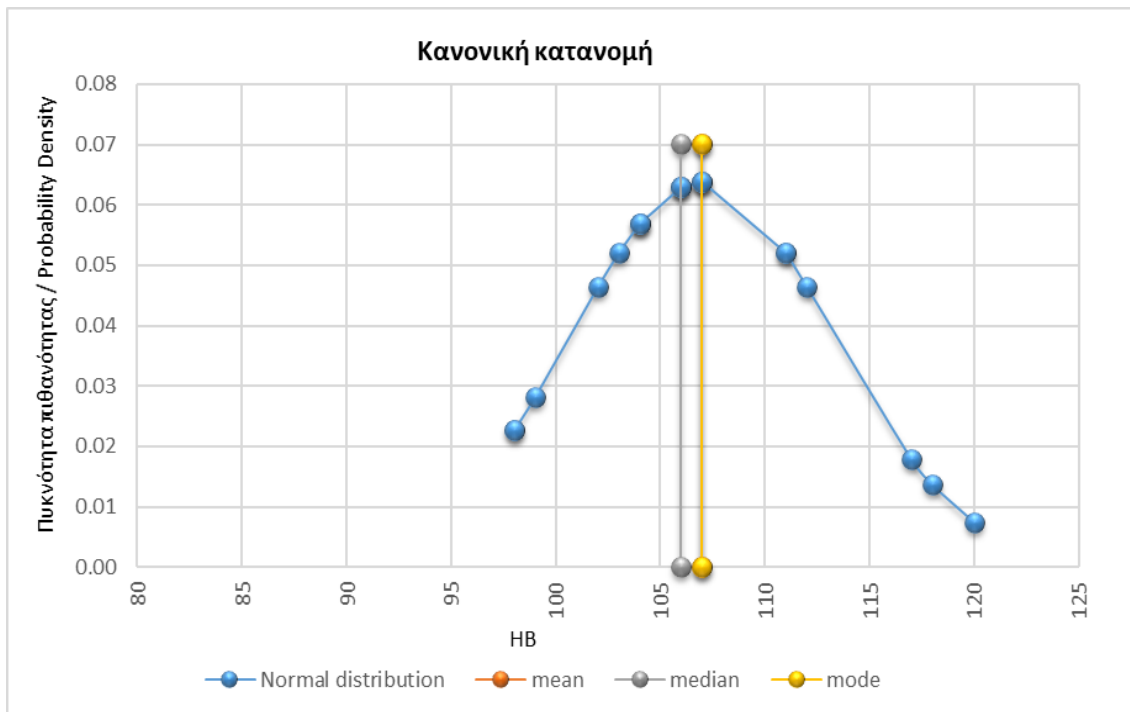
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – SUS1		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	97
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	129
Εύρος τιμών	max _i -min _i	32
Μέση τιμή	\bar{X}_m	108.5
Διάμεσος	x_0	105.0
Επικρατούσα τιμή	M_0	106
Διακύμανση	S_x^2	99.0
Τυπική απόκλιση	S_x	9.95
Τυπικό σφάλμα	S.E.	2.22
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	9.17%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±4.36
Αβεβαιότητα	u	2.05%
Επαναληψιμότητα	b	0.29
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	108.5 ±9.9	



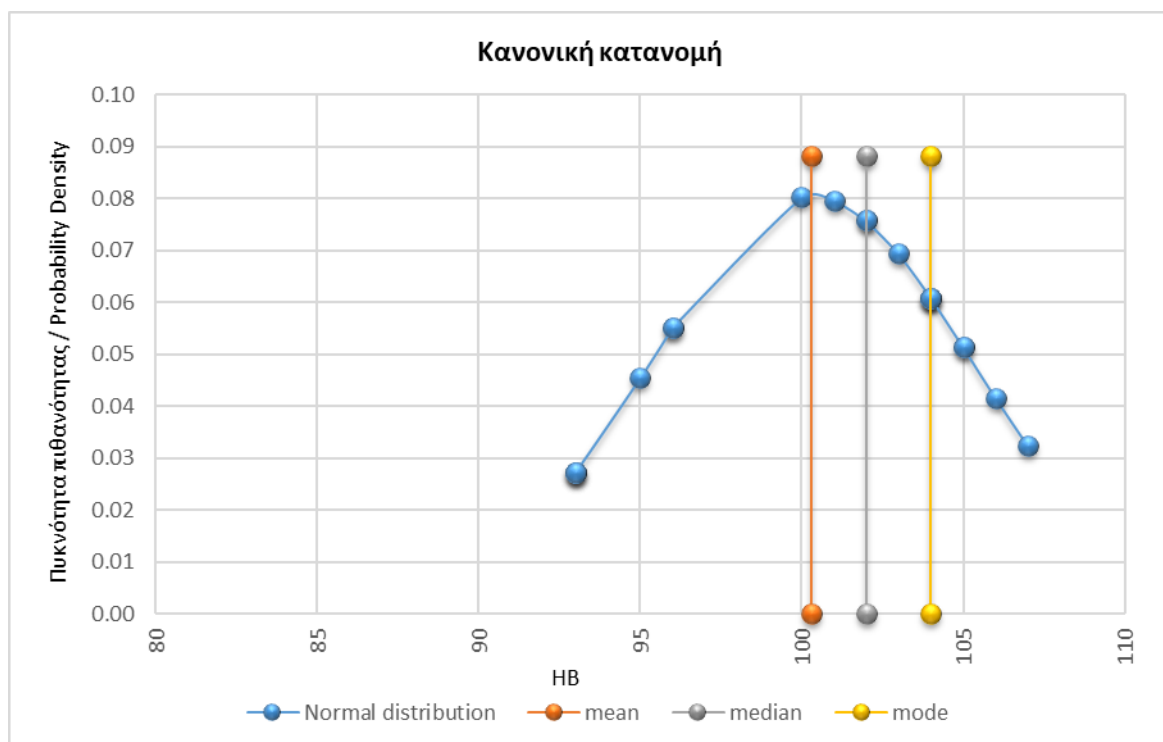
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – WUS1		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	97
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	117
Εύρος τιμών	max _i -min _i	20
Μέση τιμή	\bar{X}_m	107.5
Διάμεσος	x_0	107.5
Επικρατούσα τιμή	M_o	105
Διακύμανση	S_x^2	46.9
Τυπική απόκλιση	S_x	6.85
Τυπικό σφάλμα	S.E.	1.53
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	6.37%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±3.00
Αβεβαιότητα	u	1.43%
Επαναληψιμότητα	b	0.19
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	107.5 ±6.8	



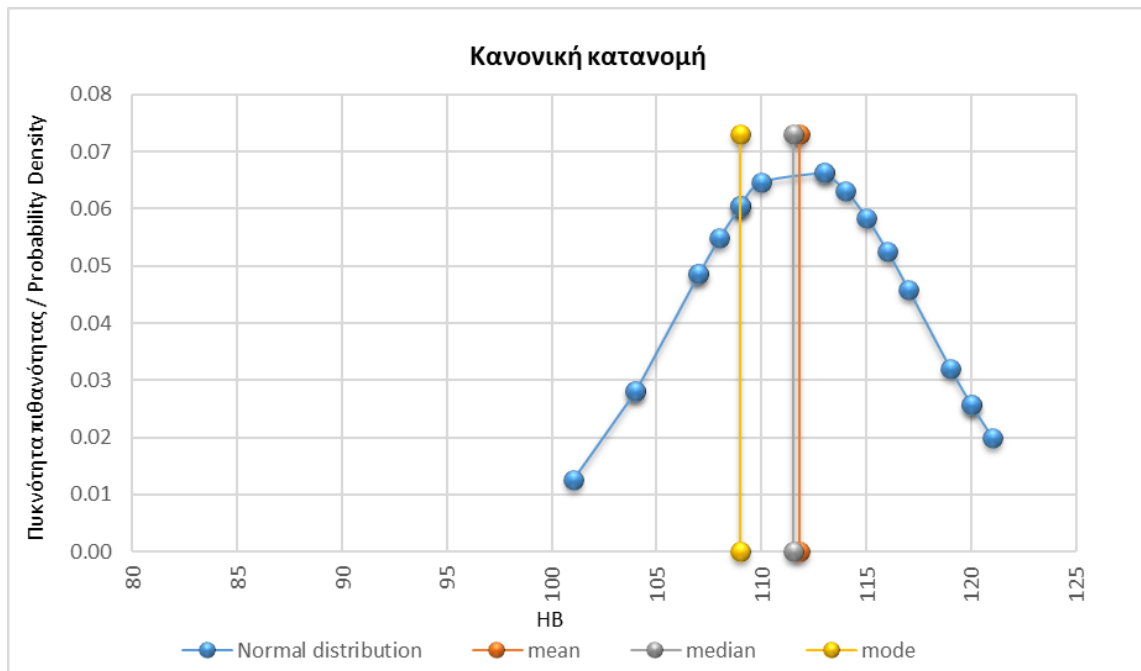
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – WUS2		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	98
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	120
Εύρος τιμών	max _i -min _i	22
Μέση τιμή	\bar{X}_m	107.0
Διάμεσος	x_0	106.0
Επικρατούσα τιμή	M_o	107
Διακύμανση	S_x^2	39.2
Τυπική απόκλιση	S_x	6.26
Τυπικό σφάλμα	S.E.	1.40
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	5.85%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±2.74
Αβεβαιότητα	u	1.31%
Επαναληψιμότητα	b	0.21
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	107.0 ±6.3	



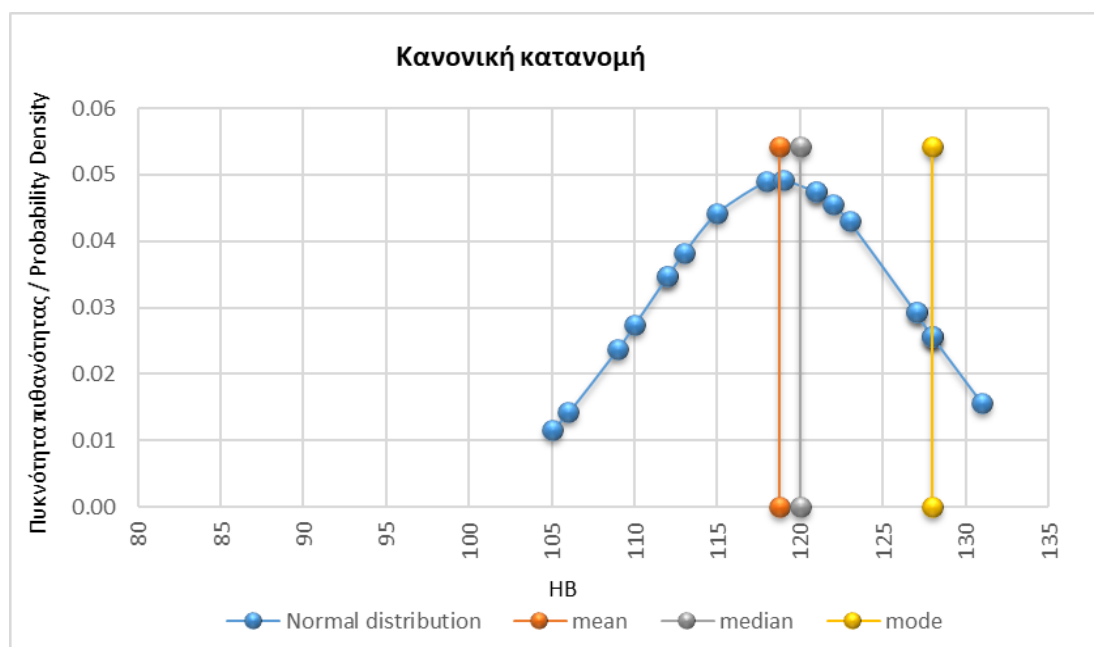
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – WUS3		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	93
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	107
Εύρος τιμών	max _i -min _i	14
Μέση τιμή	\bar{X}_m	100.3
Διάμεσος	x_0	102.0
Επικρατούσα τιμή	M_0	104
Διακύμανση	S_x^2	24.6
Τυπική απόκλιση	S_x	4.96
Τυπικό σφάλμα	S.E.	1.11
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	4.95%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±2.18
Αβεβαιότητα	u	1.11%
Επαναληψιμότητα	b	0.14
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	100.3 ±5.0	



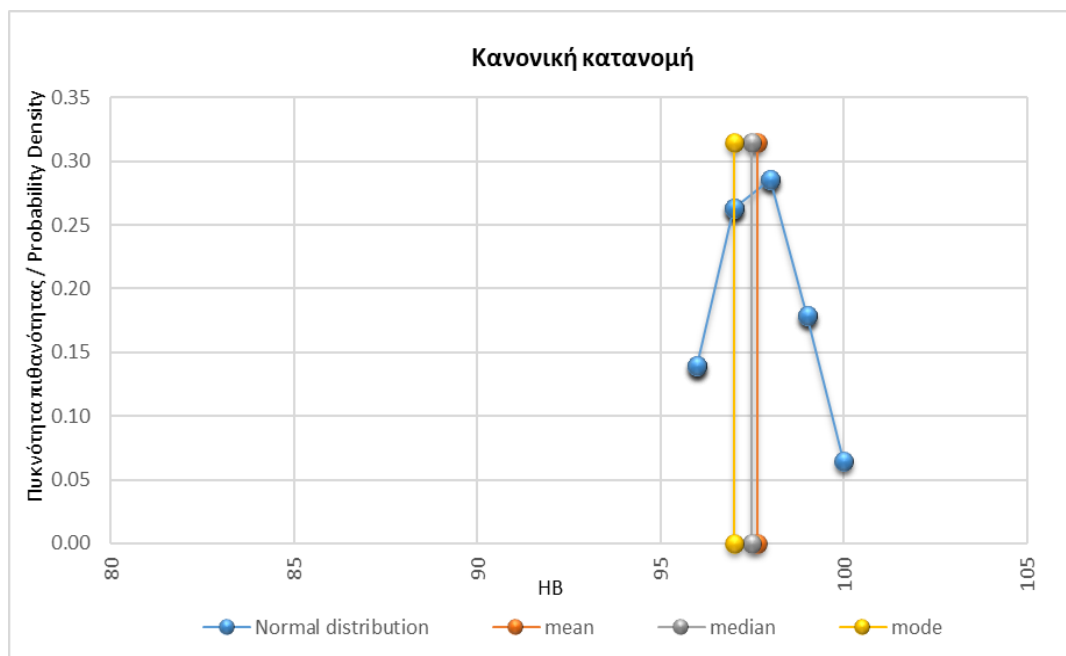
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – BUS1		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	101
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	121
Εύρος τιμών	max _i -min _i	20
Μέση τιμή	\bar{X}_m	111.8
Διάμεσος	x_0	111.5
Επικρατούσα τιμή	M_0	109
Διακύμανση	S_x^2	34.7
Τυπική απόκλιση	S_x	5.89
Τυπικό σφάλμα	S.E.	1.32
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	5.27%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±2.58
Αβεβαιότητα	u	1.18%
Επαναληψιμότητα	b	0.18
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	111.8 ±5.9	



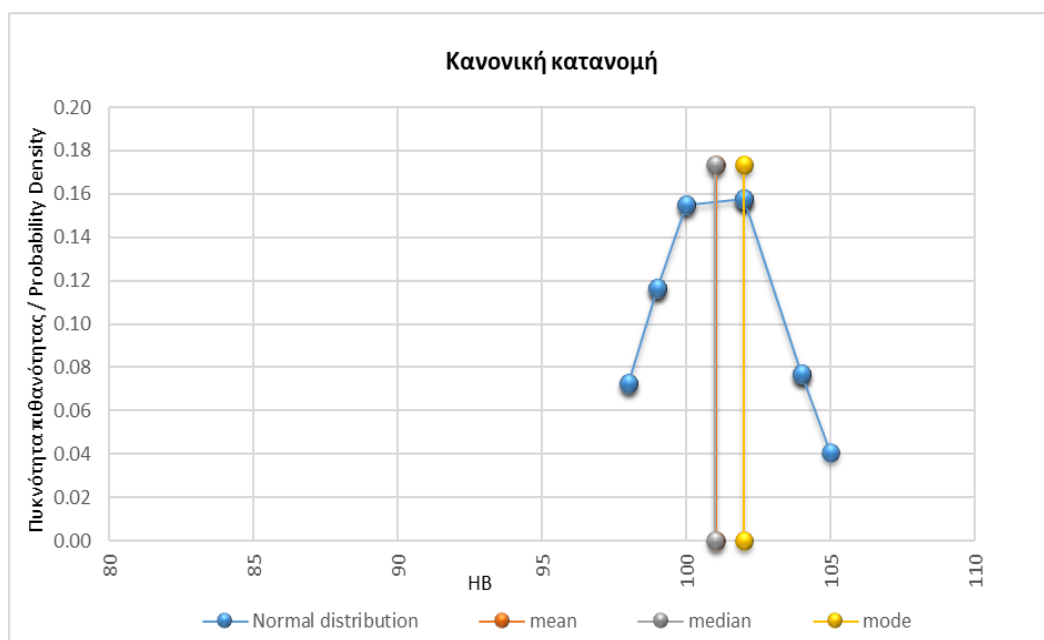
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – BUS2		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	105
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	131
Εύρος τιμών	max _i -min _i	26
Μέση τιμή	\bar{X}_m	118.8
Διάμεσος	x_0	120.0
Επικρατούσα τιμή	M_0	128
Διακύμανση	S_x^2	65.5
Τυπική απόκλιση	S_x	8.09
Τυπικό σφάλμα	S.E.	1.81
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	6.8%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±3.55
Αβεβαιότητα	u	1.52%
Επαναληψιμότητα	b	0.22
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	118.8 ±8.1	



