

Θέμα: Πρακτικές δυνατότητες επαγωγικού αισθητηρίου μέτρησης ταπεινών ταχυτήτων.

Εισηγητής: **Ε. Γ. Μαυρογιαννάκης**, ΗΜ τ. ερευνητής ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

Εισαγωγή

Η ανακάλυψη, ο προσδιορισμός και η καταγραφή ταπεινών ταχυτήτων αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα, μεγάλης τεχνολογικής σημασίας σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι εφαρμογές αυτές σχετίζονται, γενικά, με την κινητική κατάσταση ενός σώματος ή και κάποιας διεργασίας ακόμη.

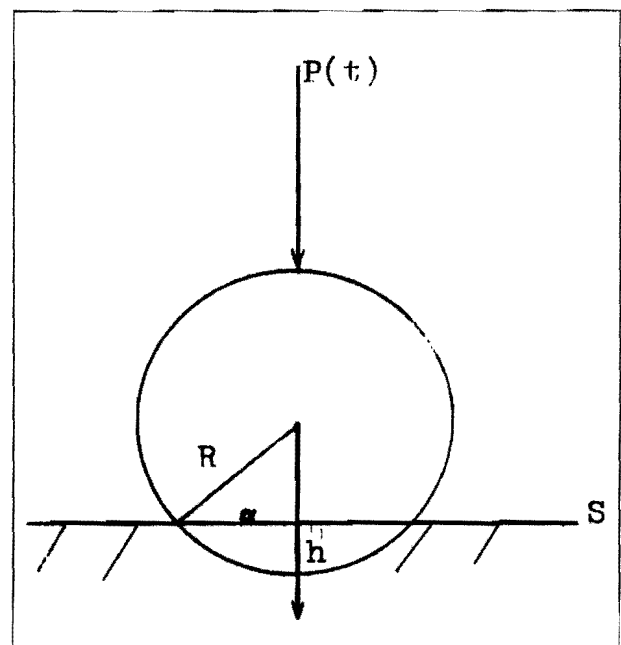
Η κινητική κατάσταση είναι συχνά αποτέλεσμα δυναμικών φαινομένων, των οποίων η μελέτη δίνει ενδιαφέρουσες πληροφορίες για τη χρονική τους εξέλιξη.

Ταπεινές ταχύτητες παρατηρούνται επίσης σε θερμικές και μηχανικές διεργασίες, καθώς επίσης και κατά τα αρχικά και τα τελικά στάδια διεργασιών που στο μεγαλύτερο μέρος της εξέλιξής τους χαρακτηρίζονται από σχετικά υψηλές ταχύτητες. Ταπεινές ταχύτητες παρατηρούνται ακόμη στη διάρκεια περιοδικών ή μη ταλαντώσεων, καθώς και σε παλμικά φαινόμενα.

Στη συνέχεια το ενδιαφέρον μας θα επικεντρωθεί στο σύνθετο πρόβλημα της κίνησης μιας σφαίρας, η οποία συνθλίβει επίπεδη επιφάνεια υλικού σώματος με δύναμη $P(t)$. Η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στην αρχή της δοκιμασίας της σκληρομέτρησης, αλλά και άλλων φαινομένων, όπως είναι η πρόσκρουση σωματιδίων, π.χ. χονδρών ή λεπτών κόκκων σκόνης, στην επιφάνεια στερεών σωμάτων, όπως είναι τα μέταλλα, το γυαλί, τα κεραμικά και τα πλαστικά υλικά. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις οι ταχύτητες είναι ταπεινές από τη στιγμή που έχει πραγματοποιηθεί η επαφή. Στις επόμενες στιγμές η κίνηση της σφαίρας είναι σε άμεση ή έμμεση σχέση με τα φυσικά χαρακτηριστικά αυ-

τής και της επιφάνειας, καθώς επίσης και με τα ιδεωδιστικά φαινόμενα που λαβαίνουν χώρα στα συνθλιβόμενα υλικά.

Για την αποκάλυψη και την καταγραφή των ταχυτήτων αυτών μελετήθηκε και κατασκευάστηκε ειδικό επαγωγικό αισθητήριο, του οποίου το κινητό μέρος είναι ο μαγνήτης, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.



Σχήμα 1.

Το κινητικό πρόβλημα της σφαίρας

Έστω η σφαίρα του σχ. 1, η οποία προσπίπτει στην επιφάνεια S στερεού σώματος. Για να αποφευχθούν καταστάσεις απροσδιοριστίας, υποτίθεται ότι παρακολουθούμε την τύχη της σφαίρας από τη στιγμή που έχει ήδη πραγματοποιηθεί η επαφή και η σφαίρα έχει διεισδύσει στην επιφάνεια του στερεού κατά μία πολύ μικρή ποσότητα Δh . Κατ' αυτόν τον τρόπο η επαφή σφαίρας - επιφάνειας είναι πλέον αναγκαστική. Η παραδοχή αυτή ισχύει, όπως είναι φυσικό, εάν και εφόσον η δύναμη $P(t)$, η οποία ασκείται στη σφαίρα είναι ικανή να προκαλέσει την παραμόρφωση της επιφάνειας. Θεωρούμε ότι, σε πρώτη προσέγγιση, η σφαίρα αποτελείται από υλικό, το οποίο δεν είναι δυνατό να παραμορφωθεί αισθητά από το υλικό της επιφάνειας.

