

ΠΗΓΕΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΩΝ ΣΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΟΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΝΤΥΠΩΣΗΣ

Π. Κάβουρας^{1,2}, Γ. Δημητρακόπουλος¹, Θ. Κεχαγιιάς¹, Φ. Κομνηνού¹ και Θ. Καρακώστας¹

¹Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη

²Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας, Διεύθυνση Μηχανικών Μεγεθών, ΒΠΕΘ, Σίνδος

e-mail: pkavo@physics.auth.gr

Λέξεις-Κλειδιά: μικροσκληρότητα, εντύπωση, πλαστική παραμόρφωση.

1. Εισαγωγή

Η σκληρότητα αποτελεί μια από τις σημαντικότερες μηχανικές παραμέτρους, η οποία έχει σημαντική επίδραση στις μηχανικές επιδόσεις ενός υλικού. Η σκληρότητα εκφράζει την αντίσταση του υλικού στην πλαστική παραμόρφωση. Η μέθοδος της εντύπωσης αποτελεί την ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο προσδιορισμού της σκληρότητας [1]. Τις δύο τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι εντύπωσης, όπου το εφαρμοζόμενο φορτίο βρίσκεται στην περιοχή από λίγα N μέχρι λίγες δεκάδες mN [2,3]. Η τιμή της σκληρότητας που προκύπτει από εντυπώσεις με τέτοια φορτία, ονομάζεται μικροσκληρότητα. Ο διαχωρισμός αυτός δεν είναι μόνο τυπικός. Για τέτοια φορτία το μέγεθος της εντύπωσης, από το οποίο προκύπτει και η τιμή της μικροσκληρότητας, επηρεάζεται σημαντικά από έναν αριθμό πηγών αβεβαιοτήτων, οι οποίες δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα για μετρήσεις με εφαρμοζόμενα φορτία μεγαλύτερα των λίγων N.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζουμε τις πηγές αβεβαιοτήτων κατά τη μέτρηση της μικροσκληρότητας. Οι πηγές αυτές μπορούν να διαχωριστούν καταρχήν σε σχέση με την προέλευσή τους. Μπορεί να οφείλονται στη διακριτική ικανότητα του οπτικού μικροσκοπίου που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του μεγέθους του ίχνους της εντύπωσης, σε στρώματα οξειδίων στην επιφάνεια του υπό μέτρηση δοκιμίου, στην ελαστική επαναφορά του υλικού μετά την εντύπωση, στην τριβή μεταξύ του εντυπωτή και του υλικού, στην υποχώρηση ή στη συσσώρευση υλικού στα άκρα του ίχνους της εντύπωσης και στον τρόπο με τον οποίο το υλικό απορροφά την ενέργεια που δίνεται από τον εντυπωτή. Όλες αυτές οι πηγές αβεβαιοτήτων είναι συνήθως ταυτόχρονα παρούσες κατά τη δημιουργία μιας εντύπωσης και όπως είπαμε και προηγουμένως αρχίζουν να γίνονται αισθητές για φορτία τα οποία είναι μικρότερα από λίγα N.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως οι περισσότερες από τις παραπάνω πηγές αβεβαιοτήτων προκαλούν την έντονη εξάρτηση της τιμής της μετρούμενης μικροσκληρότητας από το χρησιμοποιούμενο φορτίο, τη λεγόμενη επίδραση του μεγέθους της εντύπωσης ή Indentation Size Effect (ISE).

