



Α.Π. : 57899  
Αθήνα, 16/11/23

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

Προς  
τα Μέλη ΔΕΠ  
της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

## ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του Υποψήφιου Διδάκτορα **κ. ΣΑΡΚΙΡΗ Παναγιώτη του Ιωάννη**, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και κατόχου Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης του Δ.Π.Μ.Σ. του ΕΜΠ «Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις».

Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί **την Παρασκευή 24 Νοεμβρίου 2023, ώρα 11:00 π.μ.**, δια ζώσης, στο Αμφιθέατρο Πολυμέσων του κτιρίου της Βιβλιοθήκης ΕΜΠ στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Θα υπάρχει δυνατότητα εξ 'αποστάσεως συμμετοχής, μέσω της ηλεκτρονικής πλατφόρμας Microsoft Teams στο meeting link:

<https://teams.microsoft.com/l/channel/19%3aUmAOkEtmIdoDBSxxiVx9smVbYrIauNanM9gxcawWmI1%40thread.tacv2/%25CE%2593%25CE%25B5%25CE%25BD%25CE%25B9%25CE%25BA%25CF%258C?groupId=b66e22b8-3c53-49b3-87f8-1a96654e6ead&tenantId=075e0cb3-752a-4320-b367-6d08b7918c40>

Το θέμα της Διδακτορικής της Διατριβής στα ελληνικά και αγγλικά είναι:

**«Κατασκευή και χαρακτηρισμός υπερυδρόφοβων επιφανειών σε μέταλλα και πολυμερή για ενεργειακές εφαρμογές»**

**«Fabrication and characterization of superhydrophobic surfaces on metals and polymers for energy applications»**

Ο Κοσμήτορας της Σχολής

Ι. Αντωνιάδης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

## Κατασκευή και χαρακτηρισμός υπερυδρόφοβων επιφανειών σε μέταλλα και πολυμερή για ενεργειακές εφαρμογές

### Περίληψη

Μία επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως υπερυδρόφοβη όταν η γωνία επαφής της με μία σταγόνα νερού είναι άνω των  $150^\circ$  και η γωνία υστέρησής της είναι μικρότερη των  $10^\circ$ . Η γωνία επαφής εκφράζει την επίδραση της επιφανειακής τάσης ενός υγρού ως προς τις δυνάμεις πρόσδεσης της σταγόνας με την επιφάνεια, ενώ η γωνία υστέρησης αντιπροσωπεύει την ομοιογένεια της επιφάνειας. Για την επίτευξη υπερυδροφοβικότητας είναι απαραίτητη η ύπαρξη κατάλληλης τοπογραφίας, η οποία θα ελαχιστοποιήσει την επαφή της επιφάνειας με την σταγόνα, και η χαμηλή επιφανειακή ενέργεια της επιφάνειας, η οποία θα μειώσει τις δυνάμεις πρόσδεσης της με τη σταγόνα.