Μετά τις προηγούμενες παραδοχές μπορούμε να ορίσουμε την ακτίνα επαφής $a(t)$ του κύκλου τομής σφαίρας - επιφάνειας, σε σχέση με το βάθος $h(t)$ διείσδυσης της σφαίρας μέσα στην επιφάνεια S. Μεταξύ των ποσοτήτων αυτών έχουμε την εξής γεωμετρική σχέση

$$a^2 = R^2 - (R-h)^2 \quad (1)$$

ή ακόμη

$$a^2 = h(2R-h) \quad (2)$$

Οι σχέσεις αυτές ισχύουν, φυσικά, ανά πάσα στιγμή στην ιδεώδη περίπτωση που εξετάζουμε. Μετά από διαφορίση της σχέσης (2) προκύπτει η κινητική εξίσωση

$$a = u(R-h)/a \quad (3)$$

όπου $u = dh/dt$ είναι η ταχύτητα της σφαίρας, ενώ $a = da/dt$ είναι η ταχύτητα επέκτασης του κύκλου επαφής σφαίρας - επιφάνειας. Είναι φανερό ότι η κινητική της σφαίρας δεν είναι γραμμική.

Η σχέση (3) μπορεί να γραφεί, όμως, ως εξής

$$\ddot{a} = a/\tau \quad (4)$$

όπου

$$\tau = a^2/u(R-h) = \tau(a, R, u) \quad (5)$$

Η συνάρτηση τ έχει διαστάσεις χρόνου και ονομάζεται διάρκεια εξέλιξης (Evolution life - time) της κινητικής.

Μετά από διαφορίση της (4) προκύπτει η δευτεροβάθμια εξίσωση

$$\ddot{a} + ((He-1)/\tau^2)a = 0 \quad (6)$$

όπου $He = d\tau/dt$ είναι μια αριθμητική συνάρτηση (He ονομάζεται αριθμός του Ηράκλειτου για ιστορικούς και φιλοσοφικούς λόγους //)

Η εξίσωση (6) είναι δυνατό να ολοκληρωθεί εύκολα αν υποθέσουμε ότι $\omega = \text{σταθερό}$. Πράγματι

$$a = a_0 \cdot e^{-\omega t} \quad (7)$$

όπου a_0 αρχική ακτίνα του κύκλου επαφής, ενώ είναι

$$\omega^2 = (He-1)/\tau^2 \quad (8)$$

Είναι φανερό ότι το ω είναι πραγματικός αριθμός όταν $He > 1$, ενώ γίνεται φανταστικός αριθμός όταν $He < 1$. Κατόπιν αυτού συνάγεται ότι η συνάρτηση (7) είναι εκθετική, όταν το ω είναι πραγματικός αριθμός, ενώ για ω φανταστικό απεικονίζει ταλαντώσεις χωρίς να αποκλείεται και η περιοδική συμπεριφορά $/2/$.

Το κινητικό πρόβλημα που εξετάστηκε προηγουμένως είναι αρκετά γενικό και περιλαμβάνει σαν μερική περίπτωση τη μέτρηση της σκληρότητας κατά BRINELL ή ROCKWELL, όπου εξετάζεται η διάμετρος $2a$ μετά την απομάκρυνση της σφαίρας από την επιφάνεια S ή το πραγματικό βάθος διείσδυσης της σφαίρας στην επιφάνεια του στερεού σώματος.

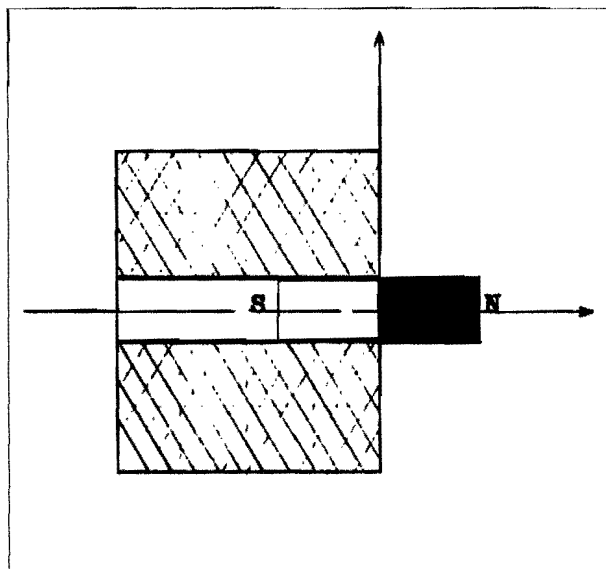
Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να έχει περισσότερο ενδιαφέρον η κίνηση της επιφάνειας και η μετάδοσή της στη σφαίρα ή το αντίθετο, χωρίς να παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ο σχετικός νόμος της κίνησης.

Περιγραφή του επαγωγικού αισθητηρίου

Είναι φανερό από τη σχέση (3) ότι η γνώση της ταχύτητας u είναι δυνατό να γίνει έμμεσα από την ταχύτητα a της σφαίρας. Για το σκοπό αυτό μελετήθηκε και κατασκευάστηκε ειδικό αισθητήριο, το οποίο εφαρμόστηκε σε σκληρόμετρο τύπου AMSLER/WOLPERT. Είναι όμως δυνατό να χρησιμοποιηθεί και σε σωρεία άλλων εφαρμογών.

Το επαγωγικό αισθητήριο αποτελείται από πηνίο μεγάλου αριθμού σπειρών, στο εσωτερικό και ομοαξονικά, με το οποίο βρίσκεται τοποθετημένος μόνιμος μαγνήτης. Ο μαγνήτης μπορεί να κινηθεί ευθύγραμμα, έτσι ώστε, αν συνδεθεί άμεσα ή έμμεσα με την κίνηση της σφαίρας, να παρακολουθεί ανελλιπώς τη συμπεριφορά της στο χρόνο.

Πειραματική έρευνα έδειξε, ότι η καταλληλότερη θέση του μαγνήτη είναι εκείνη όπου το ουδέτερο επίπεδο αυτού συμπίπτει με το επίπεδο της μιας ή της άλλης πρόσοψης του πηνίου, βλ. σχ. 2.



Σχήμα 2.