2. Περιγραφή της μεθόδου

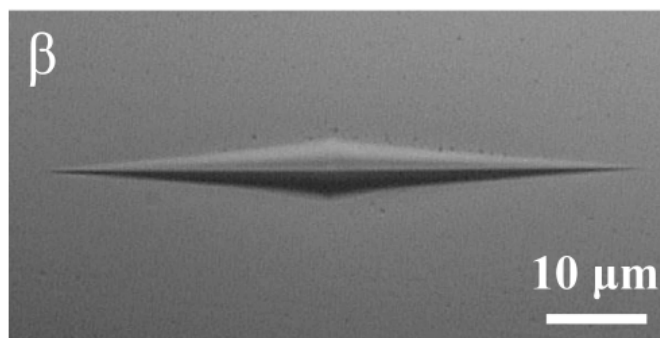
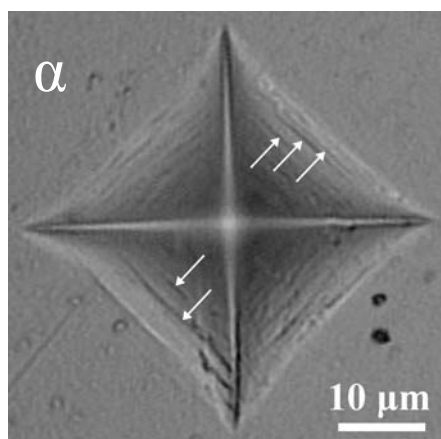
Κατά τη μέθοδο της στατικής εντύπωσης, μια ακίδα από διαμάντι ή σκληρυμένο χάλυβα εισχωρεί κάθετα στην επιφάνεια του υπό μέτρηση υλικού. Οι παράμετροι που καθορίζουν την εισχώρηση της ακίδας είναι το φορτίο που αυτή θα ασκήσει επάνω στην επιφάνεια (P), η διάρκεια άσκησης του φορτίου αυτού (t) και ο ρυθμός με τον οποίο η ακίδα θα φτάσει το προκαθορισμένο φορτίο, αφού αγγίξει την επιφάνεια. Μετά την παρέλευση του χρόνου t η ακίδα ανυψώνεται και αφήνει ένα σημάδι επάνω στην επιφάνεια ή, όπως ονομάζεται, το ίχνος μίας εντύπωσης. Η μέθοδος ονομάζεται στατική, διότι το ίχνος της εντύπωσης παρατηρείται μετά το πέρας της διαδικασίας της εντύπωσης, αφού δηλαδή απομακρυνθεί η ακίδα του εντυπωτή από την επιφάνεια του υλικού. Αυτό,

σε αντίθεση με τη μέθοδο της δυναμικής εντύπωσης, όπου καταγράφεται η μετατόπιση της ακίδας του εντυπωτή κατά τη διάρκεια της εισχώρησής του στο υλικό.

Μετά το πέρας του χρόνου t , το ίχνος της εντύπωσης παρατηρείται με οπτικό μικροσκόπιο. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ακίδα Vickers το ίχνος της εντύπωσης είναι ένα τετράγωνο, ενώ για ακίδα Knoop το ίχνος έχει σχήμα ρόμβου (Εικόνα 1). Η τιμή της μικροσκληρότητας προκύπτει από τη μέτρηση συγκεκριμένων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ίχνους της εντύπωσης και την εφαρμογή απλών μαθηματικών σχέσεων (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Σχέσεις υπολογισμού μικροσκληρότητας για ακίδες Vickers και Knoop.

Τύπος ακίδας	Vickers	Knoop
Σχήμα ίχνους	Τετράγωνο	Ρόμβος
Μετρούμενο γεωμετρικό χαρακτηριστικό ίχνους	Μέση τιμή των διαγωνίων	Μεγάλη διαγώνιος
Σχέση υπολογισμού μικροσκληρότητας	$H_V = 1.8544g \frac{P}{d^2} \quad (1)$	$H_K = 14.229g \frac{P}{d^2} \quad (2)$
Όπου:	H_V : τιμή μικροσκληρότητας Vickers	H_K : τιμή μικροσκληρότητας Knoop
	d : μέση τιμή μήκους διαγωνίων	d : μήκος μεγάλης διαγωνίου
	ή $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$	
	g : η επιτάχυνση της βαρύτητας	
Μονάδες:	Για P [gf], d [μm] και g [m/s^2] H_V και H_K [GPa]	



Εικόνα 1: Οπτικά μικρογραφήματα από εντυπώσεις (α) Vickers και (β) Knoop.

Ο ορισμός του μεγέθους της σκληρότητας, όπως υπολογίζεται από πειράματα εντύπωσης προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$H = \frac{P}{a} \quad (3)$$

όπου το a είναι:

- το εμβαδό της επιφάνειας επαφής ακίδας – δείγματος στην περίπτωση ακίδας Vickers

■ το εμβαδό του ίχνους της εντύπωσης στην περίπτωση ακίδας Knoop
Συνεπώς, οι σταθερές των σχέσεων (1) και (2) προκύπτουν από τη χρήση των κατάλληλων τύπων εμβαδού. Άρα, στις σταθερές αυτές δεν υπεισέρχεται κάποιου είδους αβεβαιότητα.

