



ΕΘΝΙΚΟ  
ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. : 64391  
Αθήνα, 21/12/23

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς  
τα Μέλη ΔΕΠ της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

### Π Ρ Ο Σ Κ Λ Η Σ Η

Παρακαλείστε να παρευρεθείτε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής που εκπόνησε στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, ο Υποψήφιος Διδάκτορας κ. **ΣΚΟΝΔΡΑΣ ΓΙΟΥΣΙΟΣ Δημήτριος του Μάρκου**, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ (Integrated Master).

Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Παρασκευή 12 Ιανουαρίου 2024, ώρα 11:00, διαδικτυακά στη διεύθυνση:

<https://centralntua.webex.com/centralntua/j.php?MTID=m41e364c1377fd66013c9e041cc5f4ce8>

Το θέμα της Διδακτορικής της Διατριβής είναι:

**Αγγλικός τίτλος:** «Manufacturing with electric discharge machining of two-level hierarchical surfaces – experimental and computational study of the effect of roughness on the hydrophobicity of aluminum alloy surfaces».

**Ελληνικός τίτλος:** «Κατασκευή με ηλεκτροδιάβρωση ιεραρχικών επιφανειών δύο επιπέδων-πειραματική και υπολογιστική μελέτη της επίδρασης της τραχύτητας στην υδροφοβικότητα επιφανειών κραμάτων αλουμινίου»

Ο Κοσμήτορας της Σχολής

Ι. Αντωνιάδης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

National Technical University of Athens

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

**Manufacturing with electric discharge machining of two-level hierarchical surfaces - experimental and computational study of the effect of roughness on the hydrophobicity of aluminum alloy surfaces**

Διδακτορική Διατριβή του

Σκόνδρα Γιούσιου Δημήτριου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΕΜΠ

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Α. Μαρκόπουλος, Αναπλ. Καθηγητής ΣΜΜ ΕΜΠ (επιβλέπων)

Δ. Μανωλάκος, Καθηγητής ΣΜΜ ΕΜΠ

Σ. Παπαευθυμίου, Αναπλ. Καθηγητής ΣΜΜΜ ΕΜΠ

**ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Α. Μαρκόπουλος, Αναπλ. Καθηγητής ΣΜΜ ΕΜΠ (επιβλέπων)

Δ. Μανωλάκος, Καθηγητής ΣΜΜ ΕΜΠ

Σ. Παπαευθυμίου, Αναπλ. Καθηγητής ΣΜΜΜ ΕΜΠ

Α. Αντωνιάδης, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Γ.-Χ. Βοσνιάκος, Καθηγητής ΣΜΜ ΕΜΠ

Β. Σπιτάς, Καθηγητής ΣΜΜ ΕΜΠ

Π. Μπενάρδος, Επίκ. Καθηγητής ΣΜΜ ΕΜΠ

**Αθήνα, Ιανουάριος 2024**

## Abstract

Hydrophobicity is a much-desired property that can assist the surface functionalization via obtaining properties such as anti-fouling, self-cleaning, directional liquid transport, wet friction reduction, anti-icing, improved heat transfer and drag reduction. The wetting state of a nominally flat surface is governed by its surface energy. Altering the surface topology by introducing roughness can increase the hydrophobicity of an inherently hydrophobic surface. More recently, outstanding wetting properties of natural surfaces unveiled the crucial role of dual scale or hierarchical morphology in further enhancing the hydrophobic properties of the structured surfaces towards superhydrophobicity. Regarding metallic surfaces, which are inherently hydrophilic, the challenge of wettability modification is great. Most of the approaches reported in the literature involve several steps of surface modification for surface energy reduction and subsequent roughening, in order to realize hydrophobicity. The unique resulting hierarchical surface of a metallic surface processed by Wire Electrical Discharge Machining (WEDM), can result in a hydrophobic outcome during a single step. The two levels of roughness are introduced by a stochastic microscale component, created by the electrical discharges, and a sub-millimeter morphology introduced by the controlled wire path. However, the inherent complexity of the interplay between process parameters and multiscale roughness outcome prevents a clear understanding of their influence in the machined surface wettability. This dissertation aims to contribute in providing a more comprehensive insight to aspects of dual scale roughness influence on the wettability of 6082 aluminum alloy surfaces fabricated by WEDM.