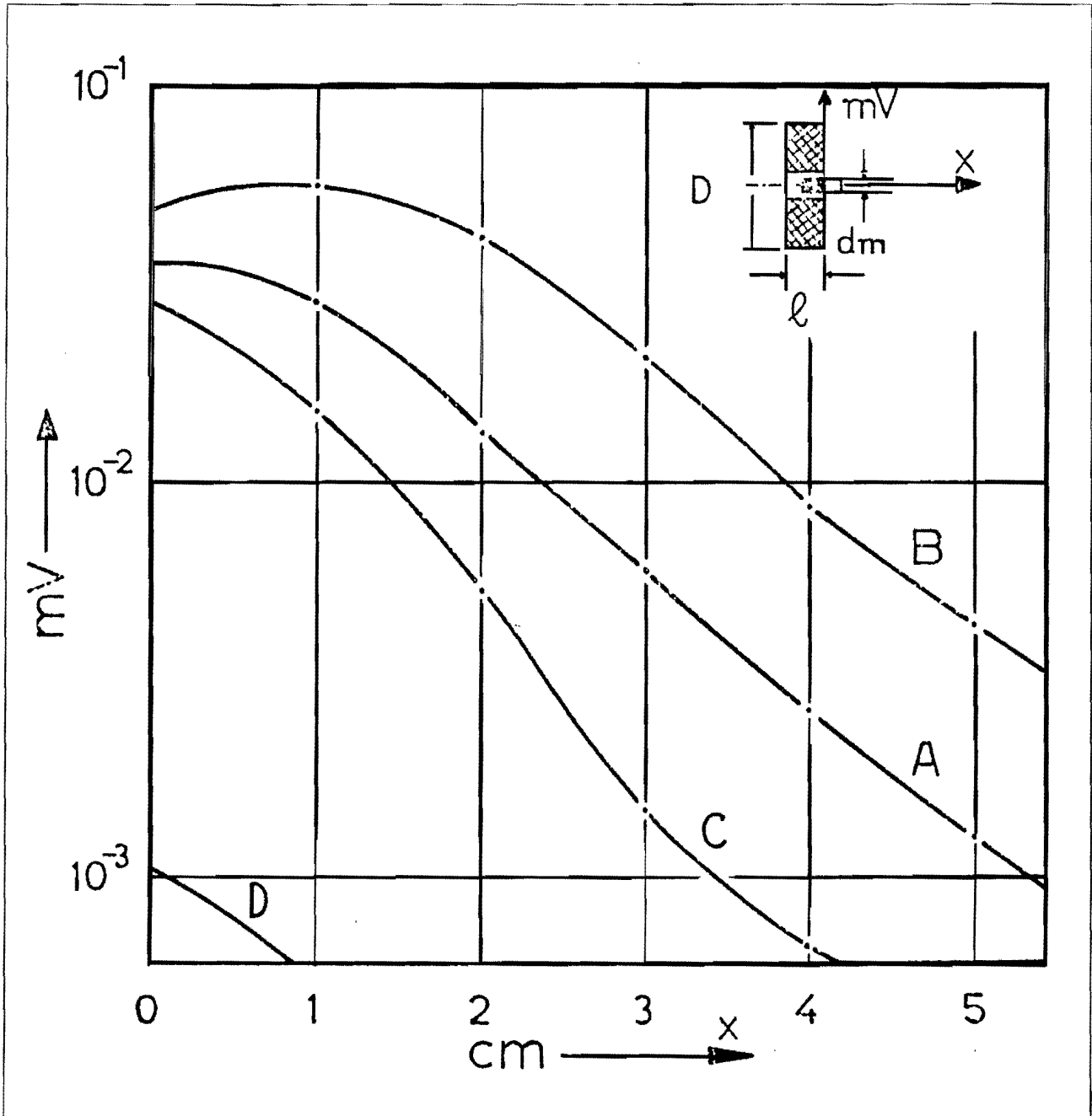
Έχει μάλιστα αποδειχθεί /3/ ότι μεταξύ της ηλεκτρογενερτικής δύναμης $E(t)$ και της ταχύτητας του μαγνήτη u ισχύει η σχέση

$$E = -CNu \quad (9)$$

όπου N ο αριθμός των σπειρών του πηνίου και $C = d\phi/dh$, όπου ϕ είναι η μαγνητική ροή. Η προηγούμενη σχέση γίνεται γραμμική όταν $C = \text{σταθερό}$. Αυτή είναι ακριβώς η περίπτωση την οποία διερευνήσαμε ιδιαίτερα. Φυσικά όσο μεγαλύτερο είναι το C , τόσο ευκολότερα μπορούμε να αποκαλύψουμε ταπεινότερες

ταχύτητες, μετρώντας την ηεδ E στα άκρα του πηνίου. Σημειώνεται ότι θεωρούνται θετικές οι ταχύτητες που απομακρύνουν τη σφαίρα από την επιφάνεια, ενώ αρνητικές είναι οι κατά τη διείδυση της σφαίρας στην επιφάνεια ταχύτητες.

Το μήκος και η διάμετρος του μαγνήτη είναι πρωταρχικής σημασίας στην πράξη, γι' αυτό απαιτείται προσεκτική επιλογή αυτού σε κάθε εφαρμογή. Σε κάθε περίπτωση, όμως, μαγνήτες όχι μεγάλης διαμέτρου και μήκους, π.χ. φ10/30χιλ, δίνουν καλά αποτελέσματα και σε διάστημα 2-3 χιλ το C παραμένει πράγματι



Σχήμα 3.

σταθερό, αν τηρηθεί ο κανόνας του σχ. 2.

Στα διαγράμματα του σχ. 3 δίδονται διάφορες χαρακτηριστικές $E(x)$, όπου η A παριστάνει εκείνη όπου το C παραμένει αρχικά σταθερό.

Η διευκρινιστική ικανότητα του αισθητήριου εξαρτάται, όπως είναι φυσικό, από τη σταθερά χρόνου του πηνίου, η οποία είναι της τάξης του 0,2 sec για το πηνίο της χαρακτηριστικής A . Για την αύξηση της διευκρινιστικής ικανότητας του πηνίου επιβάλλεται μείωση των σπειρών αυτού και αύξηση του C . Όσον αφορά στην ευαισθησία του αισθητήριου du/dE αυτή ανέρχεται σε 580 $\chi\lambda/sec.V$ για την περίπτωση A του σχ. 3.

Το επαγωγικό αισθητήριο που περιγράψαμε είναι μια απλή επινόηση, σε σύγκριση με άλλα επαγωγικά αισθητήρια και προσφέρεται σε πληθώρα εφαρμογών, όπως προκύπτει από τις χαρακτηριστικές του σχ. 3. Τούτο προκύπτει εξάλλου και από τις πολυπαραμετρικές σχέσεις (3) και (9).

Είναι ακόμη δυνατό να προσδιοριστεί και η επιτάχυνση της σφαίρας ανά πάσα στιγμή. Όπως προκύπτει από τη σχέση (9)

$$du/dt = -C_0 dE/dt \quad (10)$$

ενώ από την ολοκλήρωση της (9) προκύπτει

$$h(t) = -C_0 \int_0^t E(t) dt \quad (11)$$

Με τη χρησιμοποίηση διαφοριστή και ολοκληρωτή είναι επομένως δυνατός ο προσδιορισμός των νόμων (10) και (11) ταυτόχρονα με τον (9).

Πρέπει να λεχθεί πάλι ότι η κινητική της σφαίρας καθορίζεται στην πραγματικότητα όχι από τα γεωμετρικά, αλλά και από τα φυσικά χαρακτηριστικά των υλικών, έτσι οι σχέσεις (9), (10) και (11) έχουν σε τελική ανάλυση φυσική έννοια και είναι πολύ χρήσιμες στην

πράξη.

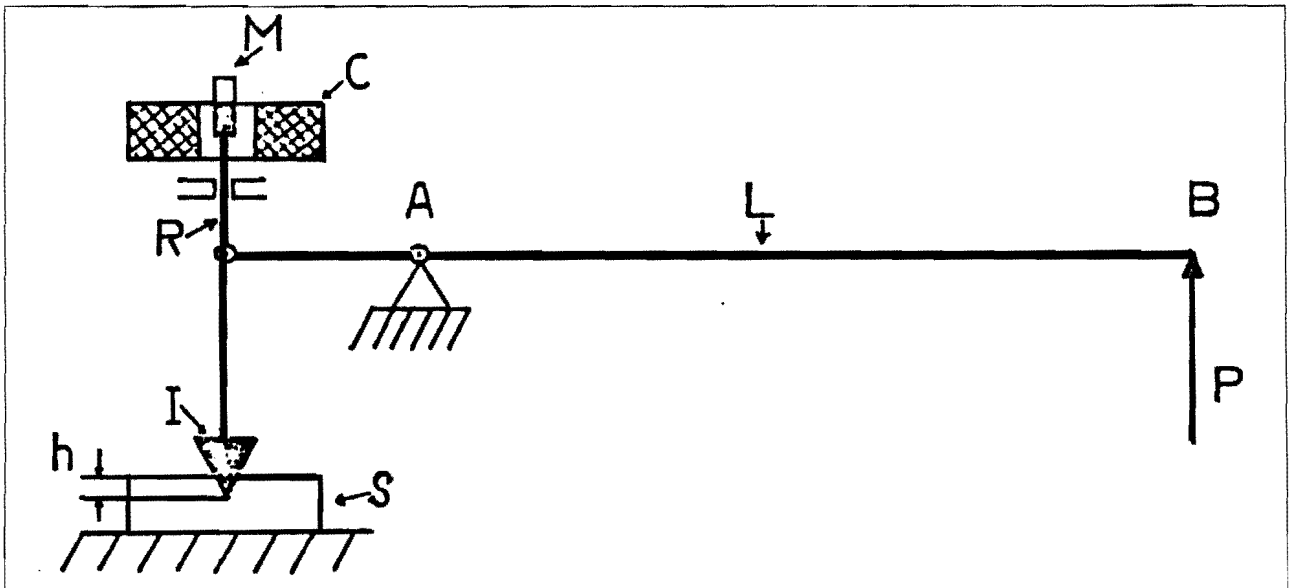
Μια πρακτική εφαρμογή του αισθητήριου

Το επαγωγικό αισθητήριο, για το οποίο έγινε λόγος προηγουμένως, εφαρμόστηκε στον τόσο σημαντικό και επίκαιρο τομέα των υλικών. Σ' αυτή την περίπτωση το αισθητήριο τοποθετήθηκε, όπως προαναφέραμε, σε ένα σκληρόμετρο τύπου AMSLER/WOLPERT, διάρκειας φόρτισης - εκφόρτισης 7sec, με τη χρησιμοποίηση σφαιρών διαμέτρων από 1/16" μέχρι 1/2".

