
Θέμα: Η έννοια της ομοιομορφίας επιφάνειας και μη καταστροφικές μέθοδοι εκτίμησης των συνιστωσών της.

Εισηγητές: **A. Μάμαλης**, καθηγητής Ε.Μ.Π.
N. Βαξεβανίδης, ΜΜ, ερευνητής Ε.Μ.Π.

Παρουσιαστής: **N. Βαξεβανίδης**.

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, σε παγκόσμιο επίπεδο, σχεδιαστές και κατασκευαστές φορτιζόμενων δομικών στοιχείων επιδίδονται σε σοβαρή μελέτη και αναθεώρηση των βασικών αρχών και αλληλεπιδράσεων των μεθόδων παραγωγής στις μηχανικές ιδιότητες και τη λειτουργική συμπεριφορά των παραγόμενων επιφανειών, για λόγους απαιτούμενης αυξημένης αξιοπιστίας και ασφάλειας των κατασκευών, ασυνήθιστα υψηλών λειτουργικών απαιτήσεων, καθώς και ανάγκης για ανάπτυξη νέων κατεργασιών παραγωγής. Σε στρατηγικούς βιομηχανικούς τομείς (αεροπορική βιομηχανία, αυτοκινητοβιομηχανία), όπου οι κατασκευαστές υπόκεινται σε ιδιαίτερα δυσμενείς συνθήκες μηχανικής και θερμικής φόρτισης, όπως και περιβάλλοντος λειτουργίας, το μέγεθος των κατασκευών μειώνεται συνεχώς για να συμβαδίσει με τις απαιτήσεις μικρότερου βάρους ή/ και ελάχιστης καταναλισκόμενης ενέργειας, έτσι η κατάσταση της επιφάνειας ασκεί ακόμα σημαντικότερη επίδραση στην απόκριση της κατασκευής.

Η λειτουργική συμπεριφορά των μεταλλικών τεμαχίων επηρεάζεται αποφασιστικά από τις φυσικές ιδιότητες των επιφανειακών στρωμάτων του μετάλλου, όπως η διανομή των παραμενουσών τάσεων, η μεταβολή της σκληρότητας και οι αλλαγές της δομής του υλικού, οι μαγνητικές ιδιότητες, η αντοχή σε διάβρωση κ.λπ. Ειδικότερα, σε προβλήματα τριβολογίας, διάβρωσης ή/ και δυναμικών καταπονήσεων είναι δυνατόν συγκεκριμένες ιδιότητες των επιφανειακών στρωμάτων να προκαλέσουν αστοχία και καταστροφή μιας κατασκευής ή, αντίθετα, βελτίωση της λειτουργικής συμπεριφοράς και αύξηση της διάρκειας ζωής.

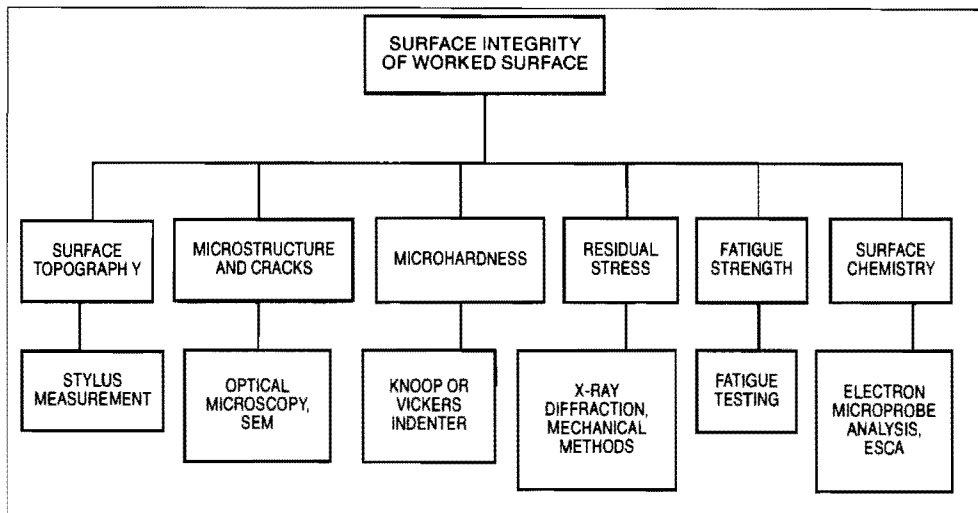
Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από το είδος της κατεργασίας του υλικού, καθώς και από την «ιστορία» του, η επακριβής δε γνώση τους είναι απαραίτητη για τη βέλτιστη χρήση του υλικού και τη δυνατότητα υψηλότερης φόρτισης μηχανών κι εγκαταστάσεων. Υπάρχει λοιπόν αυξημένη απαίτηση για τη μελέτη και ανάπτυξη κατεργασιών, που να προσδίδουν

τις επιθυμητές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες στις κατεργαζόμενες επιφάνειες, σε συνδυασμό με την εφαρμογή νέων υλικών και τη μείωση των αιτιών αστοχίας του τελικού προϊόντος. Η απαίτηση αυτή, συνήθως, για λόγους κόστους ή/και χρόνου, καλύπτεται εμπειρικά, δηλαδή μέσω τη διαδικασίας δοκιμής-λάθους-δοκιμής. Από την άλλη πλευρά, η σύγχρονη μαζική παραγωγή καθιστά αναγκαία μια πιο συστηματική προσέγγιση του κύκλου κατεργασία-ιδιότητες επιφάνειας-λειτουργική συμπεριφορά. Μια τέτοια επιτυχής προσέγγιση γίνεται με την εισαγωγή της έννοιας της **ομοιομορφίας επιφάνειας** (surface integrity) [1].

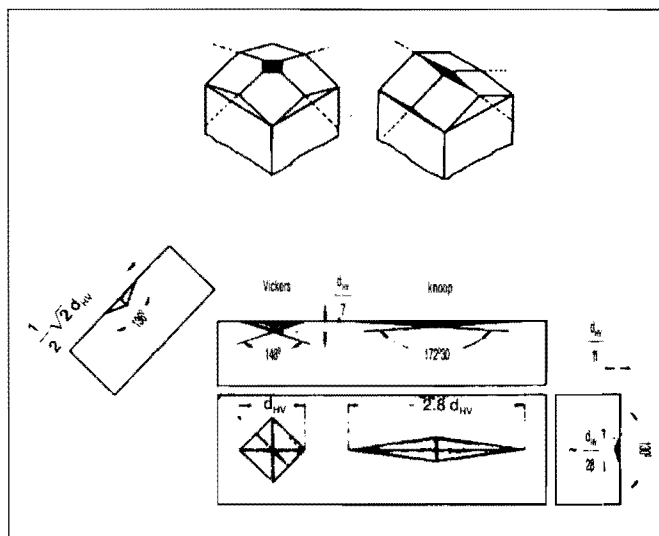
1. Ομοιομορφία επιφάνειας

Ο όρος «ομοιομορφία επιφάνειας» αποδίδει το συσχετισμό των φυσικών ιδιοτήτων και της λειτουργικής συμπεριφοράς μιας επιφάνειας και εμπεριέχει πληροφορίες σχετικά με τις παραμένουσες τάσεις, τη σκληρότητα, τη μικρογεωμετρία και τη μεταλλουργική δομή στην επιφάνεια και στα στρώματα κάτω από αυτήν [2]. Γενικά, η ομοιομορφία επιφάνειας καθορίζεται από μηχανικές, θερμικές και χημικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ υλικού του κατεργαζόμενου τεμαχίου και εργαλείου, σε συσχετισμό με τις υπόλοιπες παραμέτρους της κατεργασίας [3,4]. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην πλειονότητα των κατεργασιών οι μηχανικές, οι θερμικές και χημικές φορτίσεις δρουν ταυτόχρονα· έτσι η συσχέτιση των αλλαγών στο επιφανειακό στρώμα με μια συγκεκριμένη φόρτιση είναι πολύ δύσκολη. Αντίθετα, η μελέτη των θερμικών και μηχανικών επιδράσεων σε επιλεγμένες κατεργασίες, όπου αυτές εμφανίζονται διακριτά και μεμονωμένα, π.χ. έλαση, μπορεί να αποσαφηνίσει την επίδραση συγκεκριμένων παραμέτρων των κατεργασιών στην ομοιομορφία επιφάνειας και να συμβάλει στη μελέτη και κατανόηση συνθετότερων περιπτώσεων με ταυτόχρονη μηχανική και θερμική επίδραση, όπως π.χ. λείανση.

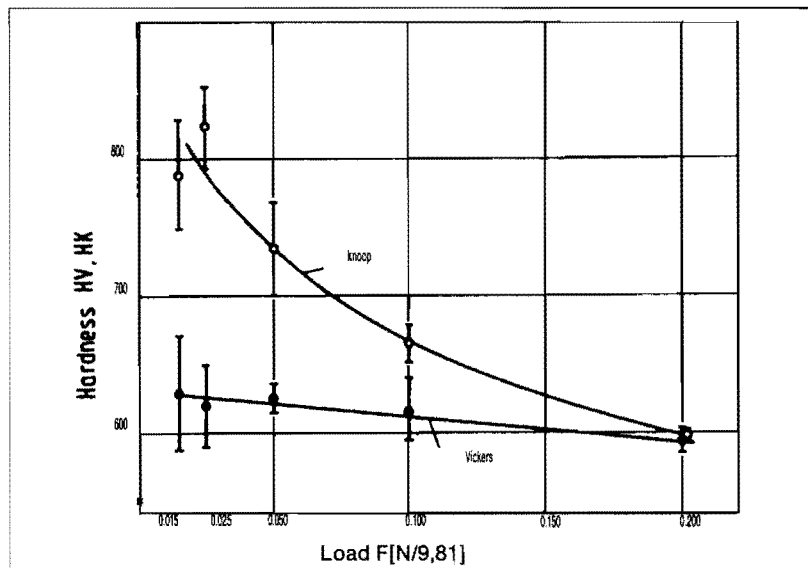
Για την εκτίμηση των παραμέτρων της ομοιομορφίας



Σχ. 1. Συνιστώσες της «ομοιομορφίας επιφάνειας» και αντίστοιχες μετρητικές μέθοδοι.



