

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΜΙΚΡΟΜΕΤΡΩΝ, ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΖΟΥΝ ΤΟ DIN 863-1, ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ VDI/VDE/DGQ 2618, part 10.1:2001

Γαλανόπουλος Ευθύμιος και Καρατίσογλου Αικατερίνη
Διεύθυνση οργανισμού συγγραφέων: C³T, ΒΙ.ΠΕ. ΚΙΑΚΙΣ
e-mail: c3t@the.forthnet.gr

1. Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να περιγράψει τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν για τη διακρίβωση των μικρομέτρων και το χαρακτηρισμό τους, ως προς τις αποκλίσεις των παραμέτρων που εξετάζονται, σύμφωνα με το πρότυπο DIN 863-1:1999 'Micrometers. Part 1: Standard design external micrometers. Concepts, requirements and testing'.

Η συγκεκριμένη οδηγία βασίζεται σε αρχές της τεχνικής οδηγίας VDI/VDE/DGO 2618 part 10.1 (November 2001): Test Instructions for Micrometers.

2. Μέθοδος

2.1 Πεδίο

Το DIN 863-1 [1] καθορίζει το σχέδιο, τις απαιτήσεις σε διαστάσεις και απόδοση καθώς και τον έλεγχο εξωτερικών μικρομέτρων καθορισμένου σχεδίου μέχρι 500 mm, που έχει 0.01 mm διαστήματα κλίμακας ή ψηφιακό βήμα και μέγιστο εύρος 25 mm. Η σειρά προτύπων DIN 863 περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Part 1: Τυπικό σχέδιο εξωτερικών μικρομέτρων – Έννοιες, απαιτήσεις, έλεγχος.
- Part 2: Σταθερά μικρόμετρα και μικρόμετρα βάθους – Έννοιες, απαιτήσεις, έλεγχος.
- Part 3: Ειδικού σχεδιασμού εξωτερικά μικρόμετρα – Σχέδια, απαιτήσεις, έλεγχος.
- Part 4: Εσωτερικά μικρόμετρα - Έννοιες, απαιτήσεις, έλεγχος.

2.2 Επιτρεπτά όρια σφάλματος

Τα όρια σφάλματος και οι ανοχές που δίνονται στον Πίνακα 1: Χαρακτηριστικά Μικρομέτρων, δεν θα πρέπει να υπερβαίνονται. Οι τιμές που καθορίζονται για το G θα πρέπει να συναντώνται σε κάθε τυχαία θέση του μικρομέτρου.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Οποιοσδήποτε διπλασιασμός του επιτρεπτού σφάλματος αποκλείεται γιατί οι τιμές του G εφαρμόζονται για κάθε θέση, συμπεριλαμβανομένων και αυτών με ακραίες τιμές.

Οι ανοχές παραλληλότητας που δίνονται στον Πίνακα 1, που ακολουθεί, βρίσκουν εφαρμογή όπου η μετρητική δύναμη εφαρμόζεται μέσω της κασάνιας.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά μικρομέτρων

Εύρος μέτρησης σε mm	Όριο σφάλματος G ¹ σε μm	Ανοχές παραλληλότητας μετρητικών επαφών για δύναμη 5 έως 10 N Αριθμός κροσσών συμβολής ή δακτυλίων (με χρήση οπτικών επιπέδων)	Ανοχές σε μm	Στερεότητα πλαισίου, ως διαφορά στις ενδείξεις για δύναμη 10 N σε μm
-------------------------	--	---	-----------------	---

0 έως 25	4	6	2	2
25 έως 50	4	6	2	2
50 έως 75	5	10	3	3
75 έως 100	5	10	3	3
100 έως 125	6	-	3	4
125 έως 150	6	-	3	5
150 έως 175	7	-	4	6
175 έως 200	7	-	4	6
200 έως 225	8	-	4	7
225 έως 250	8	-	4	8
250 έως 275	9	-	5	8
275 έως 300	9	-	5	9
300 έως 325	10	-	5	10
325 έως 350	10	-	5	10
350 έως 375	11	-	6	11
375 έως 400	11	-	6	12
400 έως 425	12	-	6	12
425 έως 450	12	-	6	13
450 έως 475	13	-	7	14
475 έως 500	13	-	7	15

¹ Στη συνήθη μετρολογική πρακτική, δίνονται συμμετρικά όρια σφάλματος και καθορίζεται μια μοναδική τιμή. Εν τούτοις, εδώ δε συνίσταται να προηγείται της τιμής το σύμβολο \pm όπως γινόταν πριν. Τα καθορισμένα όρια σφάλματος περιλαμβάνουν σφάλματα της μετρητικής επαφής, επιπεδότητας και αποκλίσεις παραλληλότητας των μετρητικών επαφών και όποια σφάλματα προκαλούνται από την κάμψη του πλαισίου.

3. Περιγραφή Διαδικασίας

Στην τεχνική οδηγία VDI 2618:part 10.1 [2], υπάρχει ένα check list με απαραίτητες ενέργειες προς υλοποίηση, που αφορούν τρία διαφορετικά είδη ελέγχων και είναι τα εξής [9]:

1. **Pattern/ type testing (B)**: κατά τον έλεγχο αυτό εξακριβώνεται πως μια ποσότητα συμμορφώνεται με κάποιο πρότυπο ή προδιαγραφή. Στην περίπτωση αυτή μετράται ένα μοναδιαίο δείγμα, το οποίο παρέχει πληροφορίες για ολόκληρη την ποσότητα. Πρόκειται ουσιαστικά για μια διαδικασία έγκρισης τύπου. Αυτό το είδος ελέγχου δεν αντικαθιστά το original inspection για τον υπόλοιπο μετρητικό εξοπλισμό της ποσότητας.
2. **Original/ incoming inspection (E)**: κατά τον έλεγχο εξακριβώνεται νέος μετρητικός εξοπλισμός ή εξοπλισμός που δεν έχει χρησιμοποιηθεί ακόμη. Μπορεί να μετρηθεί ως original inspection στους πελάτες ή ως outgoing inspection στους προμηθευτές. Ο έλεγχος παρέχει συμμόρφωση με προδιαγραφόμενα κριτήρια όπως αυτά του DIN, με πρότυπα εργασίας ή δηλώσεις του κατασκευαστή, ανάλογα με τη χρήση του μετρητικού εξοπλισμού.
3. **Control check (U)**: αυτή η επιθεώρηση εκτελείται για να ελέγξει το μετρητικό εξοπλισμό σε κανονική βάση.