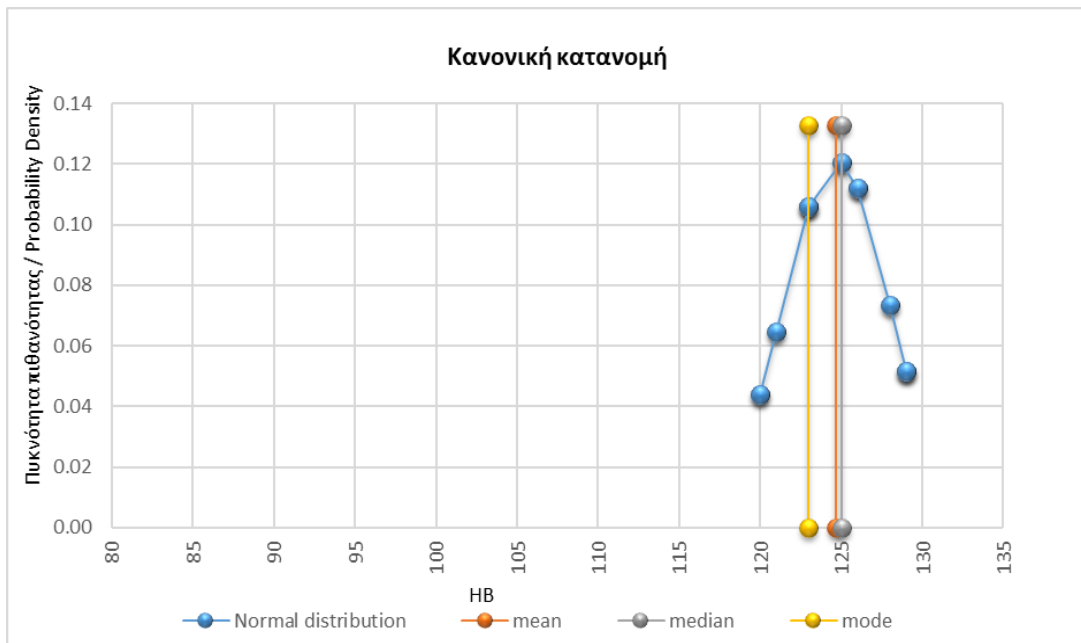
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – T5DW-1L		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	96
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	100
Εύρος τιμών	max _i -min _i	4
Μέση τιμή	\bar{X}_m	97.7
Διάμεσος	x_0	97.5
Επικρατούσα τιμή	M_o	97
Διακύμανση	S_x^2	1.8
Τυπική απόκλιση	S_x	1.36
Τυπικό σφάλμα	S.E.	0.30
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	1.38%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±0.59
Αβεβαιότητα	u	0.31 %
Επαναληψιμότητα	b	0.04
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	97.7	±1.3



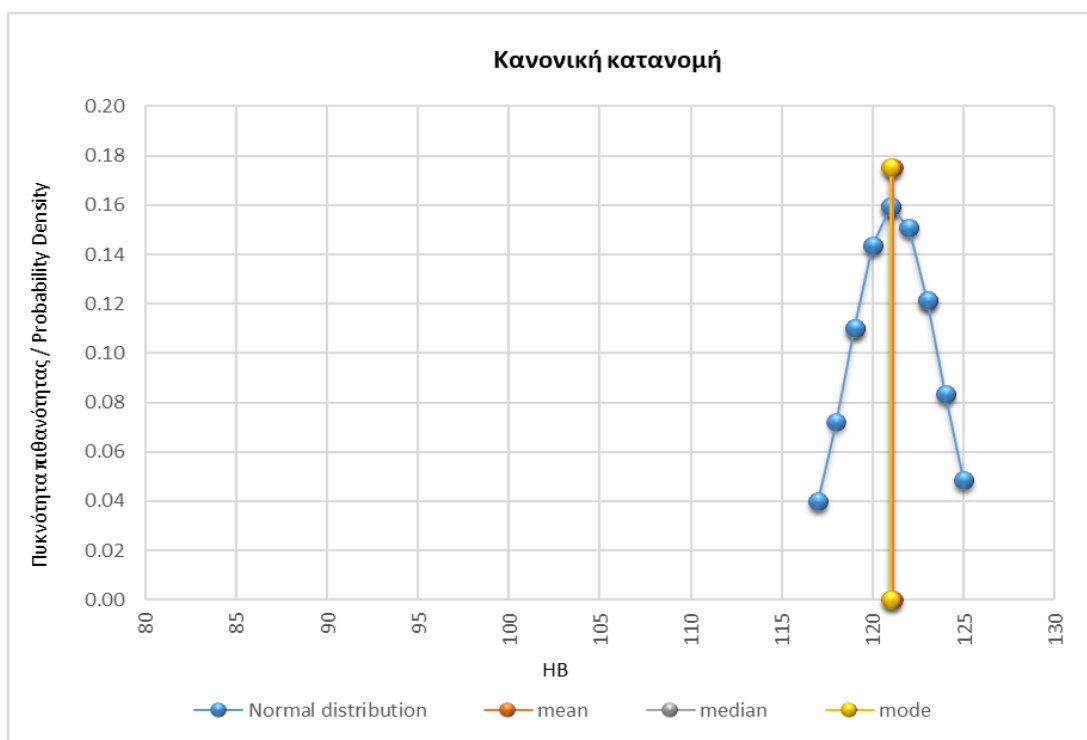
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – T5DW-2P		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	98
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	105
Εύρος τιμών	max _i -min _i	7
Μέση τιμή	\bar{X}_m	101.1
Διάμεσος	x_0	101.0
Επικρατούσα τιμή	M_o	102
Διακύμανση	S_x^2	5.4
Τυπική απόκλιση	S_x	2.33
Τυπικό σφάλμα	S.E.	0.52
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	2.30%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±1.02
Αβεβαιότητα	u	0.52%
Επαναληψιμότητα	b	0.07
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	101.1	±2.3



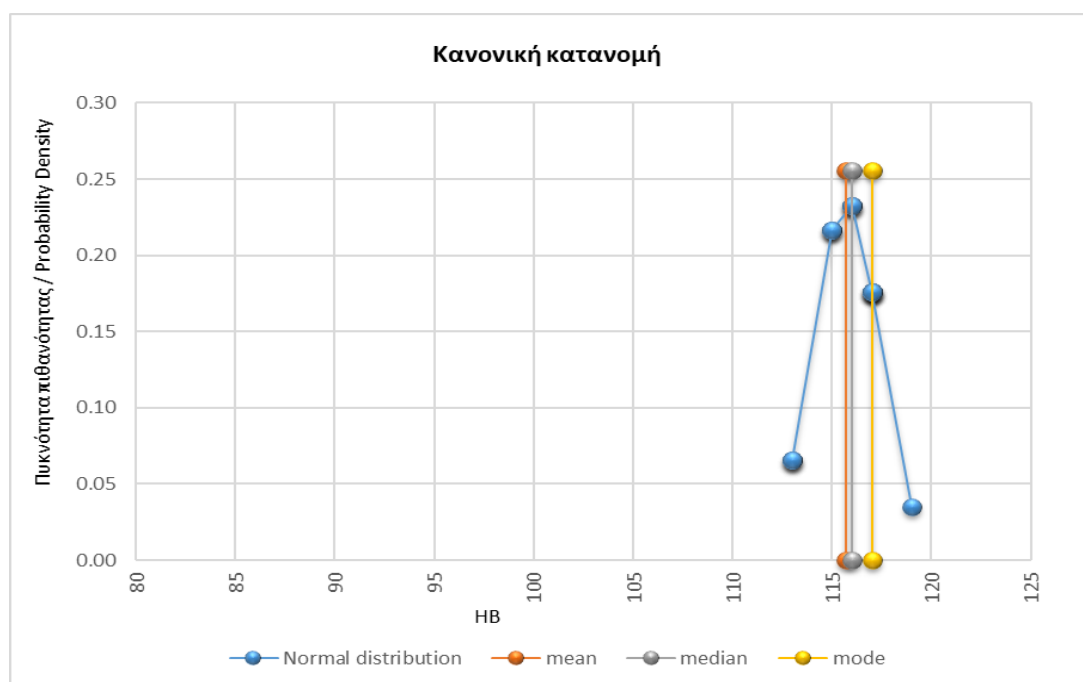
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – Τ6Β-1		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	120
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	129
Εύρος τιμών	max _i -min _i	9
Μέση τιμή	\bar{X}_m	124.7
Διάμεσος	x_0	125.0
Επικρατούσα τιμή	M_0	123
Διακύμανση	S_x^2	10.9
Τυπική απόκλιση	S_x	3.29
Τυπικό σφάλμα	S.E.	0.74
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	2.64%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±1.44
Αβεβαιότητα	u	0.59%
Επαναληψιμότητα	b	0.07
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	124.7	±3.3



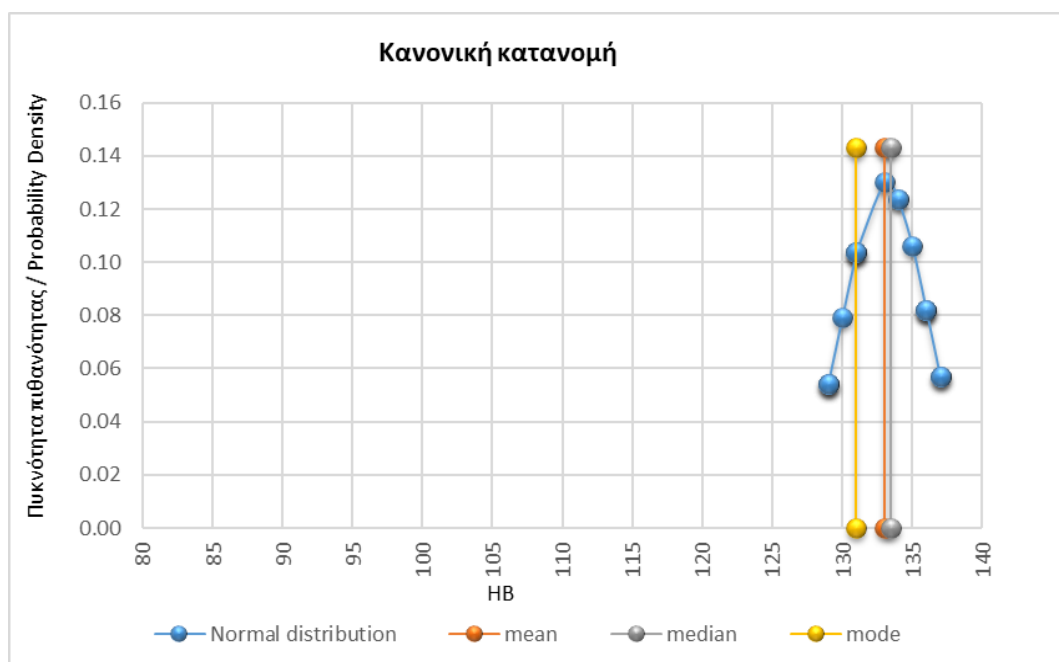
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – T6W-1		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	117
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	125
Εύρος τιμών	max _i -min _i	8
Μέση τιμή	X _m	121.2
Διάμεσος	x ₀	121.0
Επικρατούσα τιμή	M _o	121
Διακύμανση	S _x ²	6.2
Τυπική απόκλιση	S _x	2.50
Τυπικό σφάλμα	S.E.	0.56
Συντελεστής μεταβλητότητας	V _x	2.06%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±1.09
Αβεβαιότητα	u	0.46%
Επαναληψιμότητα	b	0.07
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	121.2	±2.5



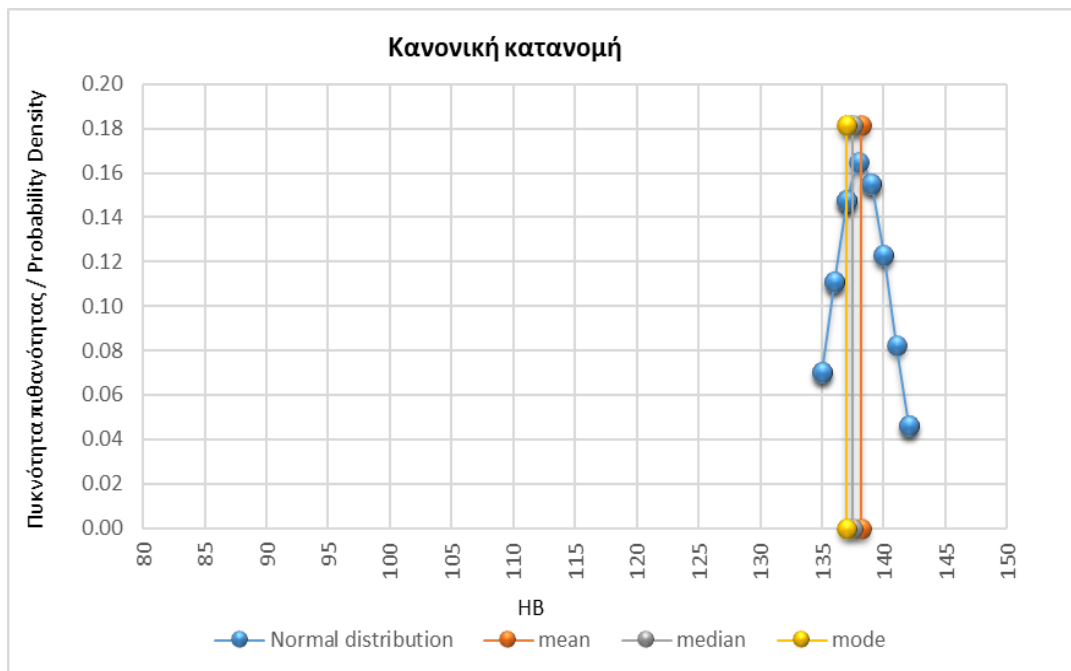
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – Τ6W-2		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	113
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	119
Εύρος τιμών	max _i -min _i	6
Μέση τιμή	\bar{X}_m	115.7
Διάμεσος	x_0	116.0
Επικρατούσα τιμή	M_0	117
Διακύμανση	S_x^2	2.9
Τυπική απόκλιση	S_x	1.69
Τυπικό σφάλμα	S.E.	0.38
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	1.46%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±0.74
Αβεβαιότητα	u	0.33%
Επαναληψιμότητα	b	0.05
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	115.7	±1.7



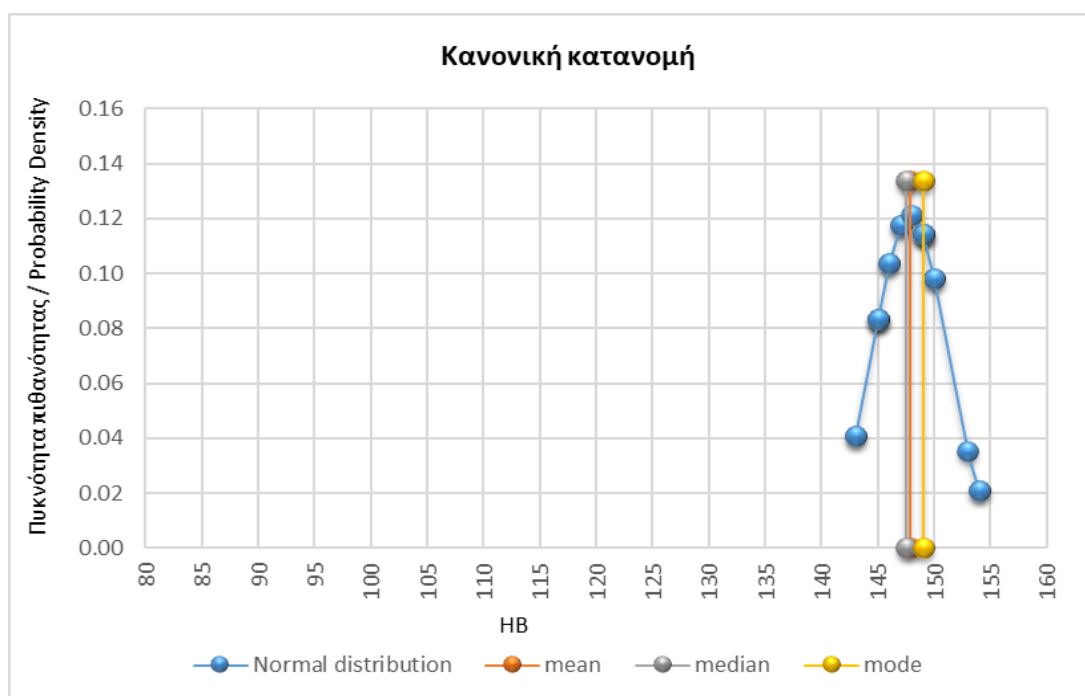
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – T10B-1		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	129
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	137
Εύρος τιμών	max _i -min _i	8
Μέση τιμή	\bar{X}_m	133.1
Διάμεσος	x_0	133.5
Επικρατούσα τιμή	M_o	131
Διακύμανση	S_x^2	9.4
Τυπική απόκλιση	S_x	3.07
Τυπικό σφάλμα	S.E.	0.69
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	2.31%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±1.34
Αβεβαιότητα	u	0.52%
Επαναληψιμότητα	b	0.06
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	133.1	±3.1



ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – T15T-1		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	135
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	142
Εύρος τιμών	max _i -min _i	7
Μέση τιμή	\bar{X}_m	138.2
Διάμεσος	x_0	137.5
Επικρατούσα τιμή	M_0	137
Διακύμανση	S_x^2	5.8
Τυπική απόκλιση	S_x	2.41
Τυπικό σφάλμα	S.E.	0.54
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	1.75%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±1.06
Αβεβαιότητα	u	0.39%
Επαναληψιμότητα	b	0.05
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	138.2	±2.4



ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ – Τ20Τ-1		
Πλήθος δειγμάτων	n	20
Ελάχιστη τιμή μετρήσεων	min _i	143
Μέγιστη τιμή μετρήσεων	max _i	154
Εύρος τιμών	max _i -min _i	11
Μέση τιμή	\bar{X}_m	147.9
Διάμεσος	x_0	147.5
Επικρατούσα τιμή	M_0	149
Διακύμανση	S_x^2	10.8
Τυπική απόκλιση	S_x	3.28
Τυπικό σφάλμα	S.E.	0.73
Συντελεστής μεταβλητότητας	V_x	2.22%
Πιθανότητα	p	5.0%
Συντελεστής ποσοστημορίου	t	1.64
Όριο εμπιστοσύνης	CL	±1.44
Αβεβαιότητα	u	0.50%
Επαναληψιμότητα	b	0.07
Αποτέλεσμα μετρήσεων [HB]	147.9	±3.3



5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων μη καταστρεπτικών δοκιμών

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται συγκριτικά τα αποτελέσματα των δύο μη καταστρεπτικών δοκιμών (μέθοδος Brinell, μέθοδος Leeb).

Στον Πίνακα 5-25 βλέπουμε τα αποτελέσματα των σκληρομετρήσεων των πρώτων δοκιμών (SUS, WUS, BUS), ενώ στον Πίνακα 5-26 τα αποτελέσματα των δεύτερων δοκιμών. Στον δεύτερο πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα για κάθε μία από τις περιπτώσεις διαμέτρου σφαίρας-δύναμης δοκιμής που εφαρμόστηκαν στο σκληρόμετρο πάγκου, όπως αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Παρατηρούμε ότι στον πρώτο πίνακα τα αποτελέσματα σκληρομέτρησης μεταξύ των δύο μεθόδων βρίσκονται αρκετά κοντά μεταξύ τους, με εξαίρεση δυο δοκίμια (SUS1, BUS1). Μάλιστα, στο δοκίμιο WUS2 οι τιμές HBW προέκυψαν ίσες με το σκληρόμετρο πάγκου και το φορητό όργανο.

Πίνακας 5-25: Συγκριτικά αποτελέσματα σκληρομετρήσεων (πρώτα δοκίμια).