Σχ. 2. Διεισδυτές Vickers και Κνοορ.



Σχ. 3. Εξάρτηση των τιμών σκληρότητας κατά Vickers και Κνοορ από το επιβαλλόμενο φορτίο.

επιφάνειας, δηλαδή των φυσικοχημικών αλλαγών μιας μεταλλικής επιφάνειας, σαν συνέπεια θερμικής ή/και μηχανικής δράσης, εφαρμόζεται μια μεγάλη ποικιλία μετρητικών μεθόδων που περιλαμβάνουν τραχυμέτρηση, χρήση οπτικών, μεταλλογραφικών και ηλεκτρονικών μικροσκοπίων, μέτρηση της μικροσκληρότητας, μεταλλογραφική προσβολή και εξέταση της μικροδομής του υλικού, χρήση ακτίνων-Χ ή μηχανικών μεθόδων για τον προσδιορισμό των πεδίων των παραμενουσών τάσεων, καθώς και ένα πλήθος κοινών και ειδικών δοκιμών (εφελκυσμού, κόπωσης, ερπυσμού, αντοχής σε διάβρωση κ.λπ.). Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται οι συνιστώσες της ομοιομορφίας επιφάνειας και οι κυριότερες αντίστοιχες μετρητικές μέθοδοι.

Λόγω της ιδιαίτερης σημασίας, αλλά και της έλλειψης επαρκούς ελληνικής βιβλιογραφίας, τα σχετικά με τη φύση, την ανάπτυξη και τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων, όπως και της (μικρο-) σκληρότητας εξετάζονται αναλυτικά στη συνέχεια. Για τα θέματα της τραχύτητας επιφάνειας, τη χημική ανάλυση μιας κατεργασμένης επιφάνειας και το μεταλλογραφικό (καταστροφικό) έλεγχο της μικροδομής, ο αναγνώστης παραπέμπεται στη σχετική βιβλιογραφία, βλέπε τις βιβλιογραφικές παραπομπές [4-7], [8] και [9, 10] αντίστοιχα.

2. Μικροσκληρότητα

Η θερμική ή/και η μηχανική επίδραση κατά τη διάρκεια της κατεργασίας επιφέρει αλλαγές στα στρώματα του υλικού κοντά στην επιφάνεια. Από τις οπουδιότερες αλλαγές αυτής της προέλευσης είναι η αλλαγή της σκληρότητας, λόγω πλαστικής παραμόρφωσης (work-hardening/softening) και οι αλλοτροπικοί μετασχηματισμοί (μαρτενσιτικός μετασχηματισμός).

Η μέτρηση της σκληρότητας που ορίζεται σαν η αντίσταση η προβαλλόμενη από το σώμα στη διείσδυση σκληρότερου υλικού [11], χρησιμοποιείται συνήθως για τη μελέτη της κατάστασης των επιφανειακών στρωμάτων κατεργασμένου τεμαχίου σε συνάρτηση με τις παραμέτρους της κατεργασίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται διεισδυτές τύπου Vickers ή Knoop. Η τιμή της σκληρότητας δίνεται από τη σχέση:

$$H = \frac{F}{A}$$

όπου F είναι το στατικό φορτίο και A η επιφάνεια διείσδυσης. Το σχήμα της επιφάνειας A εξαρτάται από τη μορφή του διεισδυτή. Στο σχήμα 2, φαίνονται οι διεισδυτές τύπων Vickers ή Knoop και οι αντίστοιχες επιφάνειες διείσδυσης.

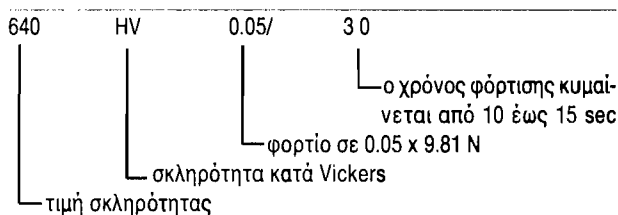
Η επιφάνεια A μπορεί να υπολογιστεί στην περίπτωση Vickers, είτε από τις διαγωνίους (d), είτε από την πλευρά (a), ενώ στην περίπτωση της σκληρότητας κατά Knoop η επιφάνεια A υπολογίζεται από τη μεγάλη διαγώνιο του αποτυπώματος (d₁), σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις, βλέπε επίσης βιβλιογραφική παραπομπή [4].

$$A_{HV} = \frac{d_v^2}{2\cos 22^\circ}, A_{HV} = \frac{a_v^2}{2\cos 22^\circ}, A_{HK} = \frac{d^2}{14.23}$$

Η θερμική και μηχανική δράση κατά τη διάρκεια μιας κατεργασίας είναι συγκεντρωμένη στα επιφανειακά στρώματα του υλικού. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε απότομες μεταβολές στην κλίση της κατανομής της σκληρότητας της τάξης των 10 HV/μm ή και περισσότερο, και έτσι για τον ακριβή προσδιορισμό της σκληρότητας καθίσταται υποχρεωτική η εφαρμογή μεθόδων **μικροσκληρότητας** (microhardness). Το εφαρμοζόμενο φορτίο σε αυτή την περίπτωση είναι συνήθως μικρότερο του 1N.

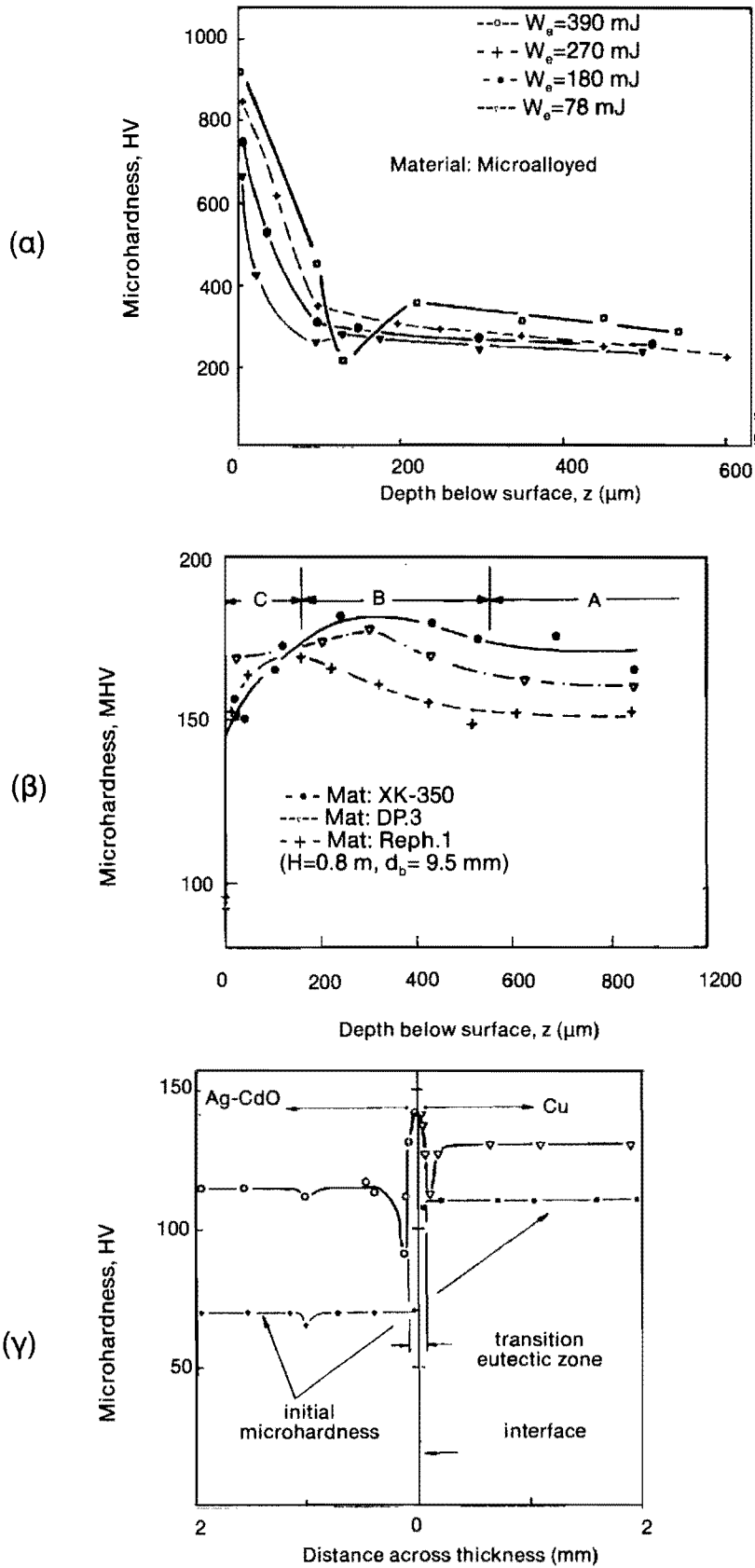
Σε αυτή την περιοχή φορτίων η τιμή της (μικρο)σκληρότητας εξαρτάται από το επιβαλλόμενο φορτίο (size effect) [4, 12], ενώ στην περίπτωση μεγαλύτερων φορτίων είναι σχεδόν ανεξάρτητη, βλέπε και σχήμα 3. Για την αναγωγή της τιμής της μικροσκληρότητας σε μια ισοδύναμη σκληρότητα συμπαγούς υλικού, έχουν προταθεί διάφορες διαδικασίες διόρθωσης [12], οι οποίες ωστόσο δεν επηρεάζουν τον υπολογισμό του βάθους της ζώνης της πλαστικής παραμόρφωσης (h), το οποίο προκύπτει από την κατανομή της (μικρο)σκληρότητας συναρτήσει του βάθους κάτω από την κατεργασμένη επιφάνεια, βλέπε επίσης βιβλιογραφική παραπομπή [13].