3.1 Προετοιμασία

Πριν την έναρξη των ελέγχων, που απαρτίζουν τη διακρίβωση, αποτελεί καλή πρακτική να πραγματοποιούνται ορισμένοι αρχικοί οπτικοί έλεγχοι που συνίστανται στα παρακάτω:

- Έλεγχος των προτύπων πλακιδίων που θα χρησιμοποιηθούν για τη διακρίβωση (κατάσταση διακρίβωσης)
- Σήμανση και αριθμός αναγνώρισης.
- Για εξοπλισμό χωρίς αριθμό αναγνώρισης ορίζεται αριθμός (πραγματοποιείται επί πλέον στο είδος ελέγχου B).
- Καθαρισμός σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.
- Απομαγνητισμός, εφόσον είναι απαραίτητος, σε μικρόμετρα με ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης, σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.
- Οπτικός έλεγχος για καταστροφή ή διάβρωση.
- Οπτικός έλεγχος αν είναι ίσες οι γραμμές των διαβαθμίσεων (πραγματοποιείται επί πλέον στο είδος ελέγχου B).
- Οπτικός έλεγχος αν οι γραμμές των διαβαθμίσεων του δακτυλίου (thimble) και της γραμμής αναφοράς έχουν το ίδιο εύρος (πραγματοποιείται επί πλέον στο είδος ελέγχου B).
- Οπτικός έλεγχος αν είναι ορατές οι διαβαθμίσεις της κλίμακας.
- Οπτικός έλεγχος στα ψηφιακά μικρόμετρα, αν είναι εμφανώς ευανάγνωστα τα ψηφία της ένδειξης (ο έλεγχος πραγματοποιείται θέτοντας όλα τα ψηφία στο 8 ή το 0 και μετά στο 2).
- Έλεγχος των μπαταριών στα ψηφιακά μικρόμετρα και αντικατάστασή τους εφόσον είναι απαραίτητο.
- Οπτικός έλεγχος στα μικρόμετρα με κυκλική κλίμακα, αν ο ενδείκτης είναι ίσος, αν οι αριθμοί είναι ευανάγνωστοι και αν το τελείωμα του ενδείκτη είναι στο μέσο του ενός τρίτου των γραμμών διαβάθμισης. Επί πλέον στο είδος ελέγχου B ελέγχονται:
 1. αν ο δείκτης του εύρους κλίμακας έχει το ίδιο εύρος με τη γραμμή διαβάθμισης
 2. αν οι γραμμές διαβάθμισης είναι ίσες και έχουν το ίδιο εύρος
 3. αν το διάστημα μεταξύ των γραμμών διαβάθμισης είναι επαρκές
 4. αν το εύρος διαβάθμισης είναι σωστό
 5. τα σημεία των γραμμών διαβάθμισης στον άξονα περιστροφής
- Επιδιόρθωση σε ελαφρές ζημιές.
- Αφαίρεση της διάβρωσης.
- Σε περίπτωση κατά την οποία η ζημιά που μειώνει τη λειτουργία της συσκευής δεν μπορεί να εξαλειφθεί, το μικρόμετρο αποσύρεται.
- Έλεγχος σκληρότητας, ύπαρξη μονάδων (πραγματοποιείται επί πλέον στο είδος ελέγχου E).
- Πρόνοια για τεχνική τεκμηρίωση.

3.2 Προκαταρκτικοί έλεγχοι και ενέργειες

Κατά το στάδιο αυτό πραγματοποιούνται ορισμένοι έλεγχοι λειτουργίας που είναι οι εξής:

- Έλεγχος της κίνησης του μικρομέτρου σε όλη τη διαδρομή της μέτρησης. Η δυσκολία στην κίνηση πρέπει να είναι η ίδια κατά όλο το μήκος της διαδρομής και να μην απαντώνται τυχαία αντιστεκόμενα σημεία.
- Έλεγχος της ευθυγράμμισης του άξονα του αμονιού (anvil axis) και του άξονα κίνησης (spindle).
- Λειτουργία της συσκευής κλειδώματος (όταν η συσκευή κλειδώματος είναι ενεργή, η τιμή της ένδειξης δεν πρέπει να μεταβάλλεται περισσότερο από τη διακριτική ικανότητα. Για μικρόμετρα με ψηφιακή ένδειξη η μεταβολή δεν πρέπει να είναι περισσότερη από ένα ψηφίο).
- Εφαρμόζεται πίεση με τον οδηγό τριβής (ο οδοντωτός οδηγός σταματάει min 5 N, max 10 N)
- Έλεγχος της εξόδου δεδομένων, εφόσον παρέχεται (ο έλεγχος πραγματοποιείται μετά από ειδική συμφωνία. Αν δεν ελεγχθεί πρέπει να αναφερθεί στο πιστοποιητικό διακρίβωσης).
- Χρόνος εγκλιματισμού τουλάχιστον 5 ώρες.