3. Το ισοζύγιο αβεβαιοτήτων

Το ισοζύγιο αβεβαιοτήτων θα υπολογιστεί για την περίπτωση εντύπωσης με ακίδα Knoop. Τα ίδια ισχύουν για εντύπωση με ακίδα Vickers, διότι το μόνο που διαφοροποιείται μεταξύ των δύο σχέσεων είναι η τιμή του σταθερού παράγοντα (Πίνακας 1). Το ισοζύγιο αβεβαιοτήτων αποτελεί έναν εύληπτο τρόπο παρουσίασης της συνεισφοράς των αβεβαιοτήτων όλων των πειραματικών παραμέτρων στην τελική αβεβαιότητα της μετρούμενης ποσότητας. Ο υπολογισμός του στην παρούσα εργασία ακολουθεί την καθιερωμένη διαδικασία κατά GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [4] που αφορά στον υπολογισμό των αβεβαιοτήτων τύπου B και των συντελεστών ευαισθησίας όλων των πειραματικών παραμέτρων.

Ο όρος αβεβαιότητα τύπου B περιλαμβάνει την αβεβαιότητα με την οποία γνωρίζουμε μια παράμετρο του πειράματος (π.χ. το φορτίο με το οποίο γίνεται η εντύπωση). Η γνώση της αβεβαιότητας τύπου B δεν στηρίζεται σε στατιστική ανάλυση, αλλά σε υποτιθέμενη *a priori* γνώση από τον πειραματιστή της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας που ακολουθεί η συγκεκριμένη παράμετρος του πειράματος. Ο συντελεστής ευαισθησίας μιας πειραματικής παραμέτρου αποτελεί μέτρο του πόσο ισχυρά επηρεάζει την τελική αβεβαιότητα η αβεβαιότητα τύπου B της συγκεκριμένης πειραματικής παραμέτρου. Ο υπολογισμός του στηρίζεται στον υπολογισμό μετάδοσης σφαλμάτων.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το ισοζύγιο αβεβαιοτήτων, θα περιέχει τους υπολογισμούς των αβεβαιοτήτων τύπου B της επιτάχυνσης της βαρύτητας, του φορτίου της εντύπωσης και της μέτρησης των διαστάσεων του ίχνους της και τους υπολογισμούς των αντίστοιχων συντελεστών βαρύτητας. Η σχέση (2) είναι απλή, οπότε ο υπολογισμός των αβεβαιοτήτων τύπου B και των συντελεστών ευαισθησίας καθίσταται ιδιαίτερα εύκολος.

Οι αβεβαιότητες τύπου B των μεγεθών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2, προκύπτουν ως εξής. Η αβεβαιότητα στην τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας είναι γνωστή και ίση με $10.4 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$. Η αβεβαιότητα του φορτίου που ασκείται από τον εντυπωτή εξαρτάται άμεσα από την αβεβαιότητα γνώσης της μάζας των προτύπων βαρών που χρησιμοποιούνται περιοδικά για τη βαθμονόμηση του φορτίου εντυπωτή. Η μάζα των προτύπων βαρών είναι γνωστή μέχρι το πρώτο δεκαδικό ψηφίο στο γραμμάριο, συνεπώς η αβεβαιότητα κατά την ζύγισή τους από τη διάταξη του εντυπωτή θα έχει αβεβαιότητα $\pm \frac{0.1}{2\sqrt{3}} \text{ g}$, με αποτέλεσμα η αβεβαιότητα τύπου B στο φορτίο εντύπωσης να είναι $2.83 \times 10^{-4} \text{ N}$ ή $2.83 \times 10^{-2} \text{ gf}$. Η αβεβαιότητα τύπου B στη μέτρηση της διαγωνίου του ίχνους της εντύπωσης σχετίζεται με τον τρόπο μέτρησής της. Η μέτρησή της γίνεται από οπτικό μικρογράφημα που λαμβάνεται από ψηφιακή κάμερα. Η μέτρηση δεν μπορεί να είναι πιο ακριβής από $\pm 2 \text{ pixel}$. Με βάση τη βαθμονόμηση που έχει γίνει με πρότυπη κλίμακα της Zeiss (ελάχιστη απόσταση χαραγών $10 \mu\text{m}$) και χρήση αντικειμενικού φακού $\times 50$, η αβεβαιότητα έχει ελάχιστη τιμή $0.17 \mu\text{m}$.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται το ισοζύγιο αβεβαιοτήτων για τη μέτρηση μικροσκληρότητας ενός πυριτικού γυαλιού. Ως σχετική συνεισφορά παρουσιάζεται η τιμή των λόγων $P_i^2 u_i^2$ διά του $P_d^2 u_d^2$. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτή ευκολότερα η σχετική συνεισφορά των τριών αβεβαιοτήτων τύπου B. Προκύπτει ότι η αβεβαιότητα τύπου B του μεγέθους της εντύπωσης έχει τη σημαντικότερη συνεισφορά