Η υπερυδροφοβοποίηση επιφανειών έχει τραβήξει, τα τελευταία χρόνια, την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας εξαιτίας της δυνατότητας εφαρμογής τους σε πολλούς βιομηχανικούς και τεχνολογικούς τομείς, και ιδιαιτέρως λόγω των δυνατοτήτων που προσφέρουν ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βελτιστοποίηση υπαρχόντων διεργασιών. Συγκεκριμένα, οι ιδιότητες αποφυγής προσκόλλησης πάγου που προσφέρει η υπερυδροφοβοποίηση πτερυγίων ανεμογεννητριών ή αεροσκαφών έχει ως συνέπεια τη μείωση των ασύμμετρων καταπονήσεων και επομένως των απαιτήσεων συντήρησής τους, ενώ παράλληλα αυξάνει τα διαστήματα λειτουργίας τους. Επίσης η υπερυδροφοβοποίηση του κύτους των πλοίων συμβάλει σε μείωση της αντίστασης κατά την πλευση, αποφυγή προσκόλλησης άλγης και επομένως μείωση των αναγκών δεξαμενισμού και ταυτόχρονη εξοικονόμηση καυσίμου. Επιπλέον, η υπερυδροφοβοποίηση αγωγών μεταφοράς υγρών έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ υγρού και αγωγού, οπότε και την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που απαιτείται για τη μεταφορά τους. Τέλος, η σημαντικότερη συνεισφορά της υπερυδροφοβικότητας στην παγκόσμια εξοικονόμηση ενέργειας και προστασίας του περιβάλλοντος, έγκειται στη βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας στους εναλλάκτες και συμπυκνωτές που χρησιμοποιούνται σε εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συνεισφέρει, περισσότερο από κάθε άλλη δραστηριότητα, στην κατανάλωση καυσίμων, ορυκτών ή πυρηνικών, καθιστώντας ακόμα και μία μικρή βελτίωση της αποδοτικότητας του θερμοδυναμικού κύκλου παραγωγής ισχύος-Rankine, να έχει τεράστιες συνέπειες στην εξοικονόμηση καυσίμου. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας της παραγωγής ισχύος ενός λιγνιτικού σταθμού των 900 MW, από 40% σε 40.1% έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση πάνω από 19.000 τόνων ετησίως στην κατανάλωση άνθρακα, κάτι το οποίο μεταφράζεται σε τεράστιο περιβαλλοντικό όφελος. Η βελτιστοποίηση των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας μέσω των υπερυδρόφοβων επιφανειών γίνεται μέσω της συμπύκνωσης του ατμού, που έρχεται από τον στρόβιλο, υπό τη μορφή διακριτών σταγόνων πάνω στις επιφάνειες του εναλλάκτη θερμότητας, ο οποίος χρησιμεύει ως συμπυκνωτής στον κύκλο Rankine. Η τυπική συμπύκνωση ατμού πάνω σε μεταλλικές επιφάνειες συμβαίνει υπό τη μορφή φιλμ νερού το οποίο δεσμεύει την επιφάνεια και προσθέτει επιπλέον θερμικές αντιστάσεις κατά τη μεταφορά της θερμότητας που εκλύεται κατά τη συμπύκνωση. Αντίθετα, η μορφή της συμπύκνωσης ως διακριτές σταγόνες υψηλής κινητικότητας αυξάνει τη διαθεσιμότητα του εναλλάκτη για περαιτέρω συμπύκνωση και μειώνει τις θερμικές αντιστάσεις που θέτει η δημιουργία φιλμ νερού ψυχρούς σωλήνες των εναλλακτών. Για την επίτευξη συμπύκνωσης υπό τη μορφή διακριτών σταγόνων πρέπει τα υποστρώματα στα οποία γίνεται συμπύκνωση να έχουν χαμηλή επιφανειακή ενέργεια και μικρή επιφάνεια επαφής με το νερό. Η χαμηλή επιφανειακή ενέργεια εξαναγκάζει το σχήμα της σταγόνας να προσεγγίσει το σφαιρικό, λόγω του ότι οι διαμοριακές δυνάμεις εσωτερικά της σταγόνας υπερνικούν τις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ αυτής και της επιφάνειας. Η

ελαχιστοποίηση της επιφάνειας επαφής αυξάνει την κινητικότητα των σταγόνων και επομένως τη συχνότητα αποχώρησής τους από την επιφάνεια.

Στην κατεύθυνση αυτή, στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή πραγματοποιείται η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός υπερυδρόφοβων επιφανειών σε μεταλλικά υποστρώματα για τη χρήση τους σε εναλλάκτες θερμότητας. Συγκεκριμένα, ο στόχος της εργασίας είναι:

α) η κατασκευή ανθεκτικών σε θερμική ή / και υδρολυτική καταπόνηση υπερυδρόφοβων επιφανειών σε μεταλλικά και πολυμερικά υποστρώματα.

β) η επίτευξη συμπίκνωσης ατμού υπό τη μορφή διακριτών σταγόνων πάνω σε μεταλλικές υπερυδρόφοβες επιφάνειες, προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση της μεταφοράς θερμότητας κατά την αλλαγή φάσης του ατμού.

Για την κατασκευή των υπερυδρόφοβων επιφανειών ακολουθήθηκαν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες βασίζονται στα απαραίτητα κριτήρια επίτευξης υπερυδροφοβικότητας. Η πρώτη προσέγγιση περιλαμβάνει τη δημιουργία ιεραρχικής δόμησης σε μεταλλικά υποστρώματα, και την μετέπειτα μείωση της επιφανειακής τους ενέργειας, ενώ η δεύτερη αφορά την επίστρωση ενός υδρόφοβου υμενίου μεγάλου πάχους και την μετέπειτα δημιουργία κατάλληλης τοπογραφίας πάνω σε αυτό.

#### Δομή της διατριβής

Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφονται οι βασικές έννοιες της διαβροχής καθώς και η χρησιμότητα των υπερυδρόφοβων επιφανειών σε διάφορες βιομηχανικές και τεχνολογικές εφαρμογές.

Στο πρώτο μισό του Κεφαλαίου 2 πραγματοποιείται βιβλιογραφική επισκόπηση των μεθόδων κατασκευής υπερυδρόφοβων επιφανειών σε μεταλλικά υποστρώματα, με βάση τις δύο προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το δεύτερο μισό του κεφαλαίου επικεντρώνεται στις βασικές έννοιες της συμπίκνωσης, όπως πυρηνοποίηση, συμπίκνωση υπό τη μορφή φιλμ, ανάπτυξη διακριτών σταγόνων και μοντέλα μετάδοσης θερμότητας. Στη συνέχεια αναλύονται διάφορες τεχνικές που έχουν χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της συμπίκνωσης και της μεταφοράς θερμότητας κατά την αλλαγή φάσης, καθώς και κανόνες σχεδιασμού επιφανειών αλλά και παράγοντες που μπορούν να μειώσουν την απόδοση της συμπίκνωσης.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή και τον χαρακτηρισμό των επιφανειών, καθώς και διατάξεις για τον έλεγχο της συμπίκνωσης και της μετάδοσης θερμότητας κατά την αλλαγή φάσης. Στο ίδιο κεφάλαιο δίνονται οι βασικές έννοιες της μετρολογίας επιφανειών με τραχύτητα και περιγράφεται η μέθοδος της προσομοίωσης Monte Carlo.

