

Zastosowanie teksturowania laserowo-wibracyjnego do intensyfikacji procesu wrzenia w przepływie przez minikanal o przekroju prostokątnym

The use of vibration-assisted laser surface texturing to enhance flow boiling heat transfer in a minichannel

KINGA STRĄK
MAGDALENA PIASECKA
BOGUSŁAW GRABAS*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.12.573

Prezentowano efektywność wymiany ciepła podczas wrzenia płynu chłodniczego przepływającego przez pionowy minikanal, asymetrycznie ogrzewany powierzchnią rozwiniętą teksturowaniem laserowo-wibracyjnym. Analizy efektywności wymiany ciepła dokonano na podstawie lokalnych współczynników przejmowania ciepła na styku powierzchni grzejna–płyn. Zastosowanie powierzchni grzejnej rozwiniętej teksturowaniem laserowo-wibracyjnym wspomogło osiągnięcie efektywniejszej wymiany ciepła podczas wrzenia nasyconego w porównaniu z powierzchnią gładką, gdyż uzyskano wyższe wartości współczynników przejmowania ciepła.

SŁOWA KLUCZOWE: laserowe teksturowanie, wibracja, intensyfikacja wymiany ciepła, minikanal

This chapter discusses the efficiency of flow boiling heat transfer for a fluid flowing through a vertical minichannel heated asymmetrically with a surface enhanced by vibration-assisted laser texturing. The study of the heat transfer efficiency involved analysing the local values of the heat transfer coefficients at the interface between the heated surface and the fluid. The use of an enhanced surface produced by vibration-assisted laser texturing contributed to more efficient saturated flow boiling heat transfer than that observed for a smooth surface because higher values of the heat transfer coefficients were obtained.

KEYWORDS: laser texturing, vibration, heat transfer enhancement, minichannel

Następstwem postępu technologicznego jest wzrost wymagań energetycznych i tendencja do miniaturyzacji urządzeń. Rosną oczekiwania wobec efektywności procesów cieplnych związanych z doprowadzaniem energii i chłodzeniem elementów elektronicznych maszyn. Podczas pracy urządzeń i ich podzespołów produkowane jest ciepło, następuje wzrost temperatury, którą należy obniżyć, aby zapewnić bezpieczną i prawidłową pracę urządzeń.

Jednym ze sposobów intensywnego chłodzenia urządzeń jest wymiana ciepła, której towarzyszy zmiana stanu skupienia. W trakcie tego procesu możliwe jest osiągnięcie wysokich wartości współczynników przejmowania ciepła, wyższych niż podczas konwekcji wymuszonej przebiegającej bez zmiany fazy.

Naukowcy stale poszukują metod zwiększających efektywność wymiany ciepła podczas wrzenia. W badaniach wymiany ciepła w trakcie przepływu [1–4] oraz w dużej

objętości [5–7] na powierzchniach rozwiniętych z mikro- i minikanalami coraz częściej stosuje się rozwiniętą powierzchnię grzejną. Rozwinięcie można uzyskać metodami pasywnymi i aktywnymi.

W pracach [8–13] szeroko opisano różne rodzaje rozwinięcia powierzchni. Rośnie popularność metod pasywnych, ponieważ wiążą się one z oszczędnościami energetyczno-materiałowymi. Głównym celem tych metod jest modyfikacja charakterystyki i struktury powierzchni wymieniającej ciepło. Stosowanie zmodyfikowanych powierzchni skutkuje kilkukrotnym zwiększeniem współczynnika przejmowania ciepła zwłaszcza podczas wrzenia w dużej objętości. Pozyskiwana powierzchnia z wytworzonymi w jej strukturze sztucznymi wgłębieniami intensyfikuje proces wymiany ciepła poprzez zwiększenie liczby aktywnych ośrodków wrzenia. W efekcie powiększa się powierzchnia oddająca ciepło, co skutkuje zmniejszeniem przegrzania powierzchni i wzrostem ilości odprowadzanego ciepła. Powierzchnie rozwinięte mogą być stosowane do chłodzenia urządzeń o zwartej konstrukcji, np. układów scalonych i mikroprocesorów. Innym obszarem zastosowania tych powierzchni są zwarte wymienniki ciepła [14].

Do pasywnych metod intensyfikacji wymiany ciepła należy metoda laserowo-wibracyjnego teksturowania powierzchni metalowych, obecnie rozwijana w Centrum Laserowych Technologii Metali na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach, opisana w pracach [15–16].

Celem badań była ocena możliwości wykorzystania laserowo-wibracyjnych tekstur do efektywniejszej wymiany ciepła przy wrzeniu podczas przepływu dwufazowego w minikanalach. Taka wymiana ciepła podczas przepływu przez kanały o niewielkich wymiarach pozwala na jednoczesne uzyskanie możliwie dużych strumieni ciepła i małych różnic temperatury między powierzchnią grzejną i cieczą nasyconą. Wykorzystanie zjawisk przepływu dwufazowego podczas wrzenia pozwala na właściwe działanie wielu urządzeń, maszyn i ich elementów. Wymiana ciepła w takich urządzeniach jest związana z wytworzeniem ściśle określonego rodzaju przepływu oraz jego stabilnością.