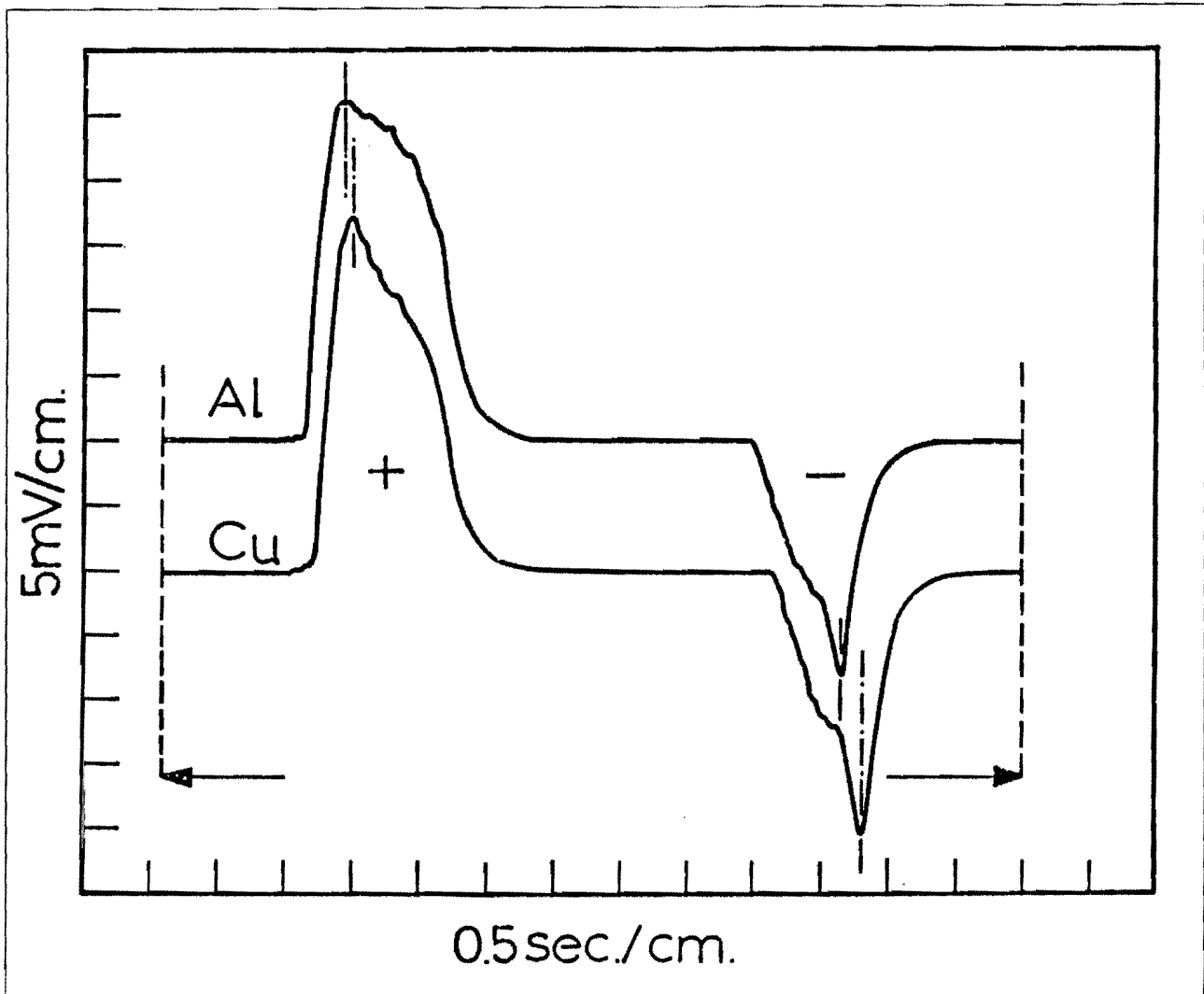
Στο σχ. 4 δίδεται η αρχή λειτουργίας του σκληρομέτρου και η θέση στην οποία είχε τοποθετηθεί το αισθητήριο.

Στη θέση S τοποθετήθηκαν διάφορα υλικά και λήφθηκαν τα σχετικά καταγραφόμενα καθ'όλη τη διάρκεια φόρτισης - εκφόρτισης. Στο σχ. 5 δίδονται τυπικά καταγραφόμενα για το αλουμίνιο και το χαλκό. Τα διαγράμματα έχουν μετατοπισθεί κατά τον κατακόρυφο άξονα για να είναι περισσότερο ευδιάκριτα.

Αρχικά παρατηρείται μια περίοδος νεκρή, ενώ στη συνέχεια αρχίζει αργά να κινείται η σφαίρα και η ηεδ αυξάνει με γρήγορο ρυθμό, και σε σύντομο χρονικό διάστημα παίρνει μια μέγιστη τιμή. Στη συνέχεια ελαττώνεται σχετικά αργά η ταχύτητα της σφαίρας και με ταλαντώσεις, όπως προβλέπεται από τη θεωρία. Κατόπιν ακολουθεί ομαλή μείωση της ηεδ, μέχρις ότου εφησυχάσει το υλικό κάτω από το μέγιστο φορτίο P . Στη φάση των ταλαντώσεων λαβαίνουν χώρα ελαστικά και πλαστικά φαινόμενα, δημιουργία ρωγμών κ.ά. /4-7/. Η διάρκεια της φόρτισης και της συμπεριφοράς ενός υλικού και για κάθε διάμετρο σφαίρας εξαρτάται κυρίως από τη δύναμη P . Έτσι κάθε υλικό παρουσιάζει τη δική του ιδιομορφία, όπως φαίνεται καθαρά από τα διαγράμματα του σχ. 5. Πρέπει να λεχθεί ότι η επιφάνεια των δύο λοβών τείνει να εξισωθεί για πολύ μικρές δυνάμεις P . Δηλαδή, η παραμόρφωση του υλικού της επιφάνειας τείνει να παραμείνει στην ελα-



Σχήμα 4.



Σχήμα 5.

στική περιοχή και παρουσιάζει ασφαλώς ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε πολλές περιπτώσεις.