Το Κεφάλαιο 4 αφορά την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή υπερυδρόφοβων επιφανειών μέσω της πρώτης προσέγγισης, δηλαδή της δημιουργίας τραχύτητας σε μεταλλικό υπόστρωμα και τη μετέπειτα μείωση της επιφανειακής του ενέργειας. Όσον αφορά την προσέγγιση αυτή, η μικροδόμηση στην επιφάνεια του αλουμινίου πραγματοποιείται μέσω χημικής εγχάραξης, ενώ η νανοδόμηση, μέσω της διαδικασίας της βοημιτοποίησης. Την δημιουργία τοπογραφίας ακολούθησε ο χαρακτηρισμός των επιφανειών, μέσω παρατήρησης με μικροσκοπία ηλεκτρονικής σάρωσης, μετρολογικής ανάλυσης των εικόνων SEM των επιφανειών, καθώς και μέσω ανάπτυξης κώδικα που αναπαριστά τη τοπογραφία. Στη συνέχεια, η επιφανειακή ενέργεια των επιφανειών μειώνεται μέσω της επίστρωσης υδρόφοβων υμενίων, με τις τεχνικές της εναπόθεσης μέσω πλάσματος, εναπόθεσης εκ περιστροφής και ενστάλαξης διαλυμάτων PTFE, καθώς και εναποθέσεων αέριας φάσης.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιήθηκε συμπύκνωση θερμού ατμού στις επιφάνειες που κατασκευάστηκαν με βάση την πρώτη προσέγγιση, όπου έγινε έλεγχος της αντοχής τους, μέτρηση των διαμέτρων αποχώρησης των σταγόνων από τις επιφάνειες, και παρατήρηση του φαινομένου και της μορφής της συμπύκνωσης. Ανάλογα με τη συμπεριφορά των επιφανειών στη συμπύκνωση, πραγματοποιήθηκε η περαιτέρω βελτιστοποίηση τους ως προς την τοπογραφία τους και τις τεχνικές μείωσης της επιφανειακής ενέργειας. Στο υποκεφάλαιο 5.3 αναλύεται η επίδραση της τοπογραφίας της συμπύκνωσης μέσω του συνδυασμού παρατήρησης του φαινομένου και της μετρολογικής ανάλυσης των τοπογραφιών. Στο κεφάλαιο αυτό εισάγεται ένας κρίσιμος λόγος της απόστασης των μικροδομών προς την απόσταση των νανοδομών για την επίτευξη συμπύκνωσης κατά σταγόνες σε ιεραρχικά δομημένες επιφάνειες. Στο τέλος του Κεφαλαίου 5 δίνονται οι μετρήσεις μετάδοσης θερμότητας στις ανθεκτικότερες επιφάνειες της πρώτης προσέγγισης, στις οποίες ο ατμός συμπυκνώνεται υπό την μορφή σταγόνων.

Στο Κεφαλαίο 6 περιγράφεται η κατασκευή υπερυδρόφοβων επιφανειών σύμφωνα με τη δεύτερη προσέγγιση, δηλαδή την επίστρωση ενός υδρόφοβου υμενίου μεγάλου πάχους και την μετέπειτα δημιουργία κατάλληλης τοπογραφίας πάνω σε αυτό. Αρχικά περιγράφεται η δημιουργία τοπογραφίας στο υμένιο μέσω της εγχάραξης με πλάσμα οξυγόνου, καθώς και διάφορες μέθοδοι που δοκιμάστηκαν για την ενίσχυση και επαναφορά της υπερυδρόφοβικότητας μετά την εγχάραξη. Στη συνέχεια του κεφαλαίου, περιγράφεται η δημιουργία τοπογραφίας μέσω της τεχνικής της θερμικής νανοαποτύπωσης, η οποία πραγματοποιήθηκε σε διάφορα υδρόφοβα υλικά.

Στο Κεφάλαιο 7 περιγράφεται και αναλύεται η συμπύκνωση θερμού ατμού πάνω στις επιφάνειες της δεύτερης προσέγγισης όπου έγινε έλεγχος της αντοχής τους, μέτρηση των διαμέτρων αποχώρησης των σταγόνων από τις επιφάνειες, και παρατήρηση του φαινομένου και της μορφής της συμπύκνωσης. Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού, αναλύονται τα αποτελέσματα της μετάδοσης θερμότητας κατά την αλλαγή φάσης στις ανθεκτικότερες επιφάνειες αυτής της προσέγγισης.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 δίνονται τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.