

Διαδικασία Διακρίβωσης και Μετρητική Αβεβαιότητα για τα Μικρόμετρα

Κ. Ν. ΑΘΑΝΑΣΙΑΔΗΣ
Δρ Τεχνικών Επιστημών

Περίληψη

Η επίτευξη ενιαίου τρόπου υπολογισμού των μετρητικών αβεβαιοτήτων σε εθνικό και διεθνή επίπεδο καθιστούν τις μετρήσεις αξιόπιστες διευκολύνοντας παράλληλα τη διαδικασία αλληλοσύγκρισης των αποτελεσμάτων των μετρήσεων μεταξύ εργαστηρίων διακρίβωσης. Η χρήση των μικρομέτρων στη βιομηχανία και στα εργαστήρια διακρίβωσης είναι συνεχής καθιστώντας τα από τα πλέον αξιόπιστα όργανα μέτρησης. Στην εργασία αυτή περιγράφεται διαδικασία διακρίβωσης μικρομέτρων για εξωτερικές μετρήσεις και γίνεται ανάλυση των πηγών, οι οποίες συμβάλλουν στη μετρητική αβεβαιότητα ενός μικρομέτρου, όπως η έλλειψη επιπεδότητας και παραλληλότητας των επιφανειών μέτρησης για τη διακρίβωση. Περιγράφεται μαθηματικό μοντέλο στη βάση του οποίου κατηγοριοποιούνται οι αβεβαιότητες τύπου Α και Β. Μέσω υπόθεσης εργασίας δίδεται συγκεντρωτικός πίνακας πηγών αβεβαιοτήτων και υπολογίζεται η συνολική και η διευρυμένη μετρητική αβεβαιότητα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μικρόμετρα είναι εργαλεία ακριβείας που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μικρών αποστάσεων από 0 μέχρι 25 cm και για μεγαλύτερες αποστάσεις μέχρι και 5 m. Το εύρος μέτρησης επιτυγχάνεται με τη χρήση εναλλασσόμενων (interchangeable) ακμών ή αλλιώς προεκτάσεων. Κατασκευάζονται δύο είδη μικρομέτρων, ο ένας για εξωτερικές μετρήσεις και ο άλλος για εσωτερικές.

Η απλότητα χρήσης και η μεγάλη ακρίβεια μέτρησης έχουν καταστήσει το μικρόμετρο ως ένα από τα βασικά όργανα μέτρησης στο εργαστήριο και στην παραγωγική διαδικασία. Το σπουδαιότερο εξάρτημα του μικρομέτρου είναι ο κοχλίας του [1]. Αυτός υλοποιεί τη διάσταση και μεγεθύνει την ένδειξη. Η λειτουργία των μικρομέτρων βασίζεται στη σχετική κίνηση κοχλίου-περικοχλίου. Το πλέον συνηθισμένο βήμα του κοχλίου είναι 0.5 mm και αυτός είναι ο λόγος που το περιστρεφόμενο τύμπανο του οργάνου φέρει περιμετρικά 50 υποδιαίρεσεις. Με αυτόν τον τρόπο αν το τύμπανο περιστραφεί κατά μια υποδιαίρεση, τότε μετατοπίζεται αξονικά ο κοχλίας κατά $0.5 : 50 = 0.01$ mm [2].

Στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια περιγραφής των βημάτων που πρέπει να ακολουθηθούν για τον έλεγχο και διακρίβωση των μικρομέτρων για εξωτερικές μετρήσεις, τα

οποία αποτελούνται από έναν σταθερό (non-removable) άκμονα (anvil) και από επίπεδες επιφάνειες μέτρησης.

Όταν πραγματοποιούνται μετρήσεις με μικρόμετρο, οι αβεβαιότητες που μπορούν να υπεισέλθουν κατά τη διαδικασία της μέτρησης θα μπορούσαν να είναι εξαιτίας:

1. του μετρητικού στελέχους (spindle error),
2. της έλλειψης επιπεδότητας μετρητικών επιφανειών μικρομέτρου,
3. της έλλειψης παραλληλότητας μετρητικών επιφανειών μικρομέτρου,
4. της αναγνωσιμότητας (ανθρώπινος παράγοντας),
5. της διαφορετικής εφαρμοζόμενης ροπής μέσω της καστάνιας για τη μέτρηση,
6. της διαφορετικής θερμοκρασίας μικρομέτρου αντικειμένου (εξωτερικός παράγοντας και όχι του μικρομέτρου η οποία όμως επηρεάζει τη μέτρηση),
7. της διαφορετικής ελαστικότητας υλικών (μέτρηση με σταθερή ροπή οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα αναλόγως των υλικών).

Γίνεται κατανοητό ότι αυτοί οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μέτρηση με μικρόμετρο δεν είναι κατ' ανάγκη και οι πηγές αβεβαιότητας κατά τη διαδικασία διακρίβωσης του οργάνου. Ο λόγος είναι ότι σε ένα εργαστήριο διακρίβωσης οι προαναφερθείσες πηγές αβεβαιότητας μειώνονται εξαιτίας του γεγονότος ότι:

- καταγράφονται οι περιβαλλοντικές συνθήκες όπως θερμοκρασία και σχετική υγρασία,
- η διακύμανση θερμοκρασίας δεν είναι μεγάλη κατά τη διάρκεια διακρίβωσης του οργάνου,
- υπάρχουν διακριβωμένες συσκευές όπως δυναμόκλειδα και ροπόκλειδα για την εφαρμογή γνωστής δύναμης και ροπής,
- υπάρχει εκπαιδευμένο προσωπικό για την πραγματοποίηση της διακρίβωσης,

Οι κύριες πηγές μετρητικής αβεβαιότητας, οι οποίες πηγάζουν από τη διαδικασία διακρίβωσης μέσω προτύπων πλακιδίων και συμβάλλουν στη μετρητική αβεβαιότητα ενός μικρομέτρου, είναι οι:

- έλλειψη επιπεδότητας και παραλληλότητας των επιφανειών μέτρησης,

- αβεβαιότητα στο μήκος των προτύπων πλακιδίων,
- διαφορική θερμοκρασία,
- αναγνωσιμότητα.

Με βάση αυτές τις πηγές μετρητικής αβεβαιότητας περιγράφεται μαθηματικό μοντέλο στη βάση του οποίου κατηγοριοποιούνται οι αβεβαιότητες τύπου Α και Β. Μέσω παραδείγματος δίδεται ο συγκεντρωτικός πίνακας του ισοζυγίου πηγών αβεβαιότητας και υπολογίζεται η συνολική και η διευρυμένη μετρητική αβεβαιότητα.

2. ΠΡΟΣΩΠΙΚΟ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

Όλος ο εξοπλισμός (όργανα διακρίβωσης και το υπό διακρίβωση μικρόμετρο με το συνοδευτικό τους εξοπλισμό) πρέπει να φυλάσσεται σε χώρο εντός του εργαστηρίου, στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η διακρίβωση και στο οποίο η θερμοκρασία και η υγρασία καταγράφονται και ελέγχονται. Ο χρόνος που πρέπει να παρέλθει για να ξεκινήσει η διακρίβωση του μικρομέτρου ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος και τον όγκο του οργάνου (και κυμαίνεται από 6 έως 24 ώρες). Με βάση το πρότυπο DIN 863 [3], όλες οι μετρήσεις σε συσκευές για μετρήσεις διαστασιακών μεγεθών όπως τα μικρόμετρα, πρέπει να υλοποιούνται σε θερμοκρασία χώρου: $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Όσο πιο μικρό το εύρος διακύμανσης της θερμοκρασίας τόσο μικρότερη είναι η αβεβαιότητα που εξαιτίας της διακύμανσης αυτής υφαισθάνεται στο ισοζύγιο μετρητικής αβεβαιότητας.

Το **προσωπικό**, που μπορεί να επιτελέσει τη διακρίβωση των μικρομέτρων, πρέπει να είναι εκπαιδευμένο για μετρήσεις ακριβείας, χρήση προτύπων οπτικών πλακιδίων (optical flats), χρήση κυρίως εξοπλισμού του εργαστηρίου για τη διακρίβωση του μικρομέτρου και του βοηθητικού εξοπλισμού της. Επίσης, θα πρέπει το προσωπικό να έχει εκπαιδευτεί στις προφυλάξεις που είναι απαραίτητες όταν χειρίζονται επίπεδες επιφάνειες μεγάλης ακριβείας.

Για τη διακρίβωση ενός μικρομέτρου χρησιμοποιείται κυρίως ο εξής εξοπλισμός:

- πρότυπα πλακίδια,
- πρότυποι ράβδοι μεγάλου μήκους,
- οπτικά πλακίδια για μέτρηση παραλληλότητας (Optical Parallels),
- οπτικά πλακίδια για μέτρηση επιπεδότητας (Optical Flats),
- δυναμόμετρο για μέτρηση της καστανίας του οργάνου.

Η επιπεδότητα των επιφανειών μέτρησης υπολογίζεται με οπτικά πλακίδια επιπεδότητας (Optical Flats).

Η παραλληλότητα των επιφανειών μέτρησης υπολογίζεται με πρότυπα οπτικά πλακίδια (Optical Parallels). Για μεγάλου εύρους μικρόμετρα μπορεί να χρησιμοποιηθούν και άλλες συσκευές όπως Universal Measurement Machine.

Η μέτρηση της κλίμακας του μικρομέτρου, πραγματοποιείται σε σύγκριση με συνδυασμό προτύπων πλακιδίων (Gauge Blocks).

Η μετρητική αβεβαιότητα του μικρομέτρου προσδιορί-

ζεται σε σύγκριση με συνδυασμό προτύπων πλακιδίων και ορίζεται ως η διαφορά της ένδειξης του μικρομέτρου και της ονομαστικής τιμής των προτύπων πλακιδίων.