Charakterystyka powierzchni rozwiniętej teksturowaniem laserowo-wibracyjnym

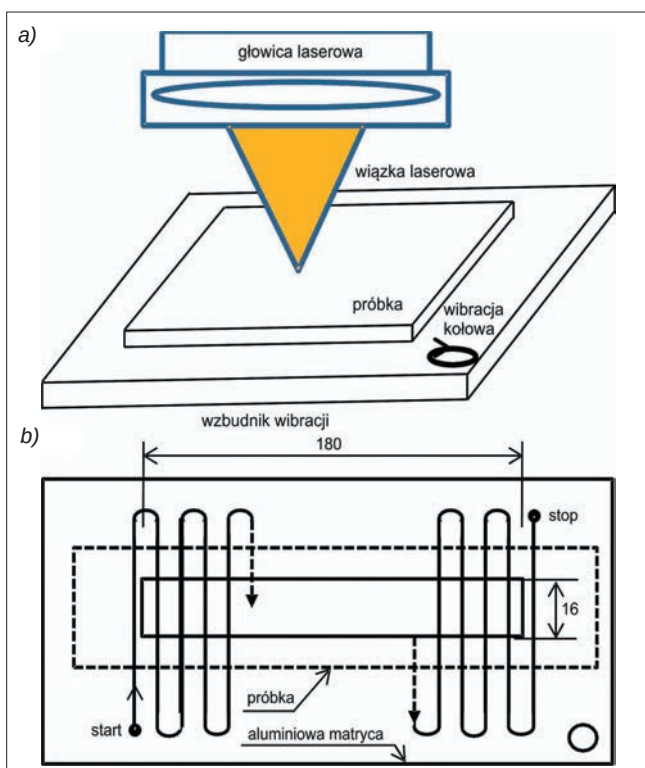
Do teksturowania laserowo-wibracyjnego wykorzystano stanowisko, którego schemat ideowy przedstawiony został na rys. 1a. Wykorzystano laser CO₂ Trumpf LaserCell 1005 z głowicą laserową o ogniskowej 200 mm, zainstalowany w Centrum Laserowych Technologii Metali Politechniki Świętokrzyskiej. Do generowania drgań kołowych w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki laserowej

* Mgr inż. Kinga Strąk (kziatala@tu.kielce.pl), dr inż. hab. Magdalena Piasecka prof. PSK (tmprmj@tu.kielce.pl) – Katedra Mechaniki Politechniki Świętokrzyskiej; dr inż. Bogusław Grabas (bgrabas@tu.kielce.pl) – Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych Politechniki Świętokrzyskiej

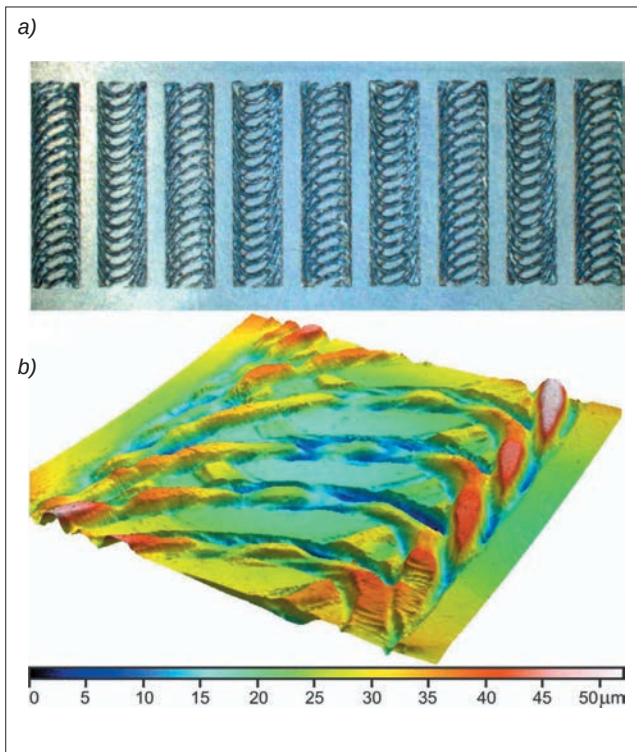
o częstotliwości 104 Hz i średnicy wibracji 3,5 mm użyto specjalnie zaprojektowanego wzbudnika mimośrodowego. Dwie próbki w kształcie prostokąta, przeznaczone do badań cieplnych, były wycięte do wymiarów 320 mm × 30 mm z arkusza stopu Hastelloy X o grubości 0,65 mm. Próbkę do teksturowania laserowego została umieszczona pod aluminiową matrycą z wydrążonym okienkiem o wymiarach 180 mm × 16 mm (rys. 1b). Zadaniem matrycy było umożliwienie wykonania laserowo-wibracyjnych przetopień w ściśle określonym miejscu na powierzchni próbki. Proces przetapiania laserowo-wibracyjnego odbywał się według odpowiednio zaprogramowanej trajektorii głowicy laserowej, pokazanej na rys. 1b, przy parametrach procesowych: mocy laserowej 2500 W, prędkości skanowania 4 m/min, natężeniu dmuchu argonu 10 l/min. Odstęp między ścieżkami wiązki laserowej wynosił 2,5 mm.