στην τελική αβεβαιότητα της τιμής της μικροσκληρότητας. Η τιμή της συνολικής αβεβαιότητας τύπου B (u_B) υπολογίζεται από την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των όρων $\sigma P_i^2 u_i^2$, όπου σ είναι μια σταθερά που πρέπει να συμπεριληφθεί λόγω διόρθωσης των μονάδων μέτρησης. Στην περίπτωση που μελετάται $\sigma=1$:

$$u_B = \sqrt{P_g^2 u_g^2 + P_P^2 u_P^2 + P_d^2 u_d^2} \quad (4)$$

Πίνακας 2: Ισοζύγιο αβεβαιοτήτων για μέτρηση μικροσκληρότητας με εντυπωτή Knoop.

Μέγεθος	g [m/s ²]	P [gf]	d [μm]
Αβεβαιότητα τύπου B (u_i)	10.4×10^{-7}	2.83×10^{-2}	0.17
Συντελεστής ευαισθησίας (P_i)	0.292341	0.028679	-0.08222
$P_i^2 u_i^2$	9.24×10^{-14}	6.59×10^{-7}	1.95×10^{-4}
Σχετική συνεισφορά ($P_i^2 u_i^2 / P_d^2 u_d^2$)	4.74×10^{-10}	3.38×10^{-3}	1

Στο ισοζύγιο αβεβαιοτήτων, όπως αναφέραμε υπεισέρχονται οι αβεβαιότητες τύπου B. Η τελική όμως αβεβαιότητα καθορίζεται και από την τυπική απόκλιση στο μέσο όρο των τιμών της μικροσκληρότητας που έχουν προκύψει, μια και για την εύρεση της τιμής αυτής γίνονται τουλάχιστον 10 εντυπώσεις. Τέτοιου είδους αβεβαιότητες, που προκύπτουν από στατιστική ανάλυση ονομάζονται αβεβαιότητες τύπου A και σχετίζονται με την έννοια της επαναληψιμότητας. Όπως είναι φανερό, η αβεβαιότητα τύπου A στην τιμή της μικροσκληρότητας (u_A) προκύπτει από το βαθμό επαναληψιμότητας του μεγέθους της εντύπωσης. Θα πρέπει να τονιστεί στο σημείο αυτό ότι η αβεβαιότητα τύπου A υπολογίζεται στις τιμές της μικροσκληρότητας και όχι στο μέγεθος των εντυπώσεων. Η τελική ή συνδυασμένη αβεβαιότητα προκύπτει από το συνδυασμό των αβεβαιοτήτων τύπου A και B με βάση τη σχέση:

$$u_{comb} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (4)$$

Στην περιγραφή της μεθόδου αναφέραμε ως μια εκ των παραμέτρων της εντύπωσης το χρόνο (t) που ασκείται το φορτίο επάνω στην επιφάνεια. Ο χρόνος δεν υπεισέρχεται στο ισοζύγιο αβεβαιοτήτων, διότι καταρχήν δεν υπάρχει στις σχέσεις (2) ή (4). Ο λόγος όμως δεν είναι μόνο αυτός. Μικρές μεταβολές στο χρόνο εντύπωσης, οι οποίες θα μπορούσαν να οφείλονται στα ηλεκτρονικά που ελέγχουν την κίνηση της ακίδας, δεν μπορούν να έχουν μετρήσιμη επίδραση στο μέγεθος της εντύπωσης. Γενικά, μεγαλύτερος χρόνος εντύπωσης προκαλεί μεγαλύτερο μέγεθος εντύπωσης, διότι θεωρητικά λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της έρπυσης, δηλαδή πλαστική παραμόρφωση υπό σταθερό φορτίο. Για να γίνει όμως μετρήσιμο το αποτέλεσμα της έρπυσης, θα πρέπει: (α) η αύξηση του χρόνου εντύπωσης να είναι τουλάχιστον κατά τρεις ή τέσσερις τάξεις μεγέθους, κάτι που αποκλείεται να συμβεί εξαιτίας σφάλματος στην χρονομέτρηση της εντύπωσης και (β) το υλικό να βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία, κάτι που δεν ισχύει στην περίπτωση αυτή, μια και οι μετρήσεις έγιναν σε θερμοκρασία δωματίου.