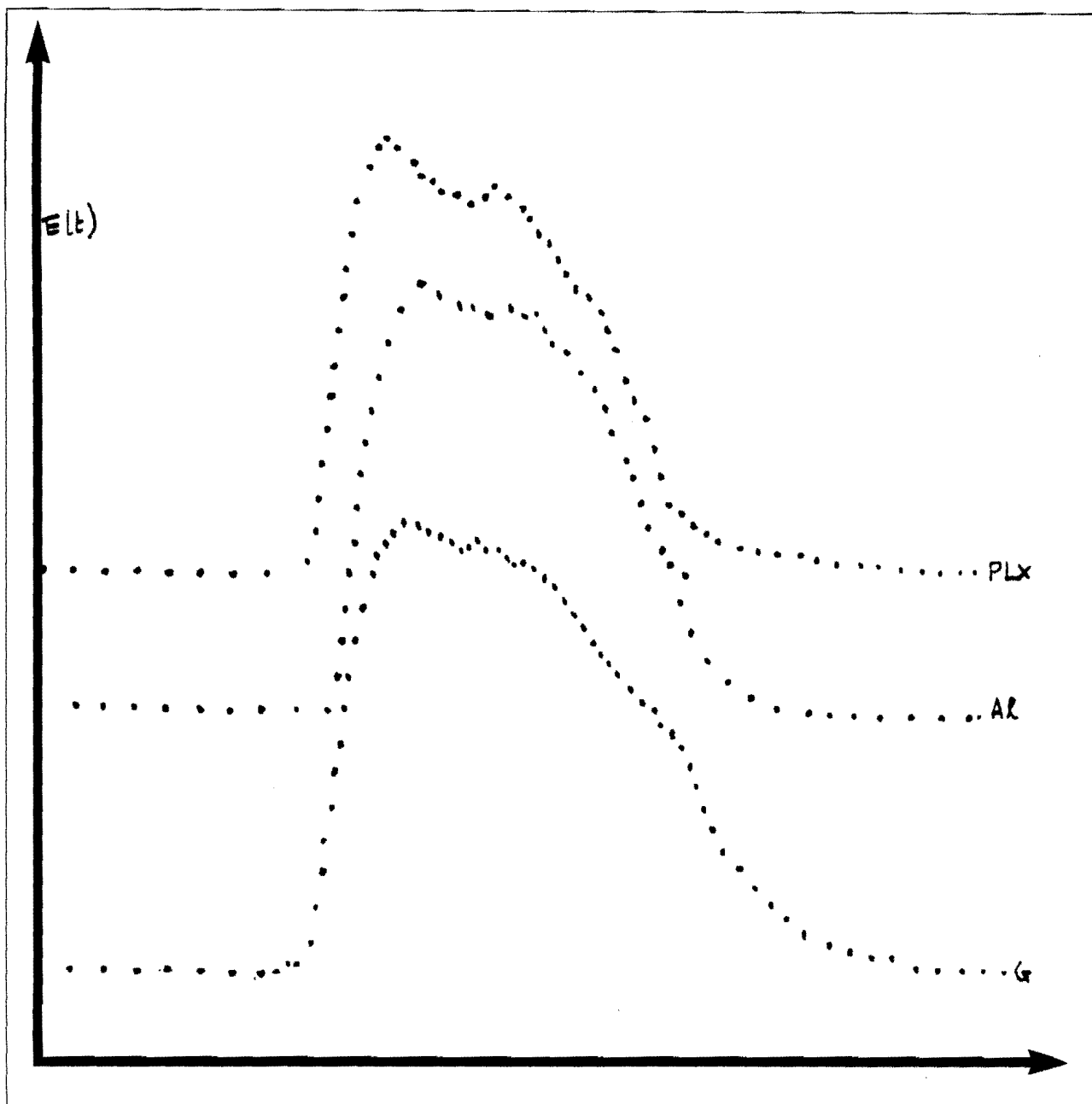
Μετά την περίοδο της φόρτισης ακολουθεί η περίοδος της εκφόρτισης, κατά την οποία αρχίζει η αφαίρεση της δύναμης P , οπότε αντιστρέφεται η κίνηση της σφαίρας. Στις πρώτες στιγμές της εκφόρτισης παρατηρούνται και πάλι ταλαντώσεις που αποδίδονται σε νέα φαινόμενα, ενώ η ταχύτητα της σφαίρας αυξάνει μέχρις ότου φθάσει μια μέγιστη τιμή. Στη συνέχεια ακολουθεί η φάση της εφυσύχασης του υλικού (RELAXATION) και τείνει πλέον ομαλά να φθάσει σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας.

Η επιφάνεια του κάθε λοβού αντιπροσωπεύει ένα μήκος σύμφωνα με τη σχέση (11). Ο θετικός λοβός αντιπροσωπεύει το μέγιστο βάθος διείσδυσης της σφαίρας, ενώ ο αρνητικός λοβός αντιπροσωπεύει τη μέγιστη επάνοδο της σφαίρας στην αρχική της θέση. Είναι επομένως δυνατό να προσδιορίσουμε τη διάμετρο του κύκλου επαφής με τις σχέσεις που έχουν δο-

θεί και να υπολογισθεί η σκληρότητα του υλικού. Όπως είναι, όμως, σαφές τα διαγράμματα του σχ. 5 δίνουν σωρεία άλλων πληροφοριών για τη συνολική συμπεριφορά του υλικού στη διάρκεια της δοκιμής, και όχι μόνο ένα τελικό και συνολικό αποτέλεσμα, όπως είναι η σκληρότητα αυτού.

Από τη σύγκριση μεταξύ χαλκού και αλουμινίου είναι δυνατή η συναγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά στη συμπεριφορά αυτών. Ακόμη, χρησιμοποιώντας διαφορετικές δυνάμεις P διαπιστώνουμε ότι η συμπεριφορά ενός και του αυτού υλικού μεταβάλλεται. Το αυτό συμβαίνει και στην περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται σφαίρες διαφορετικών διαμέτρων.

Τα προηγουμένως λεχθέντα ισχύουν φυσικά για επιφάνειες που βρίσκονται στην αυτή φυσική κατάσταση και κατεργασία. Αν η κατάσταση αυτή μεταβληθεί τότε και τα καταγραφόμενα επηρεάζονται ανάλογα. Έτσι μπορεί να μελετηθεί τόσο η φθορά, όσο και η γήρανση των υλικών.