4. Διακρίβωση

4.1 Σκοπός

Κατά τη διακρίβωση πρέπει να προσδιοριστούν:

- η απόκλιση από το επίπεδο των μετρητικών επιφανειών
- το σφάλμα παραλληλότητας των μετρητικών επιφανειών
- σφάλματα μετρήσεων

Για μικρόμετρα με επιμήκη κινούμενα αμόνια, ο επιπρόσθετος εξοπλισμός πρέπει να διακριβωθεί ξεχωριστά. Αν το μικρόμετρο παρέχεται με ανταλλάξιμα στοιχεία, το σφάλμα παραλληλότητας θα πρέπει να προσδιορίζεται και η αρχική τιμή πρέπει να ελέγχεται για κάθε ξεχωριστό στοιχείο.

4.2 Παράμετροι Διακρίβωσης

- **Επιπεδότητα των μετρητικών επιφανειών:** Η παράμετρος αυτή ελέγχεται με ένα οπτικό επίπεδο γυαλί, το οποίο τοποθετείται σε κάθε επιφάνεια μέτρησης, με τέτοιο τρόπο ώστε ο αριθμός των παρεμβαλλόμενων δακτυλίων ή περιοχών να είναι ο μικρότερος δυνατός. Ο αριθμός των δακτυλίων πολλαπλασιάζεται επί 0.32 μm και το γινόμενο ορίζει την απόκλιση της κάθε επιφάνειας από την επιπεδότητα. Ο αριθμός των δακτυλίων δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τις τιμές όπως δίνονται στον Πίνακα 1. (Δεν θα πρέπει να εμφανίζονται και στις δύο επιφάνειες περισσότερες από τέσσερις ζώνες του ίδιου χρώματος, δηλαδή δύο ανά επιφάνεια). Περιοχή πλάτους 0.4 mm θα παραβλέπεται.
- **Παραλληλότητα των μετρητικών επιφανειών:** Η παράμετρος αυτή ελέγχεται με σειρά τριών ή τεσσάρων οπτικών προτύπων επιπεδότητας, των οποίων οι διαστάσεις θα είναι το 1/3 ή 1/4 του βήματος στροφής, έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε τρία ή τέσσερα σημεία, αντίστοιχα, σε όλο το μήκος περιστροφής του βήματος (για μικρόμετρο με περιοχή μέτρησης 0-25 mm: 12.000, 12.120, 12.250, 12.370 mm).

Τα οπτικά πρότυπα επιπεδότητας τοποθετούνται ανάμεσα στις επιφάνειες μέτρησης του μικρομέτρου χρησιμοποιώντας την καστάνια. Στη θέση αυτή, μετακινώντας προσεκτικά το οπτικό επίπεδο, μετρώνται οι ορατοί δακτύλιοι συμβολής. Ο αριθμός των δακτυλίων πολλαπλασιάζεται επί 0.32 μm και το γινόμενο ορίζει την απόκλιση των επιφανειών μέτρησης από την παραλληλότητα. Ο αριθμός των δακτυλίων δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τις τιμές όπως δίνονται στον Πίνακα 1. Περιοχή πλάτους 0.4 mm θα παραβλέπεται.

- **Έλεγχος της χαμηλότερης τιμής του εύρους μέτρησης:** Ελέγχεται και αν είναι απαραίτητο διακριβώνεται η ένδειξη στη χαμηλότερη τιμή του εύρους μέτρησης, ρυθμίζοντάς τη με επιδεξιότητα.
- **Προσδιορισμός της μέγιστης απόκλισης:** Προσδιορίζεται η απόκλιση της ένδειξης τουλάχιστον για τη χαμηλή και την υψηλή τιμή του εύρους μέτρησης και για ενδιάμεσες τιμές με ένα διάστημα διακρίβωσης, που ισούται με 5 mm. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με μετρητικά πλακίδια μήκους grade 1 (όπως ορίζονται στο ISO 3650). Ο συνδυασμός των πλακιδίων μήκους θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να επιτρέπει τον έλεγχο του άξονα σε θέσεις που είναι ακέραια πολλαπλάσια του ονομαστικού μήκους, όπως επίσης και τον έλεγχο των ενδιάμεσων θέσεων. Ένα παράδειγμα για τις μετρητικές θέσεις ενός μικρομέτρου 0 έως 25 mm είναι: 0 – 5.1 – 10.3 – 15.0 – 20.2 και 25 mm. Τα πλακίδια που αναφέρονται παραπάνω μπορεί επίσης να

χρησιμοποιηθούν για να προσδιορίσουν σφάλματα ενδείξεως μικρομέτρων, των οποίων η αρχική τιμή είναι μεγαλύτερη από το μηδέν. Στην περίπτωση αυτή προστίθεται στα παραπάνω μήκη πλακίδιο ή πλακίδια ίσου μήκους με την αρχική τιμή του εύρους μέτρησης. Προσδιορίζεται η μέγιστη απόκλιση από τις μεμονωμένες αποκλίσεις.

4.3 Αποτίμηση των μετρήσεων

Οι τιμές της ένδειξης A_i στις επιλεγείσες θέσεις του μικρομέτρου συγκρίνονται με τις τιμές N_i του πρότυπου μετρητικού εξοπλισμού (ονομαστική τιμή προτύπων πλακιδίων). Τα σφάλματα της ένδειξης y_i προκύπτουν από:

$$y_i = A_i - N_i$$

Η αποτίμηση μπορεί να γίνει με ένα διάγραμμα, με πίνακα ή με κατάλληλο λογισμικό σε Ηλεκτρονικό Υπολογιστή.