Widok wycinka ścieżek otrzymanych laserowo-wibracyjnym przetapianiem jest przedstawiony na rys. 2a. Uzyskano go przy wykorzystaniu mikroskopu metalograficznego odwróconego NIKON ECLIPS MA200 w Laboratorium Mikroskopii Optycznej Katedry Techniki Komputerowych i Uzbrojenia Politechniki Świętokrzyskiej.

Na rys. 2b pokazano profilogram wycinka powierzchni pojedynczej ścieżki, zmierzony profilometrem optycznym Taylor Hobson CCI, zgodnie z normą ISO 25178-2:2012. Profilogram powierzchni wykonano w Katedrze Technologii Mechanicznej i Metrologii Politechniki Świętokrzyskiej. Profilometr skanował obszar o wymiarach 4,25 mm × 4,25 mm. W obszarze przetapiania próbki o wymiarach 180 mm × 16 mm uzyskano 36 ścieżek laserowych o szerokości ok. 3,8 mm, oddalonych od siebie o ok. 1,7 mm. Ścieżki charakteryzowały się występowaniem regularnych przetopień w kształcie łuków oddalonych od siebie o ok. 1 mm w płaszczyźnie symetrii ścieżek laserowych (rys. 2a). Same przetopienia miały bardzo zróżnicowane zakreple struktury charakteryzujące się obecnością licznych wgłębień oraz wybrzuszeń o wartościach bezwzględnych dochodzących do ponad 25 µm (rys. 2b).



Rys. 1. Schematy: a) stanowiska laserowo-wibracyjnego, b) trajektorii głowicy laserowej



Rys. 2. Obraz (powiększenie mikroskopowe) wycinka uzyskanych przetopień (a); topografia powierzchni 3D pojedynczej ścieżki laserowej (b)

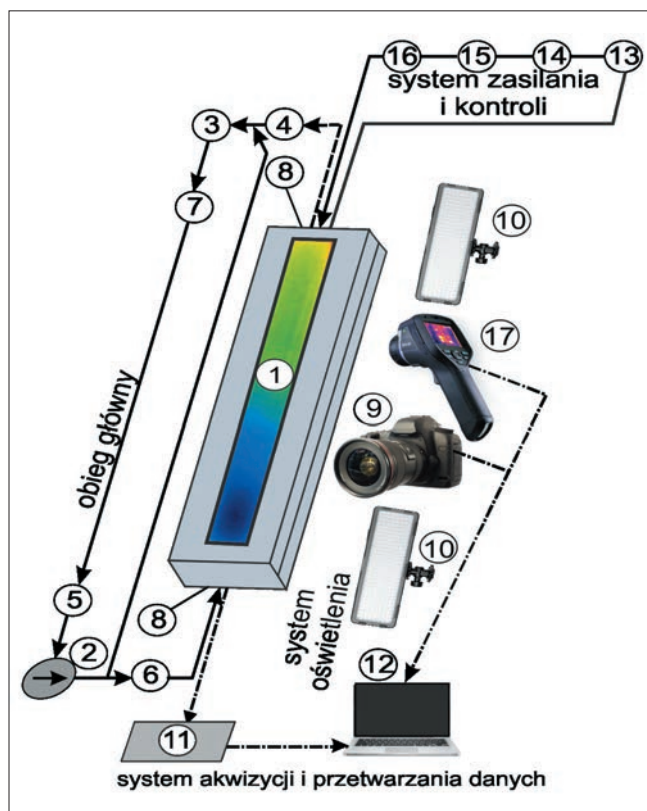
Stanowisko pomiarowe – wymiennik ciepła z minikanalem

Stanowisko pomiarowe to układ składający się z: obiegu czynnika roboczego FC-72 (obieg główny), systemu akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych, systemu zasilania i kontroli oraz systemu oświetlenia (rys. 3 i 4). Głównym elementem stanowiska badawczego jest moduł pomiarowy z pojedynczym minikanalem o przekroju prostokątnym, z jednostronnie rozwiniętą powierzchnią grzejną. Minikanal ma: głębokość – 1,7 mm, szerokość – 16 mm i długość – 180 mm (rys. 5), przy czym moduł testowy podczas badań jest ustawiony pionowo. Z jednej strony modułu – na gładkiej powierzchni grzejnej – realizuje się pomiar pola temperatury tej powierzchni za pomocą termowizji. Jednocześnie z drugiej strony modułu – od strony rozwiniętej powierzchni grzejnej – obserwuje się struktury przepływu dwufazowego, szerzej opisane w [14].