Σχήμα 6.

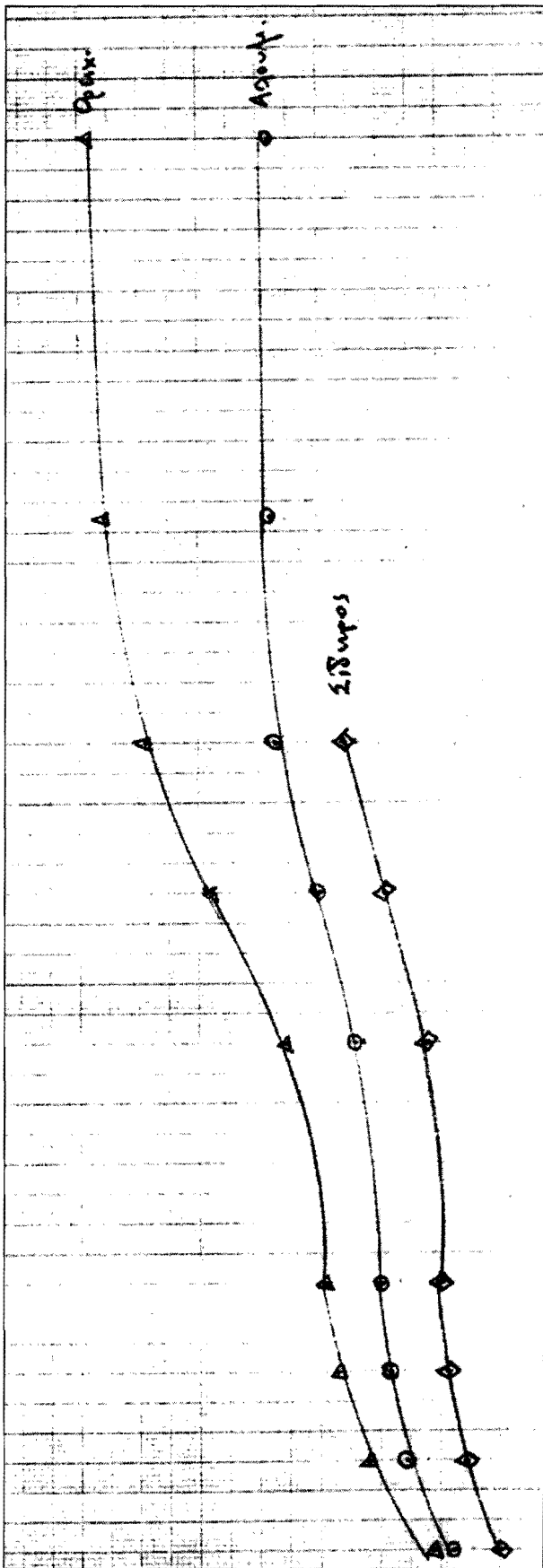
Το επαγωγικό αισθητήριο μπορεί, καταρχήν, να χρησιμοποιηθεί και στη μέτρηση της μικροσκληρότητας και τα αναμενόμενα αποτελέσματα πρέπει να είναι εξίσου ενδιαφέροντα.

Επειδή το θέμα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, δίδονται μερικά στοιχεία ακόμη για να φανεί η πρακτική αξία του αισθητηρίου. Στο σχ. 6 δίδονται καταγραφόμενα του θετικού λοβού του PLEXIGLASS, του αλουμινίου και του γυαλιού, τα οποία λήφθηκαν για δύναμη $P = 100 \text{ KG}$ και σφαίρα διαμέτρου $1/8''$. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να κάμει σειρά παρατηρήσεων και συγκρίσεων και να συναγάγει συμπε-

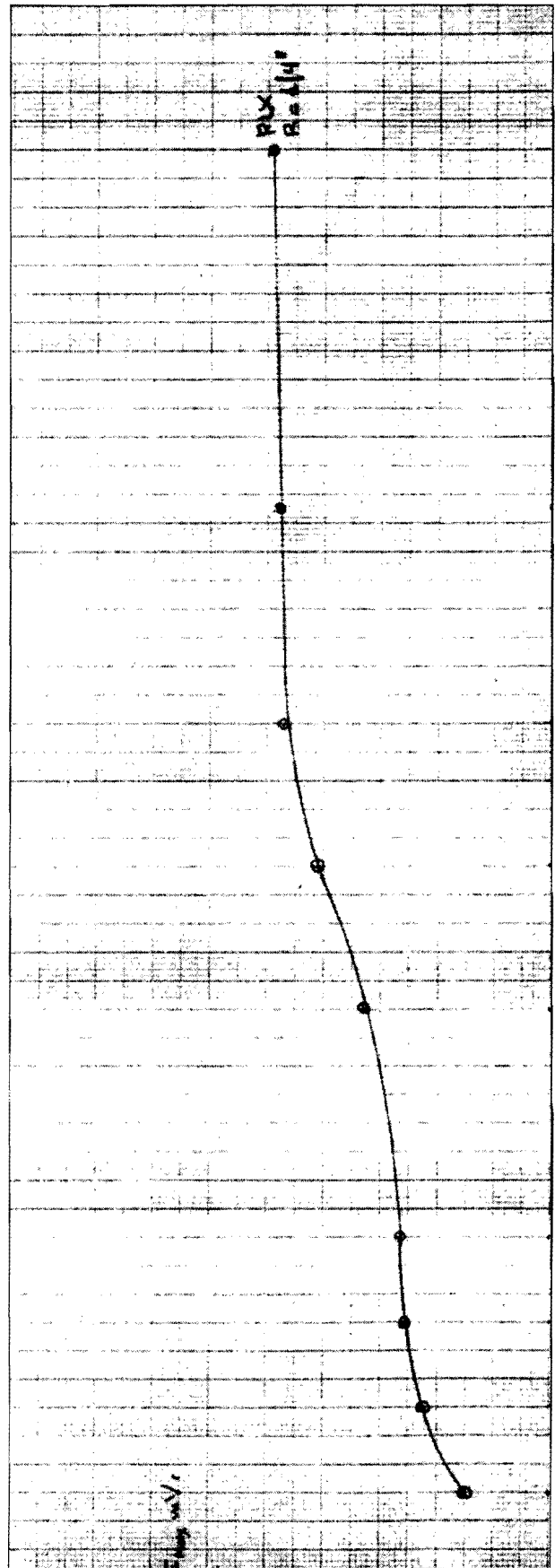
ράσματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η κλίμακα του άξονα της ηεδ του PLEXIGLASS είναι διπλάσια από τις άλλες δύο.

Στο σχ. 7 δίνεται η μέγιστη ηεδ ως συνάρτηση της δύναμης P και για διάμετρο σφαίρας $1/8''$, για τον ορείχαλκο, το αλουμίνιο και το σίδηρο. Το σχ. 8 παρουσιάζει τη χαρακτηριστική του PLEXIGLASS, αλλά για σφαίρα διαμέτρου $1/4''$.

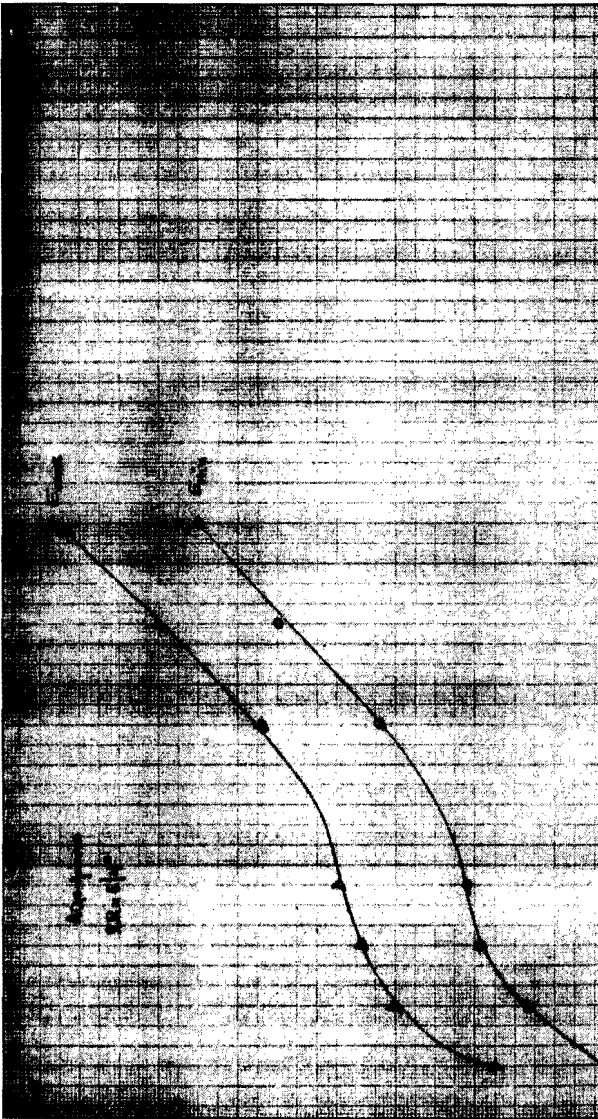
Τέλος, στα διαγράμματα του σχ. 9 γίνεται σύγκριση μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης ηεδ για το αλουμίνιο, με σφαίρα διαμέτρου $1/4''$.



Σχήμα 7.



Σχήμα 8.



Σχήμα 9.

Τελική παρατήρηση

Είναι σαφές ότι το επαγωγικό αισθητήριο, που περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο, είναι αξιόλογης πρακτικής σημασίας και η χρησιμοποίησή του

στον τομέα των υλικών μπορεί να συμβάλει αποφασιστικά στη βαθύτερη γνώση αυτών. Το θέμα αυτό όμως αφορά τους ειδικούς της επιστήμης των υλικών, στους οποίους έχει παραδοθεί ήδη.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- /1/ E.G. Mavroyannakis, a) Rules involving properties of the glass-forming liquids
J. Polym. Sci., Polym. Lett. 20, 551, 1982
- b) Properties of the Heraclitus number for glass-forming liquids
J. Polym. Sci., Polym. Lett. 23, 251, 1985
- /2/ E.G. Mavroyannakis, On the evolution of the generalized first order kinetic processes. Under Publication in Rad. Phys. Chem. 1993
- /3/ E.G. Mavroyannakis, Inductive sensor for detection of low velocities. J. Phys. E, Sci. Instr. 15, 80, 1982
- /4/ B.R. Lawn, A.G. Evans, A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields. J. Mat. Sci. 12, 2195, 1977
- /5/ B.R. Lawn, B.J. Hockey, S.M. Wiederhorn, Thermal effects in sharp particle contact
J. Am. Cer. Soc. 63, 356, 1980
- /6/ A.G. Evans, T.R. Wilshaw, Quasi-static solid particle damage in brittle solids -I. Observation analysis and implications. Acta Metallurgica 24, 939, 1976
- /7/ J.R. Cahoon, W.H. Broughton, A.R. Kutzak, The determination of yield strength from hardness measurements Metallurgical Transactions 2, 1971, 1971

Πρόεδρος: Ευχαριστούμε τον κύριο Μαυρογιαννάκη. Παρακαλούμε τον κύριο Χανιωτάκη, επίκουρο καθηγητή του Πανεπιστημίου Κρήτης, με θέμα: «Εκλεκτικά ηλεκτρόδια ιόντων και αερίων. Έρευνα και εφαρμογές».