Για να είναι δυνατή η διακρίβωση των μικρομέτρων τα παραπάνω όργανα και συσκευές, πρέπει να είναι διακριβωμένα, ώστε να εξασφαλίζουν ιχνηλασιμότητα μετρήσεων σε εθνικά ή διεθνή πρότυπα μήκους [4]. Οι χρόνοι επαναδιακρίβωσης όλων των προτύπων που χρησιμοποιούνται για τις διακρίβώσεις, πρέπει να είναι καταγραμμένοι σε ειδικό φάκελο και να ορίζονται στο εγχειρίδιο ποιότητας του εργαστηρίου ή σε μια από τις τεχνικές διαδικασίες του εργαστηρίου [5].

Πριν την έναρξη των μετρήσεων, επιβάλλεται η διεξοδική μελέτη του υπό διακρίβωση μικρομέτρου. Σε περίπτωση αντίχενωσης προβλήματος ή ύπαρξης αμφιβολιών, ως προς τη σωστή λειτουργία του οργάνου, πρέπει να υπάρξει συνεννόηση με τον πελάτη για τη συνέχιση ή μη της διακρίβωσης, την ανάγκη επισκευής του οργάνου ή όχι κ.λπ.

Τα όργανα πρέπει να καθαρίζονται με τη βοήθεια καθαριστικού που περιέχει τολουόνη ή τριχλωροαιθυλένιο και το οποίο δεν αφήνει λεπτό στρώμα πάνω στις επιφάνειες που έχουν καθαριστεί με το υλικό.

Σε κάθε όργανο, με την παραλαβή του στο εργαστήριο, πρέπει να τοποθετείται καρτέλα, όπου καταγράφονται τα στοιχεία, τα οποία περιγράφουν το όργανο όπως [5]: κατασκευαστής και τύπος του υπό διακρίβωση οργάνου, αριθμός σειράς του οργάνου, ημερομηνία παραλαβής του οργάνου. Εάν το όργανο συνοδεύεται από ελεγκτήρα, τοποθετείται μικρή καρτέλα με τον αριθμό σειράς του μικρομέτρου, στο οποίο ανήκει ο ελεγκτήρας. Σε περίπτωση ύπαρξης δύο ή περισσότερων ελεγκτήρων του ίδιου μικρομέτρου, τοποθετείται σε κάθε ελεγκτήρα για το διαχωρισμό τους ένα χαρακτηριστικό (όπως π.χ. γράμμα της λατινικής αλφαβήτου Α, Β, C κ.τ.λ.).

Το εργαστήριο είναι δυνατό να δέχεται επισκέψεις. Οι επισκέπτες με βάση το εγχειρίδιο ποιότητας του εργαστηρίου δεν πρέπει να γνωρίζουν σε ποιον πελάτη ανήκουν τα συγκεκριμένα όργανα μέτρησης, ώστε να μην εξάγουν βεβιασμένα συμπεράσματα σε περίπτωση που τα όργανα είναι παλιά ή λερωμένα. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο στην προαναφερόμενη καρτέλα τοποθετείται κωδικός πελάτη και όχι το όνομα αυτού [5].

3. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗΣ ΜΙΚΡΟΜΕΤΡΩΝ

Η διακρίβωση ενός μικρομέτρου μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω διαδικασιών, οι οποίες βασίζονται σε διάφορα διεθνή πρότυπα. Τα πιο γνωστά από τα διεθνή πρότυπα είναι τα DIN 863 [3] και ISO 3611 [6]. Η συγκεκριμένη τεχνική διαδικασία διακρίβωσης βασίζεται στο ISO 3611: 1978 [6].

Κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης τα αποτελέσματα του ελέγχου και των άλλων μετρήσεων καταγράφονται σε Πρωτόκολλο διακρίβωσης.

3.1 Έλεγχος μικρομέτρου

3.1.1 Έλεγχος σφικκτήρα:

Περιστροφή του σφικκτήρα μέχρι να φτάσει στη θέση σύσφιξης του άξονα. Με τη βοήθεια της καστανίας ή αν η καστανία απουσιάζει, με το χέρι μας, ελέγχεται αν σφίγγει σωστά το μετρητικό στέλεχος, ο σφικκτήρας.

3.1.2 Έλεγχος καστανίας:

Μέτρηση, με τη βοήθεια διακριβωμένου δυναμόμετρου, της δύναμης που εφαρμόζεται στις επιφάνειες μέτρησης του οργάνου, με την περιστροφή της καστανίας (εφόσον υπάρχει). Η δύναμη αυτή πρέπει να κείται στο εύρος (5–15) N [3,6].

Εάν απουσιάζει ή είναι κατεστραμμένη η καστανία, τότε με τη βοήθεια διακριβωμένου δυναμόκλειδου, εφαρμόζουμε στις επιφάνειες μέτρησης του οργάνου δύναμη ίση με 10 N. Με τη δύναμη αυτή γίνονται οι μετρήσεις. Η απουσία ή η βλάβη της καστανίας καταγράφεται.

3.1.3 Έλεγχος της θέσης '0' (αρχή της κλίμακας) του οργάνου

Το όργανο ελέγχεται, με τοποθέτηση προτύπων πλακιδίων ανάμεσα στις επιφάνειες μέτρησης, ως προς την ένδειξη του στη θέση '0'. Εφόσον υπάρχει απόκλιση, καταγράφεται και γίνεται η επαναφορά, αν αυτό το επιτρέπει το όργανο.

