

# INTENSYFIKACJA WYMIANY CIEPŁA W MINIKANALACH PRZEZ ZASTOSOWANIE POWIERZCHNI ROZWINIĘTYCH

Sylwia HOŻEJOWSKA, Artur MACIĄG, Magdalena PIASECKA

**Streszczenie:** W pracy analizowano możliwość zwiększenia współczynnika przejmowania ciepła poprzez zastosowanie rozwiniętych powierzchni grzejnych, podczas wrzenia w przepływie w minikanalach, na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Zaproponowano model matematyczny procesu opisujący zagadnienie proste oraz odwrotne wymiany ciepła. Do wyznaczenia rozkładów temperatury powierzchni grzejnej oraz czynnika chłodniczego FC-72 zastosowano metodę Trefftza. Znajomość rozkładów temperatury pozwala wyznaczyć lokalne współczynniki przejmowania ciepła na ich styku. Przedstawiono propozycje wykorzystania powierzchni rozwiniętych w praktyce.

**Słowa kluczowe:** powierzchnie rozwinięte, minikanal, wrzenie w przepływie, funkcje Trefftza, zagadnienie odwrotne

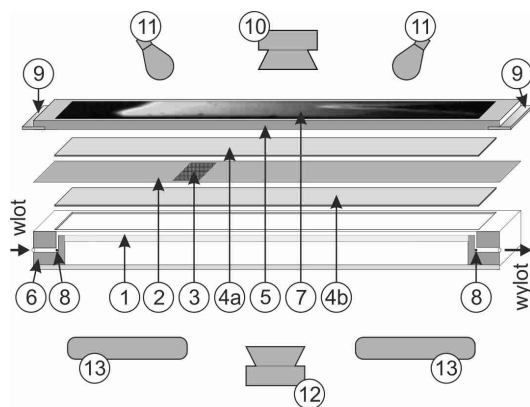
## 1. Wprowadzenie

Intensyfikacja wymiany ciepła stanowi ważny problem praktyczny. Skuteczność takiej wymiany stanowi o efektywności działania elementów grzejnych oraz chłodzących. W przypadku kompaktowych wymienników ciepła konstrukcje takich elementów bazują na minikanalach. Jako przykład podać można ogniwa fotowoltaiczne, panele słoneczne oraz układy chłodzące mikroprocesory. Poszukuje się nowych materiałów oraz konstrukcji w celu zwiększenia efektywności urządzeń. Oczywiście jest, że przed wdrożeniem nowej technologii nastąpić musi etap weryfikacji skuteczności proponowanych rozwiązań. Dokonuje się tego poprzez symulacje numeryczne oraz badania eksperymentalne na odpowiednio skonstruowanych stanowiskach badawczych. Symulacje numeryczne bazują na modelach matematycznych, gdzie model może należeć do klasy zagadnień prostych lub odwrotnych. Jedną z klas zagadnień odwrotnych stanowią brzegowe zagadnienia odwrotne, w których jeden z warunków brzegowych dla równania różniczkowego nie jest znany. Problemy takie są źle postawione w sensie Hadamarda. W praktyce oznacza to dużą wrażliwość uzyskanego rozwiązania na zaburzenia danych wejściowych. Skuteczną metodą rozwiązywania zagadnień odwrotnych jest metoda funkcji Trefftza. Dla równania różniczkowego rządzącego procesem wyznacza się kompletny zbiór funkcji spełniających w sposób ścisły to równanie. Aproksymacją rozwiązania jest kombinacja liniowa tych funkcji. Współczynniki kombinacji liniowej dobierane są w oparciu o znane warunki brzegowe. W pracy zastosowano dwa zbiory funkcji Trefftza, które posłużyły do wyznaczenia dwuwymiarowych rozkładów temperatury rozwiniętej powierzchni grzejnej oraz czynnika chłodniczego.

## 2. Stanowisko badawcze

### 2.1. Obiegi i systemy stanowiska

Obiegi i systemy realizowane na stanowisku badawczym szczegółowo omówiono w pracach [7-10]. Obieg główny z czynnikiem roboczym FC-72, zawiera następujące podstawowe elementy: moduł pomiarowy z minikanalem (pokazany na rys. 1), pompa przepływowa wirnikowa, regulator ciśnienia pełniący funkcję zbiornika wyrównawczego, wymiennik ciepła typu rura w rurze, chłodzony wodą, filtr, zespół rotametrów oraz separator powietrza. Niezbędny przy stosowaniu w badaniach termografii ciekłokrystalicznej jest dodatkowy obieg kalibracyjny, wykorzystywany do kalibracji barwy powierzchni grzejnej kanału względem odpowiadającej jej temperatury. Jest to zamknięty obieg wody, który uruchamiany jest przed właściwymi badaniami wymiany ciepła. Składają się na niego: pompa wirnikowa, przepływowo podgrzewacz wody, filtry oraz separator powietrza. Powierzchnia grzejna w module pomiarowym jest zasilana spawarką inwertorową z płynną regulacją prądu (do 300 A). Regulację i kontrolę układu prądowego dostarczanego do powierzchni grzejnej zapewniają: bocznik, amperomierz, woltomierz oraz autotransformator. Na system akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych składają się: dwa aparaty cyfrowe: Canon PowerShot G-11 i lustrzanka Canon EOS 550D wraz z obiektywami, kartami pamięci i dodatkowym osprzętem; oświetlenie: świetlówki LED emitujące „zimne” światło białe (skierowane na powierzchnię z warstwą ciekłokrystaliczną), lampy halogenowe (oświetlające obraz struktur przepływu dwufazowego w kanale) oraz stacja akwizycji danych pomiarowych DaqLab 2005 wraz z oprogramowaniem DASYLab i komputer z odpowiednim oprogramowaniem, umożliwiającą kontrolę i akwizycję podstawowych wielkości pomiarowych (temperatura, ciśnienie) oraz ich dalsze przetwarzanie oraz obróbkę zarejestrowanych przez aparaty cyfrowe obrazów.