Test	Specimen					
	SUS1	WUS1	WUS2	WUS3	BUS1	BUS2
BRINELL (HBW)	116	106	107	105	117	119
LEEB (HB) (↓)	109	107	107	100	110	118

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της δεύτερης φάσης δοκιμών, παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών στο σκληρόμετρο πάγκου υπό διαφορετικές συνθήκες (διάμετρος σφαίρας, δύναμη δοκιμής) σε κάθε δοκίμιο, προέκυψαν κοντά το ένα με το άλλο. Εξαιρείται το δοκίμιο T6W-2, στο οποίο μία μέτρηση από τις τρεις ήταν αρκετά διαφορετική από τις άλλες δύο.

Για τα αποτελέσματα του φορητού σκληρομέτρου παρατηρούμε ότι αποκλίνουν σε μεγάλο βαθμό από τις τιμές σκληρομέτρησης κατά Brinell, με εξαίρεση τα δοκίμια μεγαλύτερου πάχους (T15T-1, T20T-1). Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρέπει να διερευνήσουμε τι ευθύνεται για τις τόσο διαφορετικές μετρήσεις. Αυτό θα αναλυθεί περαιτέρω στα επόμενα κεφάλαια.

Πίνακας 5-26: Συγκριτικά αποτελέσματα σκληρομετρήσεων (δεύτερα δοκίμια).

Test	Specimen							
	T5DW-1L	T5DW-2P	T6B-1	T6W-1	T6W-2	T10B-1	T15T-1	T20T-1
BRINELL (HBW)	142	138	158	159	149	150	148	151
	144	146		153	164	148		--
	150	141	--	155	148	147	149	151
LEEB (HB) (↓)	98	102	124	121	116	130	138	148
LEEB (HB) (→)	102	106	126	117	121	133	139	149

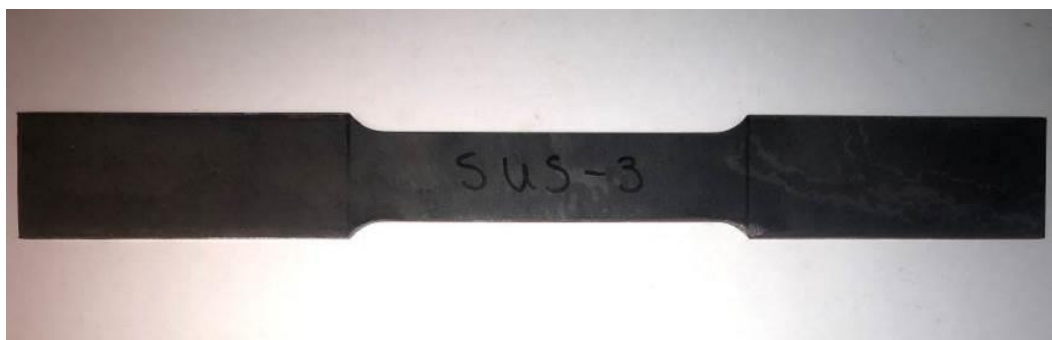
6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ-ΜΕΡΟΣ Β΄

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού, τα οποία και θα υποδείξουν πόση ακρίβεια υπάρχει στα αποτελέσματα των μη καταστρεπτικών δοκιμών.

6.1 Δοκιμή εφελκυσμού

Για το τελευταίο σκέλος του πειράματος της διπλωματικής εργασίας, και αφού πραγματοποιήθηκαν οι στατικές και δυναμικές δοκιμές μέτρησης της σκληρότητας, ακολούθησαν οι δοκιμές εφελκυσμού.

Η αρχική διαμόρφωση των χαλύβδινων δοκιμίων, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκε σε εξωτερικό μηχανουργείο. Για την κοπή τους χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της πριονοκορδέλας. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στο να χρησιμοποιηθεί η ίδια χαλύβδινη πλάκα, μεγαλύτερου πλάτους, για όλα τα δοκίμια, ώστε να είναι βέβαιο ότι θα έχουν την ίδια ποιότητα χάλυβα. Επιλέχθηκε κατηγορία ποιότητας χάλυβα S235 ($f_y=235 \text{ N/mm}^2$, $f_u=360 \text{ N/mm}^2$). Στο σύνολο διαμορφώθηκαν εννιά δοκίμια. Τρία απλά (Simple-S), τρία συγκολλητά (Welded-W) και τρία κοχλιωτά (Bolted-B). Όλα τα δοκίμια επιλέχθηκε να έχουν πάχος $t=4 \text{ mm}$.



Εικόνα 6-1: Απλό δοκίμιο.

Στα συγκολλητά δοκίμια (Εικόνα 6-2), η συγκόλληση πραγματοποιήθηκε με ηλεκτρόδιο τροφοδοτούμενο με συνεχές ρεύμα. Αυτή η μέθοδος επιλέχθηκε, καθώς το πάχος των ελασμάτων ήταν αρκετά μικρό.



Εικόνα 6-2: Συγκολλητό δοκίμιο.

Τέλος, στα κοχλιωτά δοκίμια (Εικόνα 6-3) επιλέχθηκε να τοποθετηθούν δύο κοχλίες με διάμετρο σπειρώματος $d=12$ mm, ονομαστική τιμή του ορίου διαρροής $f_{yb}=640$ MPa και ονομαστική τιμή της εφελκυστικής αντοχής $f_{ub}=800$ MPa, δηλαδή κοχλίες M12 8.8. Η διάνοιξη των οπών πραγματοποιήθηκε με διάτρηση με ζουμπά (punching). Το πάχος και των δύο ελασμάτων ήταν ίσο με $t=4$ mm.



Εικόνα 6-3: Δοκίμιο με κοχλίες.

Η τελική διαμόρφωση και λείανση των δοκιμίων με γυαλόχαρτα πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ.



Εικόνα 6-4: Δοκίμια μετά την διαδικασία της λείανσης.

Επόμενο βήμα και απαραίτητο πριν την εφαρμογή της εφελκυστικής δοκιμής ήταν η μέτρηση της γεωμετρίας των δοκιμίων. Αυτή πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια μικρόμετρου και παχύμετρου.

Πιο συγκεκριμένα, για κάθε δοκίμιο λήφθηκαν επτά μετρήσεις για το πάχος (t) και επτά μετρήσεις για το πλάτος (b). Στην συνέχεια, υπολογίσθηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων για τις δύο διαστάσεις και η τελική επιφάνεια (A) κάθε δοκιμίου.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι μετρήσεις των διαστάσεων για τα απλά (Πίνακας 6-1), τα συγκολλητά (Πίνακας 6-2) και τα κοχλιωτά δοκίμια (Πίνακας 6-3, Πίνακας 6-4). Για τα τελευταία δοκίμια μετρήθηκαν επιπλέον οι αποστάσεις των οπών από τα άκρα του κάθε τμήματος (e1, e2).

Πίνακας 6-1: Γεωμετρία απλών δοκιμίων για δοκιμές εφελκυσμού.

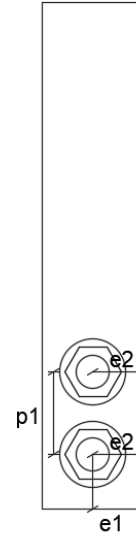
Specimen	Measure	Runs							Average	Area
		1 [mm]	2 [mm]	3 [mm]	4 [mm]	5 [mm]	6 [mm]	7 [mm]		
SUS-1	Width (bo)	24.45	24.44	24.39	24.40	24.39	24.40	24.36	24.40	97.30
	Thickness (ao)	3.99	3.98	3.99	3.99	3.98	3.99	3.99		
SUS-2	Width (bo)	26.77	26.83	26.83	26.82	26.83	26.79	26.76	26.80	107.06
	Thickness (ao)	3.99	3.99	3.99	3.99	4.00	4.00	4.00		
SUS-3	Width (bo)	25.26	25.29	25.28	25.28	25.27	25.26	25.31	25.28	101.01
	Thickness (ao)	3.99	3.99	3.99	4.00	4.00	4.00	4.00		

Πίνακας 6-2: Γεωμετρία συγκολλητών δοκιμίων για δοκιμές εφελκυσμού.

Specimen	Measure	Runs							Average	Area
		1 [mm]	2 [mm]	3 [mm]	4 [mm]	5 [mm]	6 [mm]	7 [mm]		
WUS-1	Width (bo)	26.11	26.12	26.14	26.13	26.12	26.12	26.13	26.12	104.24
	Thickness (ao)	3.99	3.99	3.99	3.99	3.99	3.99	3.99		
WUS-2	Width (bo)	26.10	26.09	26.05	26.09	26.11	26.13	26.08	26.09	103.85
	Thickness (ao)	3.98	3.98	3.98	3.98	3.98	3.98	3.98		
WUS-3	Width (bo)	26.25	26.29	26.26	26.30	26.25	26.27	26.27	26.27	104.63
	Thickness (ao)	3.98	3.99	3.98	3.98	3.98	3.98	3.99		

Πίνακας 6-3: Αποστάσεις οπών κοχλιωτών δοκιμών από τα άκρα.

Specimen	Section	Length [mm]	Diameter of Holes [mm]	e1 [mm]	p1 [mm]	e2 [mm]
BUS-1	1	184	13.34	26.99	29.98	25.60
			13.07			25.00
	2	184	12.93	26.31	30.34	24.78
			13.21			25.60
BUS-2	1	184	13.05	26.52	30.13	25.11
			13.00			25.00
	2	184	13.34	26.89	30.26	25.47
			13.37			25.32
BUS-3	1	185	13.35	26.79	30.26	25.51
			13.30			25.45
	2	184	13.34	26.92	30.13	25.49
			13.34			25.49

Bolted specimen
Section 1

Πίνακας 6-4: Γεωμετρία κοχλιωτών δοκιμών για δοκιμές εφελκυσμού.

Specimen	Section	Measure	Runs							Average	Area [mm ²]
			1 [mm]	2 [mm]	3 [mm]	4 [mm]	5 [mm]	6 [mm]	7 [mm]		
BUS-1	1	Width	37.09	37.06	36.97	37.00	37.03	37.06	36.99	37.03	147.48
		Thickness	3.98	3.99	3.98	3.99	3.98	3.98	3.98	3.98	
	2	Width	37.09	36.99	36.94	37.05	37.00	37.00	37.09	37.02	
		Thickness	3.99	3.98	3.99	3.98	3.98	3.98	3.99	3.98	
BUS-2	1	Width	37.08	37.05	36.97	36.98	37.06	36.99	37.05	37.03	147.57
		Thickness	3.98	3.98	3.98	3.99	4.00	3.99	3.98	3.99	
	2	Width	37.05	37.09	37.08	36.96	37.08	37.09	37.11	37.07	
		Thickness	3.99	4.00	4.00	4.00	3.99	3.99	4.00	4.00	
BUS-3	1	Width	37.11	37.01	36.96	37.04	36.96	36.99	36.98	37.01	147.61
		Thickness	4.00	4.00	3.99	3.99	3.98	3.98	3.98	3.99	
	2	Width	37.10	37.06	37.01	37.02	37.06	37.03	36.99	37.04	
		Thickness	3.98	3.98	3.97	3.97	3.97	3.96	3.96	3.97	

Αφού πραγματοποιήθηκε και η μέτρηση της γεωμετρίας των δοκιμίων, ήταν εφικτό να διεξαχθούν οι εφελκυστικές δοκιμές. Η υδραυλική μηχανή η οποία χρησιμοποιήθηκε για την σειρά των δοκιμών ήταν η Instron 300LX, η οποία έχει δυναμικότητα 300kN και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 6-5: Μηχανή εφελκυσμού Instron.

Κατά την τοποθέτηση των δοκιμίων στην εφελκυστική μηχανή δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στην σωστή ευθυγράμμιση των δύο σημείων προσάρτησης, ώστε να είναι όσο γίνεται πιο κατακόρυφα στην ευθεία της μηχανής. Διαφορετικά οποιαδήποτε φόρτιση εκτός κέντρου θα ασκούσε φορτία κάμψης στο δείγμα. Η κακή ευθυγράμμιση μπορεί, επίσης, να προκαλέσει σφάλματα μέτρησης λόγω της διέλευσης των δυνάμεων κάμψης μέσω της συσκευής μέτρησης του φορτίου. Επιπλέον, πολύ σημαντικό σημείο ήταν η σωστή εφαρμογή των σφηνών στα δοκίμια. Τέλος, τοποθετήθηκε προσεκτικά και το μηκυσιόμετρο (Εικόνα 6-6) για την μέτρηση των παραμορφώσεων των δοκιμίων στο ενεργό μήκος τους (gauge length) με αρχικό εύρος μηκυσιομέτρου $L_e=50$ mm.

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με έλεγχο του ρυθμού της παραμόρφωσης (strain rate control) και όχι της τάσης (stress rate control), δηλαδή το μέγεθος της παραμόρφωσης αυξάνονταν με δεδομένο ρυθμό. Για τα απλά δοκίμια επιλέχθηκε έλεγχος παραμόρφωσης με ρυθμό 0,90mm/min στην πρώτη φάση, όπου απαιτείται μικρό βήμα στην διαρροή. Μετά την διαρροή δεν υπάρχει κάποια απαίτηση και, έτσι, εφαρμόστηκε μεγαλύτερη ταχύτητα (3,22mm/min). Η αλλαγή πραγματοποιήθηκε μετά τα έξι λεπτά δοκιμής, ενώ η καταγραφή των αποτελεσμάτων γινόταν κάθε 0,08 sec. Οι ίδιες ταχύτητες επιλέχθηκαν και στα συγκολλητά δοκίμια, ωστόσο η αλλαγή έγινε στα εννιά λεπτά. Τέλος, στα κοχλιωτά δοκίμια, τα οποία είχαν προηγουμένως δεχθεί προένταση, εφαρμόστηκε μόνο μία ταχύτητα σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής η οποία ήταν ίση με 1,5mm/min.



Εικόνα 6-6: Τοποθέτηση μηκυσιομέτρου σε δοκίμιο.

Για την προένταση των δοκιμίων με κοχλίες χρησιμοποιήθηκε ροπόκλειδο ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη ροπή-δύναμη που χρειάζεται για να σφίξουν οι κοχλίες. Το ροπόκλειδο ή δυναμόκλειδο είναι ένα εργαλείο το οποίο μπορεί να εφαρμόσει με ακρίβεια ροπή σε μια βίδα, παξιμάδι, μπουλόνι κ.α. κατά τη σύσφιξη. Κατά την εφαρμογή της διαδικασίας όταν επιτευχθεί το όριο ροπής, ακούγεται ένα "κλικ" στη λαβή και πρέπει να σταματήσει η άσκηση της δύναμης.

Στα δοκίμια του πειράματος, αρχικά, εφαρμόστηκε ροπή σύσφιξης 30Nm και ακούστηκε ο χαρακτηριστικός ήχος. Στην συνέχεια, εφαρμόστηκαν με την σειρά οι ροπές 40 Nm, 50 Nm, 60 Nm, 70 Nm, 80 Nm και 90 Nm, ώσπου στα 90 Nm δεν έσφιξε ο σφιγκτήρας και δεν ακούστηκε ο ήχος. Έτσι, αποφασίστηκε τελική ροπή σύσφιξης 85 Nm για όλους τους κοχλίες.

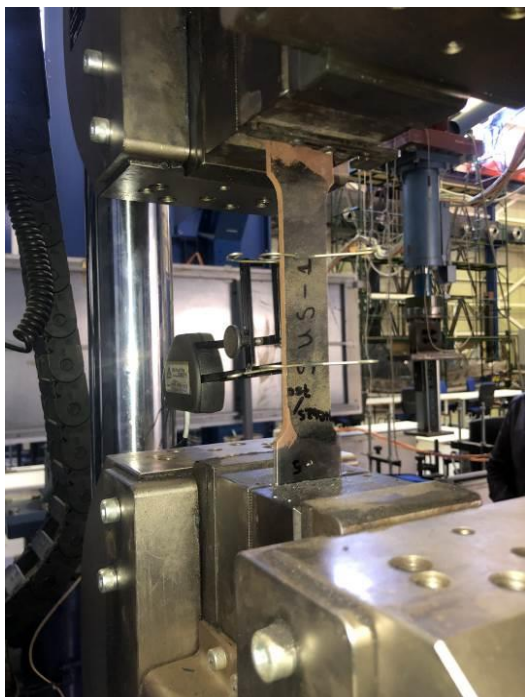
Στις προεντεταμένες κοχλιώσεις η μεταφορά των διατμητικών δυνάμεων γίνεται μέσω της αναπτυσσόμενης τριβής των συνδεόμενων ελασμάτων, η οποία οφείλεται στη δύναμη προέντασης. Για το λόγο αυτό οι κοχλιώσεις αυτού του τύπου ονομάζονται κοχλιώσεις τριβής. Από ένα σημείο και μετά, η τριβή υπερνικάται και λαμβάνει χώρα ολίσθηση μεταξύ των ελασμάτων. Από εκείνη τη στιγμή και μετά η κοχλίωση συμπεριφέρεται ως κοχλίωση άντυγας.

6.1.1 Αποτελέσματα απλών δοκιμών

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφελκυστικών δοκιμών για τα πρώτα δοκίμια (SUS).

1. Δοκίμιο SUS1

Στις δύο πρώτες φωτογραφίες φαίνεται το δοκίμιο τοποθετημένο στην μηχανή εφελκυσμού μαζί με το επιμηκυσιόμετρο πριν την έναρξη της δοκιμής, καθώς και το δοκίμιο μετά την αστοχία του σε μονοαξονικό εφελκυσμό.



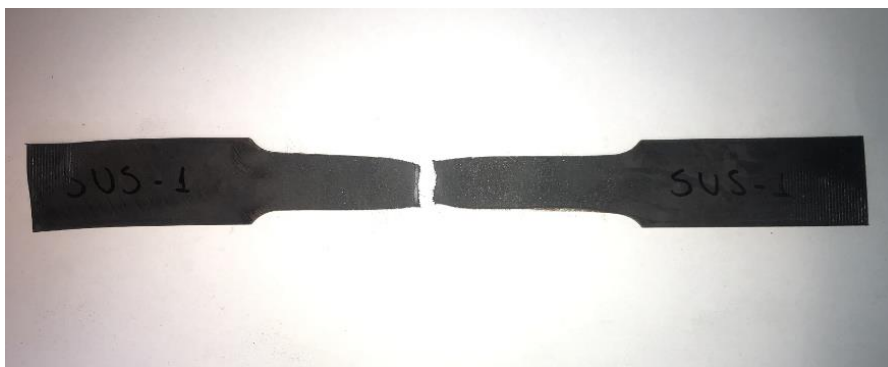
(α)



(β)

Εικόνα 6-7: Δοκίμιο SUS1 (α) πριν και (β) μετά την εφελκυστική δοκιμή.

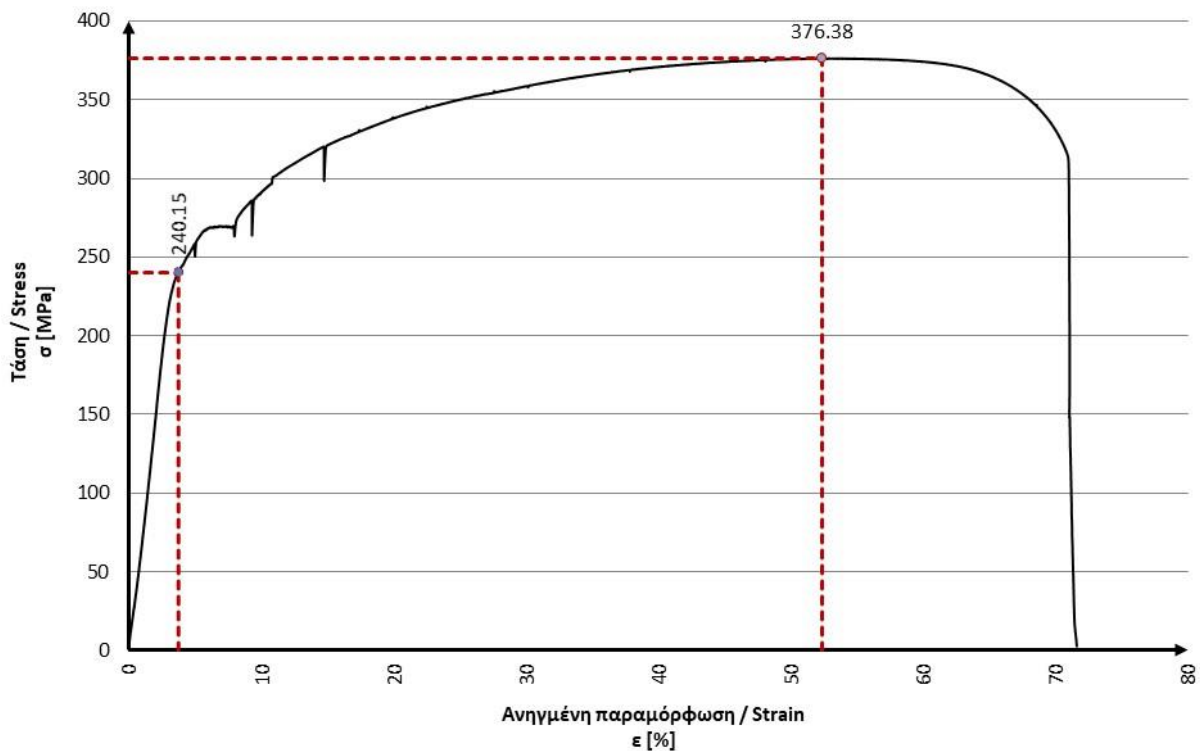
Παρατηρούμε ότι η αστοχία του πρώτου δοκιμίου (Εικόνα 6-8) προκλήθηκε περίπου στο μέσο του, κάτι που ήταν αναμενόμενο δεδομένου ότι τα άκρα του δοκιμίου βρίσκονται συγκρατημένα εντός των σιαγόνων – αρπαγών του οργάνου.



Εικόνα 6-8: Αστοχία δοκιμίου.

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων (Σχήμα 6-1) υπό συνθήκες περιβάλλοντος σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Το γραμμικό μέρος του διαγράμματος αποτελεί την ελαστική περιοχή του υλικού. Σε όλο το εύρος της περιοχής αυτής η άρση της επιβαλλόμενης αξονικής δύναμης επιτρέπει στο δοκίμιο να επανέλθει στο αρχικό του μήκος. Σε περιπτώσεις που το όριο διαρροής δεν είναι φανερό, ορίζεται ένα συμβατικό σημείο διαρροής, βάσει του οποίου προκύπτει παραμόρφωση 0,1 ή 0,2 ή 0,5%. Σε αυτό το δοκίμιο ορίστηκε παραμόρφωση 0,2% και η συμβατική τάση διαρροής (proof yield strength) προέκυψε ίση με $f_{y,0.2\%}=240$ MPa. Η ανηγμένη επιμήκυνση ήταν ίση με $\epsilon_{y,0.2\%}=3,74\%$.



Σχήμα 6-1: Διάγραμμα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμίου SUS1.

Το παραβολικό τμήμα του διαγράμματος αντιστοιχεί στην πλαστική περιοχή του υλικού. Σε αυτή την περιοχή οι παραμορφώσεις είναι μη αντιστρεπτές. Η τελική εφελκυστική αντοχή (ultimate strength) η οποία αντιστοιχεί στο ανώτατο σημείο της παραπάνω καμπύλης προέκυψε ίση με $f_u=376$ Mpa, ενώ η ανηγμένη επιμήκυνση σε αυτό το σημείο ίση με $\epsilon_u=52,37\%$.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο δοκίμιο SUS1 παρατηρήθηκε προϋπάρχουσα πλαστικοποίηση πριν την δοκιμή εφελκυσμού, κάτι που υποδεικνύεται από το παραπάνω διάγραμμα. Αυτή η πλαστικοποίηση μπορεί να δημιουργήθηκε είτε στην φάση κατασκευής, είτε στη φάση λειτουργίας του υπό εξέταση δοκιμίου.

2. Δοκίμιο SUS2

Ομοίως, πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία για το δεύτερο δοκίμιο (SUS2). Στις δύο πρώτες φωτογραφίες φαίνεται το δοκίμιο τοποθετημένο στην μηχανή εφελκυσμού πριν την έναρξη της δοκιμής και μετά την λήξη της.



(α)



(β)

Εικόνα 6-9: Δοκίμιο SUS2 (α) πριν και (β) μετά την εφελκυστική δοκιμή.

Η αστοχία του δεύτερου δοκιμίου (Εικόνα 6-10) προκλήθηκε και αυτή στο μέσο περίπου του ωφέλιμου μήκους του δοκιμίου.

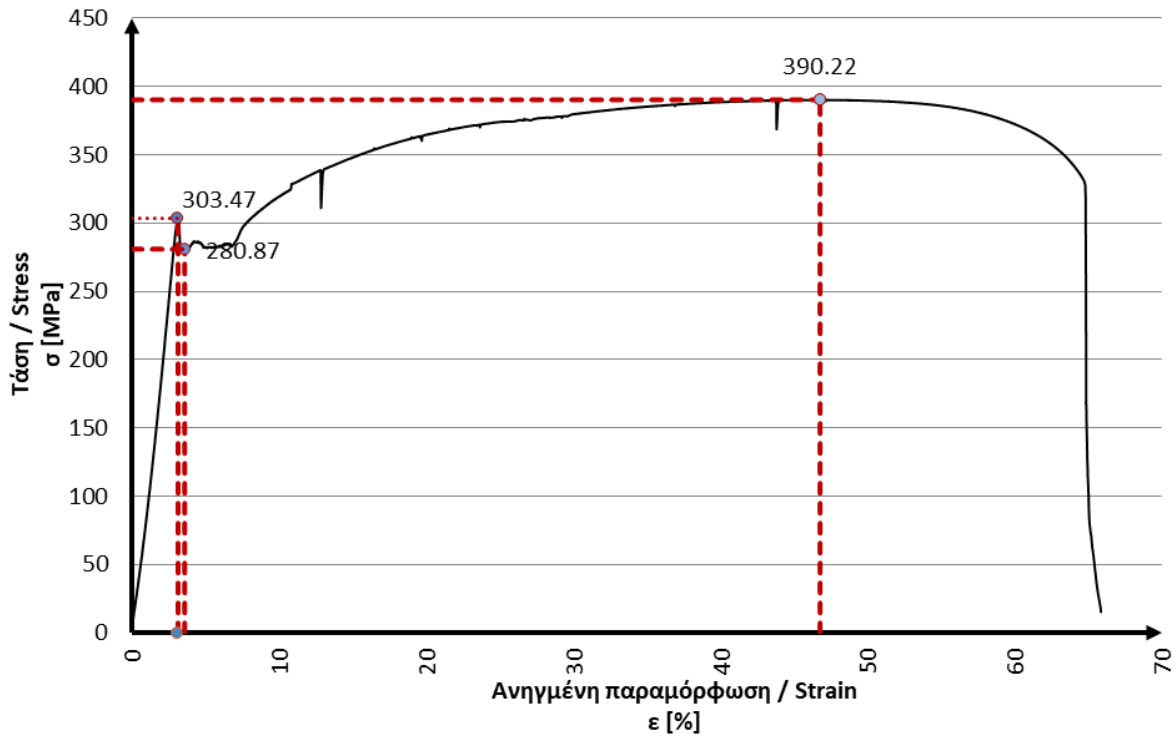


Εικόνα 6-10: Αστοχία δοκιμίου.

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων του δοκιμίου SUS2 (Σχήμα 6-2) υπό συνθήκες περιβάλλοντος σε μονοαξονικό εφελκυσμό.

Παρατηρούμε ότι, σε αυτό το δοκίμιο δε χρειάστηκε να οριστεί ένα συμβατικό σημείο διαρροής, καθώς το όριο διαρροής είναι φανερό και ίσο με $f_{y,up}=303$ MPa. Η ανηγμένη επιμήκυνση στο άνω όριο διαρροής ισούται με $\epsilon_{y,up}=3,12\%$. Επιπλέον, είναι φανερό και το κάτω όριο διαρροής ($f_{y,low}=280$ MPa).

Τέλος, η τελική αντοχή εφελκυσμού του δεύτερου δοκιμίου προέκυψε ίση με $f_u=390$ MPa, ενώ η ανηγμένη επιμήκυνση στο σημείο αυτό ίση με $\epsilon_u=46,78\%$.



Σχήμα 6-2: Διάγραμμα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμίου SUS2.

3. Δοκίμιο SUS3

Στις επόμενες εικόνες βλέπουμε το τελευταίο απλό δοκίμιο (SUS3) στην εφελκυστική μηχανή πριν την έναρξη της δοκιμής και μετά την λήξη της, όπου έχει αστοχήσει.



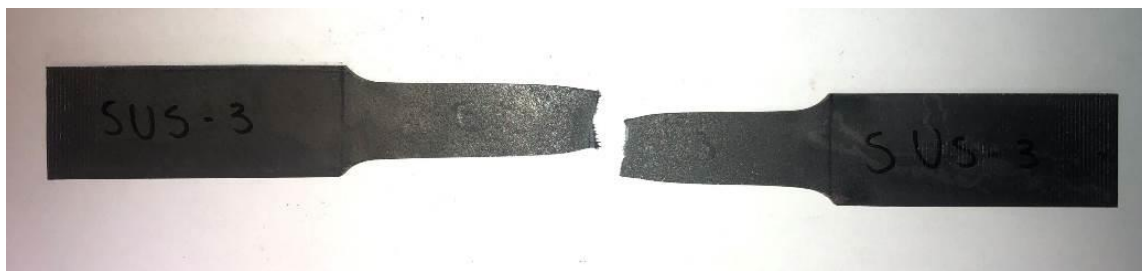
(α)



(β)

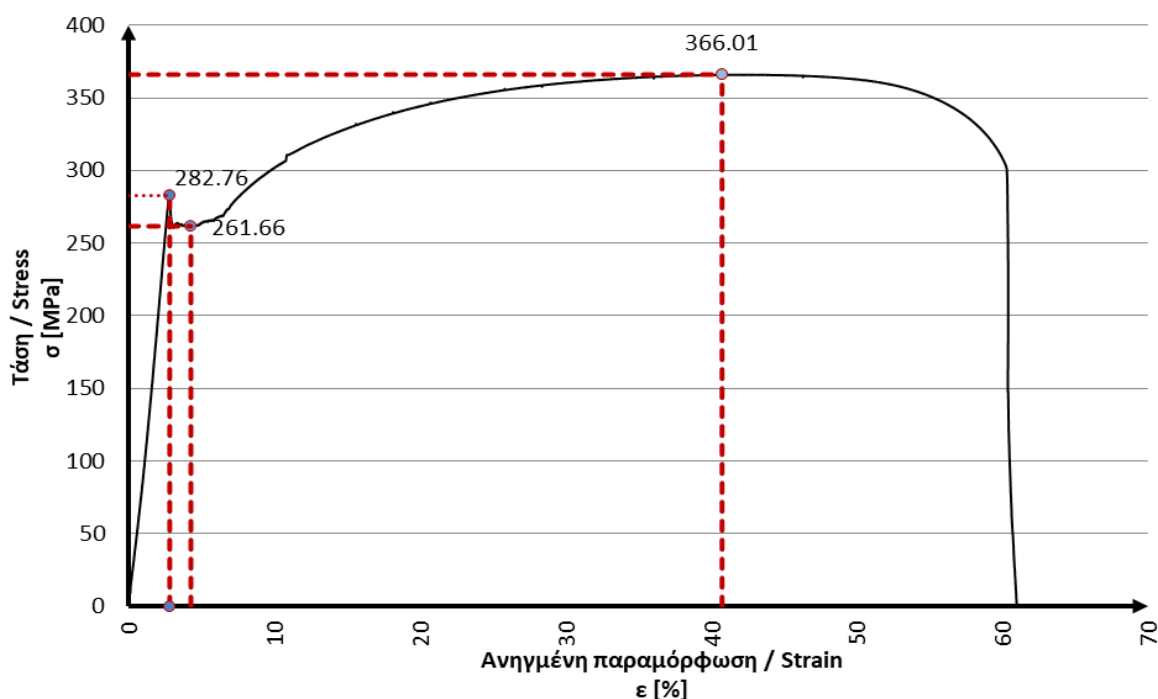
Εικόνα 6-11: Δοκίμιο SUS3 (α) πριν και (β) μετά την εφελκυστική δοκιμή.

Επιπλέον, παρουσιάζεται η αστοχία του δοκιμίου (Εικόνα 6-12) η οποία προκλήθηκε με όμοιο τρόπο με τα προηγούμενα δοκίμια.



Εικόνα 6-12: Αστοχία δοκιμίου.

Τέλος, παρουσιάζεται το διάγραμμα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων του δοκιμίου SUS3 (Σχήμα 6-3) υπό συνθήκες περιβάλλοντος σε μονοαξονικό εφελκυσμό.



Σχήμα 6-3: Διάγραμμα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων δοκιμίου SUS3.

Το άνω και κάτω όριο διαρροής και σε αυτό το δοκίμιο είναι φανερά και ίσα με $f_{y,up}=283$ MPa, $f_{y,low}=262$ MPa. Η ανηγμένη επιμήκυνση στο άνω όριο διαρροής ισούται με $\epsilon_{y,up}=2,82\%$, ενώ στο κάτω όριο προέκυψε ίση με $\epsilon_{y,low}=4,27\%$.

Η μέγιστη τάση του διαγράμματος τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων στο τρίτο απλό δοκίμιο είναι ίση με $f_u=366$ MPa, ενώ η ανηγμένη επιμήκυνση σε αυτό το σημείο ίση με $\epsilon_u=40,76\%$.

6.1.2 Αποτελέσματα συγκολλητών δοκιμών

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφελκυστικών δοκιμών για τα συγκολλητά δοκίμια (WUS).

1. Δοκίμιο WUS1

Αρχικά, παρουσιάζεται το πρώτο συγκολλητό δοκίμιο το οποίο υποβλήθηκε στο πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού (Εικόνα 6-13).



(α)



(β)

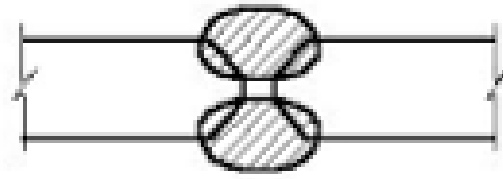
Εικόνα 6-13: Δοκίμιο WUS1 (α) πριν και (β) κατά την διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής.

Κατά την διάρκεια της δοκιμής παρατηρήθηκε αστοχία στην θέση της συγκόλλησης του δοκιμίου. Κατά συνέπεια, προέκυψε το συμπέρασμα ότι η συγκόλληση δεν είχε διεισδύσει σε όλο το πάχος των ελασμάτων και δεν ήταν πλήρους διείσδυσης (full penetration weld), όπως θα έπρεπε.



Εικόνα 6-14: Αστοχία δοκιμίου.

Ατελής διείσδυση υπάρχει όταν η συγκόλληση δεν έχει το προδιαγεγραμμένο βάθος διείσδυσης και, ως εκ τούτου, μειώνεται η αντοχή της. Κάποιοι πιθανοί λόγοι ατελούς διείσδυσης της συγκόλλησης είναι η ανεπαρκής ένταση του τόξου, ο λάθος σχεδιασμός της ένωσης από τον χρήστη ή ακόμη και η εσφαλμένη επιλογή μεθόδου.



Εικόνα 6-15: Ατελής διείσδυση σε συγκόλληση πλήρους διείσδυσης.

Έτσι, δεν ήταν δυνατό να προκύψει το διάγραμμα τάσεων-ανοιγμένων παραμορφώσεων του δοκιμίου WUS1.

2. Δοκίμιο WUS2

Ομοίως, παρουσιάζεται το δεύτερο συγκολλητό δοκίμιο το οποίο υποβλήθηκε στο πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού (Εικόνα 6-16).



Εικόνα 6-16: Δοκίμιο WUS2 πριν την εφελκυστική δοκιμή.

Κατά την δοκιμή του μονοαξονικού εφελκυσμού στο δεύτερο δοκίμιο, παρατηρήθηκε και πάλι αστοχία στην θέση της συγκόλλησης του δοκιμίου.

Έτσι, δεν ήταν δυνατό να προκύψει το διάγραμμα τάσεων-ανοιγμένων παραμορφώσεων του δοκιμίου WUS2.



(α)

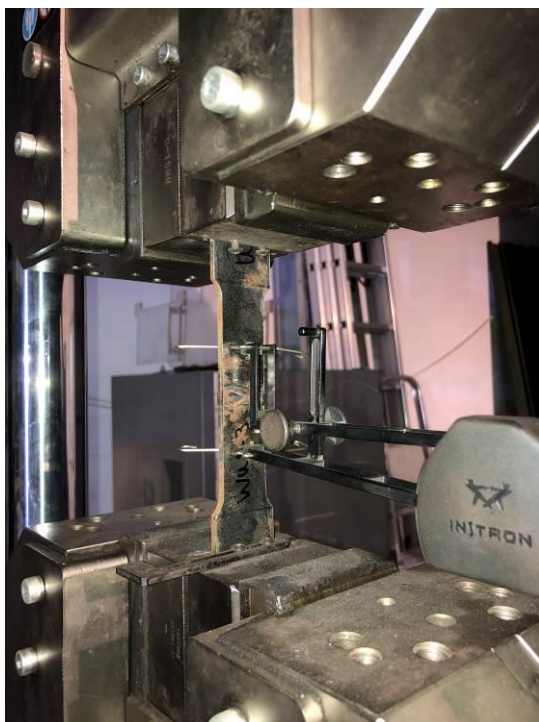


(β)

Εικόνα 6-17: Αστοχία δοκιμίου.

3. Δοκίμιο WUS3

Τέλος, στις επόμενες εικόνες βλέπουμε το τρίτο συγκολλητό δοκίμιο (WUS3) στην εφελκυστική μηχανή πριν την έναρξη της δοκιμής και μετά την λήξη της, όπου έχει αστοχήσει και πάλι το δοκίμιο στην θέση συγκόλλησης.