For the study of the smaller scale of roughness, nine samples with different combinations of process parameters were fabricated, adopting an L9 orthogonal Taguchi approach for the design of experiments. Three levels of the process parameters of peak current, pulse-on time and gap voltage were applied to produce surfaces of different topographies. The transition from initial hydrophilicity to hydrophobicity was observed for all samples. Surface texture characterization of all samples was performed. The effect that process parameters, areal texture parameters, morphology and other parameters had on wettability was discussed. Process parameter and roughness variations have an intermingled effect on wettability. Moderate values within the selected experimental ranges resulted in highest contact angles. Consequent finite element modeling of rough surfaces, by coupling phase field and laminar flow was implemented in order to further realize the roughness effect on hydrophobicity. Roughness was modeled as a uniform random distribution or by using the Perlin noise with roughness values varying according to selected experimental cases.

The study of the second, sub-millimeter scale, was performed by creating grooved structures of various geometrical profiles on the aluminum alloy surfaces by controlling the wire path. The two-level hierarchical roughness structures were able to further increase their hydrophobicity, reaching up to superhydrophobicity. The effect the second scale roughness and morphology is articulated, with considerations on wettability aspects that they influence. A correlation of contact angle with roughness parameters is indicated. The effect of wetting directionality of selected profiles is discussed in accordance to their morphology. The wetting behavior of the surfaces regarding different drop volumes and lower surface energy liquids is discussed. A temporal evolution of contact angle showed the effect of morphology on durability of the hydrophobic attribute of the surface. Finally, computational modeling of selected cases pinpointed the effect of surface texture and microscale roughness in efficient air trapping inside the groove cavities.

## Περίληψη

Η υδροφοβικότητα είναι μια ιδιαίτερα επιθυμητή ιδιότητα που μπορεί να ενισχύσει τη χρηστικότητα μιας επιφάνειας μέσω της απόκτησης ιδιοτήτων όπως απόθεση επιφανειακών ρύπων, αυτοκαθαρισμός, κατευθυντικότητα στη ροή, μείωσης της υγρής τριβής, αντι-παγοποίηση, ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας και μείωσης της υδροδυναμικής αντίστασης. Η κατάσταση διαβροχής μιας ονομαστικά επίπεδης επιφάνειας διέπεται από την επιφανειακή της ενέργεια. Η αλλαγή της τοπολογίας της επιφάνειας με την εισαγωγή τραχύτητας μπορεί να αυξήσει την υδροφοβικότητα μιας εγγενώς υδροφοβικής επιφάνειας. Προσφάτως, οι εξαιρετικές υδροφοβικές ιδιότητες φυσικών επιφανειών αποκάλυψαν τον κρίσιμο ρόλο της διπλής κλίμακας ή της ιεραρχικής μορφολογίας στην περαιτέρω ενίσχυση των υδροφοβικών ιδιοτήτων των δομημένων επιφανειών, ενισχύοντας περαιτέρω την υδροφοβικότητα προς την υπερ-υδροφοβικότητα. Όσον αφορά τις μεταλλικές επιφάνειες, οι οποίες είναι εγγενώς υδρόφιλες, η πρόκληση της τροποποίησης της διαβρεκτικής τους δυνατότητας είναι μεγάλη. Οι περισσότερες προσεγγίσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία περιλαμβάνουν αρκετά βήματα τροποποίησης της επιφάνειας για τη μείωση της επιφανειακής ενέργειας και την εκτράχυνσή της, προκειμένου να επιτευχθεί η υδροφοβικότητα. Η ιδιαίτερη επιφανειακή δομή μιας μεταλλικής επιφάνειας που έχει προκύψει με χρήση ηλεκτροδιάβρωσης σύρματος (Wire Electrical Discharge Machining - WEDM), μπορεί να οδηγήσει σε ένα υδροφοβικό αποτέλεσμα χωρίς τη χρήση επιπλέον βημάτων. Τα δύο επίπεδα τραχύτητας εισάγονται από μια στοχαστική μορφολογία μικροκλίμακας, δημιουργημένη από τις ηλεκτρικές εκκενώσεις, και μια μορφολογία υπο-χιλιοστομέτρου εισάγεται από την ελεγχόμενη διαδρομή του σύρματος. Ωστόσο, η εγγενής πολυπλοκότητα της αλληλεπίδρασης των παραμέτρων καταργασίας και του αποτελέσματος της πολλαπλής κλίμακας τραχύτητας αποτρέπει μια σαφή κατανόηση της επιρροής τους στην διαβροχή της επεξεργασμένης επιφάνειας. Η παρούσα διατριβή στοχεύει να συμβάλει στην περαιτέρω κατανόηση πτυχών της επιρροής της τραχύτητας δυο επιπέδων στην υδροφοβικότητα των επιφανειών του κράματος αλουμινίου 6082 που καταργάστηκαν με WEDM.

