

ΔΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

Εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εκτίμηση αβεβαιότητας σκληρομέτρου Innovatest κατά τη μέτρηση σκληρότητας με τη μέθοδο HRC βάσει προτύπων

Σπουδαστής: Καφάσης Αλέξανδρος

Αριθμός μητρώου: 41147

Επιβλέπων: Παπαγεωργίου Δημήτρης

Υπεύθυνη Καθηγήτρια: Μέντρεα Κάρμεν

ΑΙΓΑΛΕΩ- ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2018

Περίληψη

Στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία υπολογίζεται η αβεβαιότητα κατά τη μέτρηση σκληρότητας με τη χρήση του σκληρομέτρου Innovatest 600A που διαθέτει το εργαστήριο Ελέγχου Ποιότητας και Τεχνολογίας Μεταλλικών Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών. Ο υπολογισμός βασίζεται στο πρότυπο ASTM E18–15, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. Σύμφωνα με αυτό, η αβεβαιότητα της μέτρησης, οφείλεται στα μετρολογικά χαρακτηριστικά του οργάνου (επαναληψιμότητα, αναπαραγωγισιμότητα, διακριτική ικανότητα), την ανομοιογένεια σκληρότητας του υλικού προς μέτρηση και την αβεβαιότητα στην τιμή σκληρότητας του προτύπου αναφοράς. Ο υπολογισμός της επαναληψιμότητας και αναπαραγωγισιμότητας του οργάνου γίνεται με δύο τρόπους, ο ένας με βάση μετρήσεις επί προτύπου δοκιμίου και ο άλλος με βάση μετρήσεις σκληρότητας υλικού παραγωγής, μέσω στατιστικού ελέγχου διεργασίας. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση των τιμών αβεβαιότητας, κατά τη μέτρηση σκληρότητας με το συγκεκριμένο σκληρόμετρο, που προέκυψαν με τους παραπάνω τρόπους, ώστε να αξιολογηθεί η αξιοπιστία τους.

Abstract

The uncertainty calculation of the Rockwell hardness measurement values is the main goal of the present thesis. The hardness tester used was an Innovatest type 600A, placed to the Quality Control and Technology of Metallic Materials Lab, in Department of Mechanical Engineering to Piraeus University of Applied Sciences, Piraeus, Greece. The calculation is based to ASTM E18–15 standard. According to that, the sources of uncertainty of the Rockwell hardness values to be discussed are machine's lack of repeatability, reproducibility and resolution of the hardness measurement display as well as of the uniformity of the material under test and the uncertainty in the certified value of the reference test block. The uncertainty of machine's repeatability and reproducibility is calculated by two different methods, based on hardness measurements implemented on reference blocks as well as on test samples acquired during statistical process control. Comparison of the uncertainty estimations will evaluate their reliability. Control charts will be presented as part of the analysis of the experiment's results.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....σελ: 2

Τυπολόγιο.....σελ: 4

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Ιστορική αναδρομή.....σελ: 5-7

Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών.....σελ: 8

Τεχνολογικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών.....σελ: 9-10

Μηχανικές δοκιμές μεταλλικών υλικών.....σελ: 10-14

Σκληρότητα.....σελ: 14

Δοκιμή σκληρότητας – μέθοδοι – έλεγχοι.....σελ: 14-16

Αβεβαιότητα μέτρησης.....σελ: 17-22

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Α Μέρος.....σελ: 23-36

Β Μέρος.....σελ: 37-50

ΣΧΟΛΙΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....σελ: 51

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....σελ: 52

Τυπολόγιο

$u_{Repeat} = STDEV(H_1, H_2, \dots H_n)$, αβεβαιότητα οφειλόμενη στην επαναληψιμότητα του οργάνου

$u_{Repeat} = \frac{u_{Repeat}}{\sqrt{n_T}}$, αβεβαιότητα επαναληψιμότητας προερχόμενη από τους μέσους όρους μετρήσεων επί προτύπων δοκιμίων

$u_{Rep\&NU} = \frac{STDEV(HT1, HT2, HT3)}{\sqrt{n_T}}$, αβεβαιότητα οφειλόμενη στη σκληρότητα του υλικού

$u_{resol} = \frac{r}{\sqrt{12}}$, αβεβαιότητα οφειλόμενη στην διακριτική ικανότητα r του οργάνου

$u_{mach} = \sqrt{u_{Rep\&NU(Ref.Block)}^2 + u_{resol}^2 + u_{Ref Blk}^2}$, αβεβαιότητα στη μέτρηση του σφάλματος επί προτύπου δοκιμίου

$u_{Reprod} = STDEV(M1, M2 \dots Mn)$, αβεβαιότητα οφειλόμενη στην αναπαραγωγιμότητα του οργάνου, όπου M είναι ο μέσος όρος των μετρήσεων επί προτύπου δοκιμίου λαμβανομένων μέσα σύντομο χρονικό διάστημα, από τον ίδιο μετρητή.

$u_{Meas} = \sqrt{u_{Repeat}^2 + u_{Reprod}^2 + u_{Resol}^2 + u_{Mach}^2}$, αβεβαιότητα κατά τη μέτρηση σκληρότητας

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Ιστορική αναδρομή

Είναι γνωστή η μεγάλη επίδραση που άσκησαν τα μέταλλα στη γενική εξέλιξη του ανθρώπου, καθώς και η σημασία τους για την οικονομική και κοινωνική πρόοδό του. Ο σημερινός πολιτισμός οφείλει πάρα πολλά στη χρήση των μετάλλων. Τα πρώτα μέταλλα, που χρησιμοποιήθηκαν περίπου πριν από 3500 χρόνια, ήταν ο χαλκός και κατόπιν ο σίδηρος. Με αυτά κατασκευάζονταν όπλα, νομίσματα, εργαλεία, οικιακά σκεύη και διάφορα διακοσμητικά στοιχεία. Η πρόοδος όμως στην αξιοποίηση των ιδιοτήτων των παραπάνω μετάλλων και των νέων που ανακαλύφθηκαν στο μεταξύ, ήταν βραδύτατη. Μόλις στις αρχές του 19ου αιώνα, χάρη στην εκμετάλλευση των δυνατοτήτων του ατμού και την κατασκευή ισχυρών μηχανών, άρχισε η πραγματική κυριαρχία των μετάλλων και των κραμάτων τους. Στη δομική μηχανική, η ευρεία χρησιμοποίηση των μετάλλων εφαρμόστηκε κάπως αργά. Μόνο όταν δημιουργήθηκε η ανάγκη κατασκευής μεγαλύτερων και συνθετότερων έργων, επιδιώχθηκε παρασκευή νέων υλικών με κατάλληλες ιδιότητες και χαμηλές τιμές. Μεταξύ αυτών τα μέταλλα και τα πλαστικά κατέλαβαν εξέχουσα θέση. Τα πρώτα μεταλλικά έργα κατασκευάστηκαν από χυτοσίδηρο και ήταν οδικές και σιδηροδρομικές γέφυρες, δοκοί και στύλοι για στέγες διαφόρων κτηρίων κ.ά. Οι προσπάθειες για την κατασκευή μεταλλικών γεφυρών άρχισαν το 1775 στη Γαλλία, αλλά εγκαταλείφθηκαν λόγω του υψηλού κόστους του υλικού. Η πρώτη γέφυρα από χυτοσίδηρο κατασκευάστηκε στην Αγγλία το 1779 με άνοιγμα 30,50m. και στις αρχές του 17ου αιώνα κατασκευάστηκαν, από χυτοσίδηρους δοκούς και στύλους, στέγες κτιρίων και τρούλοι εκκλησιών.

Με τις νέες μεθόδους που μπήκαν σε εφαρμογή και με τη δημιουργία των διαφόρων κραμάτων του σιδήρου, η ποιότητα του υλικού βελτιώθηκε σημαντικά. Χαρακτηριστικό έργο, εξ ολοκλήρου χαλύβδινο, είναι ο πύργος του Eiffel στο Παρίσι. (1887-89). Σήμερα κατασκευάζονται γέφυρες από χάλυβα υψηλής αντοχής με ανοίγματα που υπερβαίνουν τα 1200 m. Η κρεμαστή γέφυρα του Mackinac στις ΗΠΑ, που κατασκευάστηκε το 1957 έχει συνολικό μήκος 2595 m και μέγιστο ελεύθερο άνοιγμα 1158 m. Η γέφυρα του Αγ. Φραγκίσκου (Golden Gate) στις ΗΠΑ



Εικόνα 1. Γέφυρα του Αγ. Φραγκίσκου, ΗΠΑ.

επίσης κρεμαστή, που κατασκευάστηκε το 1937, έχει μέγιστο ελεύθερο άνοιγμα 1280m (Εικ 1). Επίσης κατασκευάζονται γέφυρες, κυρίως οδικές, από κράματα αλουμινίου. Η πρώτη οδική γέφυρα κατασκευάστηκε στο Κεμπέκ του Καναδά το 1950 και έχει μέγιστο ελεύθερο άνοιγμα 88,50 m. Ζυγίζει μόνο 181,20 τόνους. Η πρώτη σιδηροδρομική γέφυρα, ολόκληρη από αλουμίνιο, κατασκευάστηκε το 1946 πάνω στον ποταμό Grasse της Νέας Υόρκης. Το άνοιγμά της είναι 30,50 m και το βάρος μόλις φτάνει τους 24 τόνους. Μια αντίστοιχη σιδερένια γέφυρα θα ζύγιζε 58 τόνους. Επίσης χρήση του σιδήρου και του αλουμινίου γίνεται στην κατασκευή στεγών μεγάλων αιθουσών, υπόστεγων, και γενικά χώρων με μεγάλα ανοίγματα, οι οποίοι δεν είναι δυνατόν να καλυφτούν με άλλα υλικά σε χρήση. Κατασκευάζονται ακόμη πολυώροφα κτίρια, στα οποία τα κύρια υλικά είναι χάλυβας και γυαλί. Από μέταλλα κατασκευάζονται επίσης δομικά στοιχεία, τα οποία καλύπτουν διάφορες ανάγκες των κτιρίων και άλλων τεχνικών έργων. Κατασκευάζονται παράθυρα και πόρτες από σίδηρο και αλουμίνιο, σωλήνες από σίδηρο, αλουμίνιο, χαλκό και μόλυβδο, σύρματα μεταφοράς ενέργειας, από χαλκό και αλουμίνιο, σύρματα και συρματοσχοίνα πρόσδεσης από χάλυβα και πλήθος άλλα δευτερεύοντα δομικά υλικά. Τέλος η χρήση του χάλυβα, σε συνεργασία με το σκυρόδεμα, έδωσε τεράστια ώθηση στην κατασκευή τεχνικών έργων από οπλισμένο και προεντεταμένο σκυρόδεμα .

Δομικά Μέταλλα. Τα χρησιμοποιούμενα για την παρασκευή δομικών υλικών μέταλλα είναι κατ' αρχήν ο σίδηρος, το αλουμίνιο, ο χαλκός, ο ψευδάργυρος και ο μόλυβδος και κατά δεύτερο λόγο το νικέλιο, το χρώμιο, ο κασσίτερος και το βολφράμιο. Τα τελευταία χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες, για την κατασκευή κραμάτων με τα κύρια μέταλλα. Τα μέταλλα σπάνια χρησιμοποιούνται αμιγή και απαλλαγμένα από άλλες προσμίξεις. Αναμιγνύονται συνήθως με άλλα μέταλλα ή αμέταλλα στοιχεία, και έτσι δημιουργούνται τα κράματα. Σε αυτά ακριβώς τα κράματα, που εμφανίζουν ιδιότητες πολύ ανώτερες από τα απλά μέταλλα, οφείλονται οι μεγάλες πρόοδοι στις μεταλλικές κατασκευές. Τα κυριότερα κράματα, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των δομικών μεταλλικών υλικών, είναι:

- Ο χυτοσίδηρος και ο χάλυβας (κράματα σιδήρου-άνθρακα),
- Ο νικελιούχος και ο χρωμιούχος χάλυβας (κράματα σιδήρου με χρώμιο ή/και νικέλιο),
- Τα κράματα του αλουμινίου,
- Ο μπρούντζος (κράμα χαλκού-κασσιτέρου),
- Ο ορείχαλκος (κράμα χαλκού-ψευδαργύρου).

Τα κύρια χαρακτηριστικά των μετάλλων και των κραμάτων είναι:

- Η μεγάλη μηχανική αντοχή που παρουσιάζουν σε οποιοδήποτε είδος καταπόνησης (εφελκυσμό, θλίψη, κάμψη, διάτμηση, στρέψη κ.ά.),

- Η ελαστικότητα, που εμφανίζουν μέσα σε ευρεία περιοχή φόρτισης, η οποία τους επιτρέπει να μην υφίστανται μόνιμες παραμορφώσεις,
- Η καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα,
- Το όλκιμο, η ικανότητά τους να μετατρέπονται με έλξη σε σύρμα, • Το ελατό, η ικανότητά τους να μετατρέπονται με έλαση ή σφυρηλάτηση σε ελάσματα και λεπτότατα φύλλα,
- Το εύτηκτο, η ικανότητά τους να λιώνουν κάτω από τη δράση υψηλών θερμοκρασιών και να επανέρχονται στη στερεά κατάσταση μετά την πτώση της θερμοκρασίας, χωρίς καμιά μεταβολή των χαρακτηριστικών τους,
- Το συγκολλητό, η ικανότητα δύο κομματιών του ίδιου μετάλλου ή κράματος να συνενώνονται σε ένα ομοιογενές σώμα, με τα κτυπήματα σφυριού κάτω από ορισμένη για κάθε μέταλλο ή κράμα θερμοκρασία,
- Η εμβαπτότητα, η ικανότητα αύξησης της επιφανειακής σκληρότητας και αντοχής τους, όταν θερμανθούν και στη συνέχεια ψυχθούν απότομα. Τα χαρακτηριστικά αυτά δεν εμφανίζονται σε όλα τα μέταλλα και κράματα με τον ίδιο βαθμό. Πολλές φορές οι διαφορές είναι μεγάλες και η επιλογή του καταλληλότερου υλικού για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή γίνεται με βάση το βαθμό εκδήλωσης των ιδιοτήτων του (χαρακτηριστικών) και τις απαιτήσεις του έργου, για το οποίο προορίζεται το υλικό.
Ιδιότητες των μετάλλων

Οι ιδιότητες των μετάλλων διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- Φυσικές και χημικές. Αφορούν το ειδικό βάρος, τις θερμοκρασίες τήξης, την ευχέρεια χημικής ένωσής τους με άλλα στοιχεία, την ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητά τους.
- Μηχανικές. Αφορούν τη συμπεριφορά τους, στην επιρροή των πάσης φύσης εξωτερικών δυνάμεων.
- Τεχνολογικές. Αφορούν τη συμπεριφορά τους στις διάφορες μηχανικές και θερμικές κατεργασίες.

Μηχανικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών

1. Σκληρότητα.

Λέγεται η αντίσταση που προβάλλει η επιφάνεια ενός στερεού σώματος στη χάραξη του από άλλο σώμα. Τα μέταλλα κατατάσσονται, από άποψη σκληρότητας, μεταξύ των ορυκτών αυτών και συγκεκριμένα μεταξύ εκείνου, το οποίο χαράσσουν και εκείνου από το οποίο χαράσσονται.

2. Μηχανική Αντοχή

Με τον όρο αυτό καθορίζεται, η ικανότητα των στερεών σωμάτων να αντιστέκονται στις εξωτερικές δυνάμεις που τείνουν να τα παραμορφώσουν και να τα σπάσουν. Το μέτρο της αντοχής προσδιορίζεται από την τιμή που παίρνουν οι τάσεις (εσωτερικές δυνάμεις) κατά τη στιγμή της θραύσης του σώματος και συμβολίζεται με $\sigma_{αν}$ (τάση αντοχής) ή $\sigma_{θρ}$ (τάση θραύσης). Τα μέταλλα γενικά παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε όλα τα είδη των καταπονήσεων (εφελκυσμός, θλίψη, κάμψη, διάτμηση, στρέψη).

Από όλα όμως τα είδη των αντοχών η πιο ενδιαφέρουσα για τις μεταλλικές κατασκευές είναι η αντοχή στον εφελκυσμό, η οποία προσδιορίζει την ποιότητα του υλικού και την καταλληλότητά του για κάθε συγκεκριμένο έργο, όπως η αντοχή σε θλίψη (πίεση) αποτελεί κριτήριο της ποιότητας των φυσικών και τεχνητών λίθων και των σκυροδεμάτων.

3. Ελαστικότητα και πλαστικότητα.

Από τις σπουδαιότερες ιδιότητες των μεταλλικών υλικών είναι η ελαστικότητα και η πλαστικότητά τους, δηλαδή ο τρόπος που παραμορφώνονται κατά τη διάρκεια της φόρτισής τους από εξωτερικές δυνάμεις.

4. Το εύθραυστο (αντοχή στην κρούση)

Τα μέταλλα γενικά παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή στις κρούσεις. Όταν όμως πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε δομικές κατασκευές, τότε η ιδιότητά τους αυτή δεν εξετάζεται γιατί οι κατασκευές αυτές σπάνια και μόνο σε ειδικές περιπτώσεις (π.χ. σιδηροδρομικές γέφυρες) υφίστανται κρουστικές δυνάμεις. Αντίθετα, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε μηχανολογικές κατασκευές, ο έλεγχος της αντοχής τους σε κρούση πρέπει να είναι προσεκτικός.

5. Αντοχή σε δυναμικές φορτίσεις (αντοχή σε κόπωση)

Τα μέταλλα γενικά παρουσιάζουν υψηλή αντοχή στις δυναμικές φορτίσεις. Ο έλεγχος της αντοχής τους σε κόπωση γίνεται με ειδικές μηχανές, όπου το δοκίμιο υφίσταται την επίδραση δυνάμεων εναλλασσόμενης φοράς.

Τεχνολογικές ιδιότητες μεταλλικών υλικών

1. Διαμορφωσιμότητα

Έτσι λέγεται η ικανότητα ενός μετάλλου να αλλάζει σχήμα και μορφή κάτω από την ενέργεια εξωτερικών δυνάμεων, χωρίς να επηρεάζονται οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητές του και χωρίς να υφίσταται ρήγματα ή θραύση. Είναι δηλαδή ιδιότητα ανάλογη προς την πλαστικότητα του αργίλου. Η αλλαγή του σχήματος μπορεί να επιτευχθεί «εν ψυχρώ» ή «εν θερμώ». Ανάλογα δηλαδή με την περίπτωση, το υλικό μπορεί να πάρει τη νέα μορφή είτε όταν βρίσκεται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, είτε στη θερμοκρασία της ερυθροπυρώσεως. Χάρη στην ικανότητα αυτή ένα μεταλλικό τεμάχιο (κομμάτι) είναι δυνατό να υποστεί τις παρακάτω κατεργασίες:

- Έλαση, ψυχρή ή θερμή. Με την κατεργασία αυτή μετατρέπεται σε λεπτά φύλλα (λαμαρίνες), ράβδους κανονικής διατομής, ράβδους τυποποιημένης διατομής (γωνιακά, ταφ, κλπ.), σωλήνες (τραβηχτοί σωλήνες), καθώς και σε άλλα υλικά ποικίλης μορφής.
- Εξέλαση. Με αυτή μετατρέπονται λεπτά επίπεδα φύλλα σε κοίλα ή κυρτά αντικείμενα διαφόρων μορφών (τμήματα αμαξωμάτων, περιβλήματα συσκευών και μηχανών κ.ά.).
- Εξέλιξη. Με αυτή είναι δυνατό να παραχθούν ελάσματα τυποποιημένης μορφής με διέλευση του υλικού μέσω ειδικών τύπων (καλουπιών).
- Σφυρηλάτηση, «εν ψυχρώ» ή «εν θερμώ». Με αυτή με τη βοήθεια σφυριών ή πρεσών το υλικό μπορεί να λάβει διάφορες μορφές.
- Τύπωση, «εν θερμώ» ή «εν ψυχρώ». Με αυτή αποτυπώνονται πάνω στο υλικό με πίεση μέσα σε ειδικά καλούπια διάφορα σχήματα. Τα μέταλλα παρουσιάζουν διαφορετικό βαθμό ελατότητας. Το περισσότερο ελατό μέταλλο είναι ο χρυσός, που μπορεί να μετατραπεί σε φύλλα πάχους $1 \mu\text{m}$ [$1 \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$].

2. Ολκιμότητα

Τα μέταλλα έχουν την ικανότητα να παίρνουν τη μορφή σύρματος, εάν υποστούν εφελκυστικές δυνάμεις μέσω κατάλληλης συσκευής, γνωστής με το όνομα συρματοσύρτης. Η ικανότητα αυτή λέγεται ολκιμότητα και ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό στα διάφορα μέταλλα. Το περισσότερο όλκιμο μέταλλο είναι ο χρυσός. Από ένα γραμμάριο χρυσού είναι δυνατό να κατασκευαστεί συνεχές σύρμα μήκους 3000m. Ακολουθούν δομικά μέταλλα με πολύ μικρότερη ολκιμότητα: Αλουμίνιο, Νικέλιο, Σίδηρος, Χαλκός, Ψευδάργυρος Κασσίτερος, Μόλυβδος. Ο έλεγχος της ολκιμότητας γίνεται με μέτρηση του μήκους του σύρματος που είναι δυνατό να κατασκευαστεί από ένα κυλινδρικό δοκίμιο ορισμένου βάρους του συγκεκριμένου μετάλλου.

3. Ευχυτότητα

Είναι η ικανότητα των μετάλλων να παίρνουν οποιοδήποτε σχήμα, εάν μετά την τήξη τους χυθούν μέσα σε κατάλληλα καλούπια. Η εργασία αυτή λέγεται χύτευση και τα αντικείμενα που προκύπτουν ονομάζονται χυτά ή χυτευθέντα αντικείμενα και διατηρούν γενικά τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου. Πρακτικά όμως τα χυτά ορισμένων μετάλλων δεν είναι κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν, γιατί είναι πορώδη και με μικρή αντοχή. Αυτό οφείλεται στη φύση των μετάλλων και στο παχύρρευστο ή μη του τήγματος και όχι στο σημείο τήξης τους. Έτσι π.χ. ενώ ο χαλκός έχει σημείο τήξης σχετικά χαμηλό (1084°C), σε σύγκριση με το σημείο τήξης του χυτοσίδηρου (1260°C περίπου) και του χάλυβα (1450° C περίπου), τα χυτά αντικείμενα που προέρχονται από αυτόν είναι πορώδη και ασθενή και δεν αποτυπώνουν πλήρως τις λεπτομέρειες της μήτρας. Αντίθετα τα χυτά από χυτοσίδηρο και χάλυβα προκύπτουν συμπαγή, ανθεκτικά και ανταποκρίνονται πλήρως προς τη γεωμετρία των μήτρων.

4. Συγκολλητότητα

Λέγεται η ιδιότητα, την οποία έχουν δύο κομμάτια του ίδιου μεταλλικού υλικού να συγκολλούνται μεταξύ τους και να αποτελούν ενιαίο σύνολο, χωρίς να παρουσιάζεται στη διατομή συγκόλλησης ελάττωση των φυσικών ή μηχανικών ιδιοτήτων τους. Για να πραγματοποιηθεί η συγκόλληση αυτή, ανυψώνεται η θερμοκρασία των τεμαχίων μέχρι ορισμένο βαθμό που εξαρτάται από το είδος του μετάλλου. Κατόπιν τα άκρα των κομματιών που πρόκειται να συγκολληθούν τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και σφυρηλατούνται ισχυρά. Με άλλο τρόπο λιώνουν τα άκρα των κομματιών με τη βοήθεια φλόγας ή ηλεκτρικού τόξου, οπότε, μετά τη στερεοποίηση του λιωμένου υλικού, επέρχεται πλήρης συνένωση των κομματιών (αυτογενής συγκόλληση). Ο βαθμός του συγκολλητού ενός μετάλλου προσδιορίζεται από την αντοχή σε εφελκυσμό, που παρουσιάζει η περιοχή της ένωσης. Χάρη στην ιδιότητα αυτή και την ανάπτυξη, που πήρε κατά τη διάρκεια του Β' παγκοσμίου πολέμου η αυτογενής συγκόλληση, οι μεταλλικές κατασκευές αναπτύχθηκαν πολύ.[1]

Μηχανικές δοκιμές μεταλλικών υλικών

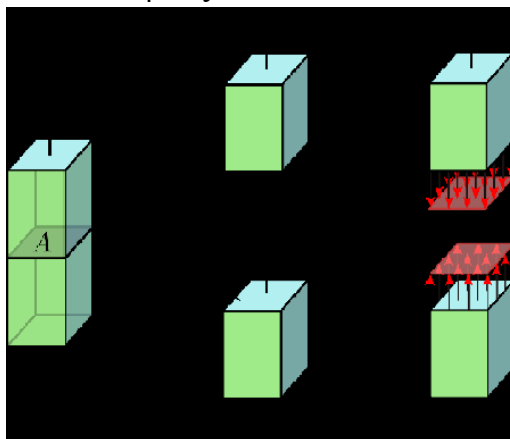
Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών είναι πολύ σημαντική, τόσο για την απευθείας χρήση τους σε μηχανολογικές κατασκευές, όσο και για την επιλογή του τρόπου διαμόρφωσής τους σε συγκεκριμένη γεωμετρία. Οι μηχανικές δοκιμές ή δοκιμασίες των υλικών έχουν ως σκοπό τον έλεγχο των μηχανικών τους ιδιοτήτων και χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες :

(α) στις καταστρεπτικές μεθόδους (άμεσες μέθοδοι), στις οποίες απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου και

(β) στις μη καταστρεπτικές μεθόδους (έμμεσες μέθοδοι), στις οποίες δεν απαιτείται καταστροφή του δοκιμίου.

Στην κατηγορία των δοκιμών με καταστροφή του δοκιμίου ανήκουν βασικά οι μηχανικές δοκιμές, που έχουν ως αντικειμενικό στόχο τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Τέτοιες δοκιμές είναι οι ακόλουθες [2]:

(α) δοκιμή εφελκυσμού και θλίψεως



Εικόνα 2. Σχηματική παράσταση δοκιμής εφελκυσμού ή θλίψεως.

Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η συνηθέστερη μηχανική δοκιμή. Συνίσταται στην υποβολή δοκιμίου, του προς χαρακτηρισμό υλικού, σε εφελκυστική καταπόνηση κατά τη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση Δl .

Εφελκυσμός ονομάζεται η εντατική κατάσταση κατά την οποία σε ένα σώμα ασκούνται δυνάμεις αντίθετης φοράς που τείνουν να το επιμηκύνουν. Ο εφελκυσμός είναι μία από τις δύο μονοαξονικές εντατικές καταστάσεις ενός παραμορφώσιμου στερεού σώματος. Η άλλη μονοαξονική εντατική κατάσταση είναι η θλίψη.

Η ισορροπία δυνάμεων είναι μηδεν: $\Sigma f = 0$

Θεωρώντας νοητή τομή σε κάποια θέση από την ισορροπία δυνάμεων μπορούμε να υπολογίσουμε τις εφελκυστικές (ορθές) τάσεις στη διατομή (Εικ.2).

Θλίψη ονομάζεται η εντατική κατάσταση κατά την οποία σε ένα σώμα ασκούνται δυνάμεις αντίθετης φοράς που τείνουν να το συμπίεσουν.

Η ισορροπία δυνάμεων είναι μηδέν: $\Sigma f = 0$

Θεωρώντας νοητή τομή σε κάποια θέση από την ισορροπία δυνάμεων μπορούμε να υπολογίσουμε τις θλιπτικές (ορθές) τάσεις στη διατομή [4,5].

(β)δοκιμή σκληρότητας



Εικόνα 3. Δοκιμή σκληρότητας

Με τον όρο «σκληρότητα» ορίζεται η αντίσταση που προβάλλει ένα σώμα στην προσπάθεια διείσδυσης κάποιου άλλου σκληρότερου διεισδυτή υπό φορτίο. Γενικά, μία δοκιμή σκληρομέτρησης εκτελείται όταν ένας διειδυτής προκαθορισμένης γεωμετρίας και γνωστών μηχανικών ιδιοτήτων πιέζει το δοκίμιο που εξετάζεται. Η σκληρότητα του υπό δοκιμή υλικού καθορίζεται μέσω μιας βαθμονομημένης κλίμακας σκληρότητας, η οποία προκύπτει από δοκιμές σε πρότυπα υλικά. Η δοκιμή σκληρότητας αποτελεί μια πολύ αποτελεσματική μέθοδο χαρακτηρισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, καθώς:

- Είναι μια πολύ απλή μέθοδος, επομένως δεν χρειάζεται εξειδικευμένες γνώσεις
- Δεν απαιτεί ειδικής μορφής δοκίμια ή δύσκολη προετοιμασία
- Ο εξοπλισμός της δοκιμής είναι πολύ φθηνός
- Είναι πολύ γρήγορη μέθοδος
- Έχει πολύ καλή ακρίβεια και επαναληψιμότητα
- Είναι μη καταστρεπτική μέθοδος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον έλεγχο ποιότητας τεμαχίων παραγωγής.

(γ) δοκιμή κρούσης

(δ) δοκιμή κόπωσης



Εικόνα 4. Μηχανή δοκιμής σε κόπωση

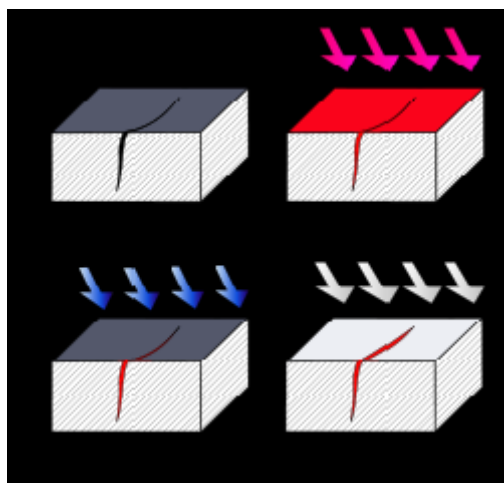
(ε) δοκιμή ερπυσμού

Στις μη καταστρεπτικές μεθόδους διαπιστώνεται αν το εξεταζόμενο τεμάχιο, όπως π.χ. ένα χυτό αντικείμενο ή η ραφή κάποιας συγκόλλησης άξονα ή δοχείου, περιέχει ρωγμές ή πόρους, που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, χωρίς όμως να καταστραφεί το εν λόγω τεμάχιο. Τέτοιες μέθοδοι είναι :

(α) Υδροστατικές μέθοδοι ελέγχου μεταλλικών δοχείων, λεβήτων, κλπ.

(β) Μαγνητικές δοκιμές ελέγχου ρωγμών μαγνητικών υλικών (π.χ. κοινοί χάλυβες, κράματα Fe-Ni, κ.λπ).

(γ) Δοκιμές με διεισδυτικά υγρά για τον εντοπισμό ρωγμών κυρίως σε μη μαγνητικά υλικά (π.χ. κράματα αλουμινίου, ανοξείδωτοι ωστενιτικοί χάλυβες, κ.λπ).



Εικόνα 5. Δοκιμή με διεισδυτικά υγρά.

(δ) Έλεγχος δομικών ατελειών (π.χ. μάκρο- και μικροπορώδες σε χυτά αντικείμενα) με υπερήχους, ραδιογραφία (ακτίνες γ), ακτινανάλυση (ακτίνες X).

Σκληρότητα

Σκληρότητα ενός υλικού είναι η αντίσταση που εμφανίζει το υλικό στη διείσδυση ενός ξένου σώματος που πιέζεται στην επιφάνεια του υλικού με κάποια συγκεκριμένη δύναμη και για ορισμένη χρονική διάρκεια. Θα μπορούσε μαθηματικά η σκληρότητα να εκφραστεί ως εξής: $H = P/A$ όπου P: η εφαρμοζόμενη δύναμη και A: η επιφάνεια του αποτυπώματος. Το σώμα αυτό που επιχειρεί να διεισδύσει στο προς εξέταση υλικό ονομάζεται διεισδυτής ή εντυπωτής. Η αρχή λειτουργίας των περισσότερων δοκιμών σκληρότητας βασίζεται στη μέτρηση των διαστάσεων του αποτυπώματος, που δημιουργεί ο διεισδυτής στο υλικό. Αν το αποτύπωμα αυτό είναι μικρό, σημαίνει ότι το υλικό αντιστέκεται στη διείσδυση και επομένως είναι σκληρό, ενώ αν το αποτύπωμα είναι μεγαλύτερο, το υλικό αντιστέκεται λιγότερο και επομένως είναι λιγότερο σκληρό. Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι σκληρομετρήσεως, η Brinell, η Rockwell και η Vickers.

Δοκιμή σκληρότητας – μέθοδοι - έλεγχοι

Η δοκιμή Brinell



Εικόνα 6. Σκληρόμετρο μέτρησης με τη μέθοδο Brinell.

Κατά τη δοκιμή αυτή, ο διεισδυτής είναι σφαίρα από σκληρυμένο χάλυβα ή από καρβίδιο, με αποτέλεσμα να δημιουργεί σφαιρικό αποτύπωμα στο υλικό. Η εφαρμοζόμενη δύναμη αλλά και η διάμετρος της σφαίρας ποικίλλουν. Η τυποποιημένη μέθοδος Brinell χρησιμοποιεί σφαίρα διαμέτρου 10 mm, φορτίο 3000 kp και διάρκεια 30 sec. Η σκληρότητα κατά Brinell δίδεται από τον τύπο:

$HB = \frac{2P}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$ όπου P : η εφαρμοζόμενη δύναμη σε kp, D: η διάμετρος του διεισδυτή σε mm και d: η διάμετρος του αποτυπώματος σε mm Αν αντικατασταθούν τα εκάστοτε μεγέθη με τις σωστές μονάδες, το αριθμητικό αποτέλεσμα που προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση έχει μονάδες $\frac{kp}{mm^2}$ ή απλώς HB. Η δοκιμή Brinell εφαρμόζεται ευρέως σε μαλακά κυρίως υλικά με μεγάλη μεταλλουργική ανομοιογένεια.

Η δοκιμή Rockwell



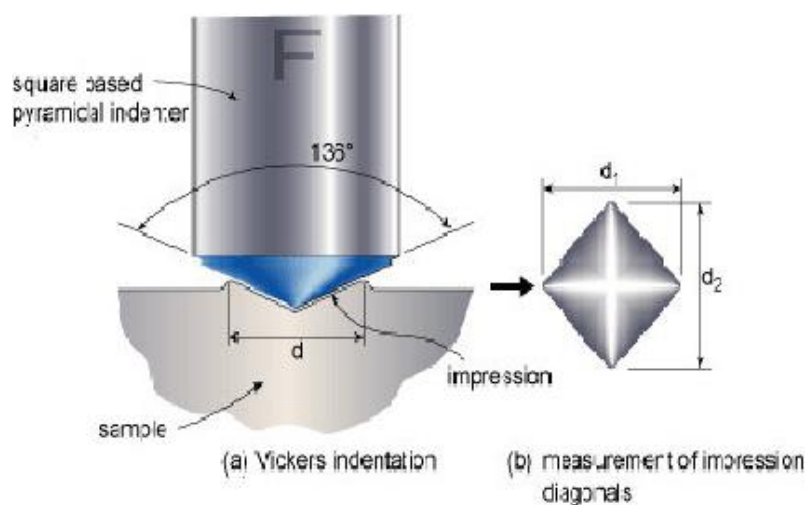
Εικόνα 7. Σκληρόμετρο μέτρησης με τη μέθοδο Rockwell.

Η δοκιμή αυτή βασίζεται στη μέτρηση του βάθους του αποτυπώματος (και όχι της διαμέτρου), που προκαλεί ο διεισδυτής κατά τη διάρκεια δύο φάσεων: (α) της προφορτίσεως, που χρησιμοποιείται μικρή δύναμη (10 kp) και (β) της φορτίσεως που χρησιμοποιείται μεγαλύτερη δύναμη, η οποία είναι καθορισμένη (100 ή 150 kp). Σύμφωνα, τώρα, με το είδος του διεισδυτή και επιβαλλόμενων φορτίων και συνεπώς με τον τύπο του δοκιμαζόμενου υλικού, υπάρχουν δυο κυρίως ευρύτατα χρησιμοποιούμενοι μέθοδοι σκληρομέτρησης κατά Rockwell:

- Rockwell C: Χρησιμοποιείται ως διεισδυτής κώνος από διαμάντι, γωνίας 120° και άκρης με ακτίνα καμπυλότητας 0.2 mm. Κατά τη διάρκεια της προφορτίσεως, η εφαρμοζόμενη δύναμη είναι ίση με 10 kp και κατά τη διάρκεια της φορτίσεως είναι ίση με 150 kp. Η κλίμακα της σκληρότητας εκτείνεται από 20 έως 70 HRC (HRC: μονάδα σκληρότητας κατά Rockwell C). Πρέπει να σημειωθεί ότι η δοκιμή σκληρότητας κατά Rockwell C εφαρμόζεται ευρύτατα στην περίπτωση θερμικά κατεργασμένων χαλύβων και γενικότερα μετάλλων και κραμάτων μετά από κατεργασίες σκληρύνσεως (π.χ. βαμμένοι χάλυβες, επιφανειακά κατεργασμένοι χάλυβες, κράματα αλουμινίου μετά από γήρανση (ντουραλουμίνιο), κ.λπ.).

- Rockwell B: Χρησιμοποιείται ως διεισδυτής σφαίρα από σκληρυμένο χάλυβα, διαμέτρου 1/16 in. (περίπου 1,59 mm). Η δύναμη προφορτίσεως είναι ίση με 10 kp και της φόρτισης είναι ίση με 100 kp. Η κλίμακα της ξεκινά από 35 HRB και φθάνει στα 100 HRB. Τα υλικά που μπορούν να σκληρομετρηθούν είναι κοινοί χάλυβες, ακατέργαστοι κραματούμενοι χάλυβες, κράματα χαλκού, κράματα αλουμινίου και γενικά υλικά που δεν έχουν υποστεί κατεργασίες σκληρύνσεως.

Η δοκιμή Vickers



Εικόνα 8. Διαδικασία σκληρομέτρησης κατά Vickers.

Η δοκιμή σκληρότητας κατά Vickers χρησιμοποιεί ως διεισδυτή πυραμίδα διαμαντιού, ανοίγματος 136° . Τα φορτία που εφαρμόζονται ξεκινούν από μερικά p και φθάνουν μέχρι κάποιες εκατοντάδες kp. Με τη διείσδυση της πυραμίδας, μέσα στο υλικό, δημιουργείται ένα τετραγωνικό αποτύπωμα στην ιδανικότερη περίπτωση. Στην πραγματικότητα, το αποτύπωμα που δημιουργείται είναι σχήματος ρόμβου και οφείλεται στη μικροσκοπική ανισοτροπία του υλικού. Η τιμή της σκληρότητας δίδεται μαθηματικά από τον τύπο: $HV = 1,854 P/d^2$ όπου, P : η εφαρμοζόμενη δύναμη σε Kp και d: ο μέσος όρος των διαγωνίων ($= (d_1 + d_2) / 2$) του αποτυπώματος σε (mm). Το αριθμητικό αποτέλεσμα έχει μονάδες $\frac{kp}{mm^2}$ ή απλώς HV (HV : μονάδα σκληρότητας κατά Vickers). Η δοκιμή σκληρότητας κατά Vickers χρησιμοποιείται για ένα μεγάλο εύρος υλικών (σκληρών και μαλακών) λόγω της ποικιλίας φορτίων που χρησιμοποιεί. Επίσης, λόγω του ρηγού αποτυπώματος που δημιουργεί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί άνετα και στη σκληρομέτρηση πολύ λεπτών ελασμάτων (λαμαρίνες, φύλλα αλουμινίου). Η δυνατότητα χρήσης πολύ μικρών φορτίων (μάζας μερικών μόλις γραμμαρίων) κάνει τη μέθοδο Vickers κατάλληλη για μικροσκληρομέτρηση υλικών, η οποία είναι πολύ βασική για τη μελέτη της κατανομής της σκληρότητας, αλλά και για τη μέτρηση της σκληρότητας των διαφόρων φάσεων και συστατικών, που εμπεριέχονται μέσα στο υλικό. Οι διαστάσεις των μικροαποτυπωμάτων μετρούνται στο οπτικό μικροσκόπιο.[6]

Αβεβαιότητα μέτρησης

Η ακρίβεια κάθε μέτρησης περιορίζεται από διάφορους παράγοντες όπως οι ατέλειες και η πεπερασμένη ικανότητα των οργάνων μέτρησης, η πεπερασμένη ικανότητα του πειραματιστή και οι απρόβλεπτες μεταβολές των συνθηκών μέτρησης. Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης είναι μόνο μια προσέγγιση ή εκτίμηση της τιμής της φυσικής ποσότητας που υπόκειται σε μέτρηση. Το αποτέλεσμα είναι πλήρες μόνο όταν συνοδεύεται από μια ποσοτική έκφραση της αβεβαιότητάς του. Ως σφάλμα ορίζεται η διαφορά μεταξύ μετρούμενης και «αληθούς» ή πραγματικής αλλά άγνωστης τιμής ενός μετρούμενου μεγέθους.

Σφάλμα = |μετρούμενη τιμή – πραγματική τιμή|

Ως αβεβαιότητα ορίζεται η ποσοτική έκφραση της «αμφιβολίας» που υπάρχει σχετικά με το αποτέλεσμα της μέτρησης. Είναι δηλαδή ένα μέτρο της αξιοπιστίας της μέτρησης.

Σημειώνεται ότι σε πολλά συγγράμματα, η αβεβαιότητα των μετρήσεων αναφέρεται ως "σφάλμα" (error). Στην πραγματικότητα δεν είναι σφάλμα ή λάθος με την κοινή έννοια του όρου γιατί είναι κάτι που δεν μπορεί να αποφευχθεί. Γίνεται προσπάθεια το σφάλμα και η αβεβαιότητα να χρησιμοποιούνται με τον τρόπο που έχει οριστεί διεθνώς στον οδηγό ISO-GUM (Guide for the Uncertainty of Measurement).

Οι αβεβαιότητες στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης προέρχονται από διάφορους παράγοντες και χωρίζονται σε δύο τύπους ανάλογα με τον τρόπο που υπολογίζονται.

- Τύπου Α. Οφείλονται σε τυχαία μεταβολή παραγόντων και υπολογίζονται με στατιστικές μεθόδους (γνωστά και ως τυχαία σφάλματα).
- Τύπου Β. Υπολογισμός αβεβαιότητας με άλλους τρόπους. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται τα λεγόμενα συστηματικά σφάλματα, η αβεβαιότητα έμμεσης μέτρησης και η σύνθετη αβεβαιότητα.

Τις περισσότερες φορές η αβεβαιότητα είναι σύνθετη έχει δηλαδή συνιστώσα που οφείλεται σε τυχαίους παράγοντες και συνιστώσα που οφείλεται σε συστηματικά φαινόμενα. Πριν αναφερθούμε πιο αναλυτικά στους τύπους αβεβαιότητας και τον τρόπο υπολογισμού τους, θα πρέπει να δούμε κάποια χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την αξιοπιστία της μέτρησης.

Η αξιοπιστία της μέτρησης σχετίζεται με το πόσο λεπτομερής είναι η μέτρηση και πόση επαναληψιμότητα έχει όταν γίνουν επαναλαμβανόμενες μετρήσεις του ίδιου μεγέθους κάτω από ίδιες συνθήκες μέτρησης. Για την κατανόηση της διαφοράς μεταξύ ακρίβειας και αξιοπιστίας, χρησιμοποιείται συχνά το παράδειγμα με τους στόχους σκοποβολής και τα ίχνη των βελών. Τα ίχνη των βελών αντιστοιχούν στις τιμές ενός μεγέθους που λαμβάνονται με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις κάτω από ίδιες συνθήκες.

Σημαντικά ψηφία και ακρίβεια οργάνων

Όλα τα όργανα έχουν όριο στις μετρητικές τους δυνατότητες. Έχουν πάντα μια ελάχιστη ποσότητα μέχρι την οποία μπορούν να μετρήσουν. Σημαντικά ψηφία μιας μέτρησης θεωρούνται όλα τα ψηφία που μπορούμε να διαβάσουμε με απόλυτη βεβαιότητα συν ένα και μόνο ένα, το τελευταίο, που είναι από εκτίμηση και επομένως είναι αβέβαιο. Η αξιοπιστία μιας μέτρησης συνδέεται με τον αριθμό των σημαντικών ψηφίων που περιέχει. Μια μέτρηση ενός μεγέθους είναι περισσότερο αξιόπιστη από μια άλλη εάν είναι πιο λεπτομερής, δηλαδή αν περιέχει περισσότερα σημαντικά ψηφία. Για παράδειγμα έστω ότι μετρήθηκε η διάμετρος ενός σύρματος με ένα διαστημόμετρο και βρέθηκε να είναι 2.3 mm. Το ίδιο σύρμα μετρήθηκε με ένα μικρόμετρο το οποίο έδωσε αποτέλεσμα 2.285 mm. Στο παράδειγμά μας η μέτρηση με το μικρόμετρο έχει 4 σημαντικά ψηφία και είναι περισσότερο αξιόπιστη από τη μέτρηση με το διαστημόμετρο που έχει 2 σημαντικά ψηφία.

Σημασία του τρόπου γραφής του αποτελέσματος μιας μέτρησης

Πραγματοποιώντας μια μόνο μέτρηση με ένα όργανο που φέρει υποδιαίρεσεις, η αβεβαιότητα της μέτρησης μπορεί να είναι η μικρότερη υποδιαίρεση του οργάνου ή άλλο κλάσμα της (συνήθως μισή υποδιαίρεση). Στην περίπτωση ψηφιακών οργάνων, δίδεται από τον κατασκευαστή. Ο τρόπος με τον οποίο γράφουμε το αποτέλεσμα μας, πρέπει να δείχνει την αξιοπιστία με την οποία μετρήθηκε. Γενικά το τελευταίο ψηφίο μιας μέτρησης είναι πάντα αβέβαιο. Για παράδειγμα αν το αποτέλεσμα μιας μέτρησης μήκους δοθεί με την μορφή α) 52 mm, θεωρούμε ότι το τελευταίο ψηφίο, είναι το ψηφίο που φέρει αβεβαιότητα και επομένως η αληθής τιμή μπορεί να βρίσκεται με μεγάλη πιθανότητα στο διάστημα μεταξύ 51 έως 53 mm, (52±1), θεωρώντας ότι η καλύτερη εκτίμηση που μπορεί να γίνει είναι με ±1mm ελάχιστη υποδιαίρεση. Αν όμως δοθεί με την μορφή β) 52.0, η αβεβαιότητα βρίσκεται στο τρίτο σημαντικό ψηφίο και η αληθής τιμή μπορεί να βρίσκεται με μεγάλη πιθανότητα στο διάστημα μεταξύ 51.9 έως 52.1 mm, (52.0 ± 0.1).

Κανόνες καθορισμού σημαντικών ψηφίων

Όταν στο αποτέλεσμα μιας μέτρησης υπάρχει υποδιαστολή, ως σημαντικά ψηφία (συντομογραφία σψ) μετράνε όλα τα ψηφία από το πρώτο μη μηδενικό και δεξιά π.χ 2.3 (2 σψ), 2.30 (3 σψ), 0.2 (1 σψ), 0.02 (1 σψ), 0.020 (2 σψ). Όταν δεν υπάρχει υποδιαστολή ως σημαντικά μετράνε όλα τα ψηφία από το πρώτο αριστερά ψηφίο μέχρι το τελευταίο μη μηδενικό. π.χ 15 (2 σψ), 15000 (2 σψ), 15050 (4 σψ). Οι δυνάμεις του 10 δεν αξιολογούνται ως σημαντικά ψηφία. $2,1 \cdot 10^{-3}$ (2 σψ), 0.0021 (2 σψ). Γενικά είναι πιο εύχρηστο και κομψό να εκφράζουμε τα αποτελέσματά μας με τάξεις μεγέθους όπως $5.6 \cdot 10^{-3}$ αντί 0.0056. Επειδή πολλές φορές ένα μέγεθος υπολογίζεται έμμεσα (για παράδειγμα η ταχύτητα ενός κινητού) χρησιμοποιώντας μετρήσεις άλλων μεγεθών (την απόσταση X που διάνυσε το κινητό και το χρόνο t) που λήφθηκαν με διαφορετική αξιοπιστία, πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι το

αποτέλεσμα που προκύπτει από πρόσθεση, αφαίρεση, πολλαπλασιασμό ή διαίρεση αριθμών, περιορίζεται πάντα από τον αριθμό με τη μικρότερη αξιοπιστία.

Σύγκριση Μετρήσεων

Γενικά αν δεν ξέρουμε ποιά είναι η αβεβαιότητα (σφάλμα) μιας μέτρησης, δεν μπορούμε να αποφασίσουμε:

- αν υπάρχει διακριτή διαφορά μεταξύ δύο διαφορετικών τιμών του ίδιου μεγέθους.
- αν η μετρούμενη τιμή χαρακτηρίζει π.χ. το α ή β υλικό (βλ. παράδειγμα 1).
- αν η απόκλιση της μέτρησης ενός μεγέθους ως προς τη θεωρητική του τιμή είναι αποδεκτή μέσα στα πλαίσια της αβεβαιότητας (βλ. παράδειγμα 2).

Παράδειγμα 1:

Έστω ότι υπολογίσαμε την πυκνότητα ενός μετάλλου και βρήκαμε 7.9 g/cm^3 . Από τη βιβλιογραφία, η πυκνότητα του σιδήρου είναι 7.25 g/cm^3 και του χαλκού 8.22 g/cm^3 . Αν δεν ξέρουμε την αβεβαιότητα που συνοδεύει τη μέτρησή μας, δεν μπορούμε να απαντήσουμε ποιό είναι το υλικό που μετρήσαμε. Αν ξέρουμε ότι η αβεβαιότητα είναι π.χ. 0.4 g/cm^3 , τότε μπορούμε να πούμε ότι είναι ο χαλκός. Αν όμως το σφάλμα είναι 0.8 g/cm^3 , δεν μπορούμε να απαντήσουμε και σε αυτή την περίπτωση πρέπει να βρούμε τρόπο να βελτιώσουμε την αξιοπιστία του πειράματός μας.

Παράδειγμα 2:

Έστω ότι σε ένα πείραμα υπολογίσαμε την επιτάχυνση της βαρύτητας και βρήκαμε 10.24 m/s^2 . Αν δεν υπολογίσουμε την αβεβαιότητα στη μέτρηση δεν μπορούμε να αποφανθούμε αν η διαφορά σε σχέση με την θεωρητική τιμή 9.81 m/s^2 οφείλεται στην αβεβαιότητα ή αν πρέπει να αναζητήσουμε κάποιο συστηματικό σφάλμα.

Αβεβαιότητες Τύπου Α (στατιστικού χαρακτήρα).

Οφείλονται σε τυχαίους παράγοντες που σχετίζονται με την επίδραση του περιβάλλοντος (θόρυβος, μεταβολή θερμοκρασίας, παρεμβολές), τις ατέλειες οργάνων, την αλληλεπίδραση οργάνου-μετρούμενου μεγέθους καθώς και σε υποκειμενικούς παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα των μετρήσεων. Με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις του φυσικού μεγέθους με το ίδιο όργανο κάτω από ίδιες συνθήκες, περιορίζουμε την επίδραση των αβεβαιοτήτων που οφείλονται σε τυχαίους παράγοντες.

Εάν X το μέγεθος το οποίο μετρήθηκε N φορές και X_i το αποτέλεσμα κάθε μέτρησης, η μέση τιμή του δίδεται από τη σχέση:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (1)$$

Έτσι, θεωρούμε ότι η "καλύτερη" τιμή για τη μέτρηση είναι ο μέσος όρος που προέκυψε από το σύνολο των μετρήσεων.

Θεωρώντας ότι η διαφοροποίηση στις μετρήσεις οφείλεται σε τυχαίους παράγοντες, οι μετρήσεις περιγράφονται από μια κανονική κατανομή πιθανοτήτων. Στην κανονική κατανομή η μέση τιμή είναι η τιμή με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης. Όταν το πλάτος της κατανομής είναι μικρό σε σύγκριση με την μέση τιμή, ο μέσος όρος αντιπροσωπεύει, σχετικά καλά, ένα μεγάλο ποσοστό των μετρήσεων ενώ όταν το πλάτος της κατανομής είναι μεγάλο σε σύγκριση με την μέση τιμή, ο μέσος όρος δεν αντιπροσωπεύει καλά το σύνολο των μετρήσεων. Έτσι, το πλάτος της κατανομής των μετρήσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο της αβεβαιότητας των μετρήσεών μας.

Η αβεβαιότητα που προκύπτει από τις επαναλαμβανόμενες μετρήσεις ενός φυσικού μεγέθους, μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους. Στο εργαστήριο φυσικής χρησιμοποιούμε ως μέτρο της αβεβαιότητας, τη λεγόμενη τυπική αβεβαιότητα της μέσης τιμής που συνδέεται με την τυπική απόκλιση της κανονικής κατανομής και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\sigma(\bar{\chi}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{\chi} - \chi_i)^2}{N(N-1)}} \quad (2)$$

Όπου $\bar{\chi}$ η μέση τιμή, N το πλήθος των μετρήσεων και χ_i το αποτέλεσμα κάθε μέτρησης.

Αναγράφοντας το αποτέλεσμά μας με την μορφή:

$$\bar{\chi} \pm \sigma(\bar{\chi})$$

ορίζεται ένα διάστημα $\sigma(\bar{\chi})$ γύρω από τη μέση τιμή, στο οποίο περιμένουμε να βρούμε ένα μεγάλο μέρος των μετρήσεων του μεγέθους χ , με μια πιθανότητα ~68% .

Ή διαφορετικά, σημαίνει ότι η πιθανότητα που έχει μια νέα σειρά μετρήσεων του ίδιου μεγέθους να έχει μέση τιμή μέσα στο εύρος τιμών $\pm \sigma(\bar{\chi})$ γύρω από τη μέση τιμή είναι 68%. Ένα αποτέλεσμα μέτρησης θεωρείται επιστημονικά αποδεκτό, μόνο εάν αναφέρεται μαζί με το διάστημα αβεβαιότητας που καλύπτει την «πραγματική τιμή» του μετρούμενου μεγέθους, με μια δεδομένη πιθανότητα. Για να συγκρίνουμε την στατιστική αβεβαιότητα του αποτελέσματός μας, με την «αποδεκτή» τιμή, χρησιμοποιούμε τη σχετική αβεβαιότητα (γνωστή ως σχετικό σφάλμα) :

$$\sigma_{\sigma\%} = \frac{\sigma(\bar{\chi})}{\bar{\chi}} * 100 \quad (3)$$

Σημειώνεται ότι αν κάνουμε μόνο μια μέτρηση τότε την αβεβαιότητα την εκτιμούμε με βάση την μικρότερη υποδιαίρεση του οργάνου και την συγκρίνουμε με την τιμή του μεγέθους που μετρήσαμε. Η σχετική αβεβαιότητα είναι πολύ χρήσιμη για την σύγκριση της ποιότητας δύο διαφορετικών μετρήσεων. Για παράδειγμα έστω ότι μετρήθηκε το πλάτος ενός βιβλίου με μία μετροταινία και βρέθηκε 16.8 cm, αν εκτιμούμε ότι η αβεβαιότητα είναι ± 0.1 cm, το σχετικό σφάλμα είναι $\sigma = \sigma\% = 0.1 \cdot 100 / 168 = 0.6\%$. Με την ίδια μετροταινία μετρήθηκε το ύψος μιας πόρτας και βρέθηκε 215.7 cm. Θεωρητικά η αβεβαιότητα της δεύτερης μέτρησης είναι επίσης ± 0.1 cm. Το σχετικό σφάλμα όμως στην περίπτωση αυτή είναι 0.05% που είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με την μέτρηση του βιβλίου. Γενικά για δοσμένη αβεβαιότητα, η μέτρηση με την μικρότερη σχετική αβεβαιότητα είναι περισσότερο αξιόπιστη.

Αβεβαιότητες Τύπου Β (συστηματικές αβεβαιότητες).

Οι συστηματικές αβεβαιότητες (σε πολλά βιβλία αναφέρονται ως συστηματικά σφάλματα) είναι αβεβαιότητες που μπορούν να εντοπισθούν και να αποφευχθούν ή να διορθωθούν. Οφείλονται συνήθως σε μη ικανοποιητική ή λανθασμένη βαθμονόμηση οργάνων, σε λανθασμένες ενέργειες του πειραματιστή, της μεθόδου ανάλυσης κλπ.

Οι συστηματικές αβεβαιότητες δίνουν σταθερά μεγαλύτερες ή σταθερά μικρότερες τιμές από τις «πραγματικές». Εντοπίζονται δε συγκρίνοντας τις τιμές του μεγέθους που μας ενδιαφέρει με τιμές που λαμβάνονται με διαφορετική τεχνική, με άλλο πειραματιστή κλπ. Χαρακτηριστικό παράδειγμα συστηματικής αβεβαιότητας είναι η περίπτωση μιας ζυγαριάς της οποίας η βελόνα πριν τη μέτρηση είναι δεξιότερα ή αριστερότερα του μηδενός. Αυτό είναι ένα σφάλμα που παρουσιάζεται σε πολλά όργανα στρεπτής βελόνας και ονομάζεται μετατόπιση του μηδενός. Στα περισσότερα όργανα υπάρχει τρόπος επαναφοράς της βελόνας στο μηδέν. Εάν δεν διορθώνεται άμεσα τότε πρέπει να υπολογιστεί η διαφορά (σφάλμα μετατόπισης μηδενός) και να προστεθεί ή να αφαιρεθεί από το αποτέλεσμα της μέτρησης. Εάν η βελόνα είναι αρχικά δεξιά του μηδενός, η ζυγαριά θα δείχνει μεγαλύτερη τιμή από την πραγματική, άρα θα πρέπει να εκτιμήσουμε τη μετατόπιση του μηδενός και να το αφαιρούμε από τις μετρήσεις μας. Εάν η βελόνα είναι αρχικά αριστερά του μηδενός, η ζυγαριά θα δείχνει μικρότερη τιμή από την πραγματική, άρα θα πρέπει να υπολογίσουμε τη μετατόπιση μηδενός και να την προσθέτουμε στις μετρήσεις μας.

Διάδοση αβεβαιότητας – Αβεβαιότητα έμμεσης μέτρησης

Οι μετρήσεις που γίνονται στο εργαστήριο συχνά δεν μετρούν άμεσα τη φυσική ποσότητα που μας ενδιαφέρει, αλλά χρησιμοποιούνται για τον έμμεσο υπολογισμό της. Στην περίπτωση αυτή η μέτρηση ονομάζεται "έμμεση". Για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας στις έμμεσες μετρήσεις, χρησιμοποιούνται οι αβεβαιότητες των άμεσα μετρομένων ποσοτήτων, όπως εξηγείται στη συνέχεια. Έστω το φυσικό μέγεθος που μας ενδιαφέρει περιγράφεται από μια συνάρτηση f

(x,y,w) και τα μετρούμενα μεγέθη είναι τα x, y, w των οποίων οι αβεβαιότητες είναι δx , δy και δw . Η κάθε αβεβαιότητα συνεισφέρει στην συνολική αβεβαιότητα του μεγέθους που υπολογίζεται έμμεσα. Η συνεισφορά της κάθε μιας καθορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις που προκύπτουν από το γινόμενο της μερικής παραγώγου της συνάρτησης ως προς την κάθε μεταβλητή, επί την επιμέρους αβεβαιότητα της μεταβλητής.

$$\delta f_x = \frac{\partial f}{\partial x} \delta x \qquad \delta f_y = \frac{\partial f}{\partial y} \delta y \qquad \delta f_w = \frac{\partial f}{\partial w} \delta w$$

Η αβεβαιότητα του έμμεσα μετρούμενου μεγέθους δίδεται από την σχέση [3] :

$$\delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial w} \delta w\right)^2} \quad (4)$$

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Α μέρος

Υπολογισμός της συνδυασμένης αβεβαιότητας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση της αβεβαιότητας κατά τη εφαρμογή σκληρομέτρησης με τη χρήση του σκληρομέτρου Innovatest 600A (Εικ.9).



Εικόνα 9. Απεικόνιση του προς μελέτη σκληρομέτρου Innovatest 600A, s/n 13154.

Με τη χρήση του προτύπου ASTM E18-15 υπολογίζονται η συνδυασμένη (combined uncertainty) και διευρυμένη (expanded uncertainty) αβεβαιότητα κατά την λήψη της μέτρησης σκληρότητας με βάση τον υπολογισμό των παρακάτω αβεβαιοτήτων:

α) αβεβαιότητα στον υπολογισμό του σφάλματος κατά τη μέτρηση σκληρότητας με τη μέθοδο Rockwell, u_{Mach}

β) i) αβεβαιότητα στη μέτρηση σκληρότητας που οφείλεται στην έλλειψη επαναληψιμότητας του οργάνου, u_{Repeat}

ii) αβεβαιότητα λόγω επαναληψιμότητας του οργάνου που προκύπτει από τη μέτρηση της μέσης τιμής σκληρότητας σε δείγμα ομοιογενών δοκιμίων, όπως στην περίπτωση μέτρησης προϊόντων μίας σειράς παραγωγής, $u_{Rep\&NU}(Material)$

iii) αβεβαιότητα λόγω επαναληψιμότητας του οργάνου που προκύπτει από τον υπολογισμό του εύρους στις μετρήσεις σκληρότητας, σε δείγμα ομοιογενών δοκιμίων, μετρημένων από διαφορετικούς χειριστές, σ_r , μέσω διαγραμμάτων ελέγχου

γ) i) η αβεβαιότητα στη μέτρηση σκληρότητας που οφείλεται στην έλλειψη αναπαραγωγιμότητας του οργάνου, u_{Reprod}

ii) αβεβαιότητα στη μέτρηση σκληρότητας που οφείλεται στην έλλειψη αναπαραγωγιμότητας του οργάνου, που προκύπτει από τον υπολογισμό του εύρους

στις μετρήσεις σκληρότητας, σε δείγμα ομοιογενών δοκιμίων, μετρημένων από διαφορετικούς χειριστές, σ_R , μέσω διαγραμμάτων ελέγχου

δ) η αβεβαιότητα στη μέτρηση σκληρότητας Rockwell που οφείλεται στην διακριτική ικανότητα του οργάνου, u_{Resol} .

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σύγκριση των διαφορετικών τρόπων υπολογισμού της συνδυασμένης αβεβαιότητας u_{Meas} και η εκτίμηση της αξιοπιστίας τους. Επιπλέον, υπολογίζεται η μεταβλητότητα του μετρητικού συστήματος $\sigma_{\mu\sigma}$ σε σχέση με τη μεταβλητότητα του προϊόντος σ_{π} ώστε να εκτιμηθεί η εξάρτηση του σκληρομέτρου από την ανομοιογένεια του υλικού των δοκιμίων, αφού αυτά προήλθαν μετά από θερμική κατεργασία, εξομάλυνσης δομής. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν εργαλειοχάλυβας «εν ψυχρώ» εφαρμογών.

Αβεβαιότητα στον υπολογισμό του σφάλματος κατά τη μέτρηση σκληρότητας u_{Mach}

Η συνδυασμένη αβεβαιότητα κατά τον υπολογισμό του σφάλματος του σκληρομέτρου δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$u_{Mach} = \sqrt{u_{Rep\&NU}^2(Ref\ Block) + u_{Resol}^2 + u_{RefBlk}^2} \quad (5)$$

Ο έλεγχος αφορά την περιοχή χαμηλών τιμών σκληρότητας κατά τη μέθοδο HRC, όπου κατά την έμμεση επαλήθευση χρησιμοποιήθηκε πρότυπο δοκίμιο ονομαστικής σκληρότητας 22,8 HRC (Εικ.10) και διευρυμένης τυπικής αβεβαιότητας $U_{RefBlk} = 1,0$ HRC.



Εικόνα 10. Πρότυπο δοκίμιο ονομαστικής σκληρότητας 22,8HRC

Οι τιμές σκληρότητας που λήφθηκαν κατά την έμμεση επαλήθευση του οργάνου, διακριτικής ικανότητας 1,0HRC, είναι:

1)22HRC, 2)22HRC, 3)21HRC, 4)22HRC, 5)22 HRC

(ημερομηνία 28/11/2016, μετρητής Μαστορίδου Νικολέτα)

$$\text{Μέσος όρος: } \frac{22+22+21+22+21}{5} = 21,6\text{HRC},$$

Εύρος σκληρότητας (επαναληψιμότητα): 1,0 HRC, σφάλμα (ορθότητα): -1,2HRC

Με βάση τα παραπάνω προκύπτουν:

$$u_{Rep\&NU} (Ref. Block) = \frac{STDEV(22+22+21+22+21)}{\sqrt{5}} = 0,245\text{HRC}$$

$$u_{RefBlk} = \frac{U_{RefBlk}}{2} = 0,5\text{HRC}$$

$$u_{Resol} = \frac{1,0}{\sqrt{12}} = 0,289\text{HRC}$$

Έτσι, από τη σχέση (5), η αβεβαιότητα κατά τον υπολογισμό του σφάλματος του σκληρομέτρου είναι:

$$u_{mach} = \sqrt{0,245^2 + 0,289^2 + 0,5^2} = \sqrt{0,06 + 0,084 + 0,25} = 0,628\text{HRC}$$

Η διευρυμένη τυπική αβεβαιότητα, με συντελεστή κάλυψης $k=2$, (επίπεδο εμπιστοσύνης 95%) είναι: $U_{mach} = 2 * u_{mach} = 2 * 0,628 = 1,256\text{HRC}$

Άρα, η αβεβαιότητα του σκληρομέτρου στο σφάλμα των -1,2HRC είναι 1,3HRC.

Αβεβαιότητα κατά τη μέτρηση σκληρότητας u_{Meas} στην περιοχή των 30-40 HRC

Εδώ θα ορίσουμε την αβεβαιότητα για την κλίμακα 30 – 40 HRC. Οι αβεβαιότητες που εμφανίζονται σε αυτό το στάδιο έχουν να κάνουν με την έλλειψη επαναληψιμότητας και αναπαραγωγισιμότητας του μηχανήματος αλλά και την αβεβαιότητα κατά τον καθορισμό του σφάλματος, το σφάλμα που κάνει ο χρήστης κατά την έμμεση διακρίβωση και την διακριτική ικανότητα της μηχανής.

Σε ένα διάστημα 20 ημερών λήφθηκαν μετρήσεις στο ίδιο σκληρόμετρο χρησιμοποιώντας το ίδιο πρότυπο δοκίμιο, με τον ίδιο μετρητή με σκοπό να υπολογίσουμε το u_{Reprod} . Οι μετρήσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Π1. Πίνακας μετρήσεων στο πρότυπο δοκίμιο

1η μέτρηση	2η μέτρηση	3η μέτρηση	4η μέτρηση
22	22	22	21
22	22	23	22
22	22	22	21
22	22	23	22
22	22	22	22

Οι μετρήσεις έγιναν 4 διαφορετικές ημέρες.

Μέσω των υπολογισμών έχουμε:

Καφάσης Α.- Εκτίμηση αβεβαιότητας σκληρομέτρου Innovatest κατά τη μέτρηση σκληρότητας με τη μέθοδο HRC βάσει προτύπων

$$u_{\text{Rep\&NU(Ref Block)}} = \frac{STDEV(22+22+21+22+21)}{\sqrt{5}} = 0,5477 \text{ HRC}$$

$$u_{\text{Reprod}} = STDEV(\text{M.o.}(1\eta)+\text{M.o.}(2\eta)+\text{M.o.}(3\eta)+\text{M.o.}(4\eta)) = STDEV(22+22+22,4+21,6) = 0,3266$$

$$u_{\text{resol}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,2887 \text{ HRC}$$

$$u_{\text{mach}} = \sqrt{0,5477^2 + 0,2887^2 + 0,5^2} = 0,7958 \text{ HRC}$$

$$u_{\text{meas}} = 0,5477^2 + 0,3366^2 + 0,2887^2 + 0,7958^2 = 1,0598 \text{ HRC}$$

Για να βρούμε την διευρυμένη αβεβαιότητα U για μια δοκιμή, πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την αβεβαιότητα με τον συντελεστή κάλυψης ο οποίος είναι 2, συν το σφάλμα των μετρήσεων από τον παραπάνω υπολογισμό, δηλαδή:

$$U_{\text{meas}} = 2 * 1,0598 = 2,1198 \text{ HRC}$$

Οπότε έχοντας αυτά τα αποτελέσματα μέσω των υπολογισμών, μπορούμε να πούμε πως με διάστημα εμπιστοσύνης 95% σε μια σκληρομέτρηση στην περιοχή των 30-40 HRC η τιμή που θα λάβουμε θα είναι η αληθινή τιμή +/- 2,1196.

Επαναληψιμότητα του οργάνου και αναπαραγωγιμότητα των μετρήσεων

Επαναληψιμότητα:

Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήσαμε 30 δοκίμια από τα οποία λήφθηκαν μετρήσεις από τρεις διαφορετικούς χειριστές: Καφάσης, Μαστορίδου, Παπαγεωργίου.

Στα δοκίμια πραγματοποιήθηκε λείανση με σκοπό την καλύτερη δυνατή επιφάνεια ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν ακριβέστερες μετρήσεις. Η διαδικασία της λείανσης έγινε με τη χρήση χαρτιού διαμέτρου 250mm και 180P για 2 min και 40 sec, καθώς και φινίρισμα με 240P για 50sec στα 220 rpm με φορά ωρολογιακή. Η λείανση πραγματοποιήθηκε από το μηχάνημα που παρουσιάζεται στις φωτογραφίες παρακάτω και βρίσκεται στο εργαστήριο του ΠΕΤΥΛ.



Εικόνα 11 Λειαντικό μηχάνημα προετοιμασίας των δοκιμών

Το τυπικό σφάλμα της επαναληψιμότητας το υπολογίζουμε μέσω του τύπου $\sigma_r = \frac{R}{d_2}$, όπου $R = \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{3} = \frac{(0,9333 + 0,5333 + 0,6)}{3} = 0,6889$. Τα R_1, R_2, R_3 είναι οι μέσοι όροι των ευρών των 30 τριάδων μετρήσεων (μετρήσεις σε δοκίμια από υλικό AISI 4140) των χειριστών Καφάσης, Μαστορίδου, Παπαγεωργίου αντίστοιχα και η τιμή d_2 είναι σταθερή και ίση με 1,693. Οπότε

$$\sigma_r = \frac{R}{d_2} = \frac{0,6889}{1,693} = 0,4069 \text{ HRC}$$

Αναπαραγωγισιμότητα:

Με δεδομένα τα x_1, x_2, x_3 , τα οποία είναι ο μέσος όρος όλων των τριάδων μετρήσεων και για τους τρεις χειριστές και οι οποίοι μ.ο. είναι 35.4778, 35.5889, 36.2889. Με αυτά λοιπόν τα δεδομένα μπορούμε να εκτιμήσουμε το τυπικό σφάλμα της αναπαραγωγισιμότητας μας με:

$$\sigma_R = \frac{R_{x_1, x_2, x_3}}{d_2}, \text{ όπου } R_{x_1, x_2, x_3} = \max(x_1, x_2, x_3) - \min(x_1, x_2, x_3) \text{ που σημαίνει ότι}$$
$$R_{x_1, x_2, x_3} = 36,2889 - 35,4778 = 0,8111 \text{ HRC}$$

$$\text{Άρα } \sigma_R = \frac{R_{x_1, x_2, x_3}}{d_2} = \frac{0,8111}{1,693} = 0,4791 \text{ HRC}$$

Υπολογισμοί μέσω μεγεθών ελέγχου διεργασίας

Χρησιμοποιώντας την σχέση $\sigma_{\mu\sigma}^2 = \sigma_r^2 + \sigma_R^2 \Leftrightarrow$

$$\sigma_{\mu\sigma} = \sqrt{0,4069^2 + 0,2167^2} = 0,6286$$

Βλέπουμε πως συνδυάζονται και τα δύο στο συνολικό σφάλμα του μετρητικού μας συστήματος. Επίσης για να προσδιορίσουμε τον δείκτη $\frac{\sigma_{\mu\sigma}}{\sigma_{\pi}} * 100$, θα πρέπει πρώτα να βρούμε την δειγματική διασπορά η οποία είναι $s^2 = 0,4890$ όλων των 270 μετρήσεων και έπειτα θα υπολογίσουμε το $\frac{\sigma_{\mu\sigma}}{\sigma_{\pi}} * 100$.

$$\text{Όποτε έχουμε } \sigma_{\pi}^2 = \sigma_{\text{ολ}}^2 - \sigma_{\mu\sigma}^2 \Leftrightarrow \sigma_{\pi}^2 = \sqrt{s^2 - \sigma_{\mu\sigma}^2} \Leftrightarrow \sigma_{\pi}^2 = \sqrt{0,4890 - 0,3951} = 0,3064$$

$$\text{Όποτε } \frac{\sigma_{\mu\sigma}}{\sigma_{\pi}} * 100 = \frac{0,6286}{0,5535} * 100 = 113.57\%$$

Προηγουμένως εκτιμήθηκε ότι η αβεβαιότητα με την χρήση του μεγέθους $u_{\text{Reprod}} = 0,3266$ HRC με βάση τα πρότυπα δοκίμια, ενώ το μέγεθος $u_{\text{Reprod}} = 0,4791$ HRC εκτιμήθηκε με βάση τις μετρήσεις των 30 δοκιμίων των τριών διαφορετικών χειριστών. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε πως παρατηρούμε ότι με τη μέθοδο των προτύπων δοκιμίων η αβεβαιότητα είναι μικρότερη και ίση με:

$$u_{\text{meas}} = \sqrt{0.5477^2 + 0.4792^2 + 0.2887^2 + 0.7958^2} = 1.1163 \text{ HRC}$$

Η διευρυμένη αβεβαιότητα U για μια δοκιμή είναι η αβεβαιότητα πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή κάλυψης 2 συν το σφάλμα μετρήσεων από τον υπολογισμό του u_{meas} ,

$$\text{άρα } U_{\text{meas}} = 2 * u_{\text{meas}} \Leftrightarrow U_{\text{meas}} = 2 * 1,1163 \text{ HRC} = \pm 2,2326 \text{ HRC}$$

Οι 270 μετρήσεις που πήραμε εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Π2. Πίνακας μετρήσεων δοκιμίων

Δοκίμια	α/α	Μετρητές		
		Καφάσης	Μαστορίδου	Παπαγεωργίου
No 1	1	34	35	35
	2	36	36	36
	3	35	35	36
No 2	1	35	34	36
	2	36	34	37
	3	36	35	37
No 3	1	35	36	36
	2	36	35	37
	3	35	35	37
No 4	1	35	36	36
	2	36	36	37
	3	35	36	36
No 5	1	36	36	36
	2	35	35	36

Καφάσης Α.- Εκτίμηση αβεβαιότητας σκληρομέτρου Innovatest κατά τη μέτρηση σκληρότητας με τη μέθοδο HRC βάσει προτύπων

	3	35	36	36
No 6	1	35	35	36
	2	35	36	36
	3	35	36	36
No 7	1	34	36	36
	2	35	36	36
	3	35	36	36
No 8	1	36	36	35
	2	35	36	36
	3	35	35	36
No 9	1	35	35	36
	2	35	35	37
	3	35	35	36
No 10	1	35	36	36
	2	36	35	36
	3	36	36	36
No 11	1	36	35	36
	2	36	35	37
	3	35	35	36
No 12	1	36	35	37
	2	36	36	36
	3	35	35	36
No 13	1	36	36	37
	2	35	36	36
	3	36	36	36
No 14	1	35	35	36
	2	35	35	36
	3	35	36	36
No 15	1	35	35	37
	2	36	36	37
	3	35	36	37
No 16	1	36	36	37
	2	36	36	37
	3	36	36	36
No 17	1	36	36	36
	2	35	35	36
	3	35	36	36
No 18	1	35	35	36
	2	36	36	36
	3	35	36	36
No 19	1	36	35	37
	2	35	35	36
	3	36	35	36
No 20	1	34	35	37
	2	34	35	37

Καφάσης Α.- Εκτίμηση αβεβαιότητας σκληρομέτρου Innovatest κατά τη μέτρηση σκληρότητας με τη μέθοδο HRC βάσει προτύπων

	3	35	36	37
No 21	1	34	36	36
	2	36	36	36
	3	36	36	37
No 22	1	36	36	36
	2	37	36	36
	3	36	36	36
No 23	1	36	36	36
	2	36	36	36
	3	36	36	36
No 24	1	37	36	37
	2	37	36	36
	3	36	36	37
No 25	1	36	35	37
	2	37	36	37
	3	36	36	37
No 26	1	34	35	35
	2	36	36	37
	3	36	36	36
No 27	1	35	35	35
	2	36	36	36
	3	35	36	36
No 28	1	36	36	37
	2	36	36	36
	3	35	36	36
No 29	1	34	36	37
	2	36	36	36
	3	35	36	36
No 30	1	36	35	37
	2	36	35	37
	3	36	35	37

Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν

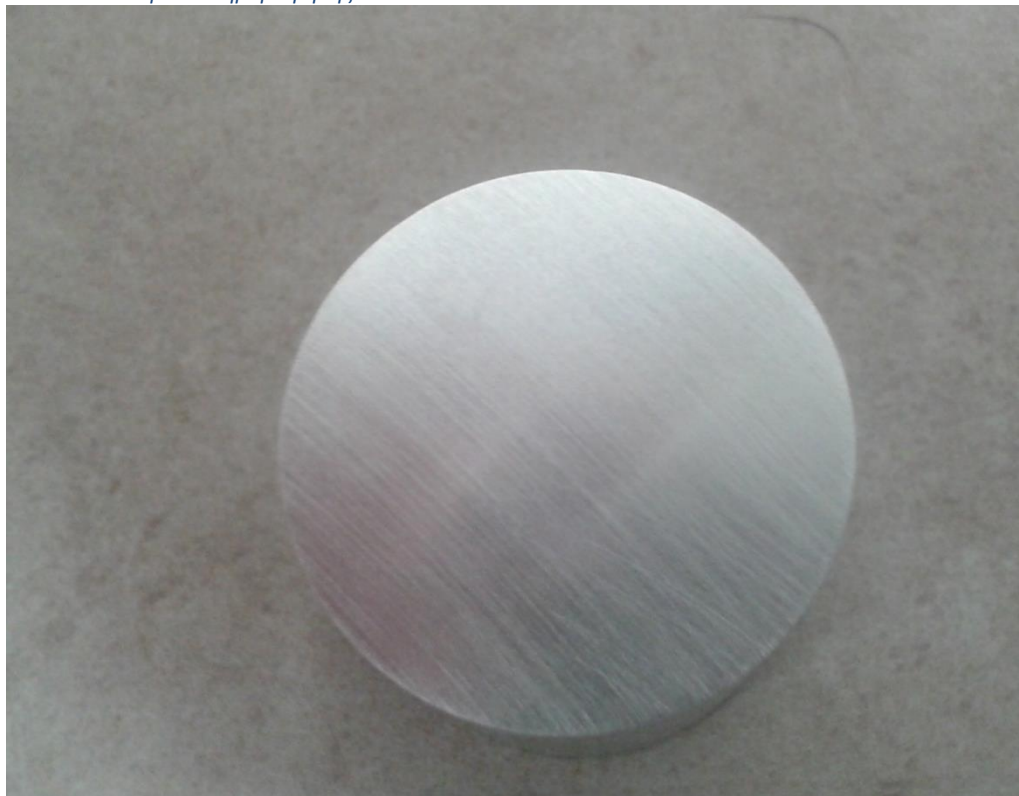


Εικόνα 12 Δοκίμια σκληρομέτρησης

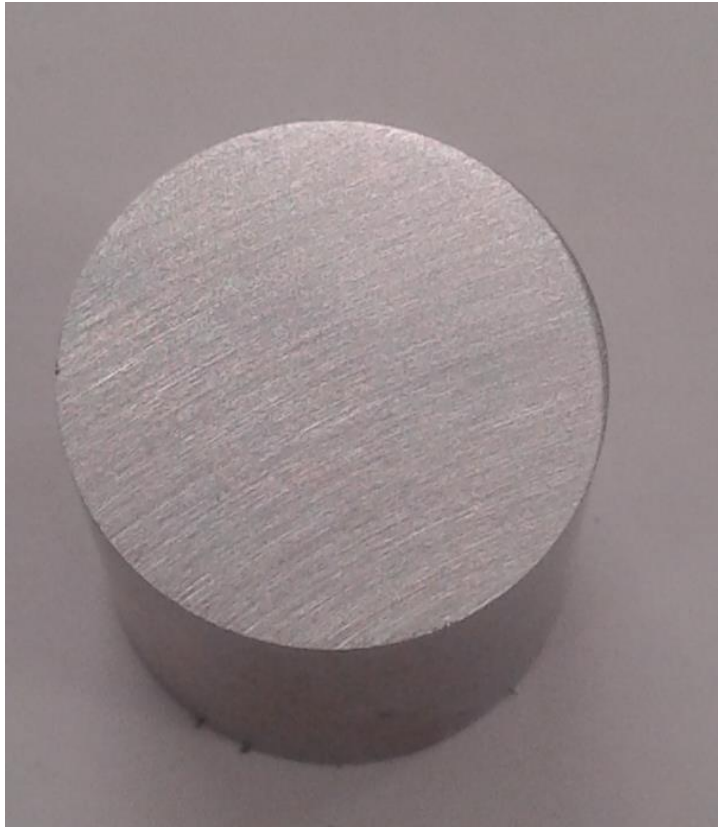
Καφάσης Α.- Εκτίμηση αβεβαιότητας σκληρομέτρου Innovatest κατά τη μέτρηση σκληρότητας με τη μέθοδο HRC βάσει προτύπων



Εικόνα 13 Δοκίμια σκληρομέτρησης



Εικόνα 14 Τραχύτητα δοκιμίων



Εικόνα 15 Τραχύτητα δοκιμίων



Εικόνα 16 Σκληρομέτρησεις απο τους τρεις μετρητές

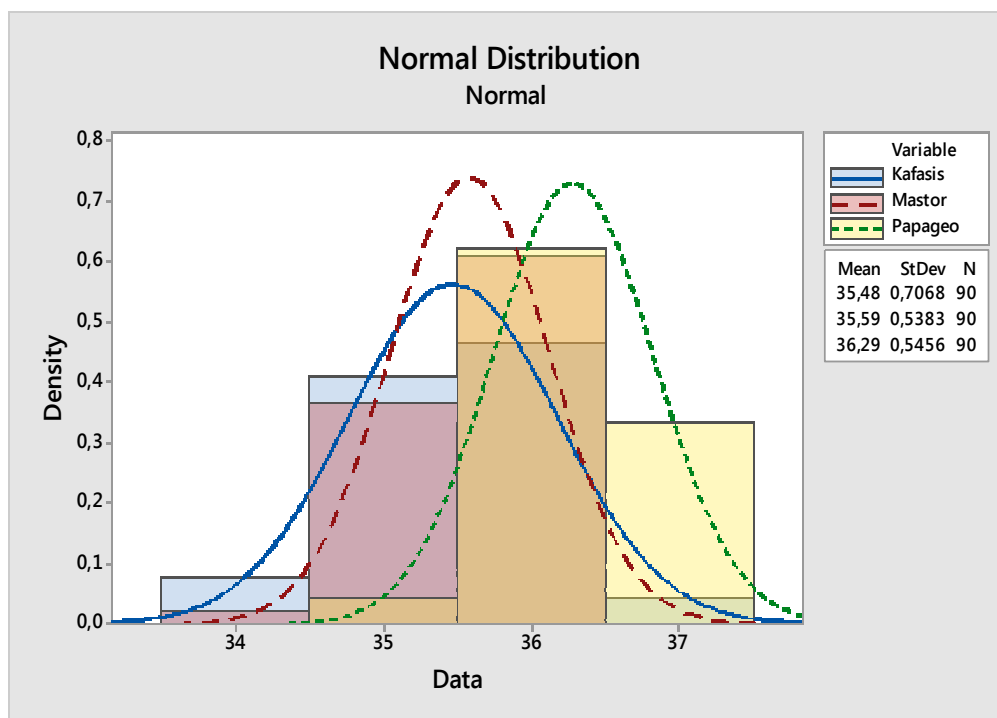
Καφάσης Α.- Εκτίμηση αβεβαιότητας σκληρομέτρου Innovatest κατά τη μέτρηση σκληρότητας με τη μέθοδο HRC βάσει προτύπων



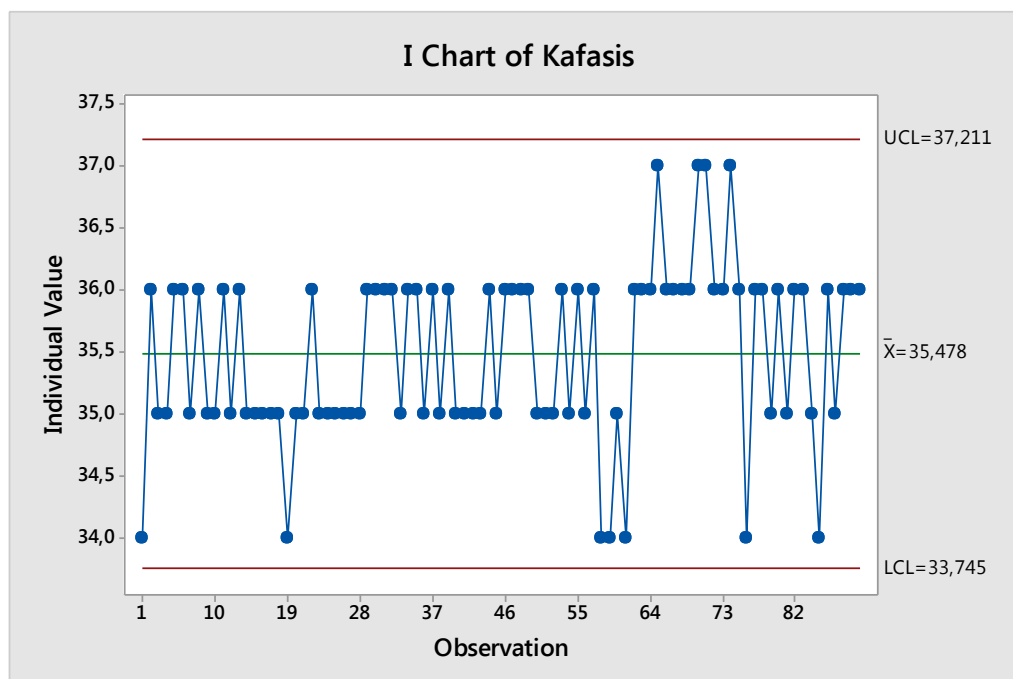
Εικόνα 17 Το σύνολο των δοκιμών μετά τη μέτρηση

Διαγράμματα ελέγχου διεργασιών

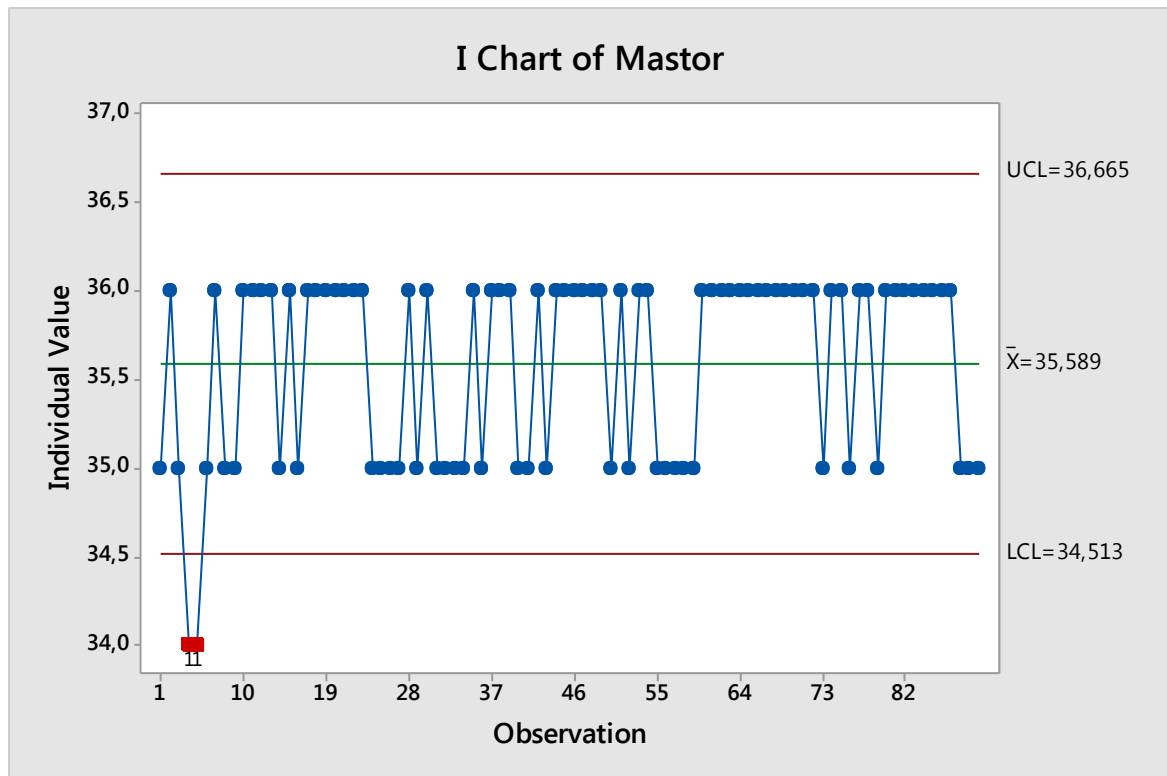
Από τα διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε πως η χρήση της κανονικής κατανομής για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων ήταν αναγκαία, επίσης παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των τιμών που πήραμε είναι μέσα στα όρια των τριών τυπικών αποκλίσεων.



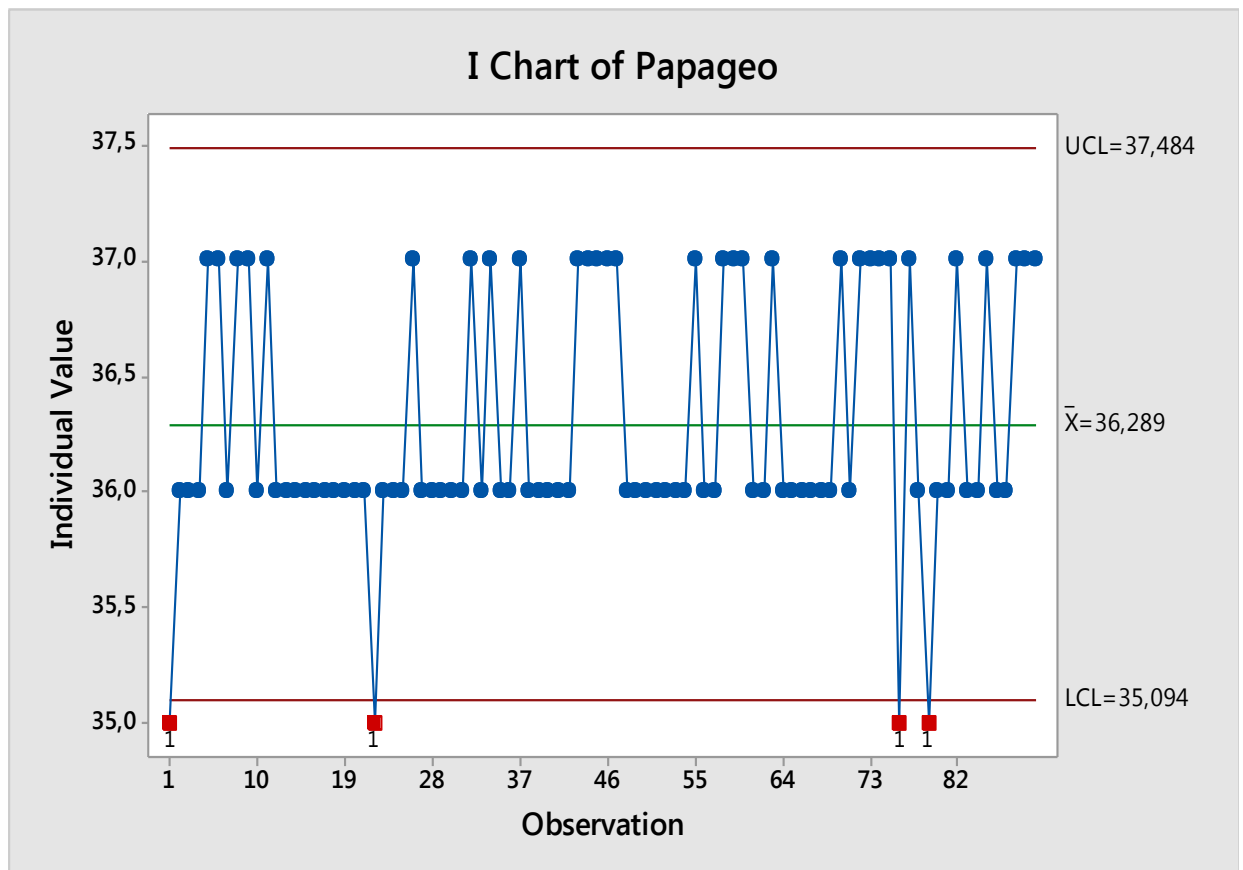
Εικόνα 18 Κατανομές των μετρήσεων από τους τρεις μετρητές



Εικόνα 19. Διάγραμμα X-R για τον μετρητή Καφάση



Εικόνα 20. Διάγραμμα X-R για τον μετρητή Μαστορίδου



Εικόνα 21. Διάγραμμα X-R για το μετρητή Παπαγεωργίου

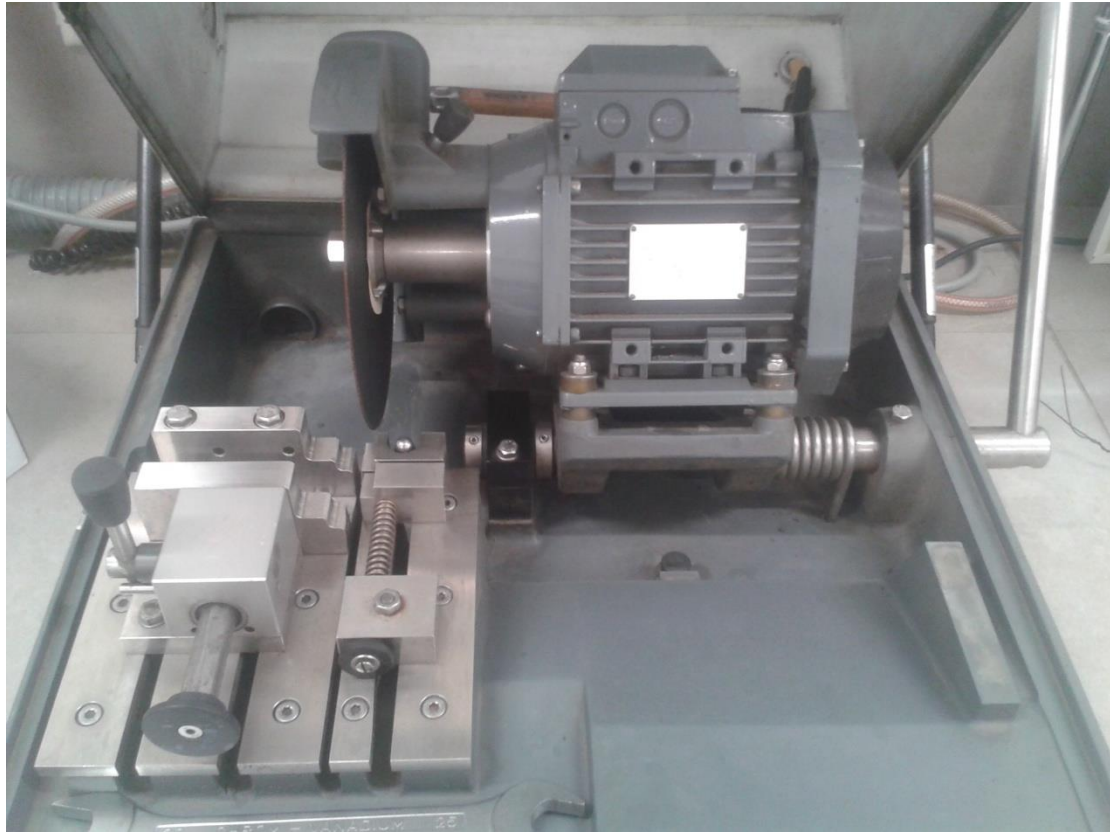
Β μέρος

Στο δεύτερο μέρος της πειραματικής μας διαδικασίας ακολουθήσαμε την ίδια διαδικασία με την μόνη διαφορά ότι πραγματοποιήθηκαν μέτρησεις σε 30 επιπλέον δοκίμια. Οι αρχικές μετρήσεις του πρότυπου δοκιμίου είναι οι ίδιες καθώς και τα αποτελέσματα που υπολογίσαμε, ενώ πήραμε μετρήσεις από 30 δοκίμια στα οποία πραγματοποιήσαμε θερμική κατεργασία. Το υλικό των 30 δοκιμίων είναι Uddeholm Agne και πραγματοποιήσαμε θερμική κατεργασία με σκοπό να πετύχουμε την μέγιστη δυνατή ομοιογένεια. Στα δοκίμια πραγματοποιήθηκε λείανση πριν την εισαγωγή στο φούρνο, η οποία έγινε με χρήση χαρτιού διαμέτρου 250mm και 180P για 1 min, καθώς και φινίρισμα με 240P για 20sec στα 220 rpm με φορά ωρολογιακή