Rys. 1. Schemat modułu testowego: 1-minikanal, 2-folia grzejna, 3-powierzchnia rozwinięta, 4-szyba, 5-pokrywa, 6-korpus, 7-ciekłe kryształy, 8-termopara, 9-elektroda, 10-aparat cyfrowy, 11-świetlówka LED, 12-aparat cyfrowy typu "lustrzanka", 13-lampa halogenowa

## 2.2. Moduł testowy z minikanalem

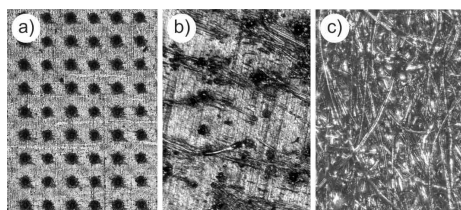
W module testowym (rys. 1) znajduje się minikanal (1) o przekroju prostokątnym, o głębokości 1 mm, szerokości 40 mm i długości 360 mm. Na konstrukcję modułu składają się: pokrywa (5), korpus (6), folia grzejna grubości 0,1 mm, (2) ze stopu Haynes-230 oraz miedziane elektrody (9), dostarczające do niej prąd. Na powierzchni grzejnej stykającej się z płynem w kanale występuje rozwinięcie na całej powierzchni folii lub jej wycinku. Na rys. 1 pokazano położenie wycinka rozwiniętego folii grzejnej (3). W niniejszym artykule omówiono wyniki otrzymane przy zastosowaniu dwóch rodzajów powierzchni rozwiniętych o niewielkim rozwinięciu (rzędu kilku procent [7]), uzyskanych z dwóch różnych procesów technologicznych: teksturowania laserowego i elektroerozji. Szyby (4a i 4b) umożliwiają prowadzenie obserwacji, w tym:

- barwy wskazywanej przez ciekłe kryształy po stronie gładkiej powierzchni folii grzejnej od strony szyby (4a), która umożliwia detekcję rozkład temperatury na powierzchni folii dzięki termografii ciekłokrystalicznej,
- struktur przepływu dwufazowego oraz zjawisk towarzyszących wrzeniu, obserwowanych poprzez szybę (4b) od strony rozwiniętej powierzchni folii podczas przepływu płynu w kanale.

Na wlocie i wylocie do/z kanału dokonywany jest pomiar temperatury i ciśnienia, realizowany przy wykorzystaniu odpowiednio termopar typu K i przetworników ciśnienia, podłączonych do stacji akwizycji danych pomiarowych.

## 2.3. Powierzchnie rozwinięte

Jako jedno z rozwinięć powierzchni folii grzejnej stykającej się z płynem w minikanale zastosowano jej teksturowanie laserowe. W wyniku procesu otrzymano mikrowgłębienia rozmieszczone równomiernie na powierzchni folii [7,9-12]. Do teksturowania wykorzystano drążarkę laserową produkcji Electro Scientific Industries (ESI), model 5200  $\mu$ via drill, posiadającą laser Nd:YAG. Mikrowgłębienia wykonano w odległości co 100  $\mu$ m, w obu osiach. Charakterystykę rozwiniętej powierzchni folii teksturowanej laserowo prezentuje zdjęcie pokazane na rys. 2a. Średnica pojedynczego mikrowgłębienia zwykle nie przekracza 10  $\mu$ m, podczas gdy całkowita średnica struktury mikrowgłębienia wraz z kraterem wynosi średnio 30  $\mu$ m, głębokość pojedynczego mikrowgłębienia - 7  $\mu$ m, wysokość pierścieniowego krateru wokół mikrowgłębienia - 3  $\mu$ m, a zatem całkowita wysokość struktury mikrowgłębienia wraz z kraterem średnio równa jest 10  $\mu$ m.



Rys. 2. Widok (zdjęcia) wycinka powierzchni rozwiniętej folii grzejnej:  
a) wykonanej laserowym teksturowaniem, b) otrzymanej w procesie elektroerozji,  
c) zlitowanej struktury metalowo-włóknistej

Rozwinięcie powierzchni folii grzejnