

ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ- ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Γ. Πετρόπουλος*, Κ. Πανταζάρας*, Ν. Βαξεβανίδης**

*Τομέας Μηχανικής, Υλικών και Κατεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 383 34 Βόλος

** Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών, Τεχνολογίας Υλικών και Οργάνωσης Παραγωγής,
Σχολή Ικάρων
gpetrop@mie.uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τοπογραφία των τεχνολογικών επιφανειών παίζει σημαντικό ρόλο, τόσο στην τριβολογική λειτουργία τους, όσο και στον έλεγχο της ακολουθούμενης κατεργασίας. Η τοπογραφική ανισοτροπία ή ισοτροπία είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό. Το παρόν άρθρο προβαίνει σε μια βασική ανασκόπηση υφιστάμενων μέτρων ανισοτροπίας, παρουσιάζει ένα παράδειγμα θεώρησης της ανισοτροπίας ως κριτηρίου φθοράς σε τριβοσύστημα και τελικώς προτείνει την εισαγωγή νέων δεικτών ανισοτροπίας.

Λέξεις - Κλειδιά: Μετρολογία επιφανειών, τοπογραφία, ανισοτροπία, φθορά, κατεργασίες μορφοποίησης.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

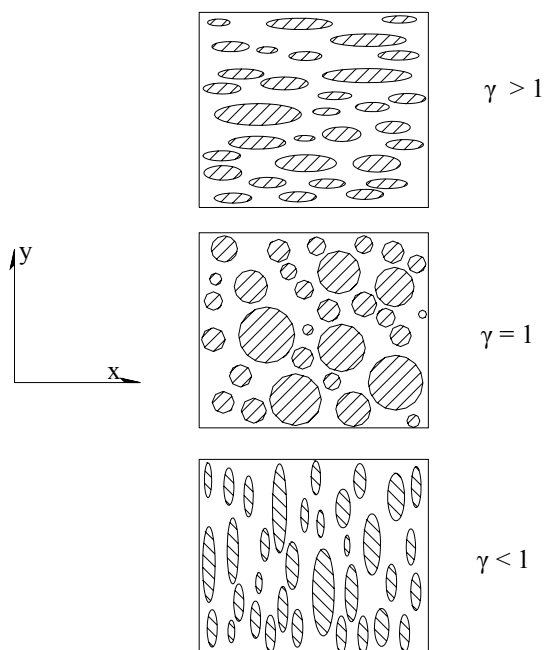
Στη σύγχρονη τεχνική των επιφανειών η ποιότητα επιφάνειας παίζει πρωτεύοντα ρόλο σε ό,τι αφορά την απόδοση και ασφάλεια λειτουργίας συναρμοζόμενων ή ελεύθερων τεχνολογικών επιφανειών, που αποτελούν μέρη διαφόρων μηχανισμών και μηχανημάτων ή κατασκευών κατά τις πρακτικές εφαρμογές.

Η τοπογραφία μιας τεχνολογικής (κατεργασμένης με μορφοποίηση) επιφάνειας, δηλαδή το σύνολο των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, ουσιαστικά αποκλίσεων από την ιδεατή λειότητα, συνιστά βασικό στοιχείο της ποιότητας επιφάνειας. Η επιφανειακή τοπογραφία συντίθεται από τρεις συνιστώσες: την τραχύτητα που συνηθέστερα μελετάται, την κυμάτωση και το σφάλμα μορφής.

Οι διάφορες κατεργασίες μορφοποίησης που εφαρμόζονται στη βιομηχανία οδηγούν σε ιδιότυπες μορφές των επιφανειών του προϊόντος. Ο χαρακτηρισμός και η αποτίμηση της τοπογραφίας των τεχνολογικών επιφανειών αποτελεί μία μεγάλη πρόκληση για την επιστήμη της Μετρολογίας.

Επιπλέον, η επιφανειακή τοπογραφία χαρακτηρίζεται από ισοτροπία ή ανισοτροπία, με την έννοια ότι τυχούσα κατευθυντικότητα των επιφανειακών σχηματισμών πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν σε τριβολογικές εφαρμογές, αλλά και στον έλεγχο της κατεργασίας [1, 2]. Οι περισσότερες κατεργασίες δίνουν ανισότροπα επιφανειακά περιγράμματα.

Σε περίπτωση που υφίσταται ανισοτροπία η επιφάνεια παρουσιάζει παρόμοιες τοπογραφικές ιδιότητες ανεξαρτήτως κατεύθυνσης. Στην περίπτωση ανισοτροπίας η επιφάνεια εμφανίζει κατευθυντικότητα των τοπογραφικών χαρακτηριστικών, υφίσταται δηλαδή δεδομένος προσανατολισμός των επιφανειακών ανωμαλιών ως προς τον γεωμετρικό άξονα της εκτελούμενης κατεργασίας μορφοποίησης [3, 4] (Σχήμα 1). Οι κατεργασίες με εργαλεία καθορισμένης γεωμετρίας, όπως τόννευση, φρεζάρισμα κ.ά. δημιουργούν ιδιαιτέρως ανισότροπες επιφάνειες. Άλλες κατεργασίες, είτε μηχανικές με λειαντικούς κόκκους ή μη συμβατικές, όπως για παράδειγμα το “lapping” και η ηλεκτροδιάβρωση (EDM) δίνουν ισότροπα επιφανειακά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 1. Ενδεικτική παράσταση τομών των ανωμαλιών της τραχύτητας επιφανειών, οι οποίες παρουσιάζουν διαμήκη ανισοτροπία ($\gamma > 1$), ισοτροπία ($\gamma = 1$) και εγκάρσια ανισοτροπία ($\gamma < 1$).

Η παρούσα εργασία κινείται σε τρεις άξονες:

- α) μία σύντομη ανασκόπηση υπάρχουσών μεθόδων αποτίμησης της επιφανειακής ανισοτροπίας
- β) την θεώρηση της ανισοτροπίας ως διαγνωστικού μεγέθους για την φθορά τριβοσυστημάτων και
- γ) την εισαγωγή νέων δεικτών ανισοτροπίας.

ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ

Προς τον σκοπό αυτό, δύο προβλήματα ανακύπτουν: ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης ή των κατευθύνσεων προσανατολισμού των επιφανειακών σχηματισμών και η αποτίμηση του βαθμού ανισοτροπίας, που συνήθως ορίζεται από έναν δείκτη (λόγο μεγεθών).

Οι προτεινόμενες μέθοδοι στη διεθνή βιβλιογραφία, χωρίς να ανασκοπούνται εξαντλητικά, έχουν, ως ακολούθως:

- 1) Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος αποτίμησης του βαθμού ανισοτροπίας χρησιμοποιεί τον λόγο των μηκών αυτοσυσχέτισης $\lambda_{0,5}$ δύο αντιπροσωπευτικών περιγραμμάτων παράλληλα προς δύο διευθύνσεις προσανατολισμένων χαρακτηριστικών της επιφάνειας [2]. Έτσι, αν $\mathbf{R}_{xx}(\mathbf{0})$ και $\mathbf{R}_{yy}(\mathbf{0})$ είναι οι μέγιστες τιμές των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης κατά τις διευθύνσεις xx και yy , αντίστοιχα, ο δείκτης ανισοτροπίας ορίζεται ως $\gamma = \frac{\lambda_{0,5yy}}{\lambda_{0,5xx}}$. Θεωρητικά, ο δείκτης λαμβάνει τιμές από 0 έως άπειρο. Η τιμή $\gamma=1$ δηλώνει πλήρη ισοτροπία.
- 2) Ένας άλλος δείκτης ανισοτροπίας προτάθηκε μετά από λεπτομερέστερη ανάλυση με θεώρηση επτά ανεξάρτητων συνδυασμών των ροπών της συνάρτησης φασματικής

πυκνότητας [5,6]. Ο δείκτης αυτός ορίζεται ως $\Lambda = \frac{1}{\gamma} = \frac{2\sqrt{m_{20}m_{02} - m_{11}^2}}{m_{20} + m_{02}}$. Μία

απόλυτα ισότροπη επιφάνεια χαρακτηρίζεται από $\gamma=1$, ενώ η περίπτωση $\gamma=0$ δηλώνει ακραία ανισοτροπία.