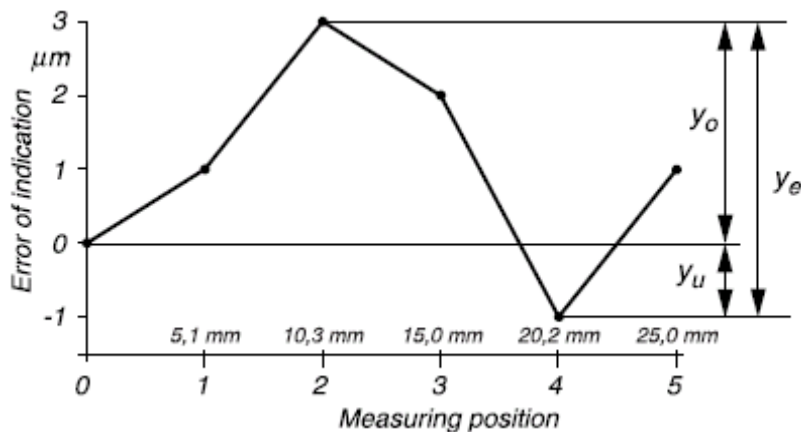
Για τον υπολογισμό της απόκλισης του μικρομέτρου f_{\max} αθροίζονται οι απόλυτες τιμές της μέγιστης θετικής y_0 και της μέγιστης αρνητικής τιμής y_u των αποκλίσεων.

$$f_{\max} = |y_0| + |y_u|$$

Η τιμή αυτή πρέπει να είναι εντός των επιτρεπτών ορίων του Πίνακα 1.

Όταν αγνοείται η επαναληψιμότητα αυτή η μέθοδος εγγυάται ότι με τη θέση μηδέν του ενδείκτη, σε οποιαδήποτε μετρούμενη θέση το f_{\max} δεν δείχνει μεγαλύτερες τιμές.

Η παραπάνω περιγραφή αποτυπώνεται διαγραμματικά στο επόμενο σχήμα 1: Υπολογισμός μέγιστης απόκλισης



Σχήμα 1: Υπολογισμός μέγιστης απόκλισης

4.4 Κρίση αποτελεσμάτων και χαρακτηρισμός

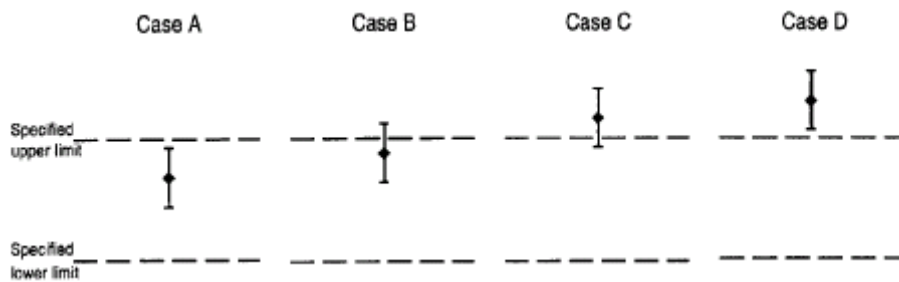
Οι χαρακτηρισμοί 'Προς χρήση', 'Ακατάλληλο' και 'Απόφαση από την εταιρεία' πραγματοποιούνται σύμφωνα με τον παρακάτω τρόπο:

- Το μικρόμετρο χαρακτηρίζεται **Προς χρήση/ Usable**, όταν η προσδιοριζόμενη τιμή f_{\max} συνυπολογιζομένης (\pm) της διευρυμένης αβεβαιότητας είναι εντός των ορίων (case A στο σχήμα 2).
- Το μικρόμετρο χαρακτηρίζεται **Ακατάλληλο για χρήση/ Unsuitable**, όταν η προσδιοριζόμενη τιμή f_{\max} συνυπολογιζομένης (\pm) της διευρυμένης αβεβαιότητας είναι εκτός των ορίων (case D στο σχήμα 2).

- Το μικρόμετρο χαρακτηρίζεται **Απόφαση από την εταιρεία/ Decision based on in house regulation**, όταν δεν μπορεί να ληφθεί καμία από τις δύο προηγούμενες αποφάσεις (case B or C στο σχήμα 2).

Στην περίπτωση που το μέγιστο σφάλμα είναι εντός των ανοχών και η αβεβαιότητα υπερβαίνει ένα όριο, παρόλο που δήλωση συμμόρφωσης δεν μπορεί να γίνει για το δηλούμενο διάστημα εμπιστοσύνης, εντούτοις η συμμόρφωση με τις προδιαγραφές είναι περισσότερο πιθανή από τη μη συμμόρφωση (case B), ενώ στην περίπτωση που το μέγιστο σφάλμα είναι εκτός των ορίων και η αβεβαιότητα εντός, τότε η μη συμμόρφωση είναι περισσότερο πιθανή από τη συμμόρφωση (case C) [12].

Οι παραπάνω περιπτώσεις μπορούν να αποτυπωθούν διαγραμματικά στο επόμενο σχήμα 2: Αποτίμηση συμμόρφωσης



Σχήμα 2: Αποτίμηση συμμόρφωσης

5. Αβεβαιότητα

5.1 Επί μέρους συνιστώσες – Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα U_c

Το στατιστικό μοντέλο που περιγράφει το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι μία συνάρτηση πολλών μεταβλητών και συσχετίζει την ένδειξη (εξαγόμενη εκτίμηση της μέτρησης) με τις εκτιμήσεις των μεταβλητών εισόδου, έχοντας την γενική μορφή:

$$I = I(a, \Delta t, L, \Delta l(ix), \Delta dig, \Delta rep, \Delta lm) \quad (1)$$

Ο υπολογισμός της τυπικής συνδυασμένης αβεβαιότητας $u_c(I)$ της ένδειξης I ακολουθεί τη μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο ISO “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements” (GUM) για την έκφραση της αβεβαιότητας των μετρήσεων. Έτσι η τυπική συνδυασμένη αβεβαιότητα εξαρτάται από τις συνεισφορές των τυπικών αβεβαιοτήτων των μεταβλητών εισόδου $u(x_i)$.