Στα μικρόμετρα με προεκτάσεις, ο έλεγχος της θέσης '0', πραγματοποιείται με κάθε μία από τις προεκτάσεις. Ανάμεσα στις επιφάνειες μέτρησης τοποθετείται συνδυασμός προτύπων πλακιδίων με ονομαστικό μήκος - το μήκος που αναφέρεται στην ένδειξη '0' του μικρομέτρου. Γίνεται καταγραφή των ενδείξεων. Εφόσον υπάρχει απόκλιση από την θέση '0' γίνεται επαναφορά (εφόσον αυτό είναι δυνατόν) αλλάζοντας το μήκος της προέκτασης.

Εφόσον οι προεκτάσεις του μικρομέτρου δεν επιδέχονται αλλαγές, η επαναφορά στη θέση μηδέν γίνεται με τη βοήθεια του μετρητικού στελέχους, με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε η απόκλιση από τη θέση '0' για όλες τις προεκτάσεις να είναι η μικρότερη δυνατή.

3.2 Διακρίβωση μικρομέτρου

3.2.1 Επιβεβαίωση της κλίμακας του οργάνου

Η μέτρηση της κλίμακας του οργάνου πραγματοποιείται με τη βοήθεια σετ προτύπων πλακιδίων.

Εφόσον το εύρος κλίμακας του μικρομέτρου είναι άνω των 25 mm, χρησιμοποιούνται πρότυπα πλακίδια από άλλα σετ προτύπων πλακιδίων, για να καλύψουν το εύρος μέτρησης του οργάνου.

Το όργανο ελέγχεται [3,6] σε 11 σημεία της κλίμακας του (0.0, 2.5, 5.1, 7.7, 10.3, 12.9, 15.0, 17.6, 20.2, 22.8, και 25.0 mm), τα οποία αντιστοιχούν σε διαφορετικές γωνιακές θέσεις του άξονα περιστροφής (spindle). Για κάθε πρότυπο μήκος σημειώνεται η ένδειξη του οργάνου στρογγυλοποιημένη στην πλησιέστερη υποδιαίρεση του οργάνου.

3.2.2 Μετρήσεις επιπεδότητας

Οι μετρήσεις επιπεδότητας, γίνονται με τη βοήθεια των προτύπων οπτικών πλακιδίων (optical flats).

Τα οπτικά πλακίδια τοποθετούνται σε κάθε μία από τις επίπεδες επιφάνειες του μικρομέτρου. Το σχήμα και ο αριθμός των κροσσών που σχηματίζονται μας δείχνουν το βαθμό επιπεδότητας της επιφάνειας. Ο αριθμός των κροσσών συμβολής που σχηματίζεται πάνω στην επιφάνεια δεν πρέπει να ξεπερνά τους τέσσερις ή αλλιώς η έλλειψη επιπεδότητας δεν πρέπει να είναι άνω του 1 μm [3,6].

3.2.3 Μετρήσεις παραλληλότητας

Οι μετρήσεις παραλληλότητας, γίνονται:

1. με το σετ οπτικών πλακιδίων (optical flats) για μικρόμετρα 0 - 25 mm. Το σετ, μέσω τεσσάρων κρυστάλλων διαφορετικού πάχους, καλύπτει μια πλήρη περιστροφή του άξονα του μικρομέτρου (spindle).
2. με το σετ οπτικών πλακιδίων (optical flats), τη βοήθεια προτύπων πλακιδίων και προτύπων ράβδων, για μικρόμετρα άνω των 25 mm,
3. με τη βοήθεια Universal Measurement Machine, για μικρόμετρα άνω των 25 mm.

Για τη μέτρηση παραλληλότητας στα μικρόμετρα 0 – 25 mm, τοποθετείται κάθε κρύσταλλος, από το προαναφερθέν σετ, ανάμεσα στις επιφάνειες επαφής και με τη βοήθεια της καστανίας έρχεται σε επαφή με τις επιφάνειες του μικρομέτρου. Προσπαθούμε από την μια πλευρά του κρυστάλλου να περιορίσουμε, όσο μπορούμε, τον αριθμό των κροσσών συμβολής. Στην απέναντι πλευρά, μετράμε τον αριθμό των κροσσών, ο οποίος και μας δείχνει την έλλειψη παραλληλότητας.

Η μέτρηση παραλληλότητας για μικρόμετρα μεγαλύτερου εύρους, μέχρι και 500 mm, γίνεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με τη διαφορά ότι παρεμβάλλεται ένα πρότυπο πλακίδιο (gauge block) ανάμεσα στους κρυστάλλους, που έχει ενωθεί με αυτούς, μέσω της διαδικασίας wringing, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο πρότυπο παραλληλότητας. Το μήκος του προτύπου πλακιδίου, το οποίο παρεμβάλλεται ανάμεσα στους κρυστάλλους, επιλέγεται, έτσι, ούτως ώστε

οι μετρήσεις να γίνονται σε σημεία, τα οποία καλύπτουν την απαίτηση για πλήρη περιστροφή του άξονα του μικρομέτρου (spindle).