(α)



(β)

Εικόνα 6-18: Δοκίμιο WUS3 (α) πριν και (β) μετά την εφελκυστική δοκιμή.



Εικόνα 6-19: Αστοχία δοκιμίου.

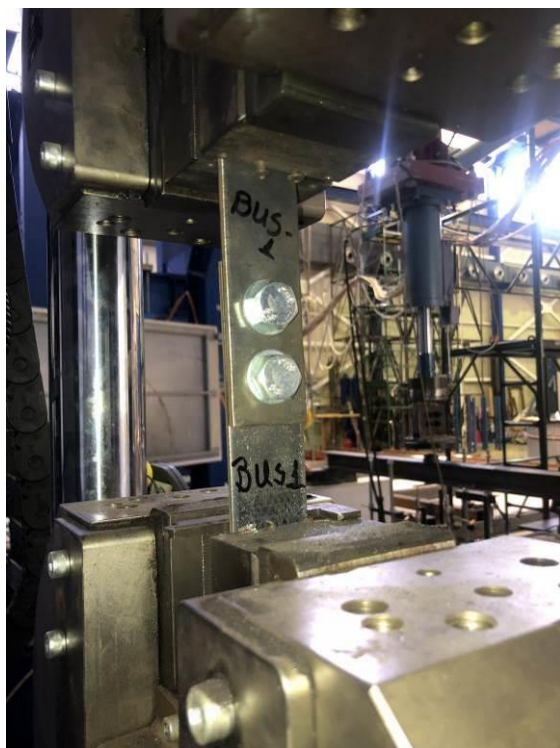
Δεν ήταν δυνατό να προκύψει το διάγραμμα τάσεων-ανοιγμένων παραμορφώσεων του δοκιμίου WUS3.

6.1.3 Αποτελέσματα κοχλιωτών δοκιμών

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφελκυστικών δοκιμών για τα δοκίμια με κοχλίες (BUS).

1. Δοκίμιο BUS1

Αρχικά, παρουσιάζεται το δοκίμιο BUS1 πριν και κατά τη διάρκεια της δοκιμής του μονοαξονικού εφελκυσμού (Εικόνα 6-20).



(α)



(β)

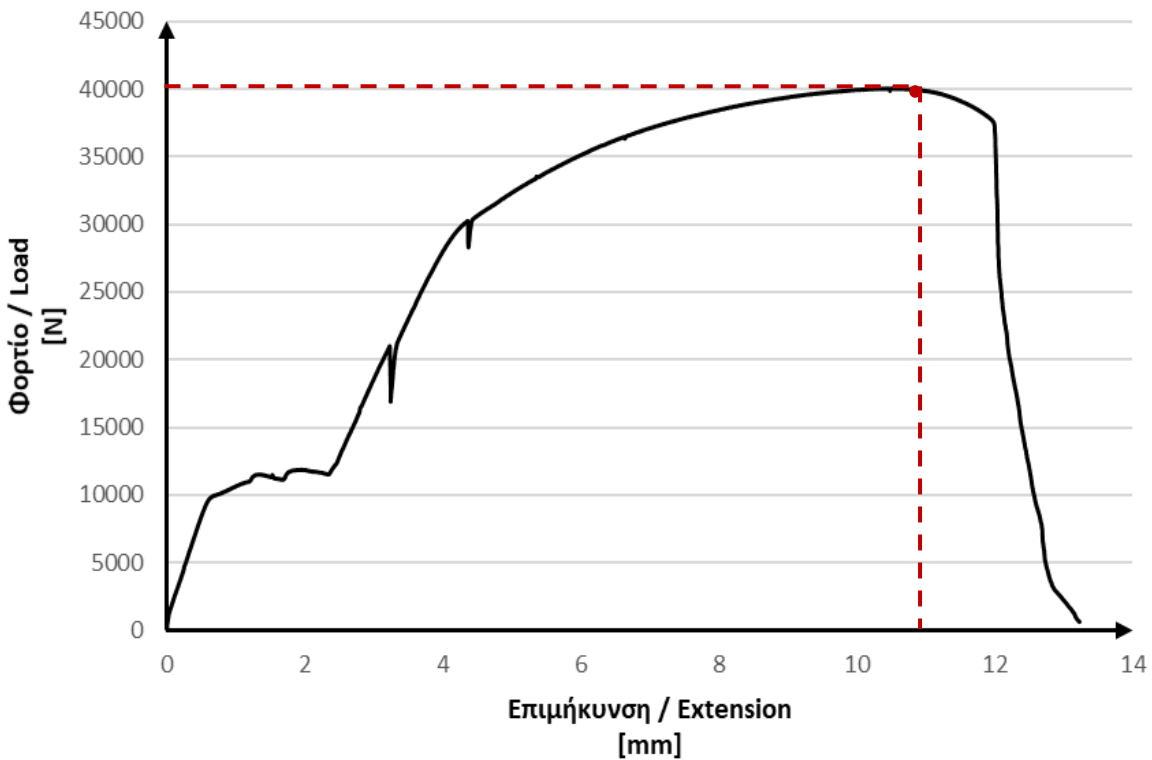
Εικόνα 6-20: Δοκίμιο BUS1 (α) πριν και (β) κατά την διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κοχλιωτές συνδέσεις των δοκιμών υπόκεινται σε διάτμηση και όχι σε εφελκυσμό, καθώς η διεύθυνση της προς μεταφορά δύναμης είναι κάθετη προς τον άξονα του κοχλία. Η αστοχία που προκλήθηκε ήταν αυτή της σύνθλιψης άντυγας (Εικόνα 6-21), η οποία αποτελεί όλκιμη και όχι ψαθυρή αστοχία.



Εικόνα 6-21: Αστοχία δοκιμίου.

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης του δοκιμίου BUS1 (Σχήμα 6-4).



Σχήμα 6-4: Διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης δοκιμίου BUS1.

Όπως παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα το μέγιστο φορτίο το οποίο μπόρεσε να παραλάβει το δοκίμιο είναι ίσο με 40kN.

Ο τύπος υπολογισμού της αντοχής σε σύνθλιψη άντυγας είναι ο παρακάτω.

$$F_b = k_1 \times a_b \times f_u \times d \times t \quad (6-1)$$

Όπου:

- F_b = αντοχή άντυγας οπής σε σύνθλιψη
- k_1 , a_b = συντελεστές που εξαρτώνται από τη γεωμετρία της κοχλίωσης (αποστάσεις της οπής από τα όρια ή άλλες οπές) και από τα υλικά

- f_u = το όριο θραύσης του χάλυβα του ελάσματος
- d = η διάμετρος του κοχλίου
- t = το πάχος του λεπτότερου από τα συνδεόμενα ελάσματα

Οι συντελεστές k_1 , a_b προσδιορίζονται με βάση τους τύπους:

$$k_1 = \min\left\{\frac{2.8e_2}{d_0} - 1.7, \frac{1.4p_2}{d_0} - 1.7, 2.5\right\} \quad (6-2)$$

$$a_b = \min\left\{1, \frac{f_{ub}}{f_u}, \frac{e_1}{3d_0}, \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}\right\} \quad (6-3)$$

Ωστόσο, επειδή οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται για λόγους σχεδιασμού και υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα για την τιμή που θα πάρουν σε κάθε συγκεκριμένη περίπτωση δεν γίνεται να εφαρμοστεί η Εξ. (6-1) για την εκτίμηση του ορίου θραύσης του χάλυβα. Καθώς είναι γνωστό το όριο θραύσης από τις δοκιμές στα απλά δοκίμια, θα συγκριθεί η θεωρητική αντοχή σύνθλιψης άντυγας με την πειραματική αντοχή, δηλαδή την αντοχή που προέκυψε από την δοκιμή.

Ο μέσος όρος της τελικής εφελκυστικής αντοχής στα τρία πρώτα δοκίμια προέκυψε ίσος με $f_u=377$ MPa. Έτσι, η θεωρητική αντοχή σύνθλιψης άντυγας είναι ίση με:

$$F_b = 2,5 \times 0,59 \times 377000 \times 0,012 \times 0,00398 = 27 \text{ kN}$$

Όπου:

- k_1 , a_b = από Πίνακα 6-3
- $f_u = 377000 \text{ kN/m}^2$
- $d = 0,012 \text{ m}$ (κοχλίας M12)
- $t = 0,00398 \text{ m}$ (πάχος λεπτότερου ελάσματος)

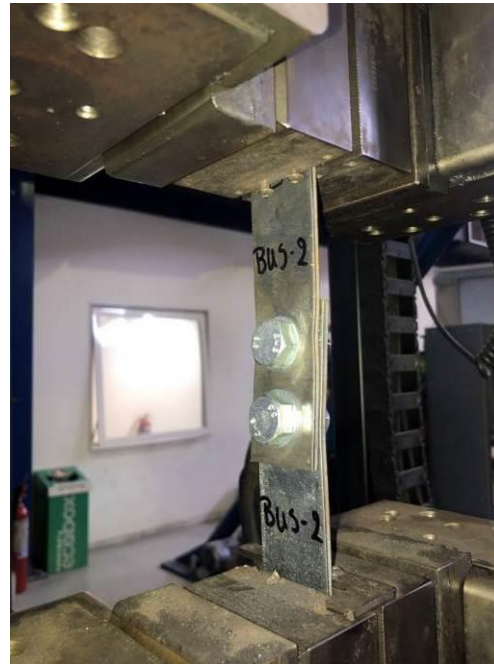
Από το Σχήμα 6-4 προκύπτει ότι η θραύση του δοκιμίου BUS1 προκλήθηκε όταν το φορτίο έγινε ίσο με 40kN, δηλαδή άντεξε 32,5% περισσότερο φορτίο σε σχέση με την θεωρητική αντοχή σύνθλιψης άντυγας.

2. Δοκίμιο BUS2

Ομοίως, στις παρακάτω εικόνες φαίνεται το δεύτερο δοκίμιο με κοχλίες (BUS2), πριν και κατά την διάρκεια της δοκιμής του εφελκυσμού.



(α)



(β)

Εικόνα 6-22: Δοκίμιο BUS2 (α) πριν και (β) κατά την διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής.

Η αστοχία που προκλήθηκε και σε αυτό το δοκίμιο ήταν αυτή της σύνθλιψης άντυνας των οπών (Εικόνα 6-23).



Εικόνα 6-23: Αστοχία δοκιμίου.

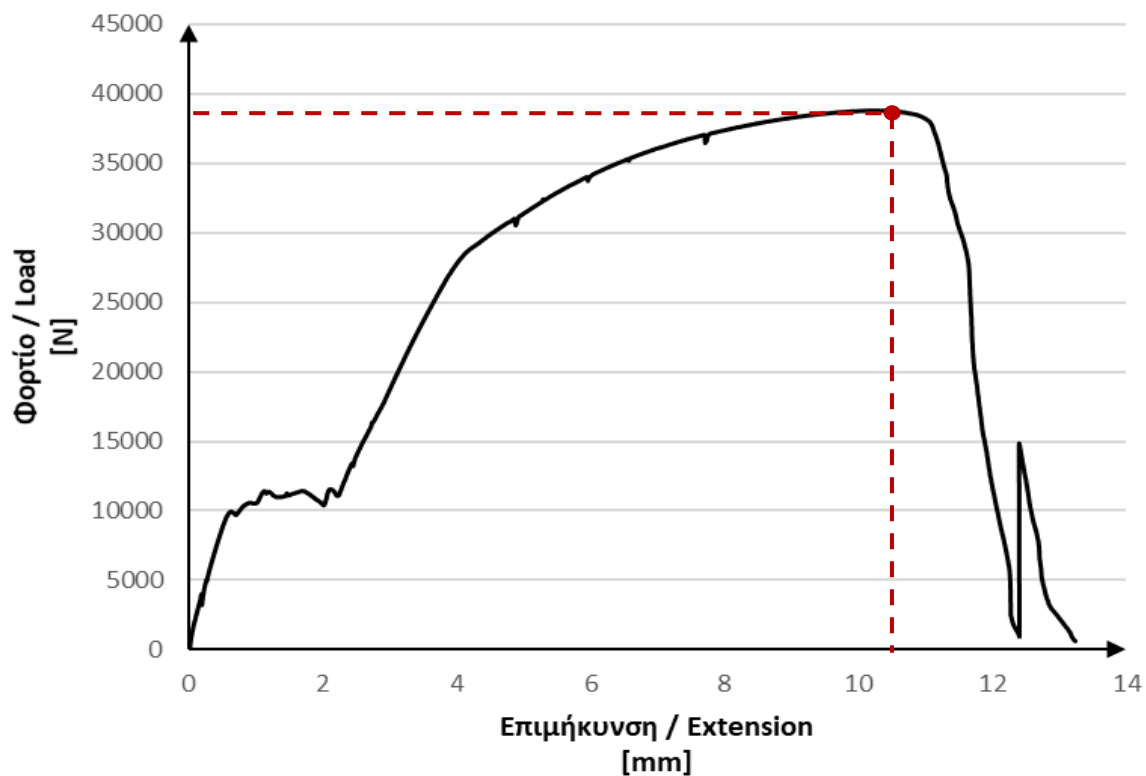
Η θεωρητική αντοχή σύνθλιψης άντυνας ισούται με:

$$F_b = 2,5 \times 0,59 \times 377000 \times 0,012 \times 0,00399 = 26,6 \text{ kN}$$

Όπου:

- k_1, a_b = από Πίνακα 6-3
- $f_u = 377000 \text{ kN/m}^2$
- $d = 0,012 \text{ m}$ (κοχλίας M12)
- $t = 0,00399 \text{ m}$ (πάχος λεπτότερου ελάσματος)

Τέλος, παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης του δοκιμίου BUS2, όπου η θραύση προκλήθηκε όταν το φορτίο έγινε ίσο με περίπου 39kN. Συνεπώς, το δοκίμιο άντεξε 31,7% περισσότερο φορτίο σε σχέση με την θεωρητική αντοχή σύνθλιψης άντυνας.



Σχήμα 6-5: Διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης δοκιμίου BUS2.

3. Δοκίμιο BUS3

Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για το τελευταίο δοκίμιο BUS3.



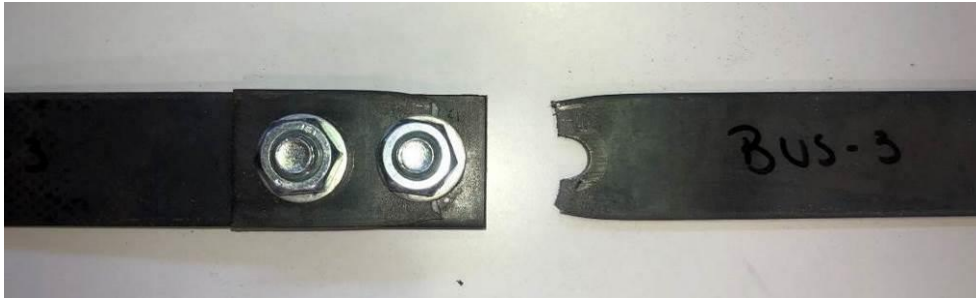
(α)



(β)

Εικόνα 6-24: Δοκίμιο BUS3 (α) πριν και (β) κατά την διάρκεια της εφελκυστικής δοκιμής.

Η αστοχία που προκλήθηκε ήταν η σύνθλιψη άντυγας των οπών. Μάλιστα, και τα τρία δοκίμια αστόχησαν στον κάτω κοχλία.



Εικόνα 6-25: Αστοχία δοκιμίου.

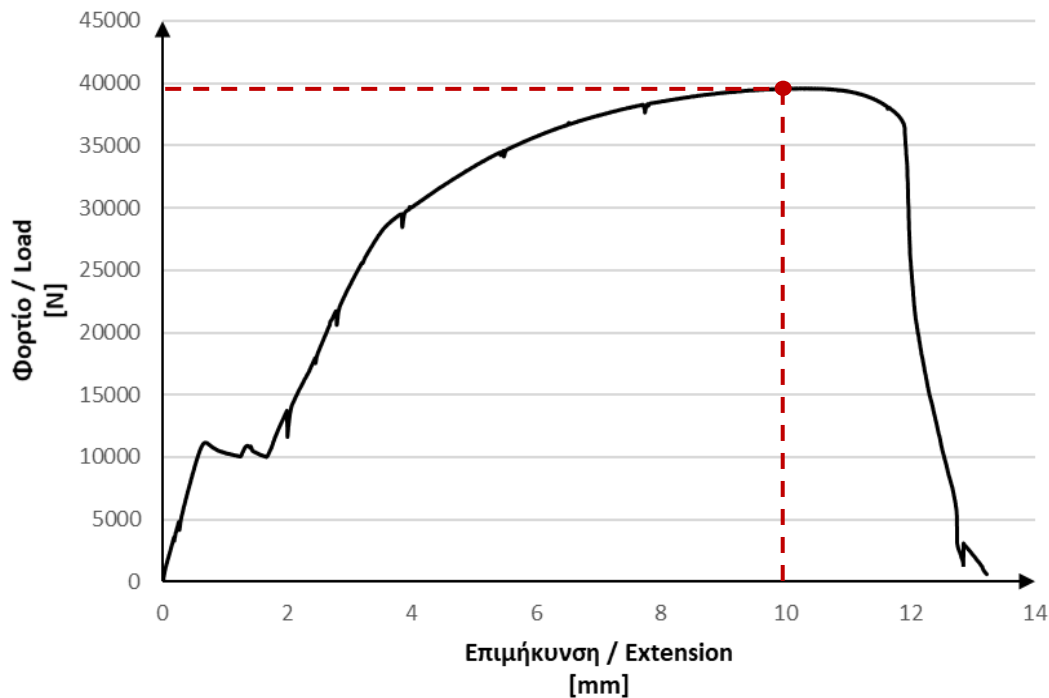
Η θεωρητική αντοχή σύνθλιψης άντυγας στο δοκίμιο BUS3 ισούται με:

$$F_b = 2,5 \times 0,59 \times 377000 \times 0,012 \times 0,00397 = 26,5 \text{ kN}$$

Όπου:

- k_1, a_b = από Πίνακα 6-3
- $f_u = 377000 \text{ kN/m}^2$
- $d = 0,012 \text{ m}$ (κοχλίας M12)
- $t = 0,00397 \text{ m}$ (πάχος λεπτότερου ελάσματος)

Τέλος, παρουσιάζεται το διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης του δοκιμίου BUS3, όπου η θραύση προκλήθηκε όταν το φορτίο έγινε ίσο με περίπου 40kN. Συνεπώς, το δοκίμιο άντεξε 33,7% περισσότερο φορτίο σε σχέση με την θεωρητική αντοχή σύνθλιψης άντυγας.



Σχήμα 6-6: Διάγραμμα φορτίου-επιμήκυνσης δοκιμίου BUS3.