Οι τυπικές αβεβαιότητες των εκτιμήσεων των μεταβλητών εισόδου $u(x_i)$, προσδιορίζονται ως τύπου A ή τύπου B, όπως αυτοί ορίζονται στο ISO GUM, και εκτιμούνται ως εξής:

A. Επαναληψιμότητα

Η συνεισφορά στην αβεβαιότητα λόγω αποκλίσεων σε μια σειρά μετρήσεων $u(\Delta_{rep})^2 = s^2$, όπου s η τυπική απόκλιση μιας σειράς μετρήσεων, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u_{rep}(\Delta) = \frac{s[\Delta l(n)]}{\sqrt{n}} \quad (2) \quad \underline{\text{ΤΥΠΟΥ A}}$$

όπου n ο αριθμός μετρήσεων και $s[\Delta l(ix)]$ η τυπική απόκλιση των διαφορών μήκους $\Delta l(i)$, που υπολογίζεται από τη σχέση

$$s[\Delta l ix(n)] = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (l(ix) - l(is))^2} \quad (3)$$

Στις αβεβαιότητες τύπου A οι βαθμοί ελευθερίας είναι $(n-1)$, όπου n ο αριθμός των μετρήσεων σε κάθε σημείο.

B. Πρότυπα Αναφοράς (Gauge Blocks)

Η συνεισφορά στην αβεβαιότητα λόγω του προτύπου πλακιδίου $U(l_r)$, θεωρείται ότι ακολουθεί κανονική κατανομή και εκτιμάται από τη σχέση:

$$u(l_r) = \frac{U(l_r)}{k} \quad (4) \quad \underline{\text{ΤΥΠΟΥ B}}$$

όπου $U(l_r)$ η διευρυμένη αβεβαιότητα του προτύπου πλακιδίου μήκους, και k ο συντελεστής κάλυψης, όπως αναγράφονται στο πιστοποιητικό διακρίβωσής του (συνήθως $k=2$ για διάστημα εμπιστοσύνης 95%).

Οι βαθμοί ελευθερίας στις αβεβαιότητες τύπου B είναι άπειροι ∞ .

Γ. Διακριτική ικανότητα μικρομέτρου d

Η συνεισφορά στην αβεβαιότητα λόγω διακριτικής ικανότητας u_d του μικρομέτρου θεωρείται ότι ακολουθεί τετραγωνική κατανομή και εκτιμάται από τη σχέση:

$$u_d = \left(\frac{d/2}{\sqrt{3}} \right) \quad (5) \quad \underline{\text{ΤΥΠΟΥ B}}$$

με d τη μικρότερη υποδιαίρεση της κλίμακάς του.

Δ. Θερμοκρασία ($\Delta t, \alpha$)

Τα αντικείμενα γενικά διαστέλλονται ή συστέλλονται με τις θερμοκρασιακές μεταβολές. Τα μήκη των αντικειμένων εκφράζονται στη διεθνώς υιοθετημένη τιμή των 20°C (reference temperature, t_0). Τα μήκη των προτύπων πλακιδίων, που λαμβάνονται από το πιστοποιητικό διακρίβωσής τους αναφέρονται σε αυτή τη θερμοκρασία. Ο τεχνικός μετρήσεων για να ελαχιστοποιήσει το σφάλμα που οφείλεται στη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ πλακιδίου και μικρομέτρου, πρέπει να βεβαιωθεί ότι και τα δύο παρέμειναν επαρκές χρονικό διάστημα στην ίδια θερμοκρασία, το οποίο ορίζεται σε 5 ώρες τουλάχιστον.

Η συνεισφορά της θερμοκρασιακής αυτής ελάχιστης διαφοράς Δt , ανάμεσα στο μικρόμετρο και το πρότυπο πλακίδιο μήκους (εφόσον είναι κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό και μετά την παραμονή τους στον ίδιο

χώρο για επαρκές χρονικό διάστημα), θεωρείται ότι ακολουθεί τετραγωνική κατανομή και εκτιμάται από τη σχέση:

$$u_{\Delta t} = \left(\frac{a \cdot L \cdot \Delta t}{\sqrt{3}} \right) \quad (6) \quad \underline{\text{ΤΥΠΟΥ Β}}$$

,όπου a είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής και ισούται με $11,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ σε ένα εύρος θερμοκρασίας από 10 έως 30°C .

Αποτελεί κοινή πρακτική για τη λαμβανόμενη τιμή του συντελεστή θερμικής διαστολής να υποτίθεται και μία αβεβαιότητα $1 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [6], η οποία θεωρείται ότι ακολουθεί τετραγωνική κατανομή και εκτιμάται από τη σχέση:

$$u_{\alpha} = \left(\frac{1 \cdot 10^{-6} \cdot L}{\sqrt{3}} \right) \quad (7) \quad \underline{\text{ΤΥΠΟΥ Β}}$$