Na rys. 5 przedstawiono przekrój modułu pomiarowego z minikanalem (1). Głównym elementem kanału jest powierzchnia grzejna wykonana ze stopu Hastelloy X (o grubości ok. 0,65 mm) produkcji firmy Haynes Int. Inc. (USA). Materiał powierzchni został wybrany z uwagi na wysoką rezystancję elektryczną, z założeniem, że zmiany oporności w zakresie stosowanej temperatury są niewielkie. Hastelloy X wykonany jest ze stopu Ni-Cr-Fe-Mo, który odznacza się wyjątkową kombinacją odporności na utlenianie i modyfikację oraz wytrzymałości na wysoką temperaturę. Doskonale nadaje się do formowania i zgrzewania [17].

Teksturowanie laserowo-wibracyjne zostało wykonane na całej powierzchni grzejnej z Hastelloy X i ma bezpośredni kontakt z płynem w minikanale. Zagłębienia na powierzchni grzejnej zostały rozmieszczone równomiernie (rys. 2a). Obraz i topografię powierzchni 3D teksturowania laserowo-wibracyjnego przedstawiono na rys. 2a i b.

Pozostałymi elementami modułu pomiarowego (pokazany na rys. 5) są: płyta szklana (3), która ma bezpośredni kontakt z płynem przepływającym w minikanale, i termopary typu K (6), na wejściu/wyjściu z minikanalu. Bezpośrednio na powierzchnię grzejną – gładką – od strony stykającej się z otoczeniem napyłono warstwę czarnej farby podkładowej (8) o znanym współczynniku emisyjności (0,83) [18]. Z tej strony modułu obserwowano pole temperatury powierzchni grzejnej, rejestrowane za pomocą kamery termowizyjnej. Do obliczeń przyjęto dane temperatury powierzchni dla centralnej osi kanału, o powierzchni wycinka ok. 5 mm × 180 mm. Pozostałą część kanału, od strony pomiaru temperatury powierzchni grzejnej, osłonięto płytami wykonanymi z mikanitu, w celu zabezpieczenia przed deformacją kanału oraz ograniczenia strat ciepła do otoczenia.

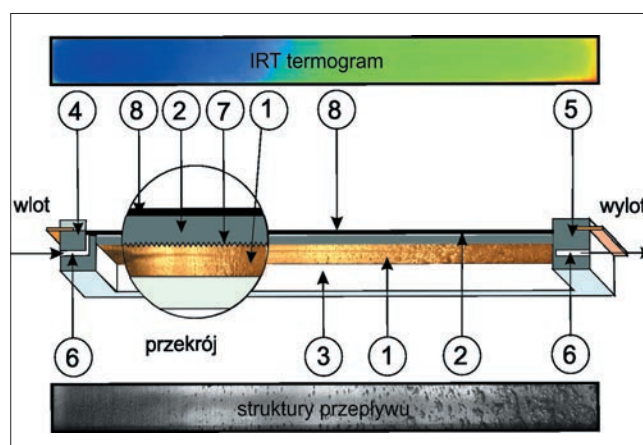


Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego wraz z jego głównymi obiegami: 1 – moduł pomiarowy z pojedynczym kanałem, 2 – pompa zębata, 3 – regulator ciśnienia, 4 – wymiennik ciepła (typu „rura w rurze”), 5 – filtr, 6 – rotametry, 7 – separatory powietrza, 8 – przetworniki ciśnienia, 9 – aparat cyfrowy typu lustrzanka, 10 – lampa halogenowa, 11 – stacja akwizycji danych, 12 – komputer, 13 – spawarka inwertorowa, 14 – bocznik, 15 – amperomierz, 16 – woltomierz, 17 – kamera termowizyjna

W skład podstawowych komponentów systemu akwizycji i przetwarzania danych oraz obrazów wchodzi: aparat cyfrowy typu lustrzanka firmy Canon EOS 550D (identyfikacja obrazów struktur przepływu płynu), kamera termowizyjna typ E60 firmy Flir (rejestracja termogramów IR), stacja akwizycji danych pomiarowych DaqLab 2005 wraz z oprogramowaniem komputerowym (akwizycja podstawowych danych eksperymentalnych) oraz system oświetlenia wykorzystujący lampy halogenowe (oświetlenie struktur przepływu). Natomiast system zasilania i kontroli zawiera: źródło zasilania (spawarkę inwertorową), bocznik, amperomierz i woltomierz. Dokładność kamery termowizyjnej to: $\pm 1^\circ\text{C}$ lub $\pm 1\%$ z odczytu w zakresie temperatury: $0\text{--}120^\circ\text{C}$ oraz $\pm 2^\circ\text{C}$ lub $\pm 2\%$ z odczytu poza tym zakresem [19].