4. Το μέγεθος της εντύπωσης

Στην προηγούμενη παράγραφο αναδείχθηκε το μέγεθος της εντύπωσης ως η παράμετρος με τη μεγαλύτερη επίδραση στην αβεβαιότητα τύπου B και ως η παράμετρος που καθορίζει την αβεβαιότητα τύπου A του τελικού αποτελέσματος, δηλαδή της τιμής της μικροσκληρότητας. Για το λόγο αυτό, θα περιγράψουμε επιγραμματικά τις πηγές αβεβαιότητας που επηρεάζουν το μέγεθος της εντύπωσης, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής: πηγές αβεβαιοτήτων που οφείλονται (α) στις διεργασίες κατά τη

δημιουργία μιας εντύπωσης και (β) κατά τη μέτρησή της. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι πηγές αβεβαιότητας ταξινομημένες με βάση τα παραπάνω.

Πίνακας 3: Συγκεντρωτική παρουσίαση των πηγών αβεβαιοτήτων κατά τη διαδικασία δημιουργίας και μέτρησης του ίχνους μιας εντύπωσης σε ένα ιδανικά ομοιογενές και ισότροπο υλικό.

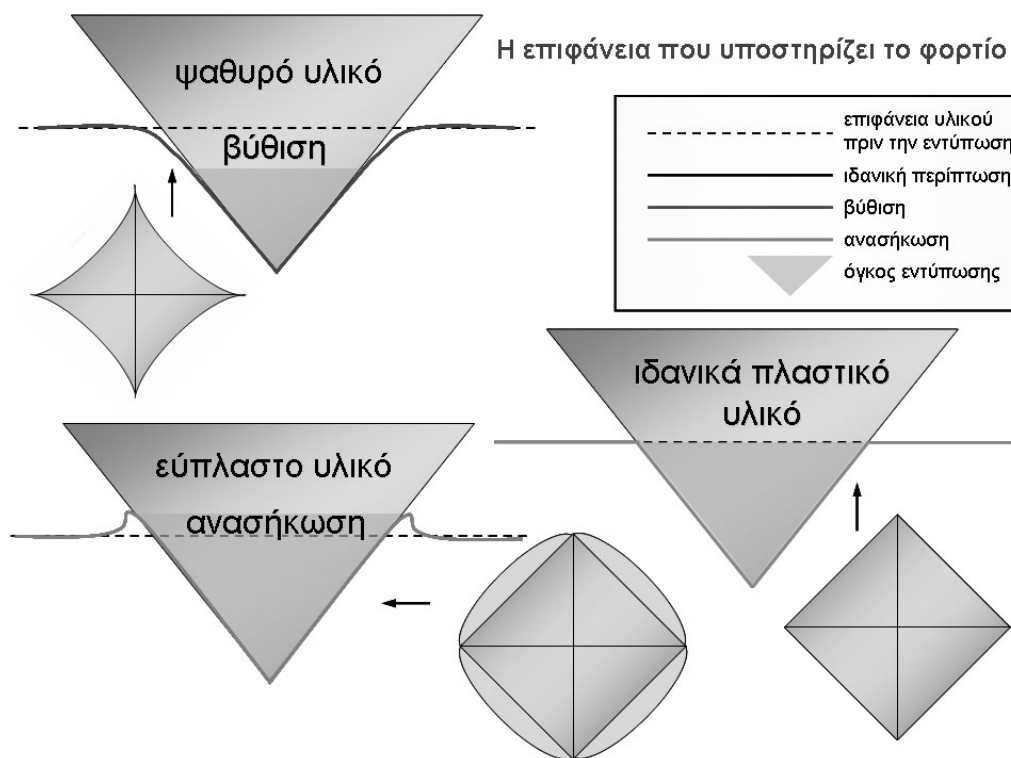
Δημιουργία εντύπωσης	Μέτρηση εντύπωσης
1. Επιπεδότητα επιφάνειας δείγματος και καθετότητά της ως προς την κίνηση του εντυπωτή	1. Διακριτική ικανότητα μικροσκοπίου και ψηφιακής κάμερας
2. Κραδασμοί κατά τη διάρκεια της εντύπωσης	2. Σχήμα ίχνους εντύπωσης
3. Ακρίβεια στον έλεγχο του φορτίου και του χρόνου εντύπωσης	3. Ανασθήκωση ή βύθιση της επιφάνειας στα όρια του ίχνους της εντύπωσης
4. Ενεργοί μηχανισμοί πλαστικής παραμόρφωσης	4. Ελαστική επούλωση του ίχνους της εντύπωσης
5. Δημιουργία σχισμών κατά τη διάρκεια της εντύπωσης	

Η επιπεδότητα της επιφάνειας του υπό μελέτη υλικού και η καθετότητά της ως προς την κίνηση του εντυπωτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμες για τη σωστή μέτρηση της μικροσκληρότητας. Αυτό συμβαίνει, διότι σε περιπτώσεις όπου η επιφάνεια είναι τραχειά ή όχι κάθετη ως προς την κίνηση του εντυπωτή το σχήμα του ίχνους δεν είναι συμμετρικό. Αυτό έχει ως συνέπεια οι σχέσεις (1) και (2) να μην είναι πια ακριβείς ως προς τον υπολογισμό της τιμής της μικροσκληρότητας. Κραδασμοί κατά τη διάρκεια της εντύπωσης που προέρχονται από εξωτερικά αίτια μπορούν να επηρεάσουν το μέγεθός της ή ακόμα και να προκαλέσουν σχισμό. Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι κραδασμοί μπορεί να μεταβάλλονται με τυχαίο τρόπο, μπορούν να προκαλέσουν σημαντική αύξηση στην αβεβαιότητα τύπου A της μικροσκληρότητας. Η ακρίβεια στον έλεγχο των συνθηκών εντύπωσης, δηλαδή φορτίου και διάρκειάς της, όπως περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, επιδρούν στην αβεβαιότητα τύπου B της μικροσκληρότητας.

Οι ενεργοί μηχανισμοί πλαστικής παραμόρφωσης επηρεάζουν το σχηματισμό του ίχνους μιας εντύπωσης. Για παράδειγμα, σε κρυσταλλικά υλικά έχει αποδειχθεί ότι η δημιουργία κλειστών βρόγχων εξαρμόσεων που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της εντύπωσης μπορούν να προκαλέσουν εργοσκληύρυνση. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μέτρηση μιας φαινόμενης μικροσκληρότητας μεγαλύτερης από την πραγματική. Ένα ανάλογο παράδειγμα για άμορφα υλικά μπορεί να δοθεί με τη σύγκριση εντυπώσεων που έχουν γίνει στην επιφάνεια ομαλών και μη ομαλών υαλοσχηματιστών. Η διαφορά τους οφείλεται στο ότι κατά τη δημιουργία μιας εντύπωσης στους πρώτους η συμπύκνωση δεν παίζει κανένα ρόλο, ενώ στους δεύτερους ο ίδιος μηχανισμός απορροφά σημαντικό ποσοστό τη ενέργειας εντύπωσης.

Επίσης, πρέπει να αποφευχθεί η δημιουργία σχισμών, ειδικά αυτών που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της εντύπωσης. Τέτοιου είδους σχισμοί επηρεάζουν το μέγεθος του ίχνους της εντύπωσης: υπάρχουν αναφορές όπου η δημιουργία σχισμών μπορεί να το μεγαλώσει αλλά και να το περιορίσει. Το ζήτημα δεν έχει βρει ακόμα μια τελική απάντηση που να στηρίζεται όχι μόνο σε πειραματικά δεδομένα, αλλά και σε μια θεωρητική πρόβλεψη, αποτέλεσμα ενός συνεπούς με την πραγματικότητα φυσικού μοντέλου.