Από τα παραπάνω διαγράμματα των δοκιμών παρατηρούμε, επίσης, ότι σχεδόν στο ίδιο φορτίο (10 kN) υπερνίκησαν τη δύναμη σύσφιγξης που εφαρμόστηκε στους κοχλίες. Αυτό γίνεται φανερό καθώς υπάρχει «γλίστρημα» στα τρία διαγράμματα σε αυτό το σημείο.

6.1.4 Αποτελέσματα δοκιμών δεύτερης φάσης

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφελκυστικών δοκιμών των ελασμάτων στα οποία οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ πριν την έναρξη του πειραματικού σκέλους αυτής της εργασίας.

Πίνακας 6-5: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού για τα δεύτερα δοκίμια.

	T5DW-1L		T5DW-2P		T6B-1		T6W-1	
ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (MPa)	fy	fu	fy	fu	fy	fu	fy	fu
	359	474	362	469	388	521	371	496

Πίνακας 6-6: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού για τα δεύτερα δοκίμια (συνέχεια).

	T6W-2		T10-B1		T15-T1		T20-T1	
ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (MPa)	fy	fu	fy	fu	fy	fu	fy	fu
	345	480	371	500	348	478	349	514

6.2 Αποτελέσματα εφελκυστικών δοκιμών

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις εφελκυστικές δοκιμές για τις τρεις κατηγορίες δοκιμών (SUS, WUS, BUS).

Πίνακας 6-7: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού (απλά δοκίμια).

	SUS1		SUS2		SUS3	
ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (MPa)	fy	fu	fy	fu	fy	fu
	240	376	303	390	283	366

Πίνακας 6-8: Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού (συγκολλητά δοκίμια).

	WUS1	WUS2	WUS3
ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (MPa)	fu	fu	fu
	--	--	--

Παρατηρούμε ότι οι τιμές των τελικών αντοχών έχουν μικρή απόκλιση μεταξύ των απλών δοκιμών με μέσο όρο $f_u=377$ MPa. Επιπλέον, επιβεβαιώνεται η κατηγορία χάλυβα S235 (Πίνακας 6-9).

Στα δοκίμια WUS υπήρξε το πρόβλημα της ατελούς διείδυσης της συγκόλλησης. Συνεπώς, δεν μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για τις εφελκυστικές αντοχές των δοκιμίων.

Πίνακας 6-9: Ονομαστικές τιμές του ορίου διαρροής και της οριακής εφελκυστικής αντοχής (ονομαστικό πάχος στοιχείου $t \leq 40$ mm).

Ποιότητα χάλυβα κατά EN 10025-2	f_y (MPa)	f_u(MPa)
S235	235	360
S275	275	430
S355	355	510
S450	440	550

7 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Η αντοχή ορίζεται ως η ικανότητα ενός υλικού να αντέχει ένα εφαρμοζόμενο φορτίο χωρίς αστοχία. Από την άλλη πλευρά, η σκληρότητα ορίζεται ως η ικανότητα αντίστασης του υλικού στην παραμόρφωση. Παρόλο που τα δύο αυτά μεγέθη διαφέρουν, έχουν, επίσης, άμεση σύνδεση. Η αντοχή σε εφελκυσμό και η σκληρότητα είναι ενδείξεις της αντίστασης ενός μετάλλου στην πλαστική παραμόρφωση. Τα δύο μεγέθη είναι ανάλογα μεταξύ τους και παρουσιάζουν γραμμική συσχέτιση σε όλο το εύρος τιμών αντοχής. Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις είναι δυνατό να αντικατασταθεί η σχετικά χρονοβόρα και δαπανηρή δοκιμή εφελκυσμού με μια πιο βολική δοκιμή της συμπεριφοράς πλαστικής παραμόρφωσης των μετάλλων, μια δοκιμή σκληρότητας. Συνήθως, όσο πιο σκληρός είναι ο χάλυβας, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του σε εφελκυσμό και τόσο μικρότερη η ολκιμότητα του. Ωστόσο, υπάρχει διαφορετική σχέση αναλογίας για κάθε μέταλλο.

7.1 Βιβλιογραφική έρευνα

Αν και η έννοια των μηχανικών δοκιμών βασισμένη στον εξαναγκασμό ενός ισχυρού διείσδυτή σε μια επίπεδη επιφάνεια χρονολογείται πριν από τουλάχιστον 150 χρόνια, η σύγχρονη ερμηνεία της σκληρότητας ενός μετάλλου ως η ανθεκτικότητα έναντι πλαστικής παραμόρφωσης από μια σχετικά ισχυρή και άκαμπτη εσοχή (indenter) καλά καθορισμένης γεωμετρίας ξεκίνησε το 1900 με το έργο του Brinell.

Οι μέθοδοι σκληρομετρίας Brinell, Vickers και Rockwell χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στις μεταλλουργικές και μηχανικές βιομηχανίες στις αρχές του 20ου αιώνα, από όπου ξεκίνησαν ως μετρήσεις ποιοτικού ελέγχου και ως μέσο προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των μεταλλικών στοιχείων. Αν και ήταν γενικά αποδεκτό ότι οι δοκιμές αυτές, και ιδιαίτερα η δοκιμή Brinell, ήταν εξαιρετικά χρήσιμες στη βιομηχανία για πρακτικούς σκοπούς, δεν ήταν ξεκάθαρο ποια ιδιότητα του υλικού υπολογίζονταν μέσω της αντίστασης σε διείσδυση.

Πρόέκυψε, έτσι, η ανάγκη μιας εμπειρικής συσχέτισης μεταξύ της σκληρότητας Brinell (HB) και της εφελκυστικής αντοχής (f_u) για μέταλλα, και ειδικά για χάλυβες. Ο ίδιος ο Brinell διαπίστωσε ότι για χάλυβες με μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα προκύπτει μια γραμμική σχέση συσχέτισης των δύο μεγεθών. Αυτή φαίνεται στον παρακάτω τύπο.

$$f_u = c \times HB \quad (7-1)$$

Όπου:

$$- c = 0,346$$

Μέχρι τη δεκαετία του 1940, μια τέτοια γραμμική σχέση είχε καθιερωθεί. Οι τιμές 0,36 και 0,34 για το c προδιαγράφηκαν σε ένα γερμανικό πρότυπο DIN για διαφορετικούς τύπους χάλυβα.

Η Lea το 1936 παρείχε πειραματικές μετρήσεις της σκληρότητας Vickers και των διαφόρων μηχανικών ιδιοτήτων για μια σειρά από διαφορεικά κράματα χάλυβα, τα οποία είχαν υποστεί διαφορετικές θερμικές επεξεργασίες και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι «δεν φαίνεται δυνατό να βρεθεί για τους χάλυβες οποιαδήποτε άλλη ιδιότητα εκτός από την τελική αντοχή εφελκυσμού (ή τη μέγιστη διατμητική τάση κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής εφελκυσμού που ισούται με το μισό της εφελκυστικής τάσης) η οποία να έχει περίπου σταθερή αναλογία προς τον αριθμό σκληρότητας».

Ο O'Neill δήλωσε το 1934 ότι παρόλο που δεν φαινόταν να υπάρχει σταθερή τιμή c για όλα τα μέταλλα, εάν παρουσίαζαν μικρή σκλήρυνση, τότε ίσχυε $c = 0,36$. Ωστόσο, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι «η θεωρητική προσέγγιση για μια σταθερή σχέση μεταξύ της τελικής τάσης εφελκυσμού και της σκληρότητας είναι κάπως ασαφής» [11].

7.2 Κανονιστικές διατάξεις

Σήμερα, παρόλο που έχουν γίνει σημαντικά βήματα προς αυτή την κατεύθυνση, εξακολουθεί να μην υπάρχει γενική μέθοδος μετατροπής των αριθμών σκληρότητας που προσδιορίζονται σε μια κλίμακα σε αριθμούς σκληρότητας σε άλλη κλίμακα ή σε τιμές αντοχής εφελκυσμού.

Ωστόσο, στις κανονιστικές διατάξεις ISO 18265:2013(E), ASTM A370 παρέχονται πίνακες μετατροπής της σκληρότητας σε εφελκυστικές αντοχές. Οι μετατροπές αυτές αποτελούν, στην καλύτερη περίπτωση, προσεγγίσεις και επομένως πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή. Οι τυπικοί πίνακες μετατροπής σκληρότητας για μέταλλα δίνουν κατά προσέγγιση τιμές μετατροπής για συγκεκριμένα υλικά όπως ο χάλυβας, ο ανοξείδωτος χάλυβας, κράματα υψηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο, κράματα χαλκού και λευκού χυτοσίδηρου.

Ενώ η μετατροπή της σκληρότητας από μία μέθοδο σε άλλη περιλαμβάνει σημαντικά συστηματικά σφάλματα και σφάλματα διασποράς, η μετατροπή της σκληρότητας σε τιμές αντοχής εφελκυσμού παράγει ακόμη μεγαλύτερη αβεβαιότητα. Ένας λόγος για αυτό είναι ότι μια μεγάλη αβεβαιότητα μπορεί να επηρεαστεί από αλλαγές στην μικροδομή (π.χ. που προκύπτουν από θερμική επεξεργασία ή ψυχρή επεξεργασία) ακόμη και στην ίδια ποιότητα χάλυβα.

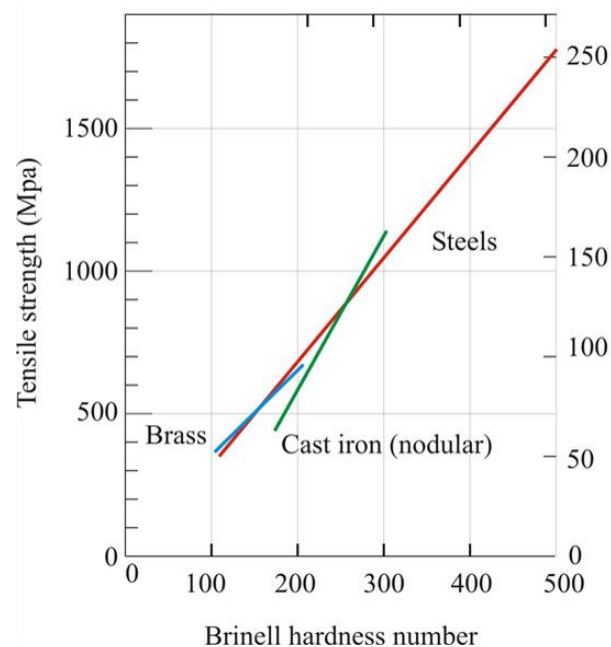
Συνεπώς, οι τιμές εφελκυστικής αντοχής οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα είναι μόνο κατά προσέγγιση τιμές και δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού.

Πίνακας 7-1: Μετατροπή της σκληρότητας σε εφελκυστική αντοχή για χάλυβα και χυτοσίδηρο. (Οι τιμές του πίνακα αντιστοιχούν στο πρότυπο DIN EN ISO 18265:2013, Πίνακας A.1).

Tensile Strength (MPa)	Brinell Hardness (HB)
255	76
270	80.7
285	85.5
305	90.2
320	95
335	99.8
350	105
370	109
385	114
400	119
415	124
430	128
450	133
465	138
480	143
495	147
510	152
530	156
545	162
560	166
575	171
595	176
610	181
625	185
640	190
660	195
675	199
690	204
705	209
720	214
740	219
755	223

Tensile Stength (MPa)	Brinell Hardness (HB)
770	228
785	233
800	238
820	242
835	247
850	252
865	257
880	261
900	266
915	271
930	276
950	280
965	285
995	295

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται ένα γράφημα που απεικονίζει την σύνδεση μεταξύ σκληρότητας HBW και εφελκυστικής αντοχής για τρία υλικά (χάλυβα, ορείχαλκο και χυτοσίδηρο). Ανάλογα γραφήματα μπορούν να δημιουργηθούν και για άλλα υλικά, βασιζόμενα στους πίνακες των κανονιστικών διατάξεων.



Σχήμα 7-1: Συσχέτιση σκληρότητας HBW με εφελκυστική αντοχή χάλυβα, ορείχαλκου και χυτοσίδηρου [Πηγή:SlideToDoc.com].

8 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ

8.1 Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα των δοκιμών

Η επιλογή ενός υλικού για μια συγκεκριμένη εφαρμογή βασίζεται κυρίως στις φυσικές, χημικές και μηχανικές του ιδιότητες. Διαφορετικές μέθοδοι σκληρομετρήσεων αναπτύχθηκαν και υιοθετήθηκαν ανά τα χρόνια για την εξαγωγή συμπερασμάτων σε ένα μεγάλο εύρος δοκιμών. Κύριο μέλημα αποτελεί πάντα η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών σε μια αναμφισβήτητη βάση, μια αποδεκτή κλίμακα αναφοράς. Καθώς η σκληρότητα εξαρτάται από τη μέθοδο δοκιμής και την επιλογή των παραμέτρων εφαρμογής δεν αποτελεί θεμελιώδη (φυσική) ιδιότητα των υλικών. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό να καθορίζονται κάθε φορά με σαφήνεια τα όργανα και οι παράμετροι δοκιμής.

Οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι δοκιμών στοχεύουν στον έλεγχο της ποιότητας του χάλυβα. Λάθη στην ποιότητα του μπορεί να επηρεάσουν την αντοχή αλλά και τον ικανοτικό σχεδιασμό μιας κατασκευής. Οι απαιτήσεις σε μεταλλικά υλικά και η πρακτική εφαρμογή τους σε διάφορες κατασκευές, εγκαταστάσεις και μηχανήματα αυξάνονται συνεχώς. Εξαιτίας αυτού, ένας αξιόπιστος χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων των υλικών, συμπεριλαμβανομένης μιας ποσοτικής αξιολόγησης παίζουν κυρίαρχο ρόλο.

Υπάρχει μια σειρά από ευδιάκριτα πλεονεκτήματα των μη καταστρεπτικών δοκιμών. Το πιο προφανές, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι ότι τα δοκίμια που δοκιμάζονται παραμένουν άθικτα κατά τη διαδικασία. Τα δοκίμια ούτε θραύονται, ούτε παραμορφώνονται υπερβολικά, επιτρέποντας την επισκευή ενός τμήματος αντί για την αντικατάστασή του σε περίπτωση που εντοπιστούν προβλήματα. Οι δοκιμές είναι δυνατό να εφαρμοστούν επανειλημμένα στο ίδιο δοκίμιο και αυτό που προκύπτει είναι μόνο το αποτύπωμα μιας μικρής διείσδυσης.

Το κόστος των μη καταστροφικών δοκιμών είναι, συνήθως, αρκετά χαμηλό και απαιτούν έναν στοιχειώδη μόνο εξοπλισμό. Επίσης, άλλο ένα πλεονέκτημα τους θεωρείται η πληθώρα προτύπων και προδιαγραφών που καλύπτουν τους ελέγχους των δοκιμών και βοηθούν στην ορθότερη διεξαγωγή τους.

Η μέθοδος αναπήδησης (Leeb) με χρήση φορητού οργάνου είναι κατάλληλη για επί τόπου ελέγχους σε κατασκευές από χάλυβα. Αυτό προκύπτει καθώς στο έργο δεν αποσπάται τμήμα από την κατασκευή ώστε να ελεγχθεί η ποιότητα του χάλυβα, είτε με την μέθοδο Brinell (μη καταστροφική), είτε με την δοκιμή εφελκυσμού (καταστροφική). Ως εκ τούτου, τα σύγχρονα φορητά όργανα σκληρομετρήσεων προσφέρουν μια γρήγορη, αξιόπιστη και οικονομική εναλλακτική λύση έναντι των τυπικών

σκληρόμετρων πάγκου. Το αρχικό κόστος αγοράς, ιδιαίτερα των σκληρόμετρων πάγκου, μπορεί να είναι αρκετά υψηλό, χωρίς ωστόσο να φτάνει το κόστος μίας μηχανής δοκιμών εφελκυσμού.

Από την άλλη πλευρά, υπάρχει ένα ουσιαστικό μειονέκτημα σε όλα τα φορητά σκληρόμετρα ανεξαρτήτως τεχνολογίας και αυτό είναι η έλλειψη ακρίβειας σε σχέση με αυτή που προσφέρουν τα σταθερά σκληρόμετρα και ακόμα περισσότερο οι δοκιμές εφελκυσμού. Σε πολλές περιπτώσεις, απαιτείται καλή μηχανική κρίση και είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται ως μέσο στατιστικού ελέγχου της διαδικασίας. Ωστόσο, με την εξέλιξη της επιστήμης γίνεται δυνατή η διεξαγωγή αυτού του είδους των δοκιμών με ολόένα και περισσότερο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Άλλο ένα μειονέκτημα των μη καταστρεπτικών δοκιμών θεωρείται ότι το αποτέλεσμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα και εμπειρία του χειριστή. Δεν μπορούν όλοι να εκτελέσουν αξιόπιστα μη καταστροφικές δοκιμές, αλλά απαιτείται ένας εξειδικευμένος εμπειρογνώμονας για τη λειτουργία και τη διεξαγωγή των δοκιμών. Επιπλέον, πρέπει να υπάρχει γνώση των αναμενόμενων αποτελεσμάτων.

Τέλος, μετά την διεξαγωγή του πειραματικού σκέλους της διπλωματικής εργασίας, έγινε αντιληπτή η χρονοβόρα και, εν μέρη, δύσκολη διαδικασία της προετοιμασίας των δοκιμών (λείανση), η οποία είναι απαραίτητη και για τις δοκιμές στο σκληρόμετρο πάγκου και στη μέθοδο αναπηδήσεως. Άλλο ένα συμπέρασμα που προέκυψε από τις μη καταστροφικές δοκιμές αποτελεί το γεγονός ότι σε αρκετά μικρά πάχη δοκιμών τα αποτελέσματα δεν έχουν μεγάλη ακρίβεια ή δεν είναι αξιόπιστα λόγω της δημιουργίας παραμορφώσεων στην αντίθετη πλευρά από την εφαρμογή της δύναμης.

Όσον αφορά τις καταστρεπτικές μεθόδους δοκιμών, βασικό πλεονέκτημά τους θεωρείται η ακρίβεια με την οποία επαληθεύονται οι ιδιότητες ενός υλικού. Το αποτέλεσμα των δοκιμών δεν εξαρτώνται από τις ικανότητες του χειριστή αλλά προκύπτουν αυτόματα από λογισμικό. Υπάρχουν πολλές κανονιστικές διατάξεις και για αυτές τις δοκιμές. Διασφαλίζεται, έτσι, η συμμόρφωση με τα διεθνή και βιομηχανικά πρότυπα. Κατά την δοκιμή εφελκυσμού εξάγονται συμπεράσματα για την συνολική συμπεριφορά του υλικού υπό διάφορα φορτία και όχι μόνο για την τελική του αντοχή. Αυτό δεν είναι δυνατό με τις μη καταστροφικές δοκιμές.