Rys. 4. Widok stanowiska badawczego od strony pomiaru temperatury powierzchni grzejnej

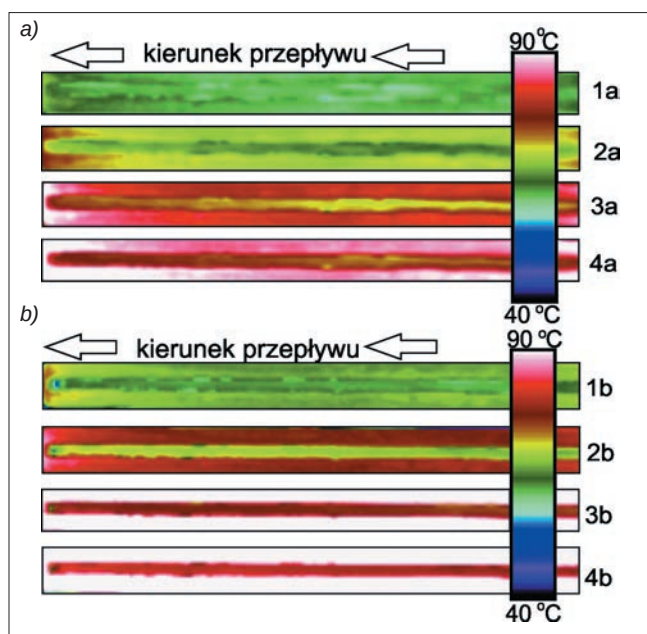


Rys. 5. Przekrój modułu pomiarowego z kanałem: 1 – minikanal, 2 – powierzchnia grzejna, 3 – płyta szklana, 4 – kanał, 5 – przednia część kanału, 6 – termopara, 7 – rozwinięta powierzchnia grzejna, 8 – warstwa czarnej farby podkładowej

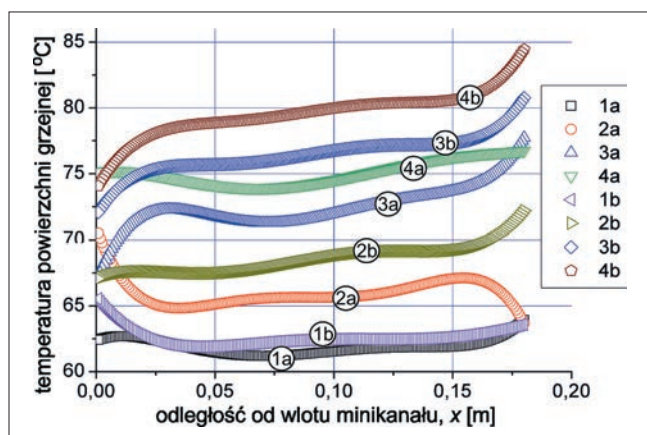
Metodyka badań, wyniki

Wyniki doświadczeń przedstawiono w postaci termogramów uzyskanych za pomocą kamery termowizyjnej (rys. 6) oraz wykresu temperatury powierzchni grzejnej wzdłuż odległości od wlotu minikanalu dla centralnej osi kanału (powierzchnia ok. 5 mm × 180 mm; rys. 7). Porównano wyniki otrzymane z eksperymentów z wykorzystaniem gładkiej powierzchni grzejnej oraz powierzchni jednostronnie rozwiniętej teksturowaniem laserowo-wibracyjnym (od strony płynu w minikanale). Badania powierzchni wykonano przy zbliżonych parametrach cieplno-przepływowych, a do analizy wybrano dane uzyskane dla jednakowych strumieni ciepła dostarczonych do powierzchni grzejnej.

Podczas serii eksperymentalnej do kanału doprowadzana jest ciecz o temperaturze niższej od temperatury nasycenia (zwana cieczą niedogrzaną lub przechłodzoną). Stopniowe zwiększanie dostarczanego strumienia ciepła powoduje inicjację wrzenia i jego dalszy rozwój w kanale. Można wyróżnić dwie strefy dla wrzenia w przepływie: wrzenie przechłodzone i nasycone. Wrzenie przechłodzone ma miejsce, gdy średnia temperatura płynu w rdzeniu przepływu jest niższa od temperatury nasycenia. W tej strefie podczas zwiększania strumienia ciepła w warstwie przysiennej ciecz ulega przegrzaniu, a w rdzeniu przepływu jest niedogrzana. Występuje wówczas duży gradient temperatury płynu. Dla tej strefy wrzenia w obliczeniach współczynnika przejmowania ciepła wykorzystywana jest różnica temperatury powierzchni grzejnej i płynu w rdzeniu przepływu, którą wyznacza się (przy założeniu liniowego rozkładu temperatury płynu od wlotu do wylotu minikanalu) jako różnicę ($T_F - T_f$).