Η διακριτική ικανότητα του οπτικού συστήματος με το οποίο μεγεθύνεται η εικόνα του ίχνους της εντύπωσης, καθώς και η ευκρίνεια της ψηφιακής κάμερας που χρησιμοποιείται επηρεάζουν άμεσα την ακρίβεια με την οποία μπορεί να προσδιοριστεί η τιμή της μικροσκληρότητας. Στην προηγούμενη παράγραφο περιγράφηκε ο τρόπος που η αβεβαιότητα μέτρησης του ίχνους της εντύπωσης προκαλεί αύξηση της αβεβαιότητας τύπου B στην τιμή της μικροσκληρότητας.



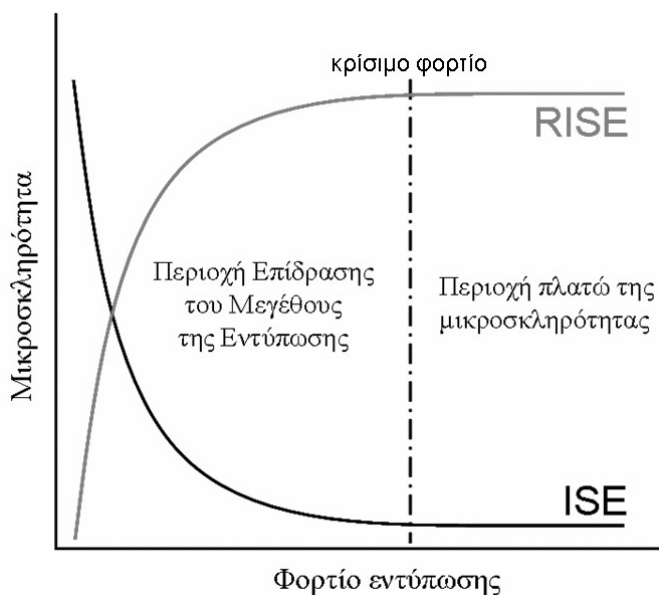
Εικόνα 2: Επίδραση της μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού στη γεωμετρία της επιφάνειας στα όρια του ίχνους της εντύπωσης και στο σχήμα του ίχνους της εντύπωσης.

Το σχήμα του ίχνους εντύπωσης εξαρτάται από το εάν το υπό μελέτη υλικό είναι εύπλαστο ή ψαθυρό. Όταν το υλικό είναι εύπλαστο το ίχνος μιας εντύπωσης Vickers παύει να είναι ένα τετράγωνο. Μετατρέπεται σε τετράγωνο με κυρτές πλευρές, διότι η επιφάνεια στα όρια της εντύπωσης ανασηκώνεται (Εικόνα 2). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η επιφάνεια που απαρτίζει τη φαινόμενη εντύπωση να είναι μικρότερη από την επιφάνεια επαφής. Συνεπώς, υπάρχει υποεκτίμηση του d , δηλαδή μεγαλύτερη φαινόμενη τιμή μικροσκληρότητας. Όταν το υλικό είναι ψαθυρό το ίχνος μιας εντύπωσης Vickers παύει να είναι ένα τετράγωνο. Μετατρέπεται σε τετράγωνο με κοίλες πλευρές, διότι η επιφάνεια στα όρια της εντύπωσης βυθίζεται (Εικόνα 2). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η επιφάνεια που απαρτίζει τη φαινόμενη εντύπωση να είναι μεγαλύτερη από την επιφάνεια επαφής. Συνεπώς, υπάρχει υπερεκτίμηση του d , δηλαδή μικρότερη φαινόμενη τιμή μικροσκληρότητας.

Τέλος, η μέτρηση του μεγέθους του ίχνους της εντύπωσης επηρεάζεται από τα ελαστικά χαρακτηριστικά του υλικού. Μετά την ανασήκωση του εντυπωτή, ένα μέρος του ίχνους της εντύπωσης χάνεται, διότι ένα μέρος της παραμόρφωσης είναι ελαστική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια μείωση του ίχνους της εντύπωσης. Η μείωση αυτή θα είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η ελαστική σταθερά του υλικού. Συνεπώς, όταν γίνεται σύγκριση στις τιμές μικροσκληρότητας δύο υλικών με πολύ διαφορετικές ελαστικές σταθερές, θα πρέπει δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο εξής: η τιμή μικροσκληρότητας του υλικού με τη μεγαλύτερη ελαστική σταθερά κατά κανόνα υπερεκτιμάται.