Βασικό μειονέκτημα της δοκιμής εφελκυσμού, εκτός από την προφανή καταστροφή των υπό εξέταση στοιχείων, αποτελεί το αρχικό κόστος του εξοπλισμού. Απαραίτητη είναι και η συντήρηση των μηχανών. Επιπλέον, αποτελεί δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία η προετοιμασία των χαλύβδινων δειγμάτων, καθώς κάθε δοκίμιο εφελκυσμού πρέπει να διαθέτει μια τυποποιημένη διατομή και συγκεκριμένο μέγεθος, με το τμήμα του μετρητή να έχει μικρότερη διάμετρο. Δοκίμια μικρού μεγέθους, συχνά, δεν μπορούν να δοκιμαστούν.

8.2 Σύγκριση μεταξύ των δεδομένων σκληρομέτρησης κατά Brinell

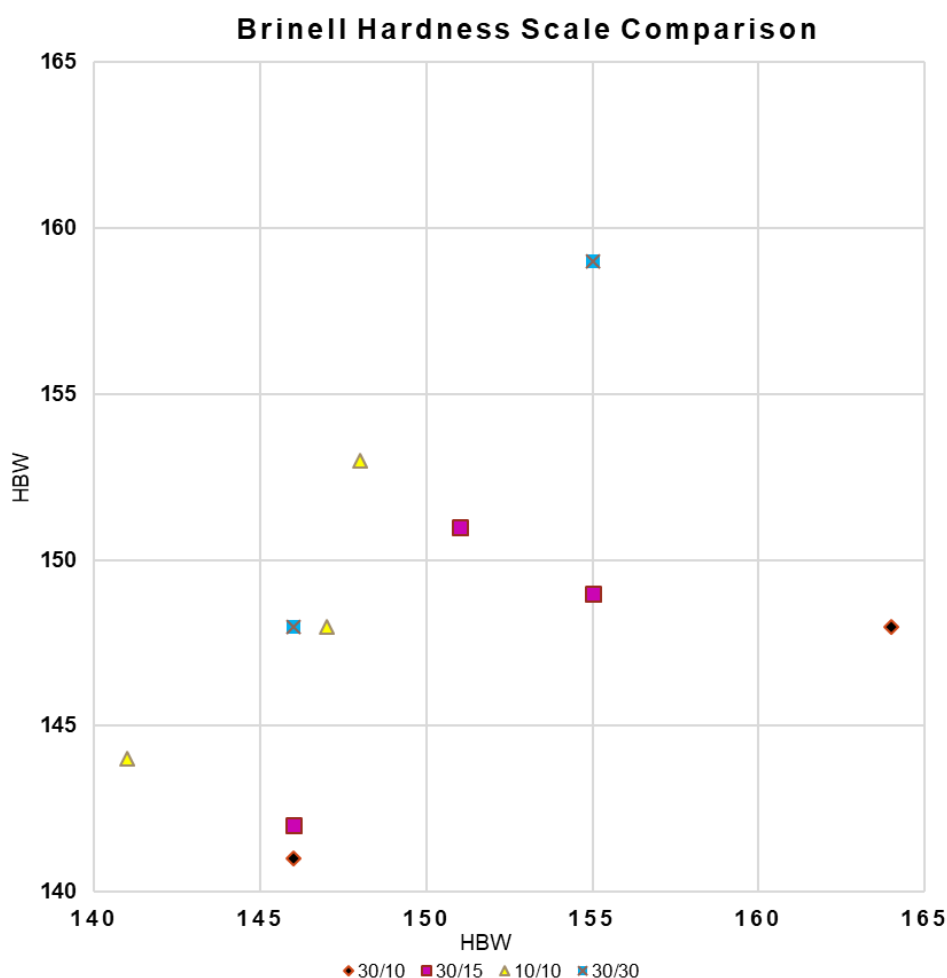
Στη δοκιμή Brinell κάθε συνδυασμός σφαίρας διεισδυτή και φορτίου ορίζει διαφορετική κλίμακα σκληρότητας. Για παράδειγμα το HBW 10/1000, το HBW 10/3000, το HBW 2,5/62,5, το HBW 5/750 κ.λπ. αποτελούν διαφορετικές κλίμακες. Τόσο το ASTM E10 όσο και το ISO 6506 προειδοποιούν κατά της σύγκρισης μεταξύ των διαφορετικών κλιμάκων, αλλά υποδεικνύουν ότι εάν διατηρηθεί ο λόγος δύναμης/διαμέτρου τότε η προκύπτουσα τιμή σκληρότητας θα προκύψει, περίπου, η ίδια.

Οι εργαστηριακές δοκιμές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, μεταξύ άλλων, στοχεύουν στην κατανόηση της επίδρασης της χρήσης διαφορετικών κλιμάκων σκληρότητας Brinell στα χαλύβδινα δοκίμια και την ποσοτικοποίηση τυχόν διαφορών. Για το λόγο αυτό συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα του HBW 5/750 έναντι του HBW 2,5/62,5, του HBW 2,5/187,5 έναντι του HBW 10/1500, του HBW 2,5/62,5 έναντι του HBW 5/250 και του HBW 2,5/187,5 έναντι του HBW

10/3000. Αυτές αποτελούν τις πιο συνηθισμένες κλίμακες που χρησιμοποιούνται και αντιπροσωπεύουν μια σύγκριση μεταξύ διαφορετικών λόγων δύναμης/διαμέτρου (10 έναντι 30 και 30 έναντι 15) και διαφορετικών κλιμάκων αλλά με κοινή αναλογία δύναμης/διαμέτρου (ίση με 10 και 30).

Τα αποτελέσματα από όλους τους συνδυασμούς σχεδιάστηκαν στο ίδιο γράφημα (Γράφημα 8-1). Το γράφημα μορφοποιήθηκε για να δημιουργήσει ένα ισότοπο με εύρος από 140 έως 165 τόσο στον άξονα x όσο και στον άξονα y.

Οι μετρήσεις σκληρότητας που λήφθηκαν χρησιμοποιώντας την κλίμακα HBW 2,5/62,5 ήταν χαμηλότερες από αυτές που προέκυψαν χρησιμοποιώντας την κλίμακα HBW 5/750. Η κλίμακα HBW 5/750 είχε κατά μέσο όρο 10 βαθμούς υψηλότερες τιμές σκληρότητας από την κλίμακα HBW 2,5/62,5. Επιπλέον, οι μετρήσεις που λήφθηκαν χρησιμοποιώντας την κλίμακα HBW 2,5/187,5 ήταν υψηλότερες από αυτές της κλίμακας HBW 10/1500 με μέσο όρο περίπου 3 μονάδες.



Γράφημα 8-1: Σύγκριση μεταξύ HBW 5/750 και HBW 2,5/62,5, HBW 2,5/187,5 και HBW 10/1500, HBW 2,5/62,5 και HBW 5/250, HBW 2,5/187,5 και HBW 10/3000.

Στο ίδιο γράφημα αξιολογήθηκαν και τα αποτελέσματα με ίδιους λόγους δύναμης/διαμέτρου. Έτσι, αρχικά συγκρίθηκαν οι κλίμακες HBW 2,5/62,5 και HBW 5/250. Και οι δύο έχουν λόγο δύναμης/διαμέτρου ίσο με 10, επομένως σύμφωνα με το ISO 6506 και το ASTM E-10 οι προκύπτουσες τιμές σκληρότητας πρέπει να είναι, περίπου, οι ίδιες. Για τα δείγματα που δοκιμάστηκαν η κλίμακα HBW 5/250 είχε κατά μέσο όρο 3 βαθμούς υψηλότερες τιμές σκληρότητας από την κλίμακα HBW

2,5/62,5. Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των HBW 2,5/187,5 και HBW 10/3000. Και οι δύο έχουν λόγο δύναμης/διαμέτρου ίσο με 30. Προέκυψε ότι η κλίμακα HBW 10/3000 είχε κατά μέσο όρο 3 βαθμούς υψηλότερες τιμές σκληρότητας από την κλίμακα HBW 2,5/187,5.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, πιθανώς, δεν μπορεί να εφαρμοστεί μια καθολική αρχή για την προσαρμογή των μετρήσεων από τη μία κλίμακα στην άλλη. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι σε μεγαλύτερους λόγους δύναμης/διαμέτρου προέκυψαν μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας HBW. Επίσης, κατά τη σύγκριση ίσων λόγων δύναμης/διαμέτρου μεγαλύτερες τιμές προέκυψαν όπου υπήρχε μεγαλύτερη δύναμη εφαρμογής και διάμετρος διεισδυτή. Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι το εύρος των δοκιμών για σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών κλιμάκων ήταν μικρό και περισσότερες δοκιμές θα βοηθούσαν να εξαχθούν πιο σίγουρα αποτελέσματα.

Κατά την σύγκριση των τριών διαφορετικών λόγων δύναμης εφαρμογής προς διάμετρο σφαίρας (10, 15, 30) προέκυψε ότι πιο κοντά στις πραγματικές εφελκυστικές αντοχές έδωσε αποτελέσματα ο λόγος 10, με μέσο όρο απόκλισης στις τιμές ίσο με 9 MPa και ποσοστό 1,8%. Στην συνέχεια, ακολούθησε ο λόγος 15 και, τέλος, λιγότερο ακριβή αποτελέσματα προέκυψαν με λόγο δύναμης/διάμετρο ίσο με 30.

Πίνακας 8-1: Απόκλιση τιμών HBW από εφελκυστικές αντοχές ανάλογα με τον λόγο F/D.

F/D	Απόκλιση Τιμών (MPa)	Ποσοστό Απόκλισης
10	9	1.8 %
15	11	2.2 %
30	27	5.2 %

8.3 Εκτίμηση μεθόδων με βάση την οριακή αντοχή

Σε αυτή την ενότητα θα πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μη καταστροφικών δοκιμών (Brinell, Leeb) σε σχέση με τις οριακές αντοχές (f_u), όπως προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμού.

Για τα δοκίμια που διαμορφώθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας συνοψίζονται τα αποτελέσματα στον Πίνακα 8-2. Υπενθυμίζονται τα δεδομένα των δοκιμών στο σκληρόμετρο πάγκου στον Πίνακα 8-3.

Πίνακας 8-2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών SUS, WUS, BUS.

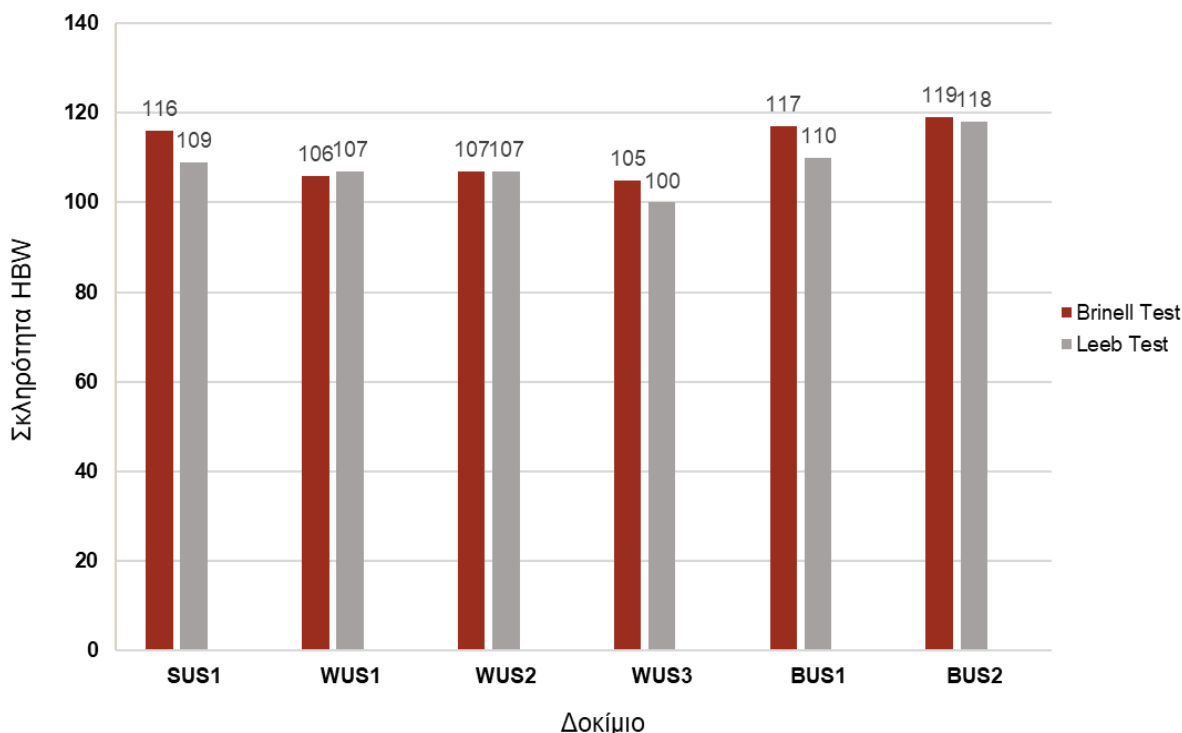
	SUS1	WUS1	WUS2	WUS3	BUS1	BUS2
BRINELL (HBW)	116 (390 MPa)	106 (357 MPa)	107 (361 MPa)	105 (351 MPa)	117 (393 MPa)	119 (402 MPa)
PORTABLE (HB) (↓)	109 (370 MPa)	107 (361 MPa)	107 (361 MPa)	100 (336 MPa)	110 (373 MPa)	118 (397 MPa)
ΔΟΚ. ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (MPa)	376	--	--	--	--	--

Πίνακας 8-3: Διάμετροι σφαίρας και δυνάμεις οι οποίες εφαρμόστηκαν κατά τις δοκιμές Brinell.

	SUS1	WUS1	WUS2	WUS3	BUS1	BUS2
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ (mm)	5	5	10	10	2,5	10
ΔΥΝΑΜΗ ΔΟΚΙΜΗΣ (kgf)	750	250	1000	3000	62,5	1500

Ο χάλυβας των δοκιμών SUS, WUS, BUS επιβεβαιώθηκε ότι ήταν κατηγορίας S235 ($f_u=360$ MPa). Παρατηρούμε ότι η μέθοδος Brinell αποκλείει από τα αποτελέσματα της μεθόδου Leeb όταν χρησιμοποιείται σφαίρα διαμέτρου 2.5, 5, 10 mm με δύναμη εφαρμογής 62.5, 750 και 3000 kgf αντίστοιχα. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις η δοκιμή πλησιάζει αρκετά τα αποτελέσματα της δυναμικής μεθόδου σκληρομέτρησης. Η μέθοδος με χρήση φορητού οργάνου τείνει να οδηγεί σε αποτελέσματα μικρότερων τιμών τελικής εφελκυστικής αντοχής σε σύγκριση με τις τιμές των δοκιμών εφελκυσμού αλλά και των δοκιμών στο σκληρόμετρο πάγκου. Ο μέσος όρος της διαφοράς μεταξύ των δύο μη καταστροφικών μεθόδων ισούται με 3 μονάδες HBW.

Brinell Test VS Leeb Test



Γράφημα 8-2: Συγκριτικά αποτελέσματα μη καταστροφικών δοκιμών.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δεύτερης σειράς δοκιμών. Στους Πίνακες 8-5 και 8-7 αναφέρονται τα δεδομένα των δοκιμών της μεθόδου Brinell. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 8-4 και 8-6 ξεκινούν στην πρώτη σειρά με διάμετρο σφαίρας 2.5 mm και να συνεχίζουν στις επόμενες με διαμέτρους 5 και 10 mm αντίστοιχα.

Πίνακας 8-4: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών T5DW-1L, T5DW-2P, T6B-1, T6W-1.

	T5DW-1L	T5DW-2P	T6B-1	T6W-1
BRINELL (HBW)	146 (491 MPa)	141 (474 MPa)	--	155 (521 MPa)
	144 (484 MPa)	146 (491 MPa)	--	153 (515 MPa)
	142 (480 MPa)	138 (466 MPa)	158 (533 MPa)	159 (537 MPa)
PORTABLE (HB) (↓)	98 (329 MPa)	102 (343 MPa)	124 (417 MPa)	121 (407 MPa)
PORTABLE (HBW) (↔)	102 (343 MPa)	106 (356 MPa)	126 (424 MPa)	117 (394 MPa)
ΔΟΚ. ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (MPa)	474	469	521	496

Πίνακας 8-5: Διάμετροι σφαιρας και δυνάμεις οι οποίες εφαρμόστηκαν κατά τις δοκιμές Brinell.

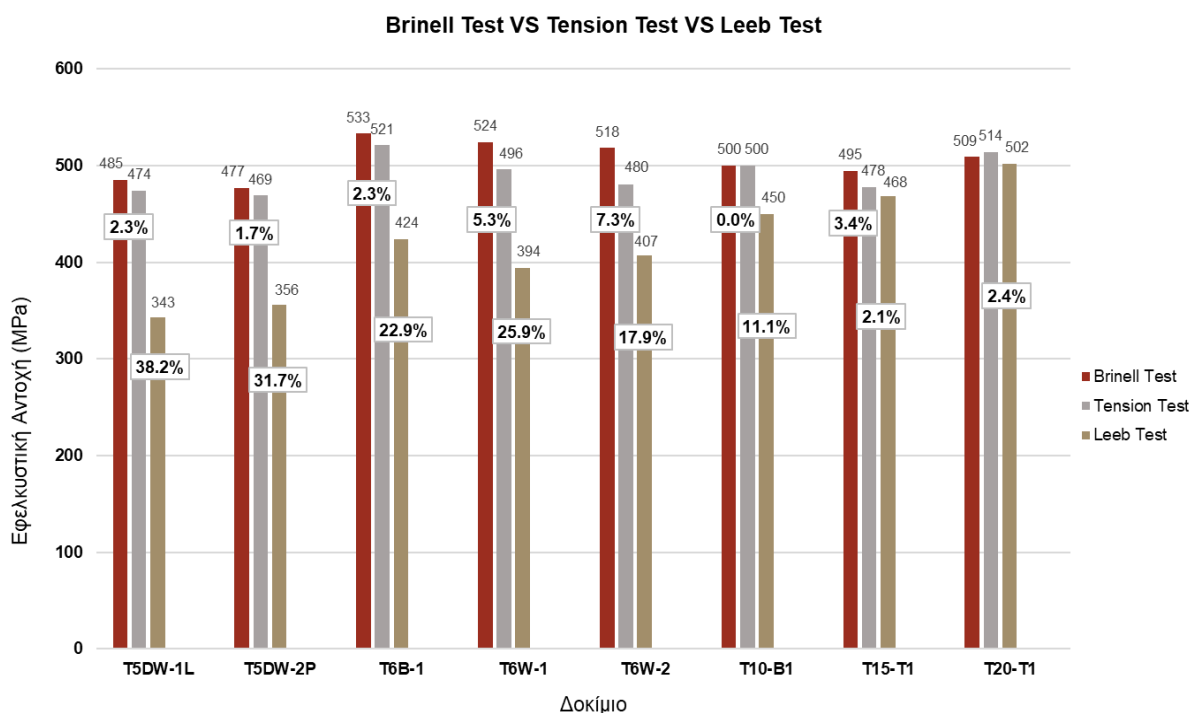
	T5DW-1L	T5DW-2P	T6B-1	T6W-1
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ (mm)	2.5, 5, 10	2.5, 5, 10	10	2.5, 5, 10
ΔΥΝΑΜΗ ΔΟΚΙΜΗΣ (kgf)	187.5, 250, 1500	62.5, 750, 1000	1000	187.5, 250, 3000

Πίνακας 8-6: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών T6W-2, T10-B1, T15-T1, T20-T1.

	T6W-2	T10-B1	T15-T1	T20-T1
BRINELL (HBW)	148 (500 MPa)	147 (496 MPa)	--	151 (509 MPa)
	164 (553 MPa)	148 (499 MPa)	146 (491 MPa)	--
	149 (502 MPa)	150 (505 MPa)	148 (498 MPa)	151 (509 MPa)
PORTABLE (HB) (↓)	116 (390 MPa)	130 (438 MPa)	138 (466 MPa)	148 (499 MPa)
PORTABLE (HBW) (↔)	121 (407 MPa)	133 (450 MPa)	139 (468 MPa)	149 (502 MPa)
ΔΟΚ. ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ (MPa)	480	500	478	514

Πίνακας 8-7: Διάμετροι σφαιρας και δυνάμεις οι οποίες εφαρμόστηκαν κατά τις δοκιμές Brinell.

	T6W-2	T10-B1	T15-T1	T20-T1
ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΣΦΑΙΡΑΣ (mm)	2.5, 5, 10	2.5, 5, 10	5, 10	2.5, 10
ΔΥΝΑΜΗ ΔΟΚΙΜΗΣ (kgf)	62.5, 750, 1500	62.5, 250, 1000	750, 3000	187.5, 1500



Γράφημα 8-3: Συγκριτικά αποτελέσματα εφελκυστικής δοκιμής, δοκιμής Brinell και δοκιμής Leeb.

Ο χάλυβας όλων των δοκιμών επιβεβαιώθηκε ότι ήταν κατηγορίας S275 ($f_u=430$ MPa), εκτός από τα δοκίμια T6B-1 και T20-T1 στα οποία προέκυψε χάλυβας κατηγορίας S355 ($f_u=510$ MPa).

Στο παραπάνω γράφημα (Γράφημα 8-3) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφελκυστικών δοκιμών (σε MPa) συγκριτικά με τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δοκιμές Brinell και τις δοκιμές Leeb για κάθε δοκίμιο. Η πρώτη στήλη απεικονίζει τα αποτελέσματα της δοκιμής Brinell, η δεύτερη της εφελκυστικής και η τρίτη της δοκιμής Leeb. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα ποσοστά απόκλισης των αποτελεσμάτων των μη καταστροφικών δοκιμών με τις πραγματικές τιμές.

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα της μεθόδου Brinell προσδίδουν μεγαλύτερες εφελκυστικές αντοχές στα δοκίμια σε σύγκριση με τις πραγματικές τιμές. Εξαιρέση αποτελούν τα δοκίμια T10-B και T20-T1 με σχεδόν ίδιες τιμές f_u μεταξύ των δύο δοκιμών. Ο μέσος όρος της διαφοράς μεταξύ των δύο μεθόδων ισούται με 14 MPa (ποσοστό απόκλισης 2,6%).

Τα αποτελέσματα της μεθόδου αναπηδήσεως με χρήση φορητού οργάνου απέκλιναν σε μεγάλο βαθμό από τις πραγματικές εφελκυστικές αντοχές, όπως, επίσης, και από τις τιμές που προέκυψαν στις δοκιμές με το σκληρόμετρο πάγκου. Ο μέσος όρος της διαφοράς μεταξύ της μεθόδου Leeb με κατακόρυφη θέση του οργάνου και της εφελκυστικής δοκιμής ισούται με 80 MPa, ενώ με οριζόντια θέση του οργάνου ισούται με 73 MPa (ποσοστό απόκλισης 15%). Ουσιαστικά, αποτελέσματα κοντά στις πραγματικές τιμές προέκυψαν μόνο σε ελάσματα πάχους από 15mm και πάνω.

Για την σύγκριση των τριών ποιοτήτων χάλυβα, αρχικά, δεν έχουμε μεγάλο δείγμα στην κατηγορία S235 λόγω των σφαλμάτων της συγκόλλησης. Έτσι, δεν είναι εφικτό να εξαγάγουμε κάποιο έγκυρο συμπέρασμα. Ωστόσο, από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τελική εφελκυστική αντοχή, σε συνδυασμό πάντα και με το πάχος του ελάσματος, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια διαθέτουν τα αποτελέσματα των στατικών δοκιμών σκληρότητας.

8.4 Εκτίμηση μεθόδων με βάση το πάχος των ελασμάτων

Με βάση τα αποτελέσματα των μη καταστροφικών και καταστροφικών δοκιμών, τα οποία αναλύθηκαν παραπάνω, προέκυψε το συμπέρασμα ότι το πάχος των ελασμάτων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια των σκληρομετρήσεων.

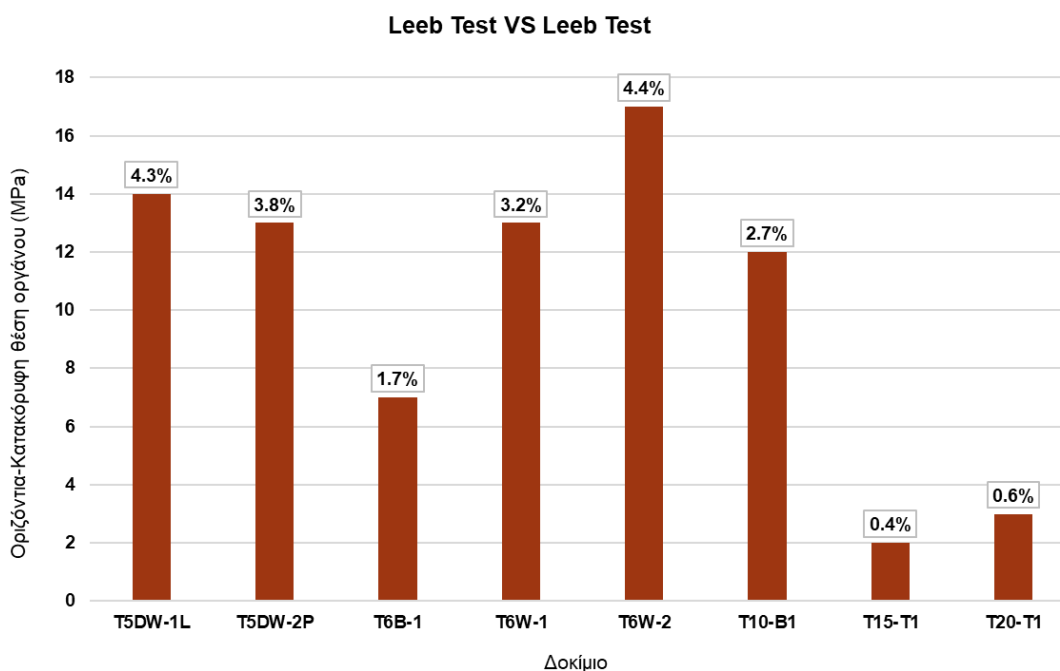
Σύμφωνα με τα κανονιστικά πρότυπα, όταν πραγματοποιούνται δοκιμές στο σκληρόμετρο πάγκου δεν πρέπει να δημιουργούνται ορατές παραμορφώσεις στην αντίθετη πλευρά από την εφαρμογή της δύναμης στα ελάσματα. Ωστόσο, αυτό συνέβη σε δοκίμια πάχους 5 mm, όταν η σφαίρα του διεισδυτή είχε διάμετρο 5 mm και η δύναμη εφαρμογής ήταν άνω των 250 kgf. Επιπλέον, όταν χρησιμοποιήθηκαν σφαίρες με διάμετρο 10 mm και με οποιαδήποτε δύναμη, εμφανίστηκαν και πάλι αποτυπώματα στα δοκίμια αυτού του πάχους. Η σφαίρα 2.5 mm δεν δημιούργησε κανένα πρόβλημα. Τέλος, στα δοκίμια με πάχος 6 mm εμφανίστηκε αποτύπωμα στην αντίθετη πλευρά όταν χρησιμοποιήθηκε σφαίρα διαμέτρου 10 mm και δύναμη εφαρμογής άνω των 1000 kgf.

Συνεπώς, ένα αρχικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι σε ελάσματα πάχους κάτω των 10 mm είναι ορθότερο να αποφεύγονται σφαίρες διεισδυτή με μεγάλη διάμετρο όταν πραγματοποιούνται δοκιμές στο σκληρόμετρο πάγκου. Σε περίπτωση χρήσης αυτής της διαμέτρου να εφαρμόζεται δύναμη 1000 kgf και όχι ανώτερη. Σε δοκίμια πάχους από 10 mm και πάνω δεν προέκυψε κανένας περιορισμός.

Επιπλέον, αξιόπιστα αποτελέσματα με την μέθοδο αναπηδήσεως προέκυψαν όταν το πάχος των δοκιμών ήταν από 15 mm και πάνω και στις δύο θέσεις του φορητού οργάνου.

8.5 Εκτίμηση μεθόδων με βάση τη γωνία εφαρμογής της μεθόδου

Κατά την σύγκριση των δυναμικών δοκιμών σκληρομέτρησης, στις οποίες τοποθετήθηκε το φορητό όργανο σε δύο διαφορετικές θέσεις (κατακόρυφη, οριζόντια), παρατηρήθηκε ότι όταν το όργανο είχε οριζόντια θέση οι τιμές σκληρότητας προέκυπταν μεγαλύτερες σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των δοκιμών με κατακόρυφη θέση του οργάνου. Στο επόμενο γράφημα παρουσιάζονται οι διαφορές στις τιμές που προέκυψαν μεταξύ των δύο διαφορετικών συνθηκών.



Γράφημα 8-4: Διαφορά αποτελεσμάτων δοκιμών Leeb με διαφορετική θέση οργάνου.

Όπως προαναφέρθηκε, σε μικρά πάχη ελασμάτων τα αποτελέσματα της μεθόδου Leeb απέκλιναν πολύ από τις πραγματικές τιμές και στις δύο θέσεις χρήσης του οργάνου. Πιο κοντά στην πραγματικότητα ήταν τα αποτελέσματα των δοκιμών στις οποίες το όργανο τοποθετούνταν οριζόντια. Ο μέσος όρος της διαφοράς των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο δοκιμών ισούται με 2 μονάδες HBW (περίπου 7 Mpa), και ποσοστό ίσο με 2,6%.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι επιτόπου στο έργο μπορεί να χρησιμοποιηθεί το φορητό όργανο σε οριζόντια θέση, η οποία τις περισσότερες φορές είναι πιο χρήσιμη, και να επιφέρει ακριβή αποτελέσματα με γνώμονα πάντα τον περιορισμό στο πάχος των ελασμάτων.

9 ΣΥΝΟΨΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιτυγχάνει το στόχο της ο οποίος είναι η παρουσίαση των βασικών μεθόδων σκληρομέτρησης χαλύβδινων μελών και η εμβάθυνση στα θετικά και αρνητικά στοιχεία κάθε μεθόδου. Επιπλέον, δίνεται έμφαση στις εναλλακτικές εφαρμογές οι οποίες μπορούν να συντελέσουν στην αειφορία και ανθεκτικότητα των μεταλλικών κατασκευών, καθώς ελέγχεται η ποιότητα του υλικού χωρίς να καταστρέφεται.

Οι δοκιμές και ο χαρακτηρισμός των υλικών εξασφαλίζουν την απαιτούμενη ασφάλεια, αξιοπιστία και οικονομική απόδοση. Οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι δοκιμών έχουν τη δυνατότητα εφαρμογής σε όλες τις φάσεις της κατασκευής και μπορούν να προσδιορίσουν πολλές ιδιότητες των υλικών, συμπεριλαμβανομένων των μηχανικών. Έτσι, καθίσταται εύκολο στους κατασκευαστές να εντοπίσουν και να επισκευάσουν ή να αντικαταστήσουν τα προβληματικά τμήματα πριν την ολοκλήρωση του έργου, καθώς και μετά τη χρήση του προϊόντος.

Στην επιστήμη των υλικών υπάρχει πληθώρα μη καταστροφικών μεθόδων ή τεχνικών για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα. Ωστόσο, αυτές οι ΜΚΕ δρουν, συνήθως, συμπληρωματικά, καθώς καμία μέθοδος από μόνη της δεν μπορεί να δώσει βέβαιες πληροφορίες για την κατάσταση όλου του δοκιμίου και η ακρίβειά τους είναι αμφιλεγόμενη.

Η σκληρότητα ορίζεται ως η αντίσταση ενός υλικού σε δειξοδυσή στην επιφάνειά του. Μια καθορισμένη τιμή λαμβάνεται μετά από δοκιμές ως η σκληρότητα του μετάλλου και αυτός ο αριθμός μπορεί να συσχετιστεί με την εφελκυστική αντοχή του. Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκαν πειραματικές εφαρμογές οι οποίες είχαν στόχο να παρουσιάσουν και να προσδιορίσουν την αβεβαιότητα που πρέπει να λάβει υπόψη του ο σχεδιαστής κατά την εφαρμογή στατικών ή δυναμικών μεθόδων σκληρομέτρησης.

Συνοψίζοντας, στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιτυγχάνονται:

- Η αναλυτική παρουσίαση των μη καταστροφικών και των καταστροφικών μεθόδων και τεχνικών οι οποίες χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της τελικής εφελκυστικής αντοχής των μεταλλικών υλικών.
- Η σύγκριση των μεθόδων ως προς τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα εφαρμογής τους.
- Η παράθεση αποτελεσμάτων πειραματικών δοκιμών για την σύγκριση των αποτελεσμάτων ως προς την ακρίβεια και την ευκολία διεξαγωγής κάθε μεθόδου.

Με τα παραπάνω ως αφετηρία, η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μπορεί να αποτελέσει βάση για τη συνέχιση της έρευνας σε άλλους ενδιαφέροντες τομείς της επιστήμης των υλικών οι οποίοι σχετίζονται με τις μη καταστροφικές δοκιμές. Επιπλέον, μπορεί να συμβάλει στην εξέλιξη και στην περαιτέρω επιστημονική αναζήτηση των ήδη υπάρχουσών μεθόδων και τεχνικών.

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Y. V. Milman, V. A. Goncharuk and L. V. Mordel, "Application of the Martel dynamic hardness to the penetration problem", UDC 620.015, 2012.
- [2] D. Leeb, "Dynamische Härteprüfung, in Härteprüfung an Metallen und Kunststoffen", 2nd Edition, Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1990.
- [3] S. Frank, C. Frehner and A. Akhlaghi, "Equotip Application Booklet: Portable Hardness Testing. Leeb, Portable Rockwell and UCI", Proceq SA, Switzerland, 2016.
- [4] Leeb test – Hardness know-how (emcotest.com)
- [5] S. Frank, J. Sommer and E. G. Nisbett, "Standardization of the Leeb Hardness Testing Method", UK.
- [6] What is Stress-strain Curve of Ductile Material - Definition | Material Properties (material-properties.org)
- [7] N. M. Μπάρκουλα και Α. Παϊπέτης, "Σύνθετα Υλικά: Χαρακτηρισμός και ιδιότητες", Σημειώσεις Εργαστηρίου, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων - Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Ελλάδα, 2020.
- [8] DIN EN ISO 6892-1:Tensile testing on metals | ZwickRoell
- [9] JCGM/WG 1, "Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement", JGGM 100, France, 2008.
- [10] I. M. Hutchings, "The contributions of David Tabor to the science of indentation hardness", J. Mater. Res., Vol. 24, No. 3, United Kingdom, 2009.
- [11] ISO 18265:2013, "Metallic materials – Conversion of hardness values".
- [12] K. Herrmann, "Hardness Testing: Principles and Applications", ASM International, USA, pp. 1-50, 2011.
- [13] What are Mechanical Properties of Steels - Definition | Material Properties (material-properties.org)
- [14] What is Hardness of Steels - Definition | Material Properties (material-properties.org)
- [15] A. Martens and E. Heyn, "Handbuch der Materialkunde für den Maschinenbau", Bd. 1,

- Verlag Julius Springer, Berlin, 1912.
- [16] M. Kompatscher, "Equotip-Rebound Hardness Testing After D. Leeb", HARDMEKO, USA, 2004.
- [17] Θ. Θεόδωρος και Σ. Κουσιδης, "Μη καταστροφικός έλεγχος", Παρουσίαση Διάλεξης, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Ελλάδα.
- [18] Σκοπός του MKE (teiath.gr)
- [19] Destructive testing - Special Piping Materials
- [20] D. Leeb, "Dynamic hardness testing of metallic materials", IPC Business Press, 1979.
- [21] Α. Ασημακόπουλος, "Σκληρομετρήσεις", Παρουσίαση Διάλεξης, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών, Ελλάδα.
- [22] A. Vasko, J. Sovik and M. Krynke, "Determination of Accuracy and Reliability of Portable Hardness Testers", Sciendo, Poland, 2019.
- [23] What Is Destructive Testing And How It Is Used In Practice (limblecmms.com)
- [24] Rockwell | ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ - organametrisis.gr
- [25] Brinell Hardness Test: Introduction, Procedure, Formula, Standards (PDF) – What Is Piping
- [26] Α. Ρούτουλας, "Έλεγχος Ποιότητας και Τεχνολογία Δομήσιμων Υλικών", Σημειώσεις Εργαστηριακού Μαθήματος, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Ελλάδα, 2012.
- [27] Ι. Κ. Βάγιας, Ι. Χ. Ερμόπουλος και Γ. Ι. Ιωαννίδης, "Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα με Παραδείγματα Εφαρμογής", Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, Ελλάδα, 2013.
- [28] J. Pelleg, "Mechanical Properties of Materials", Springer Dordrecht, Heidelberg, New York London, pp. 1-20, 2013.
- [29] D. R. Hess and H. W. Doty, "Brinell Hardness Testing Methods and Their Applicability", AFS Proceedings of the 124th Metalcasting Congress, Paper 2020-012, Michigan, 2020.
- [30] Δ. Αντωνίου, "Μέταλλα και μεταλλικά υλικά", Παρουσίαση Διάλεξης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Ελλάδα.
- [31] Σκληρότητα Μετάλλων | ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΟΥ - organametrisis.gr
- [32] e13396e8-a327-490a-a414-9bd1d2bc2bb8 (asminternational.org)
- [33] D. R. Hess and H. W. Doty, "Brinell Hardness Testing Methods and Their Applicability", AFS Proceedings of the 124th Metalcasting Congress, Paper 2020-012, USA, 2020.
- [34] ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΧΗΜΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ-new-corrected.doc (uoa.gr)