Η μέτρηση παραλληλότητας σε μικρόμετρα εύρους, μέχρι και 500 mm, μπορεί να γίνει με τη χρήση Universal Measurement Machine ή και άλλης συσκευής μέτρησης εσωτερικών διαστάσεων. Σε κάθε περίπτωση βρίσκουμε τη μεγαλύτερη δυνατή απόσταση στο κέντρο των επιφανειών μέτρησης του μικρομέτρου. Μηδενίζουμε την ένδειξη του οργάνου. Μετακινώντας τους άξονες της συσκευής σε σχήμα σταυρού, παρατηρούμε την απόκλιση από τη μέγιστη απόσταση, στην οθόνη. Η μεγαλύτερη τιμή, που θα παρατηρήσουμε, αναφέρεται στην έλλειψη παραλληλότητας του μικρομέτρου.

4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

Το υπό διακρίβωση μικρόμετρο θεωρούμε ότι έχει εύρος μέτρησης 0 - 25 mm και διακριτότητα 0.001 mm.

Το σφάλμα του μικρομέτρου προσδιορίζεται σε σύγκριση με συνδυασμό προτύπων πλακιδίων, για τη μέτρηση του σφάλματος του μετρητικού στελέχους και σειράς προτύπων οπτικών πλακιδίων (optical flats), για τη μέτρηση της παραλληλότητας και επιπεδότητας των επιφανειών μέτρησης. Τα πρότυπα πλακίδια έχουν ονομαστικό μήκος: 2.5, 5.1, 7.7, 10.3, 12.9, 15.0, 17.6, 20.2, 22.8 και 25.0 mm. Επομένως η συνολική μετρητική αβεβαιότητα θα είναι συνδυασμός της απόκλισης της ένδειξης του μετρητικού στελέχους από το ονομαστικό μήκος των προτύπων πλακιδίων και του σφάλματος, που προστίθεται, λόγω της έλλειψης επιπεδότητας ή και παραλληλότητας των επιφανειών μέτρησης του μικρομέτρου.

4.1 Μαθηματικό μοντέλο

$$Y_{UR} = X_{STD} + Error \quad (4.1)$$

όπου:

- Y_{UR} – η ανάγνωση του μικρομέτρου,
- X_{STD} – το ονομαστικό μήκος του προτύπου πλακιδίου,
- $Error$ – η διαφορά μεταξύ της ένδειξης του μικρομέτρου και του μήκους του προτύπου πλακιδίου.

Για τον υπολογισμό της μετρητικής αβεβαιότητας $Error$, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τις επιμέρους αβεβαιότητες, που υφίστανται λόγω έλλειψης παραλληλότητας του άξονα περιστροφής (spindle) με το σταθερό άκμονα (anvil) καθώς επίσης και της έλλειψης επιπεδότητας των επιφανειών μέτρησης του μικρομέτρου.

Η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα, δίδεται από τον τύπο (4.2)[4]:

$$U_C(Y_{UR}) = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial Y_{UR}}{\partial X_{STD}}\right)(U(X_{STD}))\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial Y_{UR}}{\partial Error}\right)(U(Error))\right]^2} \quad (4.2)$$

4.2 Αποτελέσματα μετρήσεων

Έγιναν τρεις μετρήσεις για κάθε ονομαστικό μήκος του προτύπου πλακιδίου. Η απόκλιση ένδειξης από την ονομαστική τιμή δίνεται στον πίνακα 1 που ακολουθεί:

Πίνακας 1: Απόκλιση ένδειξης μικρομέτρου από την ονομαστική τιμή του Προτύπου Πλακιδίου.

Table 1: Difference between the observation value and the reference standard.

Gauge block length, mm	Observation Value, mm			Standard Deviation, μm
2.5	0	0	0	0
5.1	0	0.001	0.001	0.577
7.7	0.001	0	0.001	0.577
10.3	0.001	0.001	0	0.577
12.9	0	0	0	0
15	-0.001	0	-0.001	0.547
17.6	-0.001	0	0	0.548
20.2	0	0.001	0	0.548
22.8	0.001	0.001	0.001	0
25	0.001	0	0.001	0.577

4.3 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου A

Η αβεβαιότητα τύπου A εξάγεται από τον παραπάνω πίνακα με βάση τη μέγιστη τυπική απόκλιση.

Η τυπική αβεβαιότητα (Standard uncertainty) U_M δίδεται από τη σχέση:

$$U_M = \frac{\text{Standard Deviation}}{\sqrt{n}} \quad (\text{όπου } n=3) \quad (4.3)$$

$$\Rightarrow U_M = \frac{0.577}{1.73} \Rightarrow U_M = 0.333 \mu\text{m}.$$

4.4 Εκτίμηση αβεβαιοτήτων τύπου B

Οι αβεβαιότητες ως προς το μήκος των προτύπων πλακιδίων U_{GB} , ως προς την έλλειψη επιπεδότητας και παραλληλότητας U_{OF} των ίδιων των οπτικών προτύπων που αναφέρονται στο πιστοποιητικό διακρίβωσης των προτύπων πλακιδίων, καθώς επίσης και στα πιστοποιητικά διακρίβωσης των προτύπων οπτικών πλακιδίων, είναι αβεβαιότητες τύπου B της κανονικής κατανομής.