Επειδή ο συντελεστής θερμικής διαστολής του προτύπου πλακιδίου και του μικρομέτρου είναι ο ίδιος, σχετικό σφάλμα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας περιβαλλοντικών συνθηκών (**ambient temperature, t_m**) από τη θερμοκρασία αναφοράς (**reference temperature, t_0**) δεν θα προκύψει ακόμη και αν η μέτρηση λάβει χώρα σε θερμοκρασία διαφορετική των 20°C , που είναι η διεθνώς υιοθετημένη τιμή. Στην εξαιρετικά σπάνια περίπτωση που το μικρόμετρο και τα πρότυπα πλακίδια είναι κατασκευασμένα από διαφορετικά υλικά τότε η συνεισφορά των διαφορετικών συντελεστών θερμικής διαστολής και της διαφοράς της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος από τη θερμοκρασία αναφοράς, θεωρείται ότι ακολουθεί τετραγωνική κατανομή και εκτιμάται από τη σχέση:

$$u_{\Delta t} = \left(\frac{\left(\frac{a_x + a_s}{2} \right) \cdot L \cdot \Delta t + L \cdot (a_x - a_s) \cdot (t_m - t_0)}{\sqrt{3}} \right) \quad (8) \quad \underline{\text{ΤΥΠΟΥ Β}}$$

όπου a_x είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής του μικρομέτρου και a_s αυτός του πλακιδίου [10].

Το εύρος της θερμοκρασίας τόσο κατά τη διάρκεια της διακρίβωσης όσο και στη διάρκεια του εγκλιματισμού πρέπει να κυμαίνεται από 18 έως 22°C [11].

Ε. Αρχή Abbe

Τα μικρόμετρα υπακούουν στην αρχή του Abbe (Ernst Abbe, 1890) η οποία δηλώνει ότι: «η μέγιστη ακρίβεια στις μετρήσεις εξασφαλίζεται μόνο όταν το πρότυπο είναι στην ίδια ευθεία με τον άξονα του οργάνου που μετράται». Γι αυτό το λόγο σχετικό σφάλμα δεν θα ληφθεί υπ' όψιν.

ΣΤ. Συνδυασμένη αβεβαιότητα

Θεωρώντας ότι οι τυπικές αβεβαιότητες των παραγόντων που επιδρούν είναι ανεξάρτητες [5] (μη συσχετιζόμενες), η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u_{comb}(l_{ix}) = \sqrt{(u_{rep}^2(\Delta l) + u^2(l_r) + u_d^2 + u^2(\Delta t) + u^2(a) + u^2(\delta l_M))} \quad (9)$$

5.2 Δραστικοί βαθμοί ελευθερίας V_{eff} – Διευρυμένη αβεβαιότητα U_{exp}

Η αβεβαιότητα διακρίβωσης ενός μικρομέτρου εκφράζεται ως η διευρυμένη αβεβαιότητα $\pm U_{exp}$ με επίπεδο εμπιστοσύνης 95% περίπου. Αυτή προκύπτει από το γινόμενο της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας u_{comb} με έναν συντελεστή κάλυψης (coverage factor) k , δηλαδή:

$$U_{exp} = k \cdot U_{comb} \quad (10)$$

Γενικότερα, ο συντελεστής κάλυψης k μπορεί να υπολογιστεί από την κατανομή t-student για συγκεκριμένο αριθμό δραστικών βαθμών ελευθερίας (effective degrees of freedom) v_{eff} και επίπεδο εμπιστοσύνης. Στην περίπτωση που ισχύει $v_{eff} \geq 30$, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συντελεστής κάλυψης $k = 2$, συνέπεια του Θεωρήματος της Κεντρικής Τιμής.

Υπολογίζοντας τους δραστικούς βαθμούς ελευθερίας V_{eff} της συνδυασμένης τυπικής αβεβαιότητας $U_c(y)$ από τον τύπο Welch-Satterthwaite

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{c_i^4 u^4(x_i)}{v_i}} \quad (11)$$

όπου $c_i \equiv \partial f / \partial x_i$ επιλέγουμε τον κατάλληλο συντελεστή κάλυψης k , από τον Πίνακα 2 [8].

Πίνακας 2. Δραστικοί Βαθμοί Ελευθερίας και Συντελεστής Κάλυψης k , για διάφορα επίπεδα εμπιστοσύνης

Βαθμοί Ελευθερίας v	Συντελεστής Κάλυψης					
	68.27	90	95	95.45	99	99.73
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	235.80
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59

16	1.03	1.75	2.12	2.17	2.92	3.54
17	1.03	1.74	2.11	2.16	2.90	3.51
18	1.03	1.73	2.10	2.15	2.88	3.48
19	1.03	1.73	2.09	2.14	2.86	3.45
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
25	1.02	1.71	2.06	2.11	2.79	3.33
30	1.02	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
35	1.01	1.70	2.03	2.07	2.72	3.23
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
45	1.01	1.68	2.01	2.06	2.69	3.18
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.660	1.984	2.025	2.626	3.077
∞	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

Σε κάθε περίπτωση οι βαθμοί ελευθερίας, με βάση την παραπάνω εξίσωση, υπολογίζονται για τον προσδιορισμό του k , επειδή οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται είναι μόνο τρεις (το NPL λαμβάνει $k=2$ μόνο όταν οι μετρήσεις είναι πάνω από δέκα).

6. Εξοπλισμός

6.1 Γενικά

Τα πρότυπα πλακίδια μήκους, που χρησιμοποιούνται κατά τη διακρίβωση μικρομέτρων πρέπει να εξασφαλίζουν ιχνηλασιμότητα σε κάποιο εθνικό πρότυπο. Για λόγους ευκολίας τα πρότυπα πλακίδια μήκους κατατάσσονται σε τάξεις ακρίβειας σύμφωνα με τη σύσταση του **International Organization of Legal Metrology OIML R-30** και του **International Organization for Standardization ISO 3650: Gauge Blocks** [4], όπου η κάθε τάξη προσδιορίζει ένα μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα για διάφορες ονομαστικές τιμές. Επιπλέον, για ένταξη σε μία από τις 4 τάξεις ακρίβειας (00,0,1,2) τα πρότυπα πλακίδια πρέπει να πληρούν κάποιες απαιτήσεις, ανάλογα με την τάξη, που αφορούν το υλικό κατασκευής, την επιπεδότητα (flatness), την παραλληλότητα (parallelism), την καθετότητα (squareness), το σχήμα και την ποιότητα της επιφάνειας.