Η διαδικασία της θερμικής κατεργασίας έχει ως εξής : Αρχικά κάναμε κοπή στις ράβδους από τις οποίες αποτελούνται τα δοκίμια μας. Το κοπτικό μηχάνημα το οποίο χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες,



Εικόνα 22. Μικροτόμος κοπής



Εικόνα 23. Μικροτόμος κοπής

Έπειτα τοποθετήσαμε τα δοκίμια μας σε 5 κουτιά από μία εξάδα στο καθένα. Τα κουτιά με τις εξάδες των δοκιμίων είναι τα παρακάτω:

1^η σειρά: No 60, 58, 47, 44, 49, 53

2^η σειρά: No 64, 45, 41, 50, 48, 57

3^η σειρά: No 42, 59, 55, 56, 62, 63

4^η σειρά: No 61, 66, 67, 69, 51, 52

5^η σειρά: No 54, 68, 40, 65, 43, 46

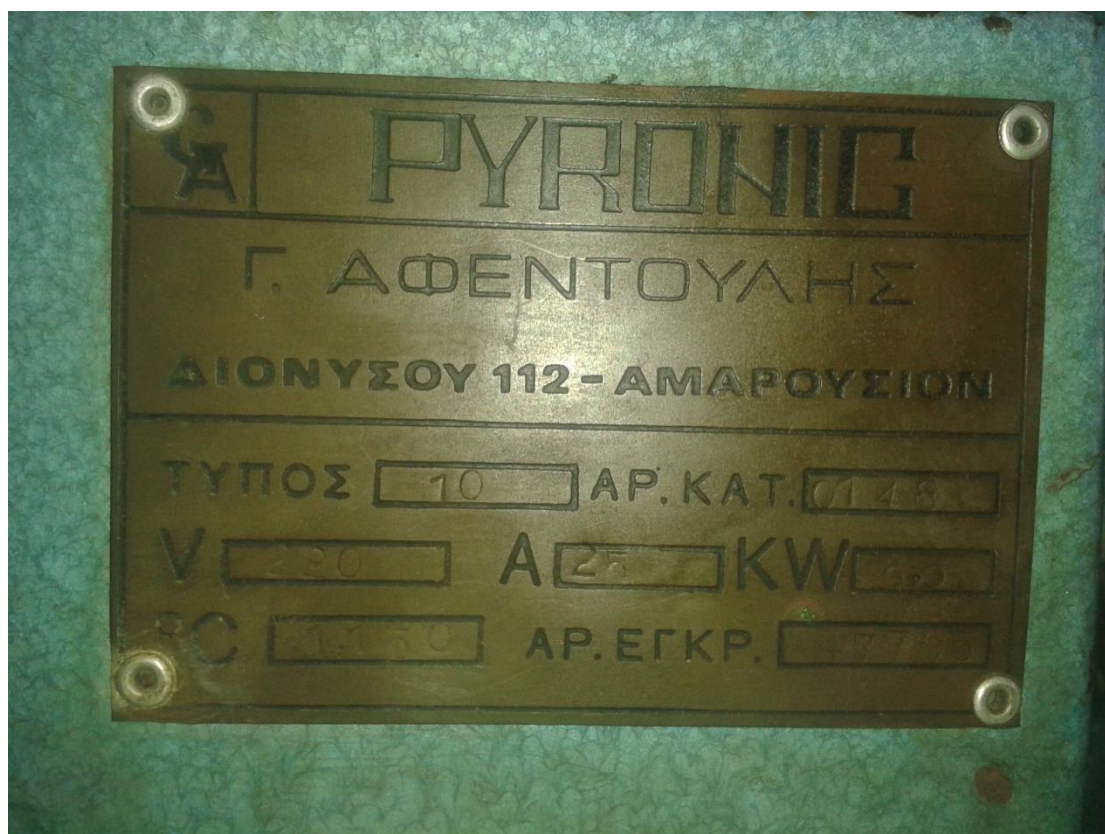
Καφάσης Α.- Εκτίμηση αβεβαιότητας σκληρομέτρου Innovatest κατά τη μέτρηση σκληρότητας με τη μέθοδο HRC βάσει προτύπων

Μετά τοποθετήσαμε τα κουτιά μέσα στο φούρνο ο οποίος παρουσιάζεται στις εικόνες παρακάτω:



Εικόνα 24. Φούρνος θερμικών κατεργασιών

Τα στοιχεία του φούρνου είναι ακόλουθα:



Εικόνα 25. Στοιχεία κατασκευής του φούρνου

Ο φούρνος ρυθμίστηκε στους 840 °C και η απόψυξη για όλα τα δοκίμια έγινε στον αέρα.

Η σειρά με την οποία βάλαμε τα κουτιά καθώς και οι χρόνοι είναι οι εξής:

1^η σειρά: Νο 60, 58, 47, 44, 49, 53 και 2^η σειρά: Νο 64, 45, 41, 50, 48, 57

Συνολικός χρόνος: 54 min.

Εισαγωγή των δοκιμίων: 10 sec

Κατώτατη θερμοκρασία: 786 °C σε 3 min και 25 sec

Ισορροπία στους 840 °C: Σε 13 min και 20 sec

Ο φούρνος ανοιχτός: 10 sec

Ο φούρνος κλειστός: 19 sec

Χρόνος απόψυξης: 1^η σειρά, 60 °C σε 52 min και 2^η σειρά, 40 °C σε 52 min

3^η σειρά: Νο 42, 59, 55, 56, 62, 63 και 4^η σειρά: Νο 61, 66, 67, 69, 51, 52

Συνολικός χρόνος: 55 min.

Εισαγωγή των δοκιμίων: 10 sec

Κατώτατη θερμοκρασία: 758 °C σε 3 min και 40 sec

Ισορροπία στους 840 °C: Σε 12 min και 25 sec

Ο φούρνος ανοιχτός: 11 sec

Ο φούρνος κλειστός: 18 sec

Χρόνος απόψυξης: 3^η σειρά, 40 °C σε 55 min και 4^η σειρά, 60 °C σε 55 min

5^η σειρά: Νο 54, 68, 40, 65, 43, 46

Συνολικός χρόνος: 60 min.

Εισαγωγή των δοκιμίων: 5 sec

Κατώτατη θερμοκρασία: 815 °C σε 2 min και 2 sec

Ισορροπία στους 840 °C: Σε 12 min και 45 sec

Ο φούρνος ανοιχτός: 10 sec

Ο φούρνος κλειστός: 21 sec

Χρόνος απόψυξης: 5^η σειρά, 60 °C σε 60 min

Μετά επαναλάβουμε λείανση στα δοκίμια για καλύτερη ποιότητα επιφανείας η οποία έγινε με τη χρήση χαρτιού διαμέτρου 250mm και 240P για 15 sec με 160 rpm και φορά ωρολογιακή.

Πριν τη λήψη μετρήσεων κάναμε χρήση του προτύπου για ζέσταμα της μηχανής από την οποία λάβαμε 10 τυχαίες μετρήσεις οι οποίες είναι οι εξής: 22HRC, 22HRC, 23HRC, 22HRC, 23HRC, 22HRC, 22HRC, 22HRC, 22HRC, 23HRC.

Στη συνέχεια λήφθηκαν 270 μετρήσεις όπως και στο α μέρος.

Οι υπολογισμοί των μετρήσεων έχουν ως εξής:

Το τυπικό σφάλμα της επαναληψιμότητας το υπολογίζουμε μέσω του τύπου $\sigma_r = R/d_2$, όπου $R = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3} = \frac{0,6333 + 0,6333 + 0,5666}{3} = 0,611$. Τα R_1, R_2, R_3 είναι οι μέσοι όροι των ευρών των 30 τριάδων μετρήσεων (μετρήσεις σε δοκίμια από υλικό Uddeholm Arne) των χειριστών Καφάσης, Μαστορίδου, Παπαγεωργίου αντίστοιχα και η τιμή d_2 είναι σταθερή και ίση με 1,693. Οπότε

$$\sigma_r = \frac{R}{d_2} = \frac{0,611}{1,693} = 0,361 \text{ HRC}$$

Αναπαραγωγισιμότητα:

Με δεδομένα τα x_1, x_2, x_3 , τα οποία είναι ο μέσος όρος όλων των τριάδων μετρήσεων και για τους τρεις χειριστές και οι οποίοι μ.ο. είναι 33.5333, 33.5333, 32.7889. Με αυτά λοιπόν τα δεδομένα μπορούμε να εκτιμήσουμε το τυπικό σφάλμα της αναπαραγωγισιμότητας μας με:

$$\sigma_R = \frac{R_{x_1, x_2, x_3}}{d_2}, \text{ όπου } R_{x_1, x_2, x_3} = \max(x_1, x_2, x_3) - \min(x_1, x_2, x_3) \text{ που σημαίνει ότι}$$
$$R_{x_1, x_2, x_3} = 33,5333 - 32,7889 = 0,7444 \text{ HRC}$$

$$\Delta\rho_\alpha = \frac{R_{x_1, x_2, x_3}}{d_2} = 0,7444/1,693 = 0,4397 \text{ HRC}$$

Υπολογισμοί μέσω μεγεθών ελέγχου διεργασίας

Χρησιμοποιώντας την σχέση $\sigma_{\mu\sigma}^2 = \sigma_r^2 + \sigma_R^2 \Leftrightarrow$

$$\sigma_{\mu\sigma} = \sqrt{0,361^2 + 0,4397^2} = 0,5689$$

Βλέπουμε πως συνδυάζονται και τα δύο στο συνολικό σφάλμα του μετρητικού μας συστήματος. Επίσης για να προσδιορίσουμε τον δείκτη $\frac{\sigma_{\mu\sigma}}{\sigma_{\pi}} * 100$, θα πρέπει πρώτα να βρούμε την δειγματική διασπορά η οποία είναι $s^2 = 3,008$ όλων των 270 μετρήσεων και έπειτα θα υπολογίσουμε το $\frac{\sigma_{\mu\sigma}}{\sigma_{\pi}} * 100$.

Οποτε έχουμε $\sigma_{\pi}^2 = \sigma_{ολ}^2 - \sigma_{\mu\sigma}^2 \Leftrightarrow \sigma_{\pi}^2 = \sqrt{s^2 - \sigma_{\mu\sigma}^2}$

$$\Leftrightarrow \sigma_{\pi} = \sqrt{3,008 - 0,3236} = 1,638$$

Οποτε $\frac{\sigma_{\mu\sigma}}{\sigma_{\pi}} * 100 = \frac{0,5689}{1,638} * 100 = 34.73\%$

Προηγουμένως εκτιμήθηκε ότι η αβεβαιότητα με την χρήση του μεγέθους $u_{Reprod} = 0,3266$ HRC με βάση τα πρότυπα δοκίμια, ενώ το μέγεθος $u_{Reprod} = 0,4791$ HRC εκτιμήθηκε με βάση τις μετρήσεις των 30 δοκιμίων των τριών διαφορετικών χειριστών. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε πως παρατηρούμε ότι με τη μέθοδο των προτύπων δοκιμίων η αβεβαιότητα είναι μικρότερη και ίση με:

$$u_{meas} = \sqrt{0.5477^2 + 0,4397^2 + 0.2887^2 + 0.7958^2} = 1.1 \text{ HRC}$$

Η διευρυμένη αβεβαιότητα U για μια δοκιμή είναι η αβεβαιότητα πολλαπλασιασμένη με τον συντελεστή κάλυψης 2 συν το σφάλμα μετρήσεων από τον υπολογισμό του u_{meas} ,

άρα $U_{meas} = 2 * u_{meas} \Leftrightarrow U_{meas} = 2 * 1,1163 \text{ HRC} = \pm 2,2 \text{ HRC}$

Οι 270 μετρήσεις που πήραμε εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα

Π3. Πίνακας μετρήσεων δοκιμίων

Δοκίμια	α/α	Μετρητές		
		Καφάσης	Μαστορίδου	Παπαγεωργίου
No 40	1	34	32	33
	2	35	32	34
	3	34	33	34
No 41	1	35	35	35
	2	35	35	35
	3	36	35	36
No 42	1	33	32	33

Καφάσης Α.- Εκτίμηση αβεβαιότητας σκληρομέτρου Innovatest κατά τη μέτρηση σκληρότητας με τη μέθοδο HRC βάσει προτύπων

	2	34	32	34
	3	33	33	34
No 43	1	34	33	34
	2	34	34	34
	3	34	34	34
No 44	1	35	35	35
	2	35	34	36
	3	35	34	35
No 45	1	36	35	35
	2	35	35	35
	3	36	35	35
No 46	1	36	34	35
	2	36	34	36
	3	36	34	35
No 47	1	31	30	31
	2	30	31	31
	3	31	31	31
No 48	1	31	31	31
	2	32	31	31
	3	31	31	31
No 49	1	37	37	37
	2	37	37	36
	3	37	37	37
No 50	1	31	30	31
	2	31	31	31
	3	31	31	31
No 51	1	32	32	33
	2	33	32	34
	3	33	32	33
No 52	1	31	31	32
	2	31	32	33
	3	32	31	32
No 53	1	34	34	34
	2	34	34	34
	3	34	34	34
No 54	1	34	33	33
	2	34	33	34
	3	35	32	34
No 55	1	33	32	33
	2	33	32	33
	3	32	32	33
No 56	1	34	32	34
	2	34	32	34
	3	33	32	34
No 57	1	33	32	33

Καφάσης Α.- Εκτίμηση αβεβαιότητας σκληρομέτρου Innovatest κατά τη μέτρηση σκληρότητας με τη μέθοδο HRC βάσει προτύπων

	2	32	33	33
	3	33	33	33
No 58	1	36	35	37
	2	36	36	37
	3	37	35	36
No 59	1	35	34	35
	2	35	35	35
	3	35	35	35
No 60	1	31	31	32
	2	32	32	34
	3	32	32	32
No 61	1	33	32	33
	2	33	32	33
	3	33	32	33
No 62	1	35	34	34
	2	34	34	35
	3	35	34	34
No 63	1	34	33	34
	2	34	34	34
	3	33	33	34
No 64	1	31	29	31
	2	32	30	30
	3	32	30	30
No 65	1	32	32	32
	2	32	33	33
	3	33	32	32
No 66	1	35	34	34
	2	35	34	34
	3	35	34	34
No 67	1	32	30	33
	2	33	30	32
	3	33	31	33
No 68	1	31	30	31
	2	31	31	32
	3	31	31	32
No 69	1	34	32	34
	2	34	33	34
	3	34	34	34

Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν



Εικόνα 26. Δοκίμια πρώτου δείγματος



Εικόνα 27. Δοκίμια δεύτερου δείγματος



Εικόνα 28. Δοκίμα τρίτου δείγματος



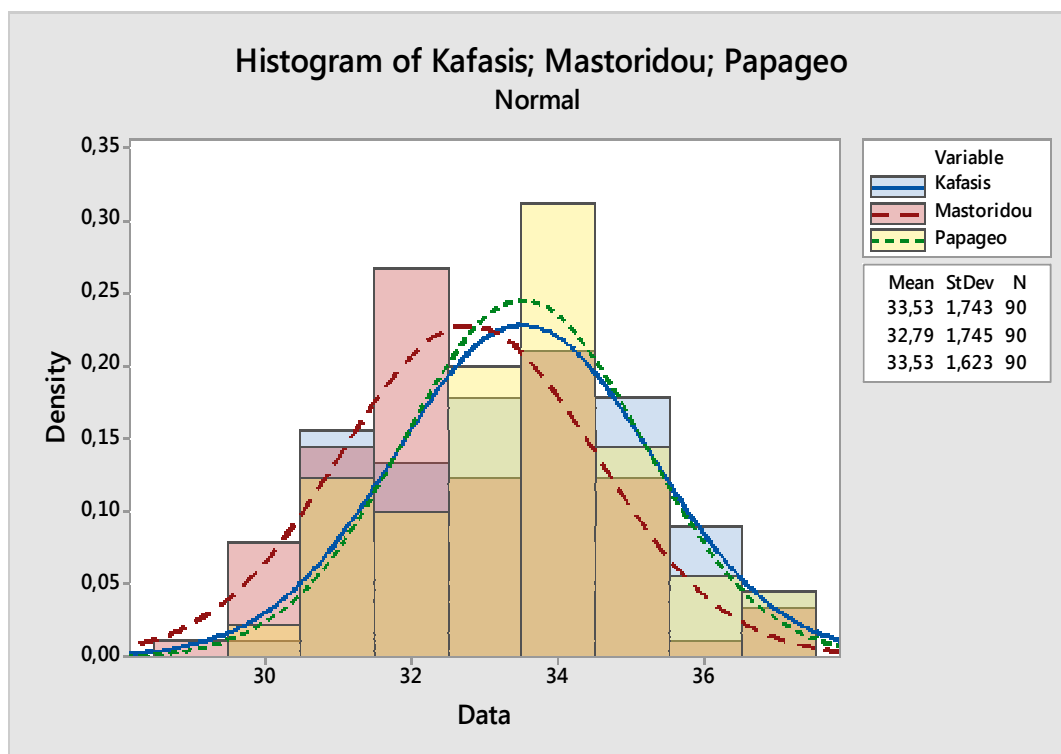
Εικόνα 29. Δοκίμα τέταρτου δείγματος



Εικόνα 30. Δοκίμα πέμπτου δείγματος

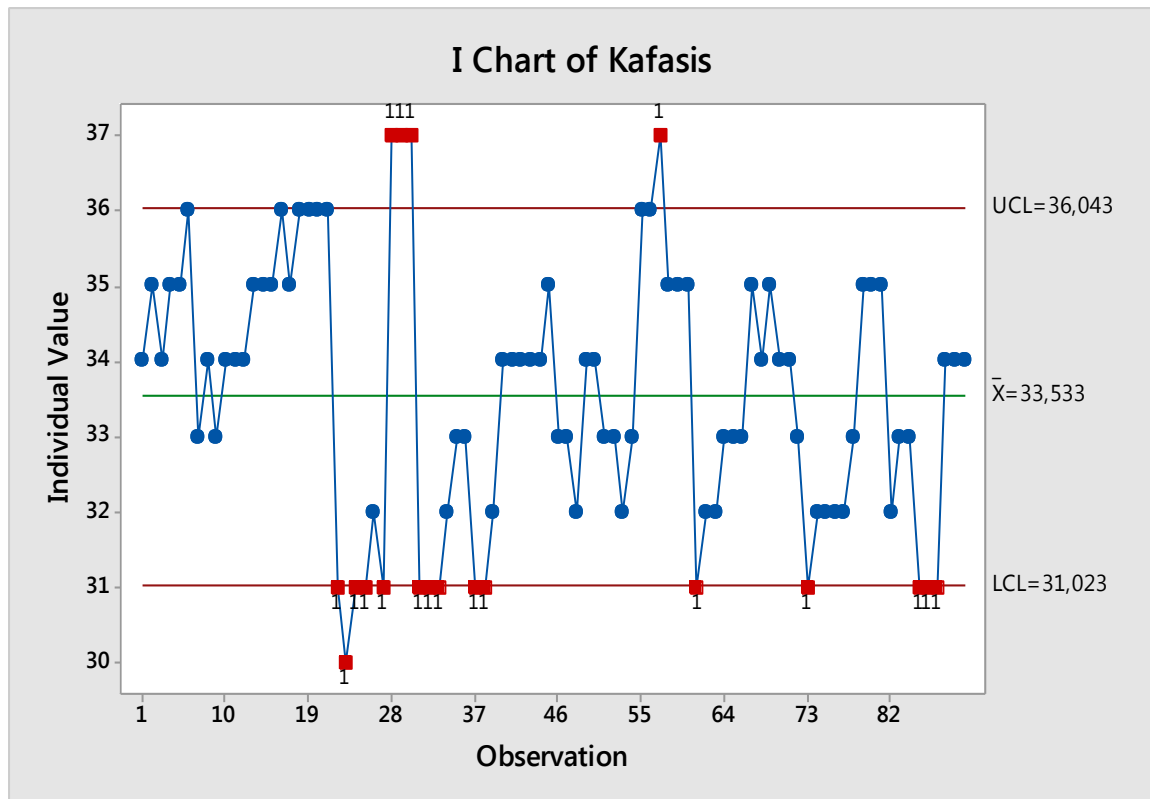
Διαγράμματα ελέγχου διεργασιών

Από τα διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε πως η χρήση της κανονικής κατανομής για τον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων ήταν αναγκαία, επίσης παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των τιμών που πήραμε είναι μέσα στα όρια των τριών τυπικών αποκλίσεων.

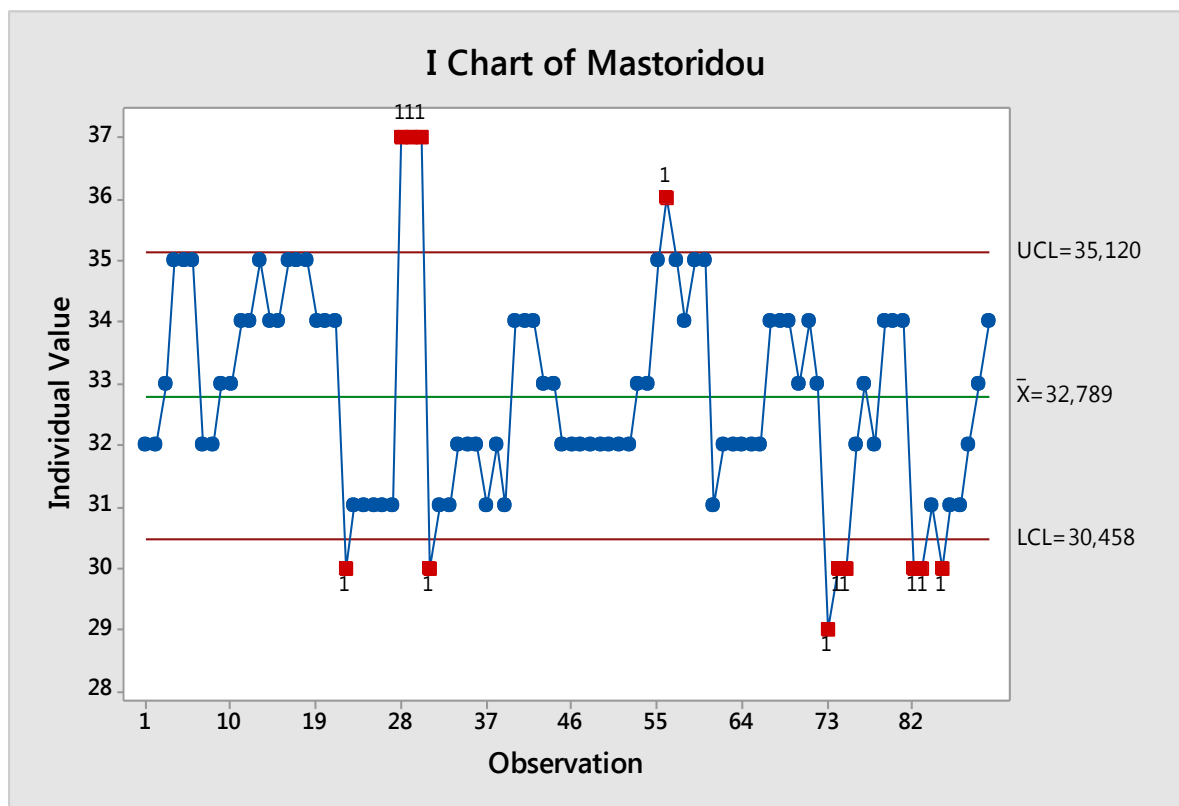


Εικόνα 31. Κατανομή για κάθε μετρητή

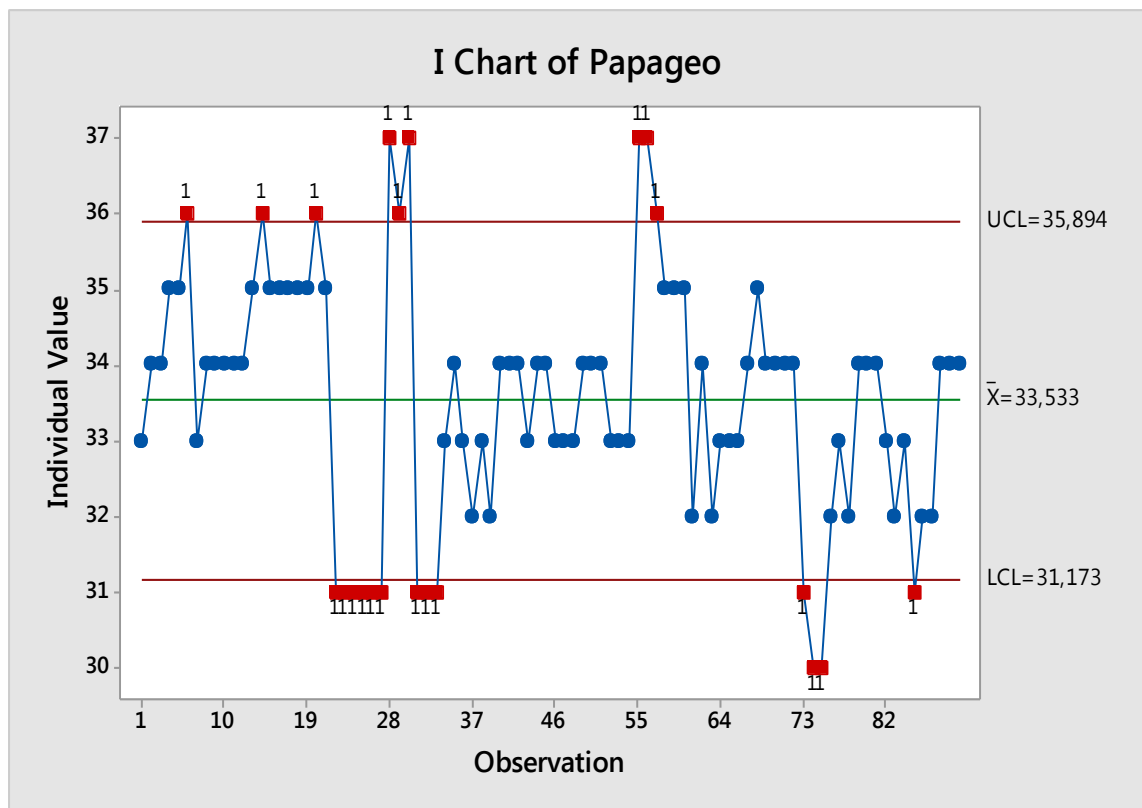
Καφάσης Α.- Εκτίμηση αβεβαιότητας σκληρομέτρου Innovatest κατά τη μέτρηση σκληρότητας με τη μέθοδο HRC βάσει προτύπων



Εικόνα 32. Διάγραμμα X-R για τον μετρητή Καφάσης

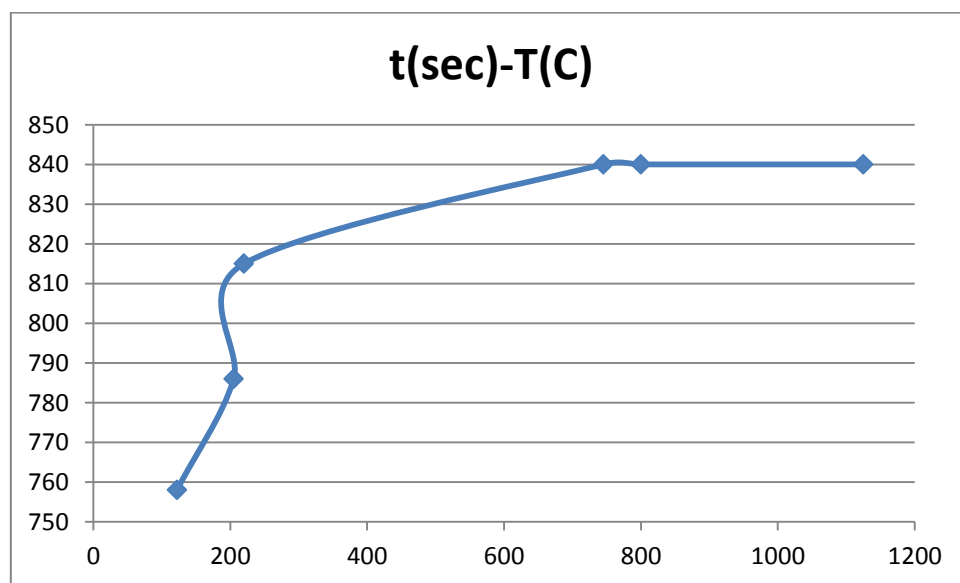


Εικόνα 33. Διάγραμμα X-R για τον μετρητή Μαστορίδου



Εικόνα 34. Διάγραμμα X-R για τον μετρητή Παπαγεωργίου

Διάγραμμα χρόνου – θερμοκρασίας φούρνου



Οριζόντιος άξονας = Χρόνος σε sec

Κάθετος άξονας = Θερμοκρασία σε °C

ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1) Η τιμή της βεβαιότητας στην περιοχή των 30 – 40 HRC βρέθηκε σχεδόν ίδια με απόκλιση της τάξεως μεγέθους εκατοστών της κλίμακας σκληρότητας HRC. Από αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε ότι και οι δύο τρόποι εύρεσης αναπαραγωγισιμότητας του οργάνου καταλήγουν περίπου στο ίδιο αποτέλεσμα. Ενώ ο μεν υπολογισμός μέσω των πρότυπων δοκιμίων η αβεβαιότητα είναι μικρότερη, η διαδικασία των μη πρότυπων είναι οικονομικότερη. Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήσαμε κατά τη διάρκεια του πειράματος μας θα χρησιμοποιηθούν μελλοντικά για την διεξαγωγή θερμικών κατεργασιών στα πλαίσια του μαθήματος ΠΕΤΥΛ.

2) Στα πλαίσια του μαθήματος ΠΕΤΥΛ, η τιμή της αβεβαιότητας που υπολογίσαμε θεωρείται ικανοποιητική για τυχόν εκπαιδευτικές διαδικασίες.

3) Μέσω της χρήσης των ιστογραμμάτων παρατηρούμε πως η μέση τιμή των τριών μετρητών κατά τη διαδικασία της σκληρομέτρησης έχει σχετικά πολύ μικρή απόκλιση. Επίσης από τα διαγράμματα των τριών μετρητών στο α μέρος παρατηρούμε πως από το σύνολο των 270 τιμών, μόλις 5 βρίσκονται εκτός άνω και κάτω του ορίου ελέγχου και αυτό μπορεί να οφείλεται σε συγκεκριμένους παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να είναι είτε κάποιο τυχαίο σφάλμα το οποίο δε μπορούμε να προσδιορίσουμε, είτε λάθος χειρισμός του εκάστοτε μετρητή που να μας έδωσε λάθος μέτρηση. Στο δεύτερο μέρος του πειράματος παρατηρούμε πως αρκετές από τις μετρήσεις βρίσκονται εκτός του ορίου ελέγχου, αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι δεν πετύχαμε ομοιογένεια στα δοκίμια κατά τη θερμική κατεργασία οπότε και εμφανίζονται αρκετές μετρήσεις με μεγάλη διαφορά.

4) Η ίδια μέθοδος υπολογισμού της αβεβαιότητας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για την εύρεση της αβεβαιότητας σε αρκετά μεγαλύτερες τιμές της κλίμακας Rockwell C.

Βιβλιογραφία

- [1]
<https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/ARCH404/%CE%98%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1%20%CE%94%CE%BF%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD%20%CE%A5%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD/0-N-On-Metals-1.pdf>, ημερομηνία προσπέλασης 10/7/2017.
- [2]
<http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/3%20MHXANIKH%20SYMPERIFORA.w.pdf>, ημερομηνία προσπέλασης 10/7/2017.
- [3]
http://e-physics.teipir.gr/HN/physics1_files/sfalmata.pdf, ημερομηνία προσπέλασης 12/7/2017.
- [4]
[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%BB%CE%AF%CF%88%CE%B7_\(%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE\)](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%BB%CE%AF%CF%88%CE%B7_(%CE%BC%CE%B7%CF%87%CE%B1%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AE)), ημερομηνία προσπέλασης 14/7/2017.
- [5]
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%86%CE%B5%CE%BB%CE%BA%CF%85%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82>, ημερομηνία προσπέλασης 14/7/2017.
- [6]
http://eclass.opencourses.teicm.gr/eclass/modules/document/file.php/TMA120/03_Hardness_tests.pdf, ημερομηνία προσπέλασης 16/7/2017.
- [7]
Βανακάρας Αλ., Δρακοπούλου Ευ., Μπασκούτας Σωτ., Ταγκούλης Β., Πλιάγκος Κ., Ψαρράς Γ., «Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών», Εκδόσεις Τζιόλα, 2008. Μετάφραση εκ του πρωτοτύπου «Materials Science and Engineering», Callister William Jr.
- [8]
ASTM E18 – 15, Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, American Society for Testing and Materials.