Rys. 6. Termogramy uzyskane za pomocą kamery termowizyjnej; w eksperymentach wykorzystano powierzchnię grzejną: a) rozwiniętą teksturovaniem laserowo-wibracyjnym oraz b) gładką; parametry eksperymentalne: a, b): średnia prędkość przepływu płynu 0,24 m/s, średnie ciśnienie na wlocie do kanału ok. 130 kPa, średnie niedogrzanie cieczy do temperatury nasycenia na wlocie do kanału 40 K; strumień ciepła: 1a, 1b: $q_w = 47 \text{ kW/m}^2$; 2a, 2b: $q_w = 60 \text{ kW/m}^2$; 3a, 3b: $q_w = 75 \text{ kW/m}^2$; 4a, 4b: $q_w = 82 \text{ kW/m}^2$



Rys. 7. Wykres temperatury powierzchni grzejnej w funkcji odległości od wlotu minikanalu, 1a–4a – dla powierzchni rozwiniętej teksturovaniem laserowo-wibracyjnym, 1b–4b – dla powierzchni gładkiej; parametry eksperymentalne jak na rys. 6

W przeprowadzonych badaniach przy tej samej gęstości strumienia ciepła dane rozkładu temperatury powierzchni grzejnej rozwiniętej uzyskanej za pomocą teksturowania laserowo-wibracyjnego osiągają niższe wartości niż w przypadku rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej gładkiej, co pokazano na rys. 7.

Współczynniki przejmowania ciepła dla wrzenia przechłodzonego (rys. 8) oraz wrzenia nasyconego (rys. 9) w funkcji odległości od wlotu minikanalu dla powierzchni grzejnej rozwiniętej teksturovaniem laserowo-wibracyjnym (1a–2a na rys. 8 i 3a–4a na rys. 9) i powierzchni grzejnej gładkiej (1b–2b na rys. 8 i 3b–4b na rys. 9) wyznaczono metodą jednowymiarową, która jest szerzej opisana w [20].

Lokalną wartość współczynnika przejmowania ciepła $\alpha(x)$ dla wrzenia przechłodzonego wyznaczono z równania:

$$\alpha(x) = \frac{\frac{I \cdot \Delta U}{A_F} - q_{wloss}}{T_F - T_f(x) - \left(\frac{I \cdot \Delta U}{A_F} - q_{wloss} \right) \cdot \frac{\delta_F}{\lambda_F}} \quad (1)$$

gdzie: I – natężenie prądu, ΔU – spadek napięcia, A_F – pole powierzchni grzejnej minikanalu, T_F – temperatura powierzchni grzejnej określona z zastosowaniem kamery termowizyjnej, T_f – średnia temperatura płynu w rdzeniu przepływu wyznaczana przy założeniu liniowego rozkładu temperatury płynu wzdłuż odległości od wlotu do wylotu minikanalu, q_{wloss} – strata ciepła do otoczenia, δ_F – grubość powierzchni grzejnej, λ_F – współczynnik przewodzenia powierzchni grzejnej, x – odległość od wlotu minikanalu zgodna z kierunkiem przepływu płynu.

Na dalszym etapie zwiększania strumienia ciepła dostarczanego do powierzchni grzejnej średnia temperatura cieczy w rdzeniu przepływu stopniowo rośnie i osiąga temperaturę nasycenia. Powstaje strefa wrzenia nasyconego. W obliczeniach współczynnika przejmowania ciepła w tej strefie wykorzystuje się różnicę temperatury powierzchni grzejnej i temperatury saturacji, czyli ($T_F - T_{sat}$).

Lokalną wartość współczynnika przejmowania ciepła $\alpha(x)$ dla wrzenia nasyconego wyznacza się z równania:

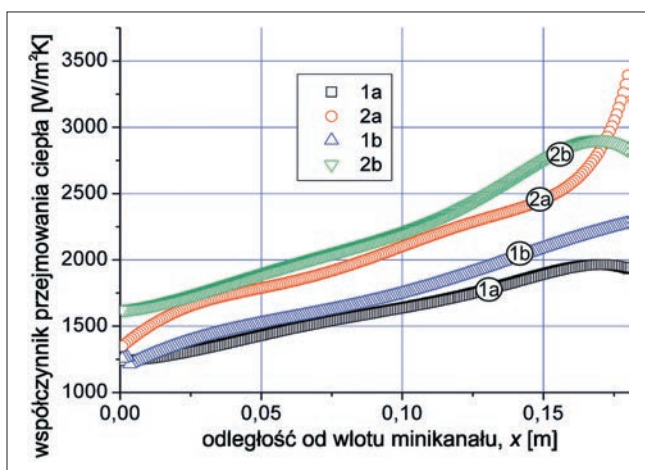
$$\alpha(x) = \frac{\frac{I \cdot \Delta U}{A_F} - q_{wloss}}{T_F - T_{sat}(x) - \left(\frac{I \cdot \Delta U}{A_F} - q_{wloss} \right) \cdot \frac{\delta_F}{\lambda_F}} \quad (2)$$

gdzie: $T_{sat}(x)$ – temperatura nasycenia płynu wyznaczana z założeniem liniowego rozkładu ciśnienia wzdłuż odległości od wlotu do wylotu minikanalu.

Aby oszacować straty ciepła, założono, że wymiana ciepła pomiędzy powierzchnią grzejną, mającą bezpośredni kontakt z otoczeniem, a powietrzem odbywa się na drodze konwekcji naturalnej. Straty ciepła do otoczenia q_{wloss} to iloczyn współczynnika przewodzenia powietrza (w danej temperaturze i danym ciśnieniu) i różnicy pomiędzy najwyższą wartością temperatury powierzchni grzejnej a temperaturą otoczenia. Te straty są stosunkowo niskie i wynoszą kilka procent, gdyż tylko niewielka część powierzchni grzejnej ma bezpośredni kontakt z otoczeniem [20].

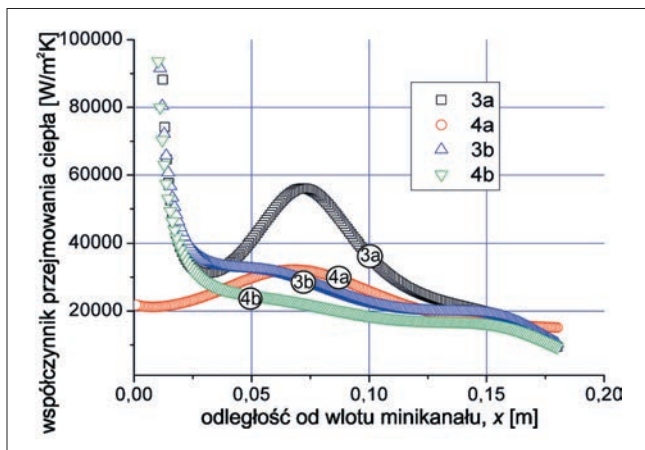
Z analizy danych pokazanych na rys. 8 i 9 wynika, że:

- w eksperymentach z zastosowaniem powierzchni gładkiej podczas wrzenia przechłodzonego (dla niższych strumieni ciepła) osiągnięto wyższe wartości lokalnych współczynników przejmowania ciepła (1b–2b, rys. 8) w porównaniu z uzyskanymi dla powierzchni rozwiniętej teksturovaniem laserowo-wibracyjnym (1a–2a, rys. 8);



Rys. 8. Zależność współczynnika przejmowania ciepła dla wrzenia przechłodzonego w funkcji odległości od wlotu kanału, 1a–2a – dla powierzchni rozwiniętej teksturowaniem laserowo-wibracyjnym, 1b–2b – dla powierzchni gładkiej; parametry eksperymentalne jak na rys. 6

• wykorzystując w eksperymentach powierzchnię rozwiniętą teksturowaniem laserowo-wibracyjnym (3a–4a, rys. 9), zaobserwowano wyższe wartości lokalnych współczynników przejmowania ciepła podczas wrzenia nasyconego (dla większych strumieni ciepła) w porównaniu do uzyskanych dla powierzchni gładkiej (3b–4b, rys. 9).



Rys. 9. Zależność współczynnika przejmowania ciepła dla wrzenia nasyconego w funkcji odległości od wlotu kanału, 3a–4a – dla powierzchni rozwiniętej teksturowaniem laserowo-wibracyjnym, 3b–4b – dla powierzchni gładkiej; parametry eksperymentalne jak na rys. 6

Ogrzewana powierzchnia rozwinięta z zastosowaniem teksturowania laserowo-wibracyjnego podczas wrzenia nasyconego wspomaga zatem osiągnięcie efektywniejszej wymiany ciepła w porównaniu z powierzchnią gładką, pomimo uzyskania niższej temperatury powierzchni grzejnej niż w przypadku powierzchni grzejnej gładkiej.

Wnioski

Przeanalizowano efektywność wymiany ciepła przy wrzeniu podczas przepływu płynu chłodniczego przez pionowy minikanal, asymetrycznie ogrzewany gładką powierzchnią grzejną oraz powierzchnią rozwiniętą teksturowaniem laserowo-wibracyjnym. Intensywność wymiany ciepła oceniono na podstawie analizy lokalnych współczynników przejmowania ciepła na styku powierzchni grzejnej z płynem chłodniczym wrzącym w minikanale.