- 3) Ο λόγος των ενεργών (RMS) τιμών των κλίσεων των περιγραμμάτων της επιφάνειας κατά δύο κατευθύνσεις, $\gamma = \frac{\Delta_{qyy}}{\Delta_{qxx}}$. Κατά τη μία κατεύθυνση η κλίση θα λαμβάνει

ελάχιστη τιμή, ενώ κατά την άλλη κατεύθυνση μέγιστη.

- 4) Η μορφοκλασματική (fractal) γεωμετρική ανάλυση έχει εισαχθεί στην τεχνική των επιφανειών, ούτως ώστε να επιτευχθεί χαρακτηρισμός των επιφανειών με ελάχιστες παραμέτρους, κυρίως με τη μορφοκλασματική διάσταση και την λεγόμενη "topothesy". Εν προκειμένω, διερευνάται η μεταβολή των παραμέτρων αυτών ως προς διάφορες διευθύνσεις επί της επιφάνειας. Απεδείχθη ότι και οι δύο παράμετροι είναι ευαίσθητες στην ύπαρξη κατευθυντικότητας [5-7].
- 5) Με εφαρμογή του γεωμετρικού μετασχηματισμού Hurst σε κατεργασμένες επιφάνειες προτάθηκε ο δείκτης S_H για αποτίμηση της ανισοτροπίας. Ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ των αξόνων μιας έλλειψης που προσαρμόζεται σε ένα "διάγραμμα ρόδου" (rose-plot) των συντελεστών Hurst. Οι τιμές $S_H \geq 0,5$ και $S_H \leq 0,5$ υποδεικνύουν ισοτροπία και ανισοτροπία, αντιστοίχως [8].

Η ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ ΩΣ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΦΘΟΡΑΣ ΣΕ ΤΡΙΒΟΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΚ

Ο έλεγχος της φθοράς των κυλίνδρων σε Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) είναι ιδιαίτερα σημαντικός με αντικειμενικό σκοπό τον εντοπισμό της λήξης της αξιόπιστης λειτουργίας του. Αν κάποιο χαρακτηριστικό τοπογραφικό μέτρο της επιφάνειας του κυλίνδρου συσχετίζεται εμφανώς με τη φθορά, τότε θα μπορούσε να τεθεί ένα κριτήριο που θα συνέδεε μία κρίσιμη τιμή του μεγέθους αυτού με τη χρονική στιγμή ή χρονικό στάδιο διορθωτικής παρέμβασης ή απόρριψης στο υπ' όψη τριβοσύστημα [9].

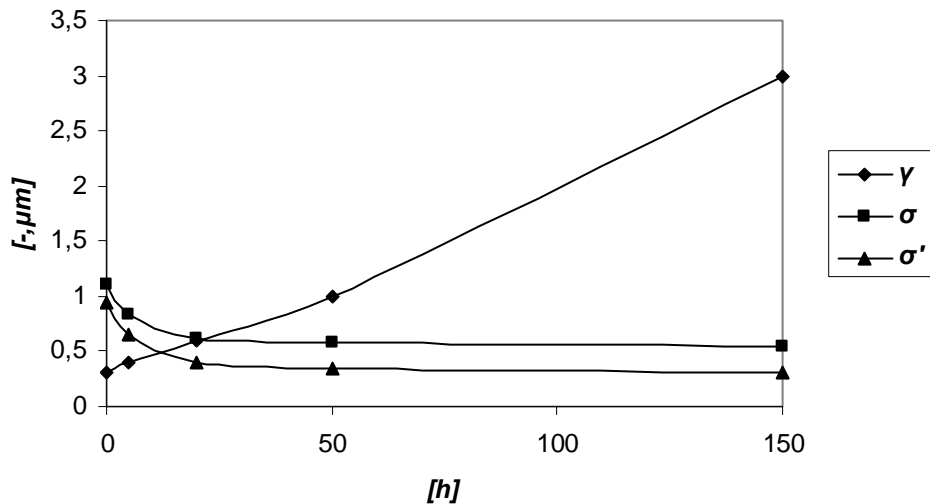
Απεδείχθη μέσω της ανάπτυξης κατάλληλου λογισμικού προσομοίωσης της τοπογραφίας των κυλίνδρων υπό διάφορες λειτουργικές συνθήκες και του μηχανισμού λίπανσης μεταξύ κυλίνδρου και εμβόλου στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας και διεξαγωγής πειραμάτων σε τριβόμετρο μελέτης τριβής- φθοράς, ότι το τοπογραφικό χαρακτηριστικό που μεταβάλλεται σε μεγαλύτερο βαθμό κατά τη λειτουργία του κυλίνδρου είναι η ανισοτροπία. Κατά συνέπεια, εκφράζει καλύτερα τη φθαρμένη επιφάνεια από άλλες τοπογραφικές παραμέτρους (Σχήμα 2) και είναι δυνατό να αποτελέσει ένα κριτήριο φθοράς σύμφωνα με τον προβληματισμό που αναπτύσσεται στο παρόν κείμενο.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΝΕΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑΣ

Όπως προαναφέρθηκε η ανισοτροπία των τεχνολογικών επιφανειών λαμβάνεται ιδιαίτερος υπ' όψη από πλευράς τριβολογικής λειτουργίας και ως αποτέλεσμα της ακολουθούμενης κατεργασίας μορφοποίησης.

Νέες προτάσεις ελέγχου της ανισοτροπίας από τους συγγραφείς του παρόντος άρθρου περιλαμβάνουν:

- α) Τη θεώρηση της κυμάτωσης, ως συνιστώσας της τοπογραφίας, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στη μηχανική της επαφής και τη συμπεριφορά σε λίπανση των επιφανειών [10]. Αν μάλιστα, υφίσταται και στην κυμάτωση σε συνδυασμό με την τραχύτητα, πρέπει να οριστεί ένας συνολικός δείκτης ανισοτροπίας της επιφάνειας.



Σχήμα 2. Μεταβολή των ενεργών (rms) τιμών του περιγράμματος και του πληθυσμού των κορυφών της τραχύτητας επιφάνειας του κυλίνδρου σ ή R_q και σ' , αντιστοίχως και του δείκτη ανισοτροπίας γ συναρτήσει του χρόνου λειτουργίας.

β) Οι καμπύλες φέρουσας επιφάνειας (Abbott- Firestone) παριστούν τις διατομές υλικού σε δεδομένες στάθμες και παρέχουν πληροφορίες, τόσο για τη συμπεριφορά της επιφάνειας σε φόρτιση και φθορά, όσο και για τη μορφή των τοπογραφικών σχηματισμών. Δεδομένου και του στατιστικού τους χαρακτήρα, θα ήταν σκόπιμο να εκφραστεί η ανισοτροπία μέσω παραμέτρων των καμπύλων αυτών, προτυποποιημένων από διεθνή συστήματα ή μη [10, 11].