Για διάστημα ενός σ (1σ), όπου σ - η τυπική απόκλιση έχουμε:

- Για τα πρότυπα πλακίδια, κατηγορίας 00 και μήκους < 100mm, η εκτίμηση της αβεβαιότητας δίδεται από τη σχέση:

$$U_{GB} = 0.15 / 2 = 0.075 \mu\text{m}. \quad (4.4)$$

- Η αβεβαιότητα για πρότυπα οπτικά πλακίδια, ως προς μετρήσεις επιπεδότητας ή παραλληλότητας:

$$U_{OF} = 0.05 / 2 = 0.025 \mu\text{m}. \quad (4.5)$$

- Ένας άλλος τύπος αβεβαιότητας τύπου B έχει σχέση με την διακριτότητα του μικρομέτρου, η οποία στην περίπτωση μας είναι 0.001 mm και κατατάσσεται στην ορθογωνική κατανομή:

$$U_{RES} = \frac{1}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0.289 \mu\text{m}. \quad (4.6)$$

Λόγω του ότι το πρότυπο πλακίδιο και το μικρόμετρο είναι κατασκευασμένα από χάλυβα, υποθέτουμε ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του προτύπου πλακιδίου και του μικρομέτρου θα είναι μηδέν με μια αβεβαιότητα ± 0.5 °C. Αυτή η τιμή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας λόγω θερμικής διαστολής/συστολής, από τη σχέση: 0.02 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$. Η θερμοκρασία ελέγχθηκε μεταξύ των ορίων και θεωρείται ότι έχει ορθογωνική κατανομή.

4.5 Συγκεντρωτικός πίνακας Μετρητικών Αβεβαιοτήτων

Πίνακας 2. Ισοζύγιο Μετρητικών Αβεβαιοτήτων
Table 2. Measurement Uncertainty budget

Πηγή Αβεβαιότητας	Τύπος	U_i	Τιμή Αβεβαιότητας (μm)	Πιθανή Κατανομή	Ενεργοί Βαθμοί Ελευθερίας
Επαναληψιμότητα	A	U_M	0.333	t-κατανομή	2
Πρότυπο πλακίδιο	B	U_{GB}	0.075	Κανονική	∞
Παραλληλότητα προτύπων οπτικών πλακιδίων	B	U_{OF}	0.025	Κανονική	∞
Συστολή / διαστολή	B	U_{TH}	0.02	Ορθογωνική	∞
Διακριτότητα	B	U_{RES}	0.289	Ορθογωνική	∞

4.6 Συνδυασμένη αβεβαιότητα

Η συνδυασμένη αβεβαιότητα θα είναι:

$$U_C(Y_{UR}) = \sqrt{U_M^2 + U_{GB}^2 + U_{OF}^2 + U_{TH}^2 + U_{RES}^2} \quad (4.7)$$

$$= \sqrt{0.333^2 + 0.075^2 + 0.025^2 + 0.02^2 + 0.289^2}$$

$$= 0.45 \mu\text{m}.$$

$$v_{eff} = \frac{U_C^4}{\frac{U_M^2}{n-1} + \frac{U_{GB}^2}{\infty} + \frac{U_{OF}^2}{\infty} + \frac{U_{TH}^2}{\infty} + \frac{U_{RES}^2}{\infty}} \quad (4.8)$$

$$= \frac{0.45^4}{\frac{0.333^4}{2}} = 6$$

Από τον πίνακα τιμών για την t – κατανομή, το $k = 2.45$ για βαθμό ελευθερίας $\nu = 6$ και για διάστημα εμπιστοσύνης 95%.

Η διευρυμένη αβεβαιότητα θα ισούται:

$$U = kU_C(Y_{UR}) \quad (4.9)$$

$$= 2.45 \times 0.45$$

$$= 1.10 \mu\text{m}.$$

4.7. Ενεργοί βαθμοί ελευθερίας

Οι ενεργοί βαθμοί ελευθερίας υπολογίζονται ως ακολούθως:

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το τελικό αποτέλεσμα της διακρίβωσης δίνεται ως εξής:

Η αβεβαιότητα η σχετιζόμενη με τη διακρίβωση είναι $\pm 0.0011 \text{ mm}$ για διάστημα εμπιστοσύνης περίπου 95%.

Η αβεβαιότητα που αναφέρεται είναι το γινόμενο της συνδυασμένης αβεβαιότητας (U_c) με το συντελεστή κάλυψης $k = 2.45$ (διευρυμένη αβεβαιότητα) και προσδιορίστηκε σύμφωνα με το έντυπο «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements» (ISO 1995). Γενικώς, η τιμή της μετρούμενης ποσότητας περιέχεται στο προσδιοριζόμενο εύρος με πιθανότητα 95% περίπου. Η εκτίμηση της αναφερόμενης αβεβαιότητας δεν εμπεριέχει ενδεχόμενες μακροπρόθεσμες μεταβολές. Οι συμμεταβλητότητες γενικώς δεν λαμβάνονται υπόψη.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή περιγράφηκε διαδικασία διακρίβωσης μικρομέτρων με επίπεδες επιφάνειες μέτρησης για εξωτερικές μετρήσεις. Μετά από ανάλυση των πηγών μετρητικής αβεβαιότητας κατά τη χρήση ενός μικρομέτρου για τη μέτρηση αποστάσεων αποδείχτηκε ότι αυτές δεν είναι

κατ' ανάγκη και οι πηγές μετρητικής αβεβαιότητας μιας διαδικασίας διακρίβωσης ενός μικρομέτρου. Έτσι, με τη χρήση μαθηματικού μοντέλου και μετά τον υπολογισμό των μετρητικών αβεβαιοτήτων που επηρεάζουν μια διαδικασία διακρίβωσης, σχηματίστηκε συγκεντρωτικός πίνακας του ισοζυγίου των μετρητικών αβεβαιοτήτων. Με βάση αυτό το μαθηματικό μοντέλο υπολογίστηκε η συνολική και διευρυμένη μετρητική αβεβαιότητα, η οποία βρέθηκε εντός των ορίων που δίδουν τα διαπιστευμένα εργαστήρια διακρίβωσης για διακριβώσεις μικρομέτρων.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Πετρόπουλος Π., **Μαθήματα μηχανουργικής τεχνολογίας, Μετροτεχνία**, Θεσ/νίκη, Εκδόσεις ΑΠΘ, Πολυτεχνική Σχολή, σελ. 237, 1985.
2. Braun H., Doll W., Fischer U. κ.ά., **Μετροτεχνία**, Αθήνα, Εκδοτικός όμιλος ΙΩΝ, Σειρά: Βιβλιοθήκη του Μηχανολόγου, σελ. 104, 1996.
3. DIN 863, **Verification of geometrical parameters - Micrometers - Parts 1-4**, DIN Verlag, Germany, 04-1994.
4. ISO **Guide to the expression of uncertainty in measurement**, p110, 1995.
5. ISO/IEC 17025:2005 **General requirements for the competence of testing and calibration laboratories**, p28, 2005.
6. ISO 3611:1978, **Micrometer callipers for external measurement**, p6, 1978.

Extended summary

Calibration Procedure and Measurement Uncertainty for External Micrometers

K. N. ATHANASSIADIS

PhD in Technical Sciences

Abstract

Finding a single way of calculating measurement uncertainties at a national and international level, while at the same time rendering the measurements reliable, facilitates the process of comparing measurement results between calibration laboratories. Micrometers are widely used in industry and in calibration laboratories and are among the most reliable measurement instruments. This paper describes the process of micrometer calibration for external measurements and analyses the elements that contribute to the uncertainty of those measurements, such as the flatness and parallelism of measurement surfaces. A mathematical model is described for categorising uncertainties of type A and B and the expanded and extended measurement uncertainty is calculated.

1. INTRODUCTION

This work refers to the control and calibration of micrometer callipers for external measurements up to 5 m. Micrometer callipers have a non-removable or an interchangeable anvil and flat measuring surfaces.

During the process of measurement with a micrometer the total measurement uncertainty is a combination of the reading of the scale related to the nominal gauge block length, and the uncertainty added due to the lack of flatness and/or parallelism of the measuring surfaces of the micrometer, the force applied on the measuring surfaces of the instrument during the rotation of the ratchet, plus the temperature difference between the micrometer and the gauge block.

It is easy to appreciate that those factors that influence micrometer measurements are not necessarily the same sources of uncertainty that are involved in the instrument's calibration. The reason is that in a calibration laboratory the above sources of uncertainty are decreased because the temperature and humidity of the air are controlled and recorded, the fluctuation of temperature is not large during the calibration process, all the equipment is calibrated and only those staff who have training in precision measurements may undertake the calibration of the instrument.

Submitted: Nov. 21. 2005 Accepted: July 3. 2006

The main sources that contribute to measurement uncertainty during micrometer calibration are: I) the lack of flatness and/or parallelism of the measuring surfaces of the micrometer; II) the gauge block size; III) uncertainty due to the difference between the micrometer reading and the gauge block nominal length; IV) the temperature difference between the micrometer and the gauge block; and V) uncertainty due to the instrument's resolution.

Given these sources of measurement uncertainty, a mathematical model is described for categorising the uncertainties of type A and B. The uncertainty budget of measurement is given and the expanded and extended measurement uncertainty are calculated for the micrometer under calibration, which is considered to be an instrument with 0-25 mm range and 0.001 mm resolution.

2. STAFF AND EQUIPMENT

Only staff who have training in precision measurements, the use of reference optical flats, the use of the universal measurement machine and its ancillary equipment, may undertake the calibration of the micrometers. They must also have been trained in the precautions necessary when handling precision surfaces.

All equipment must be located in a place where the temperature ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3]) and humidity of the air are controlled and recorded.

The listed instruments and equipment are used for micrometer calibration and must themselves be calibrated [4]:

- Gauge Blocks
- Gauge Bars
- Optical Parallels
- Optical Flats
- Dynamometer

Every instrument, after its arrival at the laboratory, must be labelled with information that describes the instrument and also the customers' code name [5].

3. CALIBRATION PROCEDURE OF MICROMETERS

A calibration procedure relies on local and international standards such as DIN 863 [3] and ISO 3611 [6]. During the calibration the results must be written on the protocol sheet.

Clamp ring test. Using the ratchet stop, or a hand in case the ratchet stop is absent, the clamp ring is checked for clamping.

Ratchet stop check. Measurement using a calibrated dynamometer, of the force applied to the measuring surfaces of the instrument during the rotation of the ratchet. This force should lie between 5-15N [3, 6].

'Zero' position checks. The instrument is checked, using reference gauge blocks between the measuring surfaces, for the indication in the '0' position. If there is a deviation, it is recorded on the protocol sheet and a correction is made, if possible. The correction to '0' point is made using the thimble, so that the deviation from '0' point remains as small as possible.

The measurement uncertainty of the micrometer is determined by the comparison with a combination of gauge blocks in order to measure the error of the scale and optical flats for the parallelism and flatness measurements.

The instrument is examined at 11 points (0.0, 2.5, 5.1, 7.7, 10.3, 12.9, 15.0, 17.6, 20.2, 22.8, and 25.0 mm) of its scale, which correspond to different points of the rotation of the spindle [3, 6].

If the measuring width of the micrometer is more than 25 mm, then another set of gauge blocks or bars is used to cover the measuring width of the instrument.

Flatness measurements are made using optical flats. The optical flats are placed on each flat measuring surface of the micrometer. The number and shape of the generated fringes gives an assessment of the flatness of the surface. The number of fringes should not be more than 4, or the lack of flatness should not be more than 1 μm [3, 6].

Parallelism measurements are made:

1. using the optical flats for micrometers 0-25 mm. This set, via 4 crystals of different widths, covers a whole rotation of the spindle of the micrometer.
2. using the optical flats, the standard gauge blocks and reference standard bars, for micrometers more than 25 mm and
3. using universal (length) measuring machine, for micrometers more than 100 mm.

4. UNCERTAINTY OF MEASUREMENTS

The micrometer under calibration is considered to have 0-25 mm range and 0.001 mm resolution.

Eq. (4.1) gives the mathematical model for calculation

of measurement uncertainty. The uncertainty of the micrometer is determined by comparison with a combination of gauge blocks, in order to measure the error of the scale and optical flats for the parallelism and flatness measurements. Therefore, the total measurement uncertainty should be a combination of the reading of the scale related to the nominal gauge block length, and the error added due to the lack of flatness and/or parallelism of the measuring surfaces of the micrometer, plus the temperature difference between the micrometer and the gauge block.

The combined standard uncertainty is given by eq. 4.2.

Three readings were taken at each nominal size. The difference between the observation value and the nominal size of reference standard is given in table 1.

Type A uncertainty is derived from the table 1 with the highest standard deviation. The Standard uncertainty U_M is equal to: $U_M = 0.333 \mu\text{m}$.

The uncertainties quoted in the calibration certificate of the gauge blocks and the optical flats calibration certificates are considered to be type B uncertainties of normal distribution.

For space σ , where σ is the standard deviation, we have:

For the gauge blocks, grade 00 and length < 100 mm, the uncertainty is given by $U_{GB} = 0.075 \mu\text{m}$.

For the optical flats and for flatness/parallelism measurements, the uncertainty is $U_{OF} = 0.025 \mu\text{m}$.

Another type B uncertainty to be considered is the resolution of the micrometer, which is 0.001 mm and is considered to be full-width with rectangular distribution $U_{RES} = 0.289 \mu\text{m}$.

Since the gauge block and the micrometer are both made of steel, we consider the temperature difference between the gauge block and the micrometer to be zero, with an uncertainty of $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. This value was used for the uncertainty evaluation due to thermal expansion from the relationship: $0.02 \mu\text{m} / \text{ }^\circ\text{C}$. The temperature was examined between the limits and is considered to have rectangular distribution.

The Measurement Uncertainty budget is given in table 2.

The combined uncertainty will be: $U_C = 0.45 \mu\text{m}$

The effective degrees of freedom are computed as in paragraph 4.7 and are: $\nu_{eff} = 6$.

From the t-distribution table, the coverage factor is $k = 2.45$ for degrees of freedom $\nu=6$ for confidence level 95%. So, the expanded uncertainty is equal to

$$U = kU_C(Y_{UR}) = 2.45 \times 0.45 = 1.10 \mu\text{m}.$$

5. RESULTS

The final results of the calibration may be stated as follows:

The uncertainty associated with the calibration is $\pm 0.0011 \text{ mm}$ at a level of confidence of approximately 95%

6. CONCLUSIONS

This paper described the calibration process of micrometers for external measurements with flat surfaces. An analysis of sources of measurement uncertainty during micrometer use proved that these are not necessarily also the

sources of measurement uncertainty during the micrometer's calibration process.

Calculation of measurement uncertainties that influence a calibration process was made on the basis of a mathematical model. This model was used to calculate the extended and expanded uncertainties.