Wyniki badań wskazują, że zastosowanie powierzchni rozwiniętej teksturowaniem laserowo-wibracyjnym umożli-

wia uzyskanie intensywniejszej wymiany ciepła podczas wrzenia nasyconego w porównaniu z powierzchnią gładką. W obszarze wrzenia przechłodzonego zaobserwowano przeciwną zależność (wyższe współczynniki przejmowania ciepła z wykorzystaniem powierzchni gładkiej w porównaniu do uzyskanych dla powierzchni rozwiniętej teksturowaniem laserowo-wibracyjnym). Należy jednak mieć na względzie, że w obszarze wrzenia przechłodzonego współczynniki przejmowania ciepła osiągają znacznie niższe wartości w porównaniu z obszarem wrzenia nasyconego. Można zatem podjąć próby wykorzystania ogrzewanych powierzchni rozwiniętych minikanalów w konstrukcji kompaktowych wymienników ciepła, przy założeniu pracy wymienników w obszarze wrzenia nasyconego.

Praca powstała w ramach projektu NCN, nr umowy UMO-2013/09/B/ST8/02825. Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2013/09/B/ST8/02825.

LITERATURA

- Wang Y., Peles Y. "Subcooled flow boiling in a microchannel with a pin fin and a liquid jet in crossflow". *Int. J. Heat Mass Transf.* Vol. 86 (2015): pp. 165–173.
- El-Genk M.S., Ali A.F. "Enhanced nucleate boiling on copper micro-porous surfaces". *Int. J. Multiph. Flow.* Vol. 36 (2010): pp. 780–792.
- Pranoto I., Leong K.C. "An experimental study of flow boiling heat transfer from porous foam structures in a channel". *Appl. Therm. Eng.* Vol. 70 (2014): pp. 100–114.
- Sommers A.D., Yerkes K.L. "Using micro-structural surface features to enhance the convective flow boiling heat transfer of R-134a on aluminum". *Int. J. Heat Mass Transf.* Vol. 64 (2013): pp. 1053–1063.
- Pastuszko R. "Pool boiling on micro-fin array with wire mesh structures". *Int. J. Therm. Sci.* Vol. 49 (2010): pp. 2289–2298.
- Pastuszko R. "Pool boiling for extended surfaces with narrow tunnels – visualization and a simplified model". *Exp. Therm. Fluid Sci.* Vol. 38 (2012): pp. 149–164.
- Orzechowski T., Tyburczyk A. "Efektywność dwufazowego chłodzenia na przykładzie żebra z pokryciem siatkowym". *Przegląd Elektrotechniczny*. R. 87, z. 7 (2011): s. 48–51.
- Depczyński W. "Investigating porosity of sintering porous copper structure with 3D micro-focus X-ray computed tomography (μCT)". *J. Achiv. Mater. Manuf. Eng.* Vol. 66 (2014): pp. 67–72.
- Depczyński W., Spadło S., Młynarczyk P., Ziach E., Hepner P. "The selected properties of the connection superalloy Haynes H 230® using microwelding". *Proceedings of 24th International Conference on Metallurgy and Materials*. METAL. 2015.
- Depczyński W. "Sintering of copper layers with a controlled porous structure". *METAL 2014. 23rd International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava (2014): pp. 1219–1224.
- Radek N., Bartkowiak K. "Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam". *Physics Procedia*. Vol. 5 (2010): pp. 417–423.
- Radek N., Konstanty J., Scendo M. "The electro-spark deposited WC-Cu coatings modified by laser treatment". *Arch. Metall. Mater.* Vol. 60 (2015): pp. 2579–2584.
- Radek N., Bartkowiak K. "Laser treatment of Cu-Mo electro-spark deposited coatings". *Physics Procedia*. Vol. 12 (2011): pp. 499–505.
- Piasecka M. "The use of enhanced surface in flow boiling heat transfer in a rectangular minichannel". *Exp. Heat Transf.* Vol. 27 (2014): pp. 231–255.
- Grabas B. "An evaluation of the use of laser-vibration melting to increase the surface roughness of metal objects". *Arch. Metall. Mater.* Vol. 60 (2015): pp. 33–39.
- Grabas B. "Vibration-assisted laser surface texturing of metals as a passive method for heat transfer enhancement". *Exp. Therm. Fluid Sci.* Vol. 68 (2015): pp. 499–508.
- <https://www.haynesintl.com/pdf/h3009.pdf>.
- Orzechowski T. "Wymiana ciepła przy wrzeniu na żebrach z mikro-powierzchnią strukturalną". Monografie, Studia, Rozprawy nr 39. Politechnika Świętokrzyska, 2003.
- http://www.flir-direct.com/pdfs/cache/www.flir-direct.com/flir_systems/thermal_imager/e60/manual/flir_systems_e60_thermal_imager_manual.pdf.
- Piasecka M., Strąk K., Maciejewska B. "Calculations of flow boiling heat transfer in a minichannel based on Liquid Crystal and Infrared Thermography data". *Heat Transf. Eng.* Vol. 38 (2017): (in print). ■