γ) Παρομοίως πολυπαραμετρικές στατιστικές συναρτήσεις περιγραφής των επιφανειακών περιγραμμάτων θα ήταν κατάλληλες για χαρακτηρισμό και ορισμό μέτρων ανισοτροπίας. Στατιστικά μοντέλα αυτού του τύπου είναι τα κατά Fisher- Pearson και αυτά των συναρτήσεων β , που συνδυάζουν την τοπική απόκλιση, τη λοξότητα και την κύρτωση των κατανομών των περιγραμμάτων. Η εφαρμογή τους μπορεί να δώσει αξιόπιστο χαρακτηρισμό, αντίστοιχο με τις παραμέτρους των καμπύλων Abbott και ήδη χρησιμοποιούνται στην τριβολογία [12].

Σύμφωνα με τις κατευθυντήριες αυτές γραμμές και προς ανάπτυξη νέων δεικτών ανισοτροπίας εξετάστηκαν δύο επιφάνειες κατεργασμένες με ηλεκτροδιάβρωση και μετωπικό φρεζάρισμα, αντιστοίχως.

Οι παράγοντες κατεργασίας και η διεξαγωγή των προφίλομετρήσεων αναφέρονται στη δημοσίευση [13].

Το δίκτυο των κρατήρων που συνιστά την ηλεκτροδιαβρωμένη επιφάνεια κατέχει τυχαίο προσανατολισμό και η τοπογραφία είναι σημαντικά ισότροπη. Η φρεζαρισμένη επιφάνεια φέρει αυλακώσεις που ακολουθούν κατά προσέγγιση τόξα κύκλου, τροχοειδούς καμπύλης στην πραγματικότητα, κατά μήκος των οποίων η τραχύτητα είναι ελάχιστη, ενώ κατά ακτινικές διευθύνσεις θα λαμβάνει μέγιστες τιμές. Σε ό,τι αφορά την κυμάτωση, εμφανίζεται ισοτροπία στην ηλεκτροδιαβρωμένη επιφάνεια, αλλά έντονη ανισοτροπία στην φρεζαρισμένη και μάλιστα με αντίστροφη τάση, δηλαδή οι μέγιστες τιμές συναντώνται κατά μήκος των αυλακιών.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι λόγοι των παραμέτρων που είναι δυνατόν να λογιστούν ως νέοι δείκτες ανισοτροπίας κατά τις προαναφερθείσες προτάσεις και επισημάνσεις.

Πίνακας 1: Δείκτες χαρακτηρισμού της επιφανειακής ανισοτροπίας κατά υπάρχουσες και προτεινόμενες μεθόδους

	Ανισότροπη επιφάνεια	Ισότροπη επιφάνεια
D	0.71	0.94
$\lambda_{0.5}$	0.07	0.65
R_q	7.33	1.26
W_q	0.04	0.72
P_q	1.19	0.97
$P_{tp(10\%)}$	0.19	1.77
$R_{tp(10\%)}$	0.35	1.16
$P_{tp(40\%)}$	0.56	1.51
$R_{tp(40\%)}$	1.86	1.25
R_{DelQ}	5.15	1.02
R_k	7.95	1.60
F-P k	-0.002	0.25

(Οι δείκτες αντιστοιχούν σε λόγους των αντίστοιχων παραμέτρων μετρημένων κατά δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις επί της επιφάνειας.)

D είναι η μορφοκλασματική διάσταση, $\lambda_{0.5}$ το μήκος αυτοσυσχέτισης, R_q η δρώσα τιμή των υψών της τραχύτητας του περιγράμματος, W_q η αντίστοιχη παράμετρος της κυμάτωσης, P_q η αντίστοιχη παράμετρος του αφιλτράριστου περιγράμματος (τραχύτητα + κυμάτωση), $P_{tp(10\%)}$ $R_{tp(10\%)}$ $P_{tp(40\%)}$ $R_{tp(40\%)}$ οι τιμές των παραμέτρων Abbott για το αφιλτράριστο περίγραμμα και την τραχύτητα σε στάθμες 10% και 40%, R_{DelQ} η δρώσα τιμή της κλίσης του περιγράμματος, R_k παράμετρος της καμπύλης Abbott κατά DIN 4776 και η παράμετρος k του στατιστικού συστήματος Pearson.