Τελικά, λαμβάνοντας υπόψη την έκφραση του φορτίου σε Kp (=N/9.81) και την επίδραση του χρόνου φόρτισης (εξάσκησης φορτίου), η τιμή της σκληρότητας προτυποποιείται ως εξής:



Από μια συγκριτική μελέτη τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της δοκιμής κατά Knoop, σε σχέση με εκείνη κατά Vickers, συνοψίζονται ως εξής:

- Οι μεγαλύτερες διαγώνιοι (2.8 φορές) μπορούν να μετρηθούν οπτικά με μικρότερο σφάλμα ανάγνωσης.
- Το βάθος διείσδυσης είναι μικρότερο (1.6 φορές). Έτσι η επίδραση της ανομοιογένειας κάθετα στη μετρούμενη επιφάνεια είναι μικρότερη.
- Η μικρή διαγώνιος (2.8 φορές μικρότερη από τη διαγώνιο του Vickers) δίνει τη δυνατότητα να πλησιάσει κανείς πολύ κοντά στην κατεργασμένη επιφάνεια.
- Η επιφάνεια μέτρησης πρέπει να είναι πολύ επίπεδη. Η επίδραση του σφάλματος λόγω της μορφής της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη δοκιμή Vickers.
- Η δοκιμή Knoop μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ανισοτροπίας [4], λόγω ακριβώς της ασυμμετρίας των διαγωνίων του. Επιπρόσθετα, η σκληρομέτρηση κατά Knoop παρέχει ενδείξεις και



Σχ. 4. Κατανομές μικροσκληρότητας Vickers σε χαλύβδινες επιφάνειες ύστερα από κατεργασίες: (α) ηλεκτροδιάβρωση (EDM), (β) βομβαρδισμού με σφαιρίδια (shot-peening) και (γ) εκρηκτικής συγκόλλησης (explosive welding).

για τα πεδία παραμενουσών τάσεων, βλέπε στη συνέχεια της παρούσας εργασίας.

– Ο διεισδυτής Κνοορ είναι ακριβότερος (1.2 φορές).

Οι μέθοδοι προετοιμασίας των επιφανειών για μικροσκληρομέτρηση, το θέμα της αξιοπιστίας και επαναληψιμότητας των μετρήσεων και οι συστηματικές και στοχαστικές επιδράσεις πάνω στη διαδικασία, όπως και οι περιορισμοί που τίθενται, δεν θα παρουσιασθούν εδώ. Η ανάλυση των παραπάνω θεμάτων μπορεί να αναζητηθεί στη βιβλιογραφική παραπομπή [14].

Σημειώνεται, επίσης, ότι για το μη καταστροφικό προσδιορισμό της κατανομής της μικροσκληρότητας, έχουν προταθεί εναλλακτικά διάφορες άλλες μέθοδοι, με κυριότερη την ανάλυση του μαγνητικού θορύβου Barkhausen [15, 16]. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές βρίσκονται ακόμα στο στάδιο της ανάπτυξης και έχουν πολύ περιορισμένες εφαρμογές.

Στα σχήματα 4(α),(β) και (γ) παρουσιάζονται κατανομές μικροσκληρότητας σε μεταλλικές επιφάνειες που έχουν υποστεί συγκεκριμένες μη συμβατικές κατεργασίες. Τα τυπικά χαρακτηριστικά και οι ιδιομορφίες των κατανομών αυτών αναλύονται στις αντίστοιχες βιβλιογραφικές παραπομπές [1,13,17].

3. Παραμένουσες τάσεις

3.1. Ορισμός – ταξινόμηση

Οι παραμένουσες τάσεις ορίζονται σαν οι αυτοίσοροπούμενες τάσεις που υπάρχουν σ' ένα υλικό ή μια κατασκευή όταν απουσιάζουν οι εξωτερικές δυνάμεις και ροπές. Σήμερα είναι γενικά παραδεκτό ότι στην

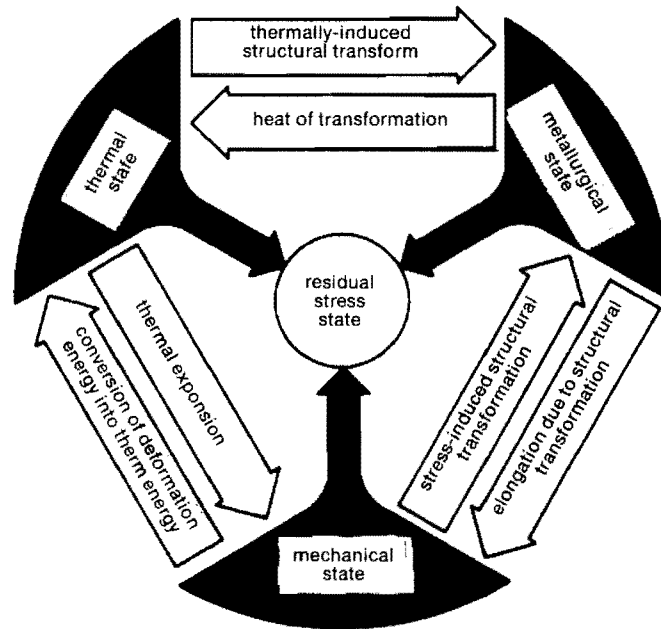
πράξη δεν μπορεί να υπάρξει υλικό ή κατασκευή χωρίς την ύπαρξη παραμενουσών τάσεων. Οι παραμένουσες αυτές τάσεις είναι συνάρτηση των θερμικών και μηχανικών δράσεων που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια των κατεργασιών κοπής, διαμόρφωσης, συγκόλλησης ή αποπεράτωσης και επηρεάζουν τα μέγιστα (θετικά ή αρνητικά) τη λειτουργική συμπεριφορά της κατεργασμένης επιφάνειας. Οι αιτίες που δημιουργούν παραμένουσες τάσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 5, ενώ στο σχήμα 6 δίνονται διαγραμματικά οι κυριότερες επιδράσεις των τάσεων αυτών, βλέπε επίσης τις βιβλιογραφικές παραπομπές [18, 19].

Εξαιτίας της ιδιαίτερης σημασίας των παραμενουσών τάσεων στη λειτουργική συμπεριφορά των κατεργασμένων επιφανειών ή αντικειμένων και της στενής συσχέτισής τους με την αστοχία υλικών ή κατασκευών (κόπωση) υπάρχει μια σχετική εκτεταμένη διεθνής βιβλιογραφία, βλέπε ενδεικτικά τις συλλογές άρθρων και τα διεθνή συνέδρια [20-25]. Επιπρόσθετα αναφέρεται ότι για τις τεχνολογικές εφαρμογές ιδιαίτερη σημασία και ενδιαφέρον έχουν οι παραμένουσες τάσεις που είναι σταθερές κατά μέτρο και διεύθυνση κατά μήκος μιας σχετικά μεγάλης επιφάνειας (πολλοί κόκκοι του υλικού) και αθροιζόμενες στο συνολικό όγκο του υλικού ή της κατασκευής, βρίσκονται σε ισορροπία. Οι τάσεις αυτές ονομάζονται μακροπαραμένουσες τάσεις ή παραμένουσες τάσεις πρώτου (I) είδους, βλέπε επίσης βιβλιογραφική παραπομπή [26].

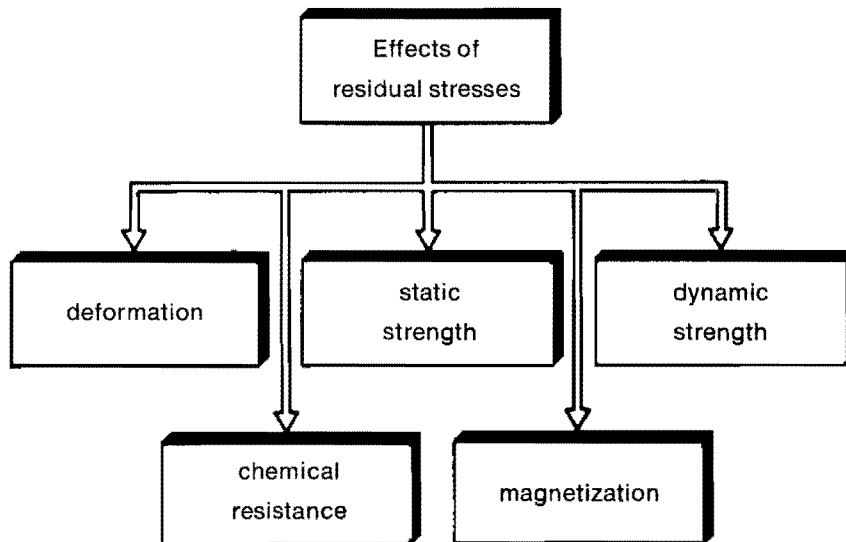
Η μαθηματική θεμελίωση και ανάλυση του πεδίου των παραμενουσών τάσεων βρίσκεται έξω από τα όρια της παρούσας (σύντομης) ανακοίνωσης, βλέπε για μια πρώτη προσέγγιση τη βιβλιογραφική παραπομπή [27].

Πίνακας 1.

Μέθοδος		Μετρούμενο μέγεθος	Είδος παραμενουσών τάσεων	Χαρακτήρας μεθόδου
Μηχανικές	Βέλος κάμψης	Μακροσκοπικές επιφανειακές παραμορφώσεις	1°	Καταστροφική
	Με διάτρηση	Μακροσκοπικές παραμορφώσεις	1°	Ημι-καταστροφική
Περίθλαση ακτίνων Χ		Παραμορφώσεις κρυσταλλικού πλέγματος	1° και 2°	Μη καταστροφική - μόνο για επιφ. μέτρηση
Περίθλαση νετρονίων		Παραμορφώσεις κρυσταλλικού	1° και 2°	Μη καταστροφική
Υπέρηχοι		Διαφορά ταχυτήτων ή διαφορά χρόνου διαδρομής διατμητικών πολωμένων κυμάτων	1°, 2° και 3°	Μη καταστροφική
Μαγνητικές (Ανάλ. θορύβου Barkhausen)		Μέτρηση των αλμάτων Barkhausen στην καμπύλη $B=\Phi(H)$	1°, 2° και 3°	Μη καταστροφική



Σχ. 5. Δημιουργία παραμενουσών τάσεων σαν συνέπεια μηχανικών, θερμικών και μεταλλουργικών αλληλεπιδράσεων στην επιφάνεια κατεργασίμου υλικού.



Σχ. 6. Επίδραση των παραμενουσών τάσεων στις ιδιότητες και τη συμπεριφορά ενός κατεργασμένου υλικού/τεμαχίου.

Το συμπέρασμα, πάντως, που προκύπτει [27, 28] είναι ότι εκτός ειδικών ή απλών περιπτώσεων οι παραμενουσες τάσεις δεν μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά, ιδιαίτερα δε στην περίπτωση σύνθετων μηχανουργικών κατασκευών. Κατά συνέπεια και με δεδομένη τη σημασία και την επίδρασή τους στη δομική ακεραιότητα των κατασκευών, ο ασφαλέστερος τρόπος για την εκτίμηση των παραμενουσών (μακρο-)τάσεων είναι ο πειραματικός προσδιορισμός και η μέτρησή τους, χωρίς, κατά το δυνατόν, να επηρεάζεται η τελική λειτουργικότητα του υλικού ή του εξαρτήματος. Το θέμα αυτό, των μη καταστροφικών μεθόδων μέτρησης των παραμενουσών τάσεων αναπτύσσεται στη συνέχεια.

3.2. Μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων

Γενικά, είναι δύσκολο να υπάρξει μια σαφής και μονοσήμαντη ταξινόμηση των μεθόδων μέτρησης των παραμενουσών τάσεων, και αυτό οφείλεται τόσο στην ασάφεια και ανεπάρκεια των σχετικών όρων να περιγράψουν σαφώς μια μέθοδο (π.χ. μηχανική, ηλεκτρική), όσο και στα κοινά χαρακτηριστικά (π.χ. αφαίρεση διαδοχικών στρωμάτων του υλικού) που έχουν κάποιες μέθοδοι [19,27].

Παλαιότερη, - αλλά ακόμα αποδεκτή -, είναι η διάκριση σε:

- α. μη καταστροφικές μεθόδους (non-destructive methods) και
- β. καταστροφικές μεθόδους (destructive methods).

Νεότερη και πλέον «πρακτική» είναι η διάκριση σε έμμεσες και άμεσες μεθόδους [15,19]:

α. Στις **έμμεσες** μεθόδους μετρήσεων, η ισορροπία των δυνάμεων και των ροπών πρέπει να διαταραχθεί, ώστε, από τις προκύπτουσες παραμορφώσεις του απομακρυνόμενου τμήματος να υπολογίζονται οι απαραίτητες τάσεις. Στην πράξη για τη μέτρηση των τάσεων, τα επιφανειακά στρώματα, από την πλευρά που έχει γίνει η κατεργασία, αφαιρούνται και μετρούνται οι παραμορφώσεις του παραμένοντος τμήματος συναρτήσει του πάχους. Για την αφαίρεση των επιφανειακών στρωμάτων συνήθως χρησιμοποιείται η ηλεκτροστίλβωση (ECM), δοθέντος ότι η μέθοδος αυτή δεν εισάγει πρακτικά νέες τάσεις στο τεμάχιο.

β. Στις **άμεσες** μεθόδους, ο προσδιορισμός των τάσεων γίνεται με τη μέτρηση των διαφόρων φυσικών ιδιοτήτων του υλικού, οι οποίες επηρεάζονται από τα σιλικές καταστάσεις. Η μέθοδος των ακτίνων-Χ είναι η περισσότερο χρησιμοποιούμενη άμεση μέθοδος μέτρησης των παραμενουσών τάσεων, ενώ εφαρμογή έχουν και οι μέθοδοι με χρήση μαγνητικού πεδίου και υπερήχων.

Στον πίνακα 1, παρουσιάζονται οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων, το μετρούμενο μέγεθος για τον προσδιορισμό των τάσεων και ο καταστροφικός ή μη χαρακτήρας της μεθόδου. Από αυτόν τον πίνακα και με βάση τα προηγούμενα, γίνεται σαφές ότι οι «μη καταστροφικές» μέθοδοι ταυτίζονται, κατά προσέγγιση, με τις άμεσες.

3.2.1. Μέθοδος περίθλασης ακτίνων-Χ (X-ray diffraction)

Μεταξύ των άμεσων μεθόδων μέτρησης των παραμενουσών τάσεων, η πλέον αναπτυγμένη είναι η μέθοδος περίθλασης ακτίνων Χ, κυρίως λόγω της ευαισθησίας και αξιοπιστίας της, καθώς και της ευελιξίας ως προς τα διάφορα γεωμετρικά σχήματα δοκιμίων που μπορούν να εξεταστούν. Βασίζεται στη μέτρηση της μεταβολής των αποστάσεων των ατομικών επιπέδων λόγω των τάσεων. Κάτω από την επίδραση εσωτερικών ή εξωτερικών δυνάμεων παρατηρείται παραμόρφωση της κρυσταλλικής δομής των υλικών, άρα μεταβολή των ενδοατομικών τους αποστάσεων. Όταν η παραμόρφωση υπερβεί το όριο ελαστικότητας, λαμβάνει χώρα πλαστική παραμόρφωση που οφείλεται στην ολίσθηση των πλεγματικών επιπέδων μεταξύ τους. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η μεταβολή της ενδοατομικής απόστασης είναι ανάλογη της επιβαλλόμενης τάσης.

Η τεχνική μέτρησης παραμενουσών τάσεων με ακτίνες-Χ είναι δυνατή λόγω του γεγονότος ότι το μήκος κύματος των ακτίνων-Χ είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την ενδοατομική απόσταση στους μεταλλικούς κρυστάλλους (περίπου 1 Å). Το μικρό μήκος κύματος των ακτίνων-Χ καθιστά δυνατή τη διεξόδυσή τους στο κρυσταλλικό πλέγμα κατά ένα ποσοστό και την ανάκλασή τους πάνω στα πλεγματικά επίπεδα.

Έστω επίπεδο μονοχρωματικό κύμα που προσπίπτει στα ατομικά επίπεδα μετάλλου κατά τη διεύθυνση ΑΒ, όπως δείχνει το σχήμα 7. Οι ανακλώμενες ακτίνες από διαδοχικά παράλληλα ατομικά επίπεδα ενισχύονται μόνο σε μια κατεύθυνση, τη ΒC, που είναι η κατεύθυνση περίθλασης. Η ενίσχυση στην κατεύθυνση ΒC (ή FH) προϋποθέτει ότι η διαφορά των δυο τροχιών (EF + FG) είναι ίση με ακέραιο αριθμό μηκών κύματος, δηλαδή ότι $EF = FG = n\lambda/2$. Στη γενική περίπτωση, η συνθήκη περίθλασης εκφράζεται από το νόμο του Bragg:

$$(n\lambda = 2 d \cdot \sin\theta \quad (1)$$

όπου λ το μήκος κύματος της προσπίπτουσας δέσμης, θ η γωνία μεταξύ της προσπίπτουσας (ή ανακλώμενης) δέσμης και της επιφάνειας των επιπέδων ανάκλασης,

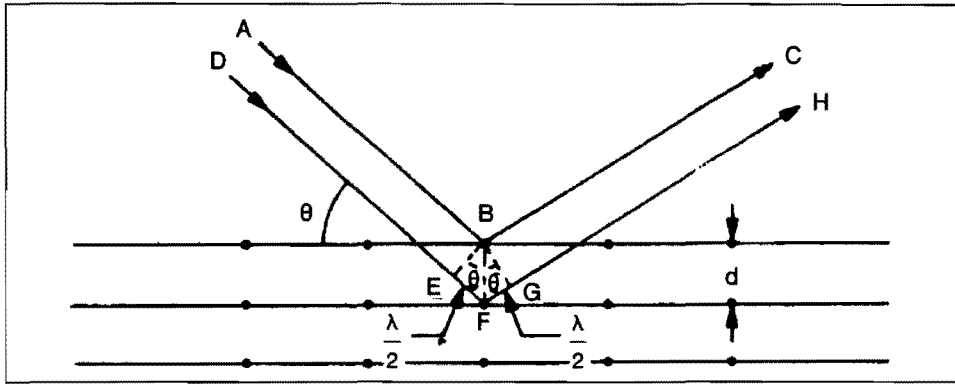
d η απόσταση μεταξύ ατομικών (πλεγματικών) επιπέδων και

n η τάξη της ανάκλασης ($n = 1, 2, 3, \dots$)

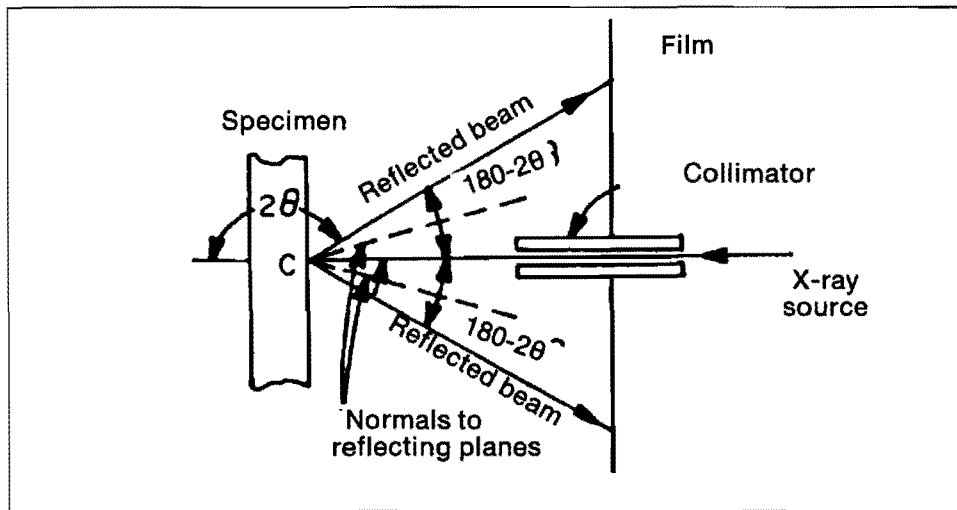
Από την εξίσωση (1) προκύπτει ότι, αν είναι γνωστό το μήκος κύματος των ακτίνων-Χ, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του d με μέτρηση της γωνίας θ . Σημειώνεται ότι στην πράξη ενδιαφερόμαστε για τα μέγιστα περίθλασης πρώτης τάξης, κατά συνέπεια $n = 1$ [18, 29].

Δυο γενικές μέθοδοι εφαρμόζονται για την καταγραφή της έντασης των διαθλώμενων ακτίνων-Χ [18-31].

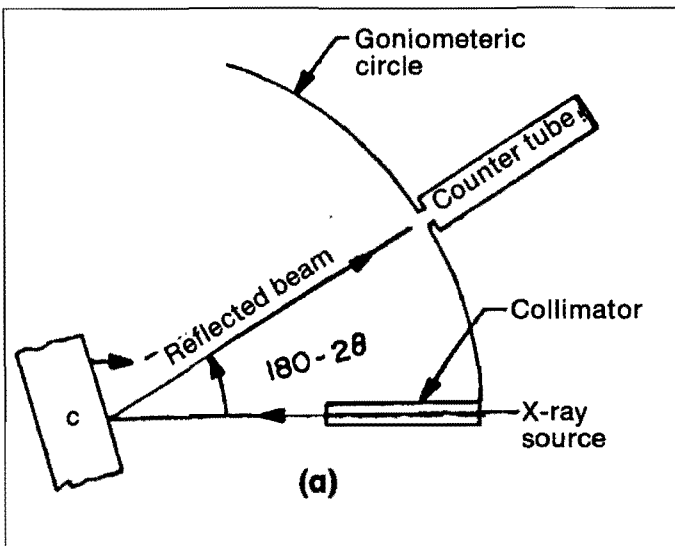
α. Η **φωτογραφική μέθοδος** (photographic or X-ray film), που παριστάνεται σχηματικά στο σχήμα 8. Η παρουσιαζόμενη διάταξη είναι κινητή και αποτελείται βασικά από ένα φιλμ σε προστατευόμενη από το φως κασέτα που τοποθετείται κάθετα προς την προσπίπτουσα δέσμη ακτίνων Χ. Η δέσμη κατευθύνεται μέ-



Σχ. 7. Αρχή περίθλασης ακτίνων -X σε κρυσταλλικό πλέγμα.



Σχ. 8. Σχηματική παράσταση φωτογραφικής μεθόδου.



Σχ. 9. (α) Σχηματική παράσταση μεθόδου διαθλασίμετρου.
(β) Σύγχρονο διαθλασίμετρο ακτίνων -X με ανιχνευτή θέσης.

σω ενός συστήματος σκόπευσης. Οι ακτίνες που διαθλώνται από το δοκίμιο αποτυπώνονται στο φιλμ. Μετά την εμφάνιση του φιλμ, οι αποτυπώσεις αυτές παρουσιάζονται υπό μορφή δακτυλιδιών σχεδόν κυκλικής μορφής. Η διάμετρος ενός τέτοιου δακτυλιδιού, διαιρεμένη με την απόσταση μεταξύ του φιλμ και του δοκιμίου, δίνει $2 \tan (180^\circ - 2\theta)$, οπότε είναι γνωστή η γωνία θ για την εισαγωγή στη σχέση (1). Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται δύσκολα σε σκληρωμένους χάλυβες.

β. Η μέθοδος διαθλασίμετρου ακτίνων Χ (X-ray diffractometer or counter tube technique), που παριστάνεται στο σχήμα 9. Στις περισσότερες περιπτώσεις η μέθοδος αυτή διαφέρει από την προηγούμενη μόνο στο είδος του ανιχνευτή (detector) και στη γωνία μεταξύ του δοκιμίου και της δέσμης των ακτίνων Χ. Η γωνία αυτή είναι 90° στη φωτογραφική μέθοδο και θ στη μέθοδο διαθλασίμετρου. Για την αποτύπωση της έντασης της ανακλώμενης δέσμης χρησιμοποιούνται ένας μετρητής και μια οπή που κινούνται πάνω σε γωνιομετρικό κύκλο. Η γωνία διάθλασης προσδιορίζεται ως η γωνία εκείνη που δίνει τη μέγιστη ένταση.

Τρεις μετρητικές τεχνικές χρησιμοποιούνται ευρέως: η **τεχνική της απλής έκθεσης** (single-exposure technique, SET),

η **τεχνική της διπλής έκθεσης** (double-exposure technique, DET),

η **τεχνική του $\sin^2\psi$** (τεχνική πολλαπλής έκθεσης, $\sin^2\psi$ technique) [31, 32]. Η μέθοδος του $\sin^2\psi$ είναι η ακριβέστερη, δεν εφαρμόζεται όμως σε περιπτώσεις όπου δεν ισχύει η γραμμική σχέση μεταξύ (d) και ($\sin^2\psi$). Η τεχνική DET είναι ακριβέστερη, αν και πιο χρονοβόρα, από την τεχνική SET, αλλά και 10 φορές πιο ευαίσθητη από την τελευταία σε μετρητικά σφάλματα. Στην πράξη, για μετρήσεις εκτός εργαστηρίου επιλέγεται η εφαρμογή μιας από τις τεχνικές DET ή SET [32]. Για τον προσδιορισμό της γωνίας του Bragg (2θ), χρησιμοποιούνται δυο είδη γωνιομέτρων/μετρητών, τα λεγόμενα Ω - και Ψ - γωνιομέτρα. Οι διαφορές τους εντοπίζονται στους διαφορετικούς άξονες περιστροφής του δοκιμίου και του μετρητή, βλέπε για περισσότερες λεπτομέρειες τις βιβλιογραφικές παραπομπές [4, 31].

Η ακρίβεια στον προσδιορισμό των παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο των ακτίνων Χ, εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον ακριβή καθορισμό της θέσης της μέγιστης έντασης των διαθλώμενων ακτίνων (peak position). Η αντικατάσταση του αναλογικού ανιχνευτή προσαρτημένου στο γωνιομέτρο, -που χρησιμοποιήθηκε παλαιότερα,- από έναν **ευαίσθητο ανιχνευτή θέσης** (position sensitive detector - PSD) μείωσε τον απαιτούμενο χρόνο μέτρησης κατά δέκα φορές περίπου και αύξησε την ακρίβεια [15-33]. Το επόμενο στάδιο βελτίωσης ήταν η σύνδεση του γωνιομέτρου με ηλεκτρικό υπολογιστή και ο υπολογισμός της "κορυφής" της δέσμης αυτόματα. Σήμερα δε, διατίθενται συστήματα μέτρησης με ακτίνες-Χ, πλήρως αυτοματοποιημένα, βλέπε ενδεικτικά [34, 35].

Εκτενέστερη αναφορά στο μετρητικό εξοπλισμό, τις

τεχνικές και τη διαδικασία έκθεσης, στα πλαίσια της παρούσας ανακοίνωσης, δεν μπορεί να γίνει. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στην ειδική βιβλιογραφία, ενδεικτικά [20-26, 32-39]. Μια πλήρη γενική ενημέρωση επί του θέματος παρέχει, επίσης, η σχετική έκδοση της Society of Automotive Engineers (SAE), βλέπε βιβλιογραφική παραπομπή [31].

Στο σχήμα 10 (α), (β) και (γ) δίνονται τυπικές κατανομές παραμενουσών τάσεων μετρημένων με τη μέθοδο των ακτίνων-Χ ύστερα από συγκεκριμένες μηχανουργικές κατεργασίες, βλέπε επίσης τις αντίστοιχες βιβλιογραφικές παραπομπές [1, 13, 40, 41].

3.2.2. Μέθοδος των υπερήχων (ultrasonic technique)

Η θεμελιακή αρχή της μέτρησης των παραμενουσών τάσεων με υπέρηχους έγκειται στο φαινόμενο της, κατά προσέγγιση, γραμμικής αλλαγής της ταχύτητας του υπέρηχου με την εφαρμοζόμενη τάση. Για την εκτίμηση των τάσεων, υπερηχητικά κύματα μεταδίδονται στο σώμα και μετρείται η διάρκεια της διάδοσης ή κάποια άλλη παράμετρος εξαρτώμενη από την ταχύτητα [42]. Όλες οι τεχνικές υπερήχων βασίζονται στην εκτίμηση της απόκλισης της απόκρισης του υλικού από τη γραμμικότητα του νόμου Hooke, όταν σ' αυτό εφαρμόζονται εσωτερικές ή εξωτερικές δυνάμεις. Η συμπεριφορά του υλικού περιγράφεται από τη σχέση:

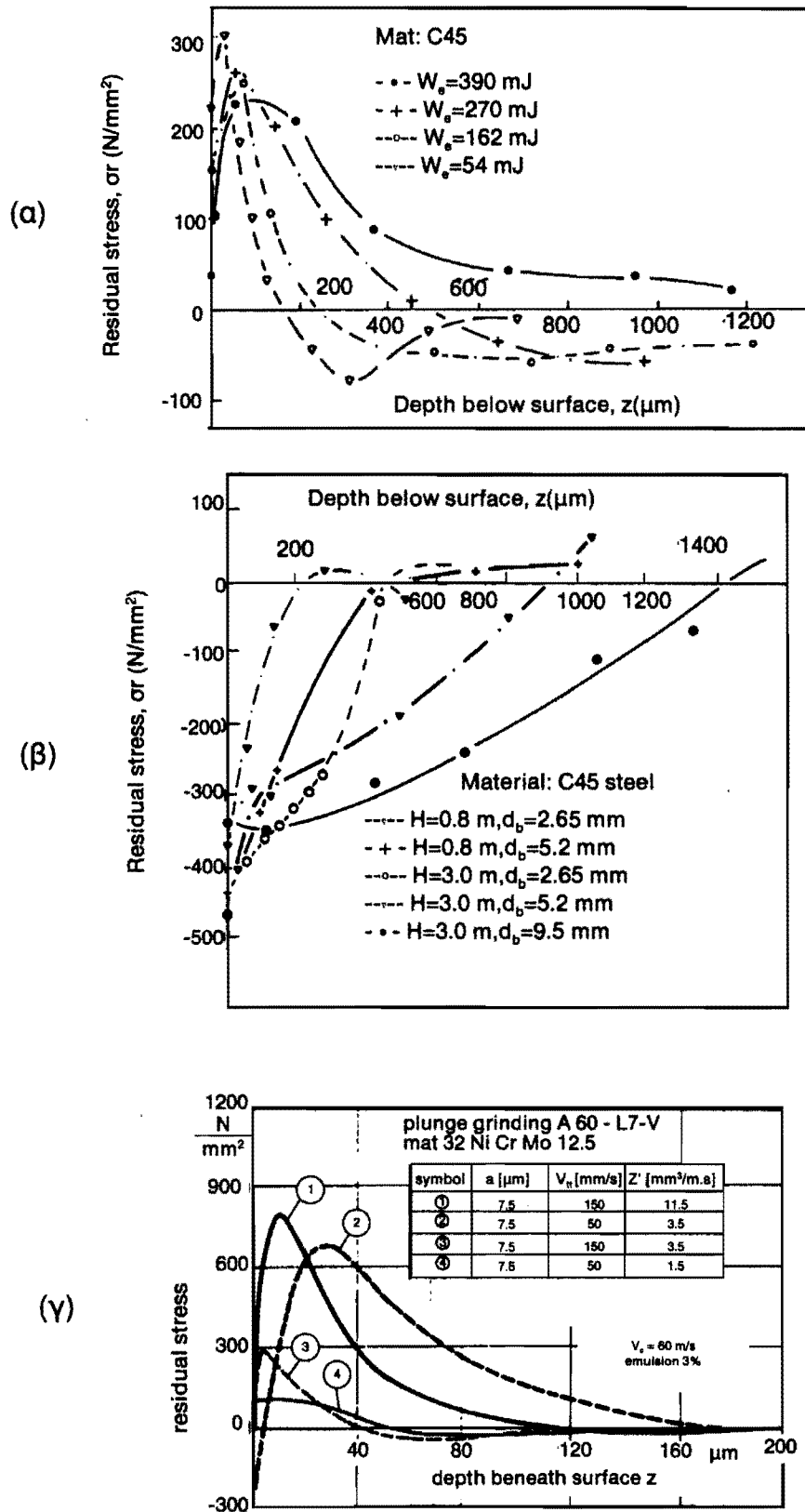
$$\sigma = E \cdot \varepsilon + C \cdot \varepsilon^2 + D \cdot \varepsilon^3 + \dots \quad (2)$$

όπου οι σταθερές C, D, ... της δυναμοσειράς (2) είναι οι μη αρμονικές ελαστικές σταθερές, οι μεταβολές των οποίων επιφέρουν αλλαγές στη μετρούμενη ταχύτητα των κυμάτων και συναρτώνται με τα υπάρχοντα τασικά πεδία [43].

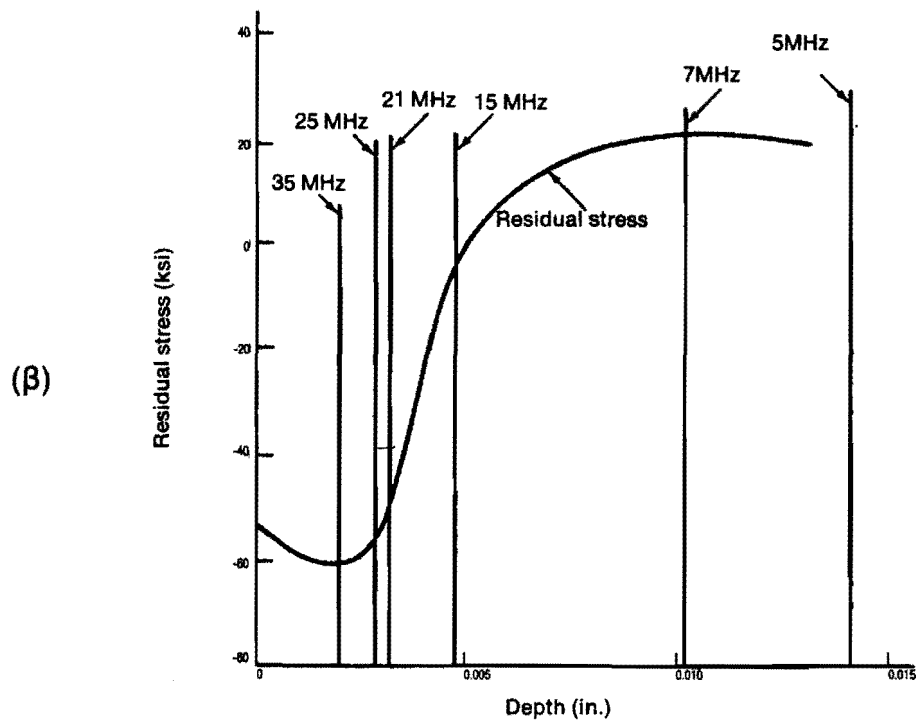
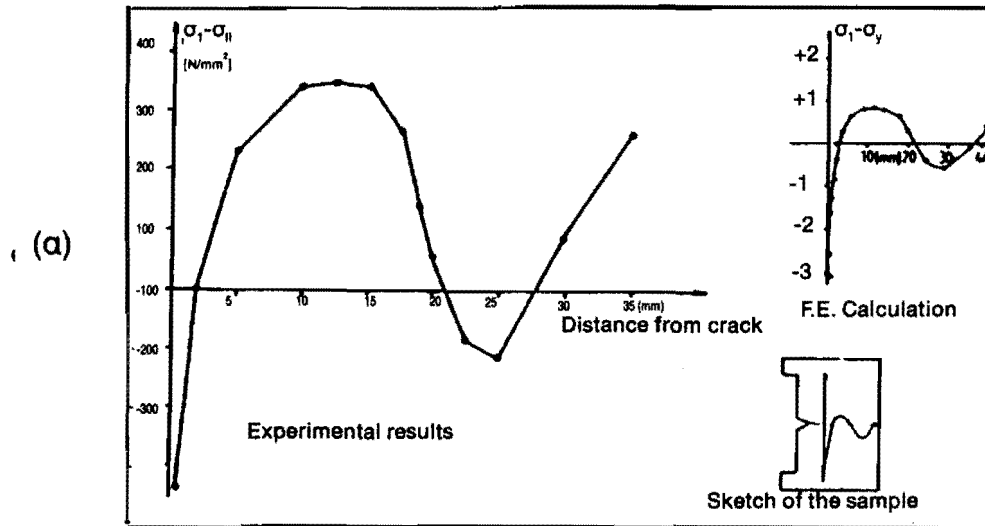
Η τεχνολογία των υπερήχων προσφέρει αρκετούς τύπους υπερηχητικών κυμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των τάσεων ενός μεταλλικού τεμάχου. Τα κύματα αυτά μπορεί να είναι είτε κύματα βάθους (bulk waves), -διαμήκη ή εγκάρσια,- είτε επιφανειακά κύματα (Rayleigh surface waves/ shear horizontal waves). Η μαθηματική θεώρηση της διάδοσης των υπερήχων σε ένα ισότροπο υλικό και η εξάρτηση της ταχύτητας του υπέρηχου από την επαγόμενη λόγω τάσης ελαστική παραμόρφωση είναι θέματα καλά τεκμηριωμένα και η ανάλυσή τους παραλείπεται για λόγους χώρου, βλέπε ενδεικτικά για μια συγκεντρωτική παρουσίαση τις βιβλιογραφικές παραπομπές [15, 44].

Οι κύριες τεχνικές για την εκτίμηση των παραμενουσών τάσεων με χρήση υπερήχων, που βασίζονται στη μέτρηση μεγεθών και παραμέτρων σχετικών με την ταχύτητα διάδοσης του υπέρηχου, παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια, βλέπε επίσης τις βιβλιογραφικές παραπομπές [45-48].

α. Διασπορά (Dispersion). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη συσχέτιση της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων βάθους με την εφαρμοζόμενη τάση, προϋποθέτει δε τη γνώση της ταχύτητας V_0 στο αφόρτιστο σώμα. Από τη σχέση:



Σχ. 10. Μετρήσεις παραμενουσών τάσεων με διάθλαση ακτίνων -X ύστερα από κατεργασίες: (α) ηλεκτροδιάβρωσης, (β) βομβαρδισμού με σφαιρίδια (shot-peening) και (γ) λείανσης.



Σχ. 11. (α) Μέτρηση παραμενουσών τάσεων σε χαλύβδινο δοκίμιο με ρωγή με τη μέθοδο της διπλής διάθλασης των υπερήχων.
 (β) Κατανομή παραμενουσών τάσεων σε δοκίμιο ύστερα από κατεργασία βομβαρδισμού με σφαιρίδια (shot-peening) χρησιμοποιώντας υπερηχητικά κύματα Rayleigh με διαφορετικές συχνότητες.

$$\Delta VV = V - V_0 | V_0 = B(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (3)$$

όπου V η ταχύτητα διάδοσης στο σώμα που περιέχει παραμένουσες τάσεις,
 B η ακουστοελαστική σταθερά και
 σ_1, σ_2 οι κύριες τάσεις σε επίπεδο κάθετο στην κατεύθυνση διάδοσης των υπερήχων,
 υπολογίζεται το άθροισμα των κυρίων τάσεων, αλλά και οι συνιστώσες του πεδίου, αν είναι γνωστή η μεταξύ τους σχέση.

β. Διπλή διάθλαση (bi-refringence). Η βάση της μεθόδου είναι ο υπολογισμός της διαφοράς ταχύτητας δυο εγκάρσιων κυμάτων που διαδίδονται κάθετα προς τον άξονα της τάσης σ_1 με διευθύνσεις πόλωσης παράλληλη (V_1) και κάθετη (V_2) αντίστοιχα στην τάση σ_1 , μέσω της εξίσωσης:

$$V_1 - V_2 = \Delta V = K \cdot \sigma_1 \quad (4)$$

όπου V_1 είναι μια σταθερά που περιλαμβάνει ελαστικές παραμέτρους δεύτερης και τρίτης τάξης. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε διδιάστατα και τρισδιάστατα πεδία, δεν απαιτεί βαθμονόμηση με αφόρτιστο δοκίμιο [45] κι έχει βρει τη σχετικά ευρύτερη εφαρμογή. Παρουσιάζει ωστόσο προβλήματα ευαισθησίας και εργαστηριακού εξοπλισμού που μέχρι στιγμής, εμποδίζουν τις εφαρμογές της σε μη εργαστηριακές συνθήκες. Στο σχήμα 11 (α) παρουσιάζεται η επιφανειακή τασική κατάσταση σε δοκίμιο με ρωγμή όπως αυτή καθορίστηκε με την τεχνική της διπλής διάθλασης των υπερήχων και τη μέθοδο των ακτίνων-Χ.

γ. Εφαρμογή επιφανειακών κυμάτων (surface acoustic wave technique). Η τεχνική της διάδοσης επιφανειακών κυμάτων, είτε οριζοντίων διατμητικών (SH-wave) είτε κυμάτων Rayleigh, εφαρμόζεται με δυο τρόπους: Στην πρώτη, η διαφορά ταχυτήτων διάδοσης στο φορτισμένο και αφόρτιστο υλικό συσχετίζεται με την τασική κατάσταση όπως ακριβώς και στην περίπτωση διάδοσης χωρικών εγκάρσιων ή διαμήκων κυμάτων. Η δεύτερη αφορά τη μέτρηση της μεταβολής των παραμενουσών τάσεων σαν συνάρτηση του βάθους από την επιφάνεια. Όπως είναι γνωστό [45, 46], τα κύματα Rayleigh έχουν βάθος διείσδυσης της τάξης του μήκους κύματος. Από τη σχέση $c = f \cdot \lambda$ προκύπτει ότι με μεταβολή της συχνότητας του μεταδιδόμενου κύματος, η εξάρτηση της ταχύτητας από τις υπάρχουσες τάσεις αφορά ένα μικρότερο ή μεγαλύτερο όγκο του υλικού μέσα στον οποίο περιορίζεται η διάδοση του κύματος. Με τον τρόπο αυτό, μεταβολές των τάσεων σε συνάρτηση της απόστασης από την επιφάνεια μπορούν να υπολογιστούν, άρα και η πλήρης διανομή των τάσεων με το βάθος να εκτιμηθεί, βλέπε χαρακτηριστικά το σχήμα 11.

Ο ειδικός εξοπλισμός (πομποί, δέκτες, παλμογράφοι κ.λπ.) που απαιτείται, όπως και οι τεχνικές που εφαρμόζονται σε ειδικές περιπτώσεις δεν θα μας απασχολήσουν, δεδομένου ότι τα σχετικά στοιχεία μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία [15, 46, 47].

Το σημαντικότερο πρόβλημα, εγγενές στη μέθοδο των υπερήχων, είναι το γεγονός ότι οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παραμε-

νουσών τάσεων (ταχύτητα διάδοσης, χρόνος διαδρομής, απορρόφηση κ.λπ.), δεν εξαρτώνται μόνο από τα εσωτερικά τασικά πεδία, αλλά και από ένα πλήθος άλλων παραμέτρων χαρακτηριστικών της δομής του υλικού, όπως η ανισοτροπία του υλικού, η κρυσταλλική δομή και το μέγεθος των κόκκων, η πυκνότητα των διαταραχών και η υφή του. Οι προοπτικές της μεθόδου βρίσκονται στη δυνατότητα διαχωρισμού όλων αυτών των επιδράσεων, γεγονός που προϋποθέτει μια συνδυασμένη βελτίωση στα πεδία της μελέτης της μικροδομής, της θεωρίας διάδοσης κυμάτων και των μετρητικών τεχνικών και συστημάτων. Πρόσθετα μειονεκτήματα συνιστούν η ανάγκη βαθμονόμησης μέσω αφόρτιστου δοκιμίου αναφοράς για την εξαγωγή ποσοτικών συμπερασμάτων και το γεγονός ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η διάδοση των υπερήχων καλύπτει μια ευρεία περιοχή του δοκιμίου και κατά συνέπεια οι μετρήσεις αναφέρονται σε μέσες τιμές όλων των παραμενουσών τάσεων (I, II και III είδους, βλέπε πίνακα 1), χωρίς να είναι, μέχρι στιγμής, δυνατή η διάκρισή τους. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα βρίσκεται στην πλήρως μη καταστροφική φύση της τεχνικής. Έτσι, παρά τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν, οι υπέρηχοι αποτελούν τη, συγκριτικά, πιο προηγμένη και εξελίξιμη μέθοδο, (μετά τις ακτίνες-Χ), για το μη καταστροφικό προσδιορισμό, όχι μόνο παραμενουσών τάσεων, αλλά και άλλων φυσικών ιδιοτήτων και ελαττωμάτων κατεργασμένων υλικών, βλέπε ενδεικτικά τη βιβλιογραφική παραπομπή [48].

3.2.3. Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι

Όλες οι ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές βασίζονται στην επίδραση των τάσεων στην ηλεκτρική αγωγιμότητα και στις μαγνητικές ιδιότητες του υλικού. Οι τελευταίες, όμως, εξαρτώνται, όχι μόνον από τις παραμενουσες τάσεις, αλλά και από τις αλλαγές στη μικροδομή του υλικού. Για το διαχωρισμό των δυο επιδράσεων (μικροδομή και παραμενουσες τάσεις) προτείνεται η εκτίμηση τουλάχιστον δύο, ανεξάρτητων μεταξύ τους μαγνητικών παραμέτρων [42]. Οι βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες [4, 49, 50]:

α. Ανάλυση του θορύβου Barkhausen (Barkhausen noise analysis-BNA)

Η μέθοδος βασίζεται στο γεγονός ότι η μαγνήτιση ενός φερομαγνητικού υλικού μεταβάλλεται με απότομες αλλαγές που ονομάζονται άλματα Barkhausen. Οι απότομες αυτές αλλαγές της μαγνήτισης αποδίδονται στην επαναδιάταξη των μικροσκοπικών μαγνητικών περιοχών του υλικού και μπορούν να καταγραφούν με τη χρήση ευαίσθητων ακουστικών ή ηλεκτρομαγνητικών ανιχνευτών. Έχουν ήδη αναπτυχθεί φορητά όργανα για τη μέτρηση του θορύβου Barkhausen και πολλοί ερευνητές έχουν συσχετίσει με επιτυχία τις παραμέτρους του σήματος με τις τασικές καταστάσεις [16, 46]. Ωστόσο, δεν έχει επιτευχθεί η πλήρης κατανόηση των θεωρητικών σχέσεων του φαινομένου με το τασικό πεδίο και, κατά συνέπεια, κάθε εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί και ιδιαίτερη βαθμονόμηση. Επιπροσθέτως, η εφαρμογή της μεθόδου περιορίζεται μόνο στα φερομαγνητικά υλικά και για τη μέτρηση μόνο των επιφανειακών παραμε-

νουςών τάσεων.

β. Μαγνητική επαγωγή (magnetic induction)

Προσδιορίζεται η σύνθετη αντίσταση ενός πηνίου που έχει ζευχθεί επαγωγικά με το δοκίμιο, σε διάφορες συχνότητες διέγερσης.

γ. Μέθοδος μαγνητικής υστέρησης (retentivity method)

Στηρίζεται στη μέτρηση του απομένουστος μαγνητισμού, όταν απομακρυνθεί το μαγνητικό πεδίο που εφαρμόζεται στο δοκίμιο.

δ. Μαγνητοσυστολή (magnetostriction)

Με την εφαρμογή ενός μαγνητικού πεδίου, η μετρούμενη μαγνητοσυστολή στο δοκίμιο επηρεάζεται από τις υπάρχουσες παραμένουσες τάσεις.

Το προβληματικό σημείο στην εφαρμογή όλων των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων είναι το γεγονός ότι οι μαγνητικές ιδιότητες των φερομαγνητικών υλικών, - και ιδιαίτερα των χαλύβων, - μεταβάλλονται σημαντικά, εξαρτώμενες από ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων, όπως: η σύσταση, η μεταλλουργική επεξεργασία, οι θερμικές κατεργασίες, η πλαστική παραμόρφωση κ.λπ. Αν δεν διατίθενται δε, δοκίμια αναφοράς, οι μετρήσεις παίζουν ρόλο απλής ποιοτικής εκτίμησης. Όλα τα παραπάνω, -όπως φαίνεται και στον πίνακα 2- περιορίζουν σημαντικά, τουλάχιστον προς το παρόν, τη χρήση των ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων. Στον ίδιο πίνακα δίνονται συγκριτικά στοιχεία για τις εφαρμογές και τους περιορισμούς των τριών αμέσων μεθόδων (ακτίνες-Χ, υπέρηχοι, ηλεκτρομαγνητικές τεχνικές).

Πίνακας 2.

● Very good Applicability ● Good Applicability ○ Limited Applicability		X-Ray Diffr		Ultrasonics			Electromagnetics			
		Current Instrument	Potential Instrument	Velocity Bulk or Surface Waves	Birefringence	Phase Dispersion	Barkhausen Noise Analysis	Magnetic Induction	Retentivity	magnetostriction
Surface Stresses	Plates	●	●	●			●	●		
	Cylinders	○	●	●			●	●		
	Complex Shapes	○	●	○			○	○		
Bulk Stresses	Plates			●	●	●		○	○	○
	Cylinders			●	●	●		○	○	○
	Complex Shapes			○	○	○		○		

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς ευχαριστούν την κυρία Πανδώρα Ψυλλάκη, μηχανικό μεταλλείων-μεταλλουργό, υπ. διδάκτορα του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών, για τη βοήθεια στην τελική επεξεργασία του κειμένου.

Βιβλιογραφία

- A.G. Mamalis, N.M. Vaxevanidis and A.P. Karafillis, **Surface Integrity and Formability of Steel Sheet**, VDI Verlag, Dusseldorf, (1990).
- M. Field and J.F. Kahles, "Review of Surface Integrity of Machined Components", *Ann. of the CIRP*, **20** (2), 153 (1971).
- A.G. Mamalis, G.C. Vosniakos and N.M. Vaxevanidis, "On the Surface Integrity of Mechanically and Thermally Worked Steel Plates", *Proc. 2nd Int. Conf. on Tech. of Plasticity*, Stuttgart, W. Germany, 407 (1987).
- H.K. Tonshoff and E. Brinksmeier, "Determination of the Mechanical and Thermal Influences on Machined Surfaces by Microhardness and Residual Stress Analysis", *Ann. of the CIRP*, **29** (2), 519 (1980).
- P. Dinichert et al., "The Evaluation of the Surface by Roughness Measurements: Situation 1973", *Ann. of the CIRP*, **22** (2), 249 (1973).
- G.H. Schaffer, "The Many Faces of Surface Texture", *S.R. 801, Amer. Machinist*, 61 (June 1988).
- K.J. Stout (ed.), *Proc. 5th Int. Conf. on Metrology and Properties of Engineering Surfaces*, Leicester, UK, 10-12/4/1991, *Int. J. of Machine Tools and Manufacture* **32** (1/2), (1992).
- R.D. Young, "Instrumentation for the Chemical Analysis of Manufactured Surfaces", *Ann. of the CIRP*, **24** (2), 549 (1975).
- D.B. Williams, "Application of Electron Optical Techniques to Problems in Metallurgical and Material Engineering", *J. of Metals*, **16** (May 1980).
- A. Taylor, **X-Ray Metallography**, John Willey and Sons Inc., (1961).
- Π.Σ. Θεοχάρη, **Πειραματική Αντοχή των Υλικών**, Ε.Μ.Π., (1975).
- Y. Tirupataiah and G. Sundararajan, "Evaluation of Microhardness Correction Procedures", *Wear*, **110** (2), 183 (1986).
- A.G. Mamalis, N.M. Vaxevanidis, A.P. Karafillis and J.Z. Xiong, "Surface Treatment of High-Strength Steel Plates due to Ball-Drop Forming", *J. of Eng. Manufacture, Proc. I. Mech. E.*, **205**, 93 (1991).
- J.H. Westbrook and H. Conrad (eds), **The Science of Hardness Testing and Its Research Applications**, ASM, (1973).
- E. Brinksmeier, E. Schneider, W.A. Theiner and H.K. Tonshoff, "Nondestructive Testing for Evaluating Surface Integrity", *Ann. of the CIRP*, **33** (2), 489 (1984).
- W. Degner and T. Lauterlein, "Determination of Microhardness and Residual Stress of Machined Ferromagnetic Components by Using the Barkhausen Effect", *Annals of the CIRP*, **29** (1), 403, (1980).
- A.G. Mamalis, J. Prohaszka, N.M. Vaxevanidis and A. Szalay, "On the Manufacturing of Ag-Cdo Bimetals by Explosive Cladding and Rolling", *Int. J. Materials and Product Tech.*, 1993 (τυπώνεται).

18. E. Brinksmeier J.T. Cammett, W. Koning, P. Leskovar, J. Peters and H.K. Tonshoff, "Residual Stresses-Measurement and Causes in Machining Processes", Ann. of the CIRP, **31** (2), 491, (1982).
19. Α.Γ. Μάμαλης, Σ. Διπλάρης και Α. Βενετσιάνος, "Παραμένουσες Τάσεις στην Επιφάνεια Κατεργασίμου Υλικού με Μηχανική και Θερμική Πλαστική Παραμόρφωση", Ημερίδα Μηχανικής, ΕΕΘΕΜ, 118 (1983).
20. E. Kula and V. Weiss (eds), **Residual Stress and Stress Relaxation**, Plenum Press, (1982).
21. L.J. V. Walle (ed.), **Residual Stress of Designers and Metallurgists**, ASM, (1981).
22. W.B. Young (ed.), **Residual Stress In Design, Process and Materials Selection**, ASM, (1988).
23. J.F. Throop and H.S. Reemsnyder, **Residual Stress Effects In Fatigue**, STP-776, ASTM, (1982).
24. E. Macherauch and V. Hauk (eds), **Eigenspannungen, Entstehung-Messung-Bewertung**, Deutsche Gesellschaft fur Metallkunde e.V., Oberusel, Band 1 und 2, (1983).
25. A. Niku-Lari (ed.), **Advances in Surface Treatments - Vol. 4 - Residual Stresses**, Pergamon Press, (1987).
26. E. Macherauch, "Introduction to Residual Stress", στο [25], (1987).
27. Ν. Βαξεβανίδης, "Ομοιομορφία Επιφάνειας Κατεργασίμου Υλικού με Μηχανική και Θερμική Πλαστική Παραμόρφωση", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., (προετοιμάζεται).
28. K. Masubuchi, **Analysis of Welded Structures**, Pergamon Press, (1980).
29. B.D. Cullity, **Elements of X-Ray Diffraction**, 2nd ed., Addison-Wiley, (1978).
30. Β. Παπάζογλου, **Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων** Ε.Μ.Π., (1987).
31. **Residual Stress Measurement by X-ray Diffraction**, HS-J784a, SAE, (1971).
32. C.O. Ruud, "A Review of Non-destructive Methods for Residual Stress Measurement", J. of Metals, **35** (July 1981).
33. M.R. James and J.B. Cohen, "The Application of a Position-Sensitive X-ray Detector to the Measurement of Residual Stresses", Adv. in X-ray Analysis, **19**, 695 (1976).
34. H.K. Tonshoff and E. Brinksmeier, "Optimization of Computer Controlled X-ray Stress Analysis", Ann. of the CIRP, **30** (1), 509 (1981).
35. E. Brinksmeier, "X-ray Stress Measurement - a Tool for the Study and Layout of Machining Processes", Ann. of the CIRP, **34** (1), 485 (1985).
36. H. Dolle and V. Hauk, "Rontgenographische Spannungsmittlung fur Eigenspannungssysteme allgemeiner Orientierung", HTM, **31** (3), 165 (1976).
37. S. Prevey, "A Comparison of X-ray Diffraction Residual Stress Measurement Methods on Machined Surfaces", Adv. in X-ray Analysis, **19**, 709 (1976).
38. B.D. Cullity, "Some Problems in X-ray Stress Analysis", Adv. in X-ray Analysis, **20**, 259 (1977).
39. V.M. Hauk, "Evaluation of Macro- and Micro-residual Stresses on Textured Materials by X-ray, Neutron Diffraction and Deflection Measurements", Adv. in X-ray Analysis, **29**, 1 (1986).
40. Α.Γ. Μάμαλης, G.C. Vosniakos, N.M. Vaxevanidis and J. Prohaszka, "Macroscopic and Microscopic Phenomena of EDMed Steel Surfaces An Experimental Investigation", J. Mech, Work. Techn., **15** (3), 335 (1987).
41. Α.Γ. Μάμαλης, **Κατεργασίες των Υλικών** Ε.Μ.Π., Αθήνα (1987).
42. D.I. Crecraft, "The Measurement of Applied and Residual Stress in Metals Using Ultrasonic Waves", J. Sound Vib., **6** (1), 173 (1967).
43. C.O. Ruud, "A Review of Selective Non-destructive Methods for Residual Stress Measurement", NDT Int., **15** (Feb. 1982).
44. M.R. James and O. Buck, "Quantitative Nondestructive Measurement of Residual Stresses", Solid State Sci., **61** (Aug. 1980).
45. K. Salama, "New Developments in Measuring Residual Stresses Using Ultrasonic Techniques", **Preprint of Technical Papers Presented at the 1980 SESA Fall Meeting**, 56 (1980).
46. **Proceedings of a Workshop on Non-destructive Evaluation of Residual Stresses**, NTIAC-76-2, (1976).
47. E. Schneider, H. Pitsch, S. Hirsekorn and K. Goebbels, "Nondestructive Detection and Analysis of Stress States with Polarised Ultrasonic Waves", **Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation**, (D.O. Thopson and D.E. Chimenti -eds), Plenum Press, **4B**, 1079 (1985).
48. R.B. Thompson, "Quantitative Ultrasonic Nondestructive Evaluation Methods", J. Appl. Mech. (Trans ASME), **50** (4c), 1191 (1983).
49. V. Hauk, "Non-destructive Methods of Measurement of Residual Stresses", στο [25], 252 (1987).
50. W.A. Theiner and E. Schneider, **Bestimmung von Spannungen mit Magnetischen, Magnetoelastischen und laufweg unabhängigem Ultraschallverfahren**, IzfP-Bericht Nr. 790321-TW, (1979).

Πρόεδρος: Ευχαριστούμε το συνάδελφο κύριο Βαξεβανίδη, για τα όσα μας ανέπτυξε.

Και τώρα θα καλέσουμε στο βήμα το συνάδελφο μηχανολόγο μηχανικό κύριο Πείμανιδη, να μας μιλήσει με θέμα: «Εφαρμογές μη καταστροφικών ελέγχων στην ελληνική αγορά».