

Αύξηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας σε υπερυδρόφοβες μεταλλικές επιφάνειες μέσω συμπύκνωσης κατά σταγόνες

Π. Σαρκίρης, Κ. Έλληνας, Ε. Γογγολίδης, Ε. Liam Cheuk Wing, Θ. Μηλιώνης

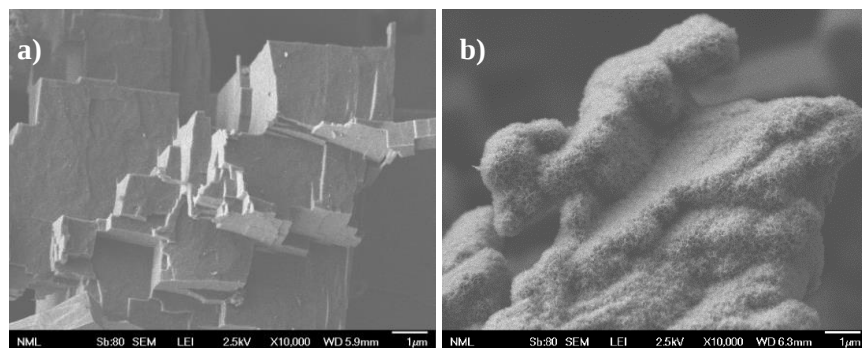
Περισσότερο από το 80% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, βασίζεται στον κύκλο ατμού που χρησιμοποιεί ορυκτά καύσιμα και πυρηνική σχάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να συνεισφέρει στο μεγαλύτερο ποσοστό στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Ακόμη και μια μικρή βελτίωση της απόδοσης στην διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εάν εφαρμοστεί για μεγάλες χρονικές περιόδους, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων.

Κάτι τέτοιο μπορεί να επιτευχθεί με την αύξηση της απόδοσης αλλαγής φάσης των βιομηχανικών συμπυκνωτών. Τυπικά, η συμπύκνωση σε βιομηχανικούς εναλλάκτες συμβαίνει υπό την μορφή φιλμ νερού (Film Wise Condensation, FWC) πάνω στους ψυχόμενους μεταλλικούς σωλήνες. Αυτό οφείλεται στην εγγενή υδροφιλικότητα των μετάλλων και περιορίζει την απόδοση αλλαγής φάσης και κατά συνέπεια την μετάδοση θερμότητας.

Η ετερογενής συμπύκνωση μπορεί να ενισχυθεί μέσω της συμπύκνωσης του ατμού υπό την μορφή διακριτών σταγόνων οι οποίες απορρίπτονται τακτικά από την επιφάνεια, (Drop Wise Condensation, DWC), αντί να σχηματίζουν ένα συνεχές υγρό φιλμ το οποίο προσθέτει συνεχή θερμική αντίσταση στη διαδικασία συμπύκνωσης και μειώνει την απόδοση της. Η τακτική απόρριψη των σταγόνων στο DWC έχει ως αποτέλεσμα την περιοδική διαθεσιμότητα της επιφάνειας για πυρηνοποίηση νέων σταγόνων κάτι το οποίο ενισχύει σημαντικά τη διαδικασία αλλαγής φάσης. Η συμπύκνωση κατά σταγόνες μπορεί να επιτευχθεί με την αλλαγή της διαβροχής των μεταλλικών επιφανειών των εναλλακτών με τέτοιο τρόπο που η σταγόνα του νερού θα έχει την ελάχιστη επαφή με την επιφάνεια. Αυτή η κατάσταση διαβροχής ονομάζεται υπερυδροφοβικότητα και χαρακτηρίζεται από μεγάλες γωνίες επαφής και χαμηλή υστέρηση. Η υπερυδροφοβικότητα απαιτεί την ύπαρξη κατάλληλης μικρο-νανο-τοπογραφίας σε συνδυασμό με χαμηλή επιφανειακή ενέργεια.

Στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκαν υπερυδρόφοβες μικρο/νανο δομημένες επιφάνειες αλουμινίου μέσω χημικής εγχάραξης και εναπόθεσης πλάσματος για την βελτίωση της μετάδοσης θερμότητας σε βιομηχανικούς εναλλάκτες θερμότητας. Οι μικροδομές στην επιφάνεια αλουμινίου κατασκευάστηκαν μέσω εγχάραξης με υδροχλωρικό οξύ ενώ οι νανοδομές προήλθαν από την διαδικασία της βοημιτοποίησης. Η υδροφοβοποίηση των ιεραρχικών αυτών επιφανειών έγινε μέσω της επίστρωσης ενός υδρόφοβου υμενίου μέσω εναπόθεσης πλάσματος C_4F_8 . Οι επιφάνειες που προκύπτουν είναι υπερυδρόφοβες με γωνίες επαφής άνω των 170° και υστέρηση γύρω στη 1° ενώ ταυτόχρονα αυξάνουν τον συντελεστή μετάδοσης θερμότητας κατά 225% σε σχέση με μία απλή υδρόφοβη επιφάνεια.