Για την επιλογή του καταλληλότερου δείκτη ή δεικτών ανισοτροπίας πρέπει να ληφθεί υπ' όψη η διακρίσιμότητα που προσφέρεται αφενός για να περιγράψει την συνολική ανισοτροπία, αλλά και μεταξύ των τιμών που λαμβάνει σε περιπτώσεις ανισοτροπίας και ισοτροπίας.

Ως προς το πρώτο κριτήριο, τα μεγέθη που αναφέρονται στο αφιλτράριστο περίγραμμα ανταποκρίνονται καλύτερα. Ως προς το δεύτερο κριτήριο, οι δείκτες **k**, **R_k** , **R_q** $\lambda_{0.5}$ διακρίνουν ευχερέστερα την ισοτροπία από την ανισοτροπία.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Από την ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας που προηγήθηκε και τα δύο αναφερθέντα παραδείγματα ερευνητικής συμβολής του Εργαστηρίου Μηχανουργικών Κατεργασιών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο θέμα του χαρακτηρισμού και της αποτίμησης της τοπογραφικής ανισοτροπίας τεχνολογικών επιφανειών, προκύπτει η ιδιαίτερη σημασία που η τελευταία κατέχει. Και μάλιστα από πολλές πλευρές, όπως αυτές της τριβολογίας, της μετρολογίας, της μοντελοποίησης και του ελέγχου των κατεργασιών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Boudreau, B.D, Raja, J., Analysis of lay characteristics of three-dimensional surface maps, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 32 (1992) 171-177.
- [2] Kubo, M., Peklenik, J., An analysis of micro-geometrical isotropy for random surface structures, *CIRP Ann.*, 16 (1968) 235-342.
- [3] Bush, A.W., Gibson, R.D., Keogh, G.P., Strongly anisotropic rough surfaces. *Trans. ASME J. Lubr. Technol.* 101 (1979) 15-20.
- [4] Dizdar, S., Wear transition of a lubricated sliding steel contact as a function of surface texture anisotropy and formation of boundary layers, *Wear*, 237 (2000) 205-210.
- [5] Li, C.-G., Dong, S., Zhang, G.-X., Evaluation of the anisotropy of machined 3D surface topography, *Wear* 237 (2000) 211-216.
- [6] Thomas, T.R., Rosen, B.-G., Amini, N., Fractal characterization of the anisotropy of rough surfaces, *Wear*, 232 (1999) 41-50.
- [7] Petropoulos, G., Dasic, P., Pandazaras, C., The significance of evaluating surface texture anisotropy, 29th Jupiter Conference, February 2003, Belgrade, Serbia and Montenegro, 3.90- 3.93.
- [8] Podsiadlo, P., Stachowiak, G.W., Application of Hurst orientation transform to the characterization of surface anisotropy, *Trib. Int.*, 32, (1999) 387-392.
- [9] Pandazaras, C., Petropoulos, G., A computational study of hydrodynamically lubricated convex and concave journal bearings, *J. Eng. Trib.*, 215 No J5 (2001) 425-429.
- [10] Petropoulos, G., Torrance, A., Pandazaras, C., Abbott curve characteristics of turned surfaces, *Int. J. Mac. Tools Manufact.*, 43, No 3 (2003) 237-243.
- [11] Pandazaras, C, Petropoulos, G., Surface anisotropy for monitoring the wear of I.C.E. cylinders, *Tribotest*, 11, No 1 (2004) 29-41.
- [12] Li, W.-L., Chien, W.-T., Parameters for roughness pattern and directionality, *Trib. Lett.*, 17, No 3 (2004) 547-551.
- [13] Petropoulos, G., Davim, P., Mata, F., Pandazaras, C., New considerations of evaluating the anisotropy of machined surfaces, *Balkantrib 2005*, June 2005, Kragujevac, Serbia and Montenegro, (2005) 154-157.