Για τη μελέτη της μικρότερης κλίμακας τραχύτητας, κατασκευάστηκαν εννέα δείγματα με διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων καταργασίας, υιοθετώντας μια ορθογωνική προσέγγιση Taguchi L9 για τον πειραματικό σχεδιασμό. Εφαρμόστηκαν τρία επίπεδα των παραμέτρων καταργασίας για την παραγωγή επιφανειών με διαφορετικές τοπογραφίες τα οποία ήταν το μέγιστο ρεύμα, ο χρόνος διάρκειας παλμού και η τάση κενού. Παρατηρήθηκε η μετάβαση από την αρχική υδροφιλία σε υδροφοβία για όλα τα δείγματα. Πραγματοποιήθηκε χαρακτηρισμός των επιφανειακών παραμέτρων τραχύτητας για τις επιφάνειες όλων των δειγμάτων. Συζητήθηκε η επίδραση των παραμέτρων καταργασίας, των παραμέτρων επιφανειακής τραχύτητας, της μορφολογίας και άλλων παραμέτρων στις μεταβολές της διαβρεκτικής ικανότητας των επιφανειών. Οι μεταβολές των παραμέτρων καταργασίας και της τραχύτητας έδειξαν να έχουν ένα συνδυαστικό αποτέλεσμα στην υδροφοβικότητα. Υψηλότερες γωνίες επαφής βρέθηκαν σε ενδιάμεσες τιμές των ανωτέρω παραμέτρων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων των επιφανειών, μέσω της σύζευξης του πεδίου φάσεων (Phase Field) και της στρωτής ροής, με στόχο την περαιτέρω κατανόηση της επίδρασης της τραχύτητας στην υδροφοβικότητα. Η τραχύτητα μοντελοποιήθηκε είτε ως μια ομοιόμορφη τυχαία κατανομή, είτε χρησιμοποιώντας τον θόρυβο Perlin, με τιμές τραχύτητας που μεταβάλλονται σύμφωνα με τις μετρήσεις επιλεγμένων πειραματικών περιπτώσεων.

Η μελέτη της δεύτερης, υπο-χιλιοστομετρικής κλίμακας πραγματοποιήθηκε δημιουργώντας δομές με αυλακώσεις διαφόρων γεωμετρικών προφίλ στις επιφάνειες του κράματος αλουμινίου, ελέγχοντας τη διαδρομή του σύρματος. Οι ιεραρχικές δομές τραχύτητας δύο επιπέδων ήταν σε θέση να αυξήσουν περαιτέρω την υδροφοβικότητά των καταργασμένων επιφανειών, μέχρι και το όριο της υπερυδροφοβικότητας. Αναλύθηκε η επίδραση της τραχύτητας δεύτερης κλίμακας και της μορφολογίας, με γνώμονα τις πτυχές της υδροφοβικότητας που επηρεάζουν. Βρέθηκε να υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ της γωνίας επαφής με τις παραμέτρους της τραχύτητας. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε συζήτηση για την επίδραση της κατευθυντικότητας στην υδροφοβικότητα επιλεγμένων προφίλ σε σχέση με τη μορφολογία τους. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η συμπεριφορά της υδροφοβικότητας των επιφανειών ως προς διαφορετικούς όγκους σταγόνων και υγρά χαμηλότερης επιφανειακής ενέργειας. Η μελέτη της χρονικής επίδρασης στη γωνία επαφής έδειξε την επιρροή της μορφολογίας στην αντοχή της υδροφοβικής ιδιότητας της επιφάνειας. Τέλος, η υπολογιστική μοντελοποίηση επιλεγμένων περιπτώσεων κατέδειξε την επίδραση του γεωμετρικού προφίλ της επιφάνειας και της τραχύτητας σε μικροκλίμακα στην αποτελεσματική παγίδευση αέρα στις εσοχές των αυλακώσεων.