Πρότυπα πλακίδια πρέπει να διακριβώνονται σε τακτικά χρονικά διαστήματα. Ο απαιτούμενος χρόνος επαναδιακρίβωσης συνήθως είναι συνάρτηση των τρόπων χρήσης και αποθήκευσης των πλακιδίων καθώς επίσης και του περιβάλλοντος που χρησιμοποιούνται. Καλή πρακτική για τον καθορισμό του διαστήματος επαναδιακρίβωσής τους είναι η παρακολούθηση της ολίσθησης της τιμής του μήκους μεταξύ διαδοχικών διακριβώσεων σε σχέση με ιστορικά στοιχεία για ανάλογο τρόπο χρήσης και αποθήκευσης [3]. Γενικά οι τιμές της ολίσθησης θα πρέπει να βρίσκονται μέσα σε σαφώς καθορισμένα όρια που προσδιορίζονται από την αβεβαιότητα του μήκους των προτύπων πλακιδίων.

6.2 Επιλογή προτύπων πλακιδίων για διακριβώσεις

Το εργαστήριο θα πρέπει να διαθέτει τα κατάλληλα διακριβωμένα πρότυπα πλακίδια για τη διενέργεια των διακριβώσεων. Με τον όρο «κατάλληλα» εννοείται ότι τα πρότυπα πλακίδια πρέπει:

- να έχουν πιστοποιημένη ιχνηλασιμότητα κάνοντας χρήση του Διεθνούς Συστήματος Μονάδων
- να καλύπτουν όλη τη χρησιμοποιούμενη περιοχή μέτρησης του οργάνου
- να κατανέμονται στην περιοχή μέτρησης σε ικανό αριθμό σημείων που επαρκεί για τον μετρολογικό χαρακτηρισμό του οργάνου
- να χρησιμεύουν, όπου απαιτείται, για τον καθορισμό της μέγιστης δυναμικότητας μέτρησης
- να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 3650 ως προς τις ανοχές της απόκλισης από το ονομαστικό μήκος της κλάσης grade 1.

6.3 Μέθοδος προσδιορισμού διαστημάτων επαναδιακρίβωσης για τα πρότυπα αναφοράς

Από τις μεθόδους που περιγράφονται στο **ISO 10012** ‘Measurement management systems-requirements for measurement processes and measuring equipment’ επιλέγεται ως προσφορότερη, ουσιαστικότερη, μετρήσιμη και παρακολουθήσιμη αυτή των Ελεγκτικών Διαγραμμάτων η οποία εφαρμόζεται για όλα τα πρότυπα πλακίδια μήκους, που διακρίβωνονται σε εξωτερικό εργαστήριο. Αφού γίνουν τα κατάλληλα διαγράμματα, για κάθε πλακίδιο μήκους προσδιορίζεται το διάστημα επαναδιακρίβωσης με βάση τα εξής:

- Η περίοδος, που καινούργια πρότυπα πλακίδια θα επαναδιακριβωθούν για πρώτη φορά ορίζεται σε 12 μήνες
- Η περίοδος αυτή μπορεί να επιμηκύνεται σε μέγιστο διάστημα τριών ετών, εφόσον υπάρχει συμφωνία με προηγούμενα αποτελέσματα.
- Αν σε δύο συνεχόμενα διαστήματα της αυτής περιόδου υπάρχει συμφωνία, ως προς την ακρίβεια της συγκεκριμένης κλάσης (όπως ορίζεται από το ISO 3650), το διάστημα επαναδιακρίβωσης αυξάνεται κατά έξι μήνες.
- Κάθε φορά που παρατηρείται υποβάθμιση ως προς την κλάση, το αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα μειώνεται κατά έξι μήνες.
- Πρότυπα πλακίδια, που μετά από διαδοχικές επιτυχείς διακριβώσεις εντάσσονται στη μέγιστη περίοδο επαναδιακρίβωσης των τριών ετών, υφίστανται στατιστικό δειγματοληπτικό έλεγχο στο μέσον της χρονικής περιόδου των τριών ετών.

7. Διασφάλιση Ποιότητας Αποτελεσμάτων Διακριβώσεων

Το εργαστήριο κατά τους ελέγχους ποιότητας που πραγματοποιεί, θα πρέπει να θέτει καθορισμένα όρια – εύρος αποδοχής των αποτελεσμάτων. Αποκλίσεις των αποτελεσμάτων εκτός των ορίων θα πρέπει να εξετάζονται.

Ο καθορισμός των ορίων του εύρους αποδοχής, σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να λάβει υπόψη την αβεβαιότητα της συγκεκριμένης μέτρησης, όπως αυτή έχει προσδιοριστεί ως αποτέλεσμα της συμβολής των παραγόντων, που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της αβεβαιότητας, όπως ενδεικτικά:

1. Περιβάλλον συνθηκών μέτρησης (θερμοκρασία, πίεση, σχετική υγρασία)
2. Επαναληψιμότητα
3. Αναπαραγωγιμότητα

Σε περίπτωση απόκλισης, οι ενέργειες εν γένει που θα μπορούσαν να δρομολογηθούν είναι:

1. Αρχικά διερεύνηση της αιτίας, προκειμένου να εντοπιστεί η πηγή του προβλήματος. Είναι προφανές ότι θα πρέπει να εξεταστούν μία προς μία όλες οι παράμετροι, που συμβάλλουν στο αποτέλεσμα της μέτρησης.

