

## **Nucleate pool boiling on microstructured surfaces**

Alexander Ustinov

Die Arbeit befasst sich mit dem Wärmeübergang beim Blasensieden an waagrechten Rohren unter dem Einfluss der freien Konvektion. Die Oberfläche der Versuchsrohre war mit einer von Prof. J. Mitrovic entwickelten Mikrostruktur versehen. Die Elemente dieser Struktur weisen die Form von Pins auf, mit Pindurchmessern zwischen  $3,4\ \mu\text{m}$  und  $17,8\ \mu\text{m}$  und die Pindichten zwischen  $1,2 \cdot 10^5$  und  $5,0 \cdot 10^6$  Elemente je Quadratzentimeter. Der Neigungswinkel der Pins in Bezug auf die Grundfläche stellt einen weiteren Parameter dar.

In den Untersuchungen werden 11 Mikrostrukturen und 3 Versuchsstoffe (R141b, R134a, FC-3284) bei Drücken zwischen 0,5 bar und 9 bar verwendet. Es wurden sowohl Einzelrohre als auch Tandemrohre eingesetzt. Die strukturierten Rohre weisen einen bis um den Faktor 20 besseren Wärmeübergang auf, der praktisch unabhängig von der Wärmestromdichte ist. Der Siedebeginn an der Struktur findet vielfach in Form von Siedefronten statt, deren Geschwindigkeit von der Mikrostruktur abhängt. Das Siedeverhalten der Struktur ist weitgehend unabhängig von der Zeit.

In der Arbeit wurde ein Klassifikationssystem für modifizierte Heizflächen vorgeschlagen. Nach diesem System lassen sich die Siedeflächen in Klassen einteilen und ihre Effizienz illustrieren. Hiernach kann der Wärmeübergang durch Steigerung der Blasendichte und/oder Vergrößerung der Dreiphasenlinie verbessert werden. Um den Mechanismus dieser Verbesserung genauer zu spezifizieren wurde eine fraktale Dimension eingeführt, die grundsätzlich universell anwendbar ist.

Mikrostrukturen mit bidirektionalen Neigungen ihrer Elemente weisen ein stufenartiges Siedeverhalten auf. Zunächst werden Blasenzentren mit kleineren Abmessungen aktiviert, später, d.h. bei einer höheren Wandtemperatur die mit größeren Abmessungen. Die an diesen gebildeten Dampfblasen verlassen schließlich die Mikrostruktur, in vielen Fällen als Dampfpolster, die in erster Linie durch die Koaleszenz gesteuert werden.

Die Verbesserung des Wärmeübergangs durch die Wirkung der Mikrostruktur hängt von den geometrischen Parametern der Struktur ab. Diese Verbesserung ist weitgehend unabhängig von der Wärmestromdichte, hängt aber von der Eigenschaft der siedenden Flüssigkeit ab; sie nimmt mit zunehmendem Systemdruck ab.

Die Steigerung der thermischen Effizienz durch die Mikrostruktur, ist in erster Linie auf die Blasendichte und die damit zusammenhängende Länge der Dreiphasenlinie (TPL) zurückzuführen. Die Mikrostruktur ist „gesättigt“ mit Dampfresten, aus denen bevorzugt aktive bzw. wachsende Blasen entstehen.

Temperaturschwankungen der Mikrostruktur wurden bei sehr hohen Wärmestromdichten, nahe der kritischen Wärmestromdichte beobachtet. Bei der Versuchsflüssigkeit FC-3284, das die Heizflächen sehr gut benetzt, waren die Schwankungen stärker als bei den anderen Versuchsstoffen. Diese Schwankungen rühren daher, dass sich große Dampfblasen von der Heizplatte lösen und an ihre Stelle die Umgebungsflüssigkeit nachrückt. Ihre Amplitude und Frequenz hängen von der Mikrostruktur ab. Die Amplitude ist kleiner bei der größten Pindichte. Aus den Experimenten konnte deduziert werden, dass sich die Temperaturschwankungen in bestimmten Bereichen der Parameter gruppieren (Attraktorwirkung), so dass es grundsätzlich möglich ist, die Mikrostrukturen zu generieren, die diese Bereiche meiden bzw. unterdrücken. Auch die beobachtete Hysterese zeigte eine Abhängigkeit von der Dichte der Pinelemente und war kleiner bei höherer Pindichte.

In den Experimenten mit Tandemrohren wurde an den Rohren die Wärmestromdichte autonom variiert. Dabei zeigte sich, dass der Wärmeübergang am oberen Rohr praktisch unabhängig ist von dem am unteren Rohr. Dieses Verhalten lässt Schlüsse über das Verhalten von in Bündel angeordneten Rohren zu. Hiernach ist mit einem, von der Position des Rohres im Bündel, unabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten zu rechnen. Dies wird stabile Siedezustände, im Vergleich zu technisch glatten Rohre, ermöglichen. Darüber hinaus werden die mit mikrostrukturierten Rohren bestückten Bündel erheblich sicherer und zuverlässiger ausgelegt.

Aufbauend auf den experimentellen Ergebnissen wurde ein Modell vorgeschlagen, das die Länge der Dreiphasenlinie als eine zentrale Größe in den Vordergrund stellt. Diese hängt von der Pindichte und der Wärmestromdichte ab. Die Länge der Dreiphasenlinie muss sich nicht unbedingt kontinuierlich mit der Wärmestromdichte ändern; auf der Mikroebene finden quantenartige Sprünge der Länge statt, was sich auf die Siedecharakteristik so auswirken kann, dass eine Zunahme der Wärmestromdichte einen Rückgang der Wandüberhitzung bedingt.

Die eigenen Experimente haben den schon seit langem vermuteten Zusammenhang bestätigt, wonach sich Siedeflächen durch Variation der zentralen Parameter kreieren lassen. Bei der untersuchten Struktur sind es die geometrischen Parameter der Pins, sowie ihre Dichte und Anordnung auf der Grundfläche.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden auf mehreren internationalen Konferenzen vorgestellt und entsprechenden in Konferenzberichten bzw. in Zeitschriften publiziert [1-5].

## Referenzen

1. Mitrovic J., Ustinov A.: Nucleate boiling heat transfer on a tube provided with a novel microstructure // *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 13(3) 1–18 (2006).
2. Mitrovic J., Ustinov A.: Boiling features of a novel microstructure // *Proc. of 13<sup>th</sup> International Heat Transfer Conference*, Sydney, Australia, August 13 – 18, 2006.
3. Ustinov A., Mitrovic J.: Highly effective surfaces for boiling applications // Paper MJ2. *Proc. of 5<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, 2007, Sun City, South Africa.
4. Ustinov A., Mitrovic J.: Special boiling effects of novel microstructured surface // Paper THP-19. *Proc. of 5<sup>th</sup> European Thermal-Sciences Conference*, 2008, Eindhoven, Netherlands.
5. Ustinov A., Mitrovic J.: Pool boiling heat transfer from a bundle of tubes provided with the novel microstructure // *Proc. of ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale*, Canada, Whistler, 21-26 September 2008. (Invited in the special issue of International Journal of Heat and Fluid Flow).