Οι μικροδομές προέκυψαν από υγρή εγχάραξη του αλουμινίου σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος περιεκτικότητας 9.25%. Προκειμένου να αναπτυχθούν ιεραρχικές δομές, οι ήδη μικροδομημένες επιφάνειες εμβαπτίζονται σε βραστό νερό για 5 λεπτά, μία διαδικασία που ονομάζεται βοημιτοποίηση. Κατά την βοημιτοποίηση αναπτύσσονται νανοδομές βοημίτη στην επιφάνεια του αλουμινίου ύψους 150-200 nm.

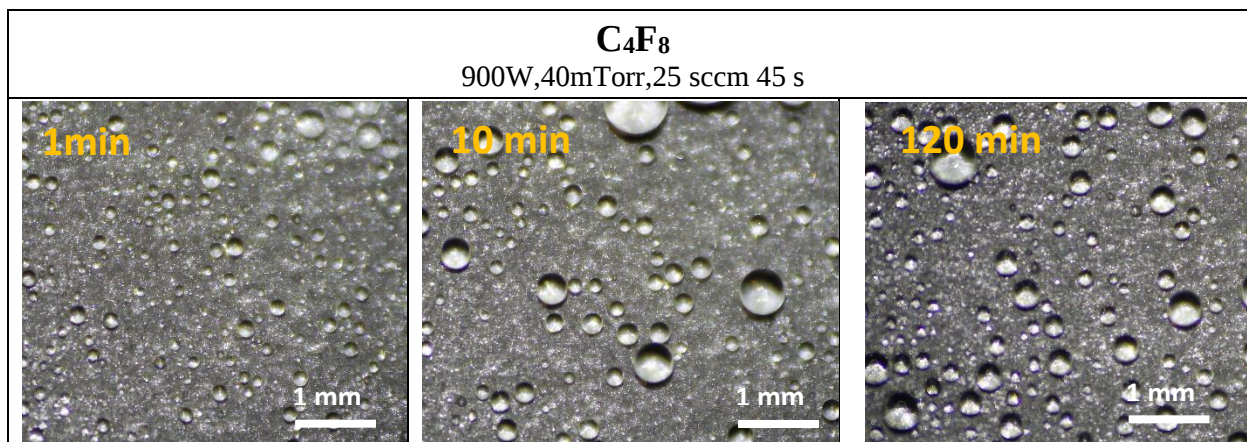


Σχήμα 1: Εικόνες SEM α) μικροδόμηση του αλουμινίου β) ιεραρχική δόμηση του αλουμινίου.

Για την υπερυδροφοβοποίηση των ιεραρχικών επιφανειών αλουμινίου πραγματοποιήθηκε εναπόθεση μέσω πλάσματος C_4F_8 σε αντιδραστήρα τύπου ICP (Inductively Coupled Plasma) και σε συνθήκες 900W ισχύς πλάσματος, 40mTorr πίεσης, 25 sccm ροή C_4F_8 , 0°C θερμοκρασία υποστρώματος και διάρκεια εναπόθεσης 1 λεπτό. Οι συνθήκες αυτές οδηγούν σε εναπόθεση υμενίου πάχους 30 nm και επιφανειακής ενέργειας 24.86 mN/m.

Οι επιφάνειες που προκύπτουν από αυτήν την διαδικασία είναι υπερυδρόφοβες με γωνία επαφής άνω των 170° και υστέρηση μικρότερη από 2°. Οι επιφάνειες αυτές διατηρούν την συμπύκνωση θερμού ατμού υπό μορφή σταγόνων για τουλάχιστον δύο ώρες, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας1: Συμπύκνωση θερμού ατμού σε υπερυδρόφοβο μικρο-νανο δομημένο αλουμίνιο. Η συμπύκνωση διατηρείται υπό την μορφή σταγόνων για τουλάχιστον δύο ώρες.



Μέτρησεις μετάδοσης θερμότητας στην βέλτιστη επιφάνεια

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η βελτίωση της συμπύκνωσης κατά σταγόνες πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας στις υπερυδρόφοβες επιφάνειες που κατασκευάστηκαν. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ‘Θερμοδυναμικής σε αναδυόμενες τεχνολογίες’ του ETH στην Ζυρίχη (Laboratory of Thermodynamics in Emerging Technologies-ETH Zurich).

Η μέτρηση του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας έγινε σε θάλαμο πίεσης 30 mbar με κορεσμένο ατμό ταχύτητας περίπου 3.7 m/s.

Ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας στις υπερυδρόφοβες ιεραρχικές επιφάνειες ανήλθε στη μέγιστη τιμή των $153 \text{ KW/m}^2\text{K}$ για $\Delta T=0.7\text{K}$. Η αντίστοιχη τιμή του συντελεστή μετάδοσης θερμότητας για μία απλή υδρόφοβη επιφάνεια είναι $48 \text{ KW/m}^2\text{K}$. Αυτό συνεπάγεται σε μία βελτίωση της τάξης του 225% σε σχέση με την απλή υδρόφοβη επιφάνεια στην καλύτερη περίπτωση, ενώ η σύγκριση των μέσων όρων για ΔT από 0 έως 3K , δείχνει βελτίωση κατά 125.9% σε σχέση με μία υδρόφοβη επιφάνεια.