Πρέπει να αναφερθεί ότι η επιλογή φορτίου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη και για ακόμα ένα παράγοντα, εξίσου σημαντικό με τους παραπάνω. Η τιμή της μικροσκληρότητας είναι συνάρτηση του φορτίου εντύπωσης. Για φορτίο άνω μιας κρίσιμης τιμής η μικροσκληρότητα είναι σταθερή. Για φορτία άνω της κρίσιμης τιμής η μικροσκληρότητα αυξάνεται, ή μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο του μεγέθους της εντύπωσης ή Indentation Size Effect (ISE). Όταν το φορτίο αυξάνεται συμβαίνει το

λεγόμενο κανονικό ISE ή Normal ISE (NISE), ενώ όταν μειώνεται συμβαίνει το λεγόμενο αντίστροφο ISE ή Reverse ISE (RISE) (Εικόνα 3). Για να συγκριθούν οι τιμές της μικροσκληρότητας δυο υλικών, θα πρέπει τα φορτία που θα χρησιμοποιηθούν να είναι μεγαλύτερα από τα κρίσιμα φορτία, τα οποία εν γένει δεν είναι τα ίδια για τα δύο υλικά.



Εικόνα 3: Διάγραμμα τιμές μικροσκληρότητας συναρτήσεως του χρησιμοποιούμενου φορτίου εντύπωσης.

περισσότερες περιπτώσεις, οδηγώντας στην καταστροφή της ομοιογένειας. Επίσης, μονοκρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά υλικά με κρυσταλλίτες συγκρίσιμους με τις διαστάσεις των εντυπώσεων δεν μπορούν να μελετηθούν ως ισότροπα. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται διαφορετική αντιμετώπιση στη λήψη και επεξεργασία των μετρήσεων μικροσκληρότητας η παρουσίαση των οποίων ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας μελέτης.

5. Συμπεράσματα

Η μέτρηση της μικροσκληρότητας ενός υλικού με τη μέθοδο της στατικής εντύπωσης είναι άμεση και ιδιαίτερα απλή. Η απλότητα στην εφαρμογή της όμως κρύβει μια πληθώρα πηγών αβεβαιότητας οι οποίες οφείλονται στην ακρίβεια ελέγχου των συνθηκών εντύπωσης, στη μορφολογία της επιφάνειας του υπό μελέτη υλικού, στην ακρίβεια μέτρησης του ίχνους της εντύπωσης, στους ενεργούς μηχανισμούς πλαστικής παραμόρφωσης και στην εμφάνιση NISE ή RISE. Συνεπώς, ο πειραματιστής θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός στην εφαρμογή της μεθόδου: όσο το δυνατόν καλύτερη επιλογή και ακριβέστερος έλεγχος των συνθηκών εντύπωσης καθώς και όσο το δυνατόν πληρέστερη γνώση των μηχανικών επιδόσεων του υπό μελέτη υλικού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] T.H. Courtney, Mechanical Behavior of Materials, McGraw-Hill, 1990.
- [2] ASTM special technical publication 889, Microindentation Techniques in Materials Science and Engineering, ASTM, 1985.
- [3] H. Mughrabi (Ed.), Materials Science and Technology Series, Vol. 6: Plastic Deformation and Fracture of Materials, VCH, 1993.
- [4] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML 1995 *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* 2nd edn ISBN 92-67-10188-9.

Στην παραπάνω ανάλυση υποτέθηκε ότι το υπό μελέτη υλικό είναι ομοιογενές και ισότροπο. Αυτό αποτελεί προφανώς μια εξιδανίκευση. Τα υλικά που πλησιάζουν αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα ομοιογενή γυαλιά ή άμορφα μέταλλα και τα πολυκρυσταλλικά υλικά με κρυσταλλίτες που έχουν μέγεθος πολύ μικρότερο από αυτό των ίχνων των εντυπώσεων. Στην πραγματικότητα όμως τα χαρακτηριστικά αυτά δεν ισχύουν. Για παράδειγμα, ένα επιφανειακό στρώμα οξειδίου με διαφορετική σκληρότητα από το υπόλοιπο υλικό σχηματίζεται στις