2. Επανάληψη της μέτρησης μετά τον εντοπισμό της πηγής του προβλήματος, ανάλογα αν ως προβληματική εντοπιστεί η κύρια – βασική πρώτη μέτρηση ή επαναληπτική ποιοτικού ελέγχου
3. Περαιτέρω διορθωτικές και προληπτικές ενέργειες, οι οποίες μπορεί να καλύπτουν ένα ευρύ πεδίο δράσεων, όπως:
 - Εκπαίδευση
 - Ρύθμιση οργάνων
 - Βελτίωση εργαστηριακών πρακτικών και διαδικασιών
 - Περαιτέρω εκτεταμένη διερεύνηση με ενδεχόμενη ανάκληση πιστοποιητικών

Οι ποιοτικοί έλεγχοι που θα υλοποιεί το εργαστήριο στη συγκεκριμένη διακρίβωση είναι:

- συμμετοχή σε πρόγραμμα διεργαστηριακών συγκρίσεων.
- μετρήσεις από τον ίδιο χρήστη στην ίδια συσκευή (μικρόμετρο που διατηρείται στο εργαστήριο) και στις προδιαγραφόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, χρησιμοποιώντας την ίδια μέθοδο, σε χρονικά διαστήματα, που δεν θα υπερβαίνουν το ένα έτος.
- διαδοχικές μετρήσεις από δύο διαφορετικούς χρήστες στην ίδια συσκευή, με την ίδια μέθοδο και στις προδιαγραφόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες, που θα διεξάγεται μία φορά το χρόνο.

Ένας δείκτης αξιολόγησης αποτελεσμάτων ποιοτικών ελέγχων, που χρησιμοποιείται ευρέως, είναι η στατιστική παράμετρος ‘**Βαθμός Αξιοπιστίας A**’ [7], που ορίζεται ως εξής:

$$A = \frac{E_{fin} - E_{in}}{\sqrt{U_{fin}^2 + U_{in}^2}} \quad (12), \text{ όπου:}$$

E_{fin} η τελική τιμή μέτρησης

U_{fin} η διευρυμένη αβεβαιότητα κατά την τελική μέτρηση

E_{in} η αρχική τιμή μέτρησης

U_{in} η διευρυμένη αβεβαιότητα κατά την αρχική μέτρηση.

Η παράμετρος A είναι η απόκλιση των μετρήσεων του εργαστηρίου κανονικοποιημένη ως προς την αναφερόμενη αβεβαιότητα και εκφράζει το βαθμό αξιοπιστίας σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

Για μία μέτρηση με αποδεκτό βαθμό αξιοπιστίας, ισχύει $-1 < A < 1$. Ο βαθμός αξιοπιστίας θεωρείται ότι αγγίζει το βέλτιστο όσο πλησιάζει την τιμή μηδέν.

8. Συμπεράσματα

Η διακρίβωση μικρομέτρων είναι προφανής ανάγκη για τις εταιρείες που εκτελούν μετρήσεις μήκους σε οποιοδήποτε στάδιο ελέγχου των διεργασιών τους, τόσο για λόγους αξιοπιστίας των μετρήσεων, όσο και για λόγους συμμόρφωσης με εθνικά ή διεθνή πρότυπα τα οποία ακολουθούν (πιστοποίηση κατά ISO 9001, 14001, 22000).

Όταν η διακρίβωση πραγματοποιείται σε εξωτερικό εργαστήριο, που είναι διαπιστευμένο κατά ISO 17025, η αξιοπιστία των μετρήσεων δεν τίθεται σε αμφισβήτηση. Η πρακτική όμως δείχνει πως στο μεγαλύτερο τμήμα της ελληνικής βιομηχανίας συναντάμε πλήθος και ποικιλία εσωτερικών ελέγχων, χωρίς τη χρήση τεκμηριωμένων μεθόδων και διαδικασιών με αποτέλεσμα να μην εξασφαλίζεται η αξιοπιστία και η εγκυρότητα των μετρήσεων.

Η παροχή τεχνικών οδηγιών από διαπιστευμένα εργαστήρια ή από εθνικά ινστιτούτα μετρολογίας, η υιοθέτησή τους από τις εταιρείες και ο έλεγχος εφαρμογής τους από τους φορείς πιστοποίησης, θα οδηγήσει

σε περισσότερο ποιοτικά και συμμορφούμενα προϊόντα καθώς και σε άμβλυνση των φαινομένων υποβάθμισης που παρατηρούνται στο χώρο της ποιότητας.

9. Βιβλιογραφία

- [1] DIN 863-1:1999, 'Micrometers. Part 1: Standard design external micrometers. Concepts, requirements and testing'.
- [2] VDI/VDE/DGO 2618 part 10.1 (November 2001): Test Instructions for Micrometers.
- [3] ISO 10012:2003, 'Measurement management systems-requirements for measurement processes and measuring equipment'.
- [4] ISO 3650: Gauge Blocks.
- [5] EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration
- [6] NPL, Fundamental Good Practice in Dimensional Metrology, MGPG No 80
- [7] EA-2/03 Interlaboratory Comparisons
- [8] NIST, 'Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty', 1994
- [9] VDI/VDE/DGO 2618 part 1.1 (December 2001): Instructions to inspect measuring and test equipment for geometrical quantities. Basic principals.
- [10] VDI/VDE/DGO 2618 part 1.2 (December 2003): Instructions to inspect measuring and test equipment for geometrical quantities. Uncertainty of measurement.
- [11] UKAS:LAB 36 (March 2001): Laboratory Accommodation and Environment of Length, Angle and Form.
- [12] UKAS:M3003 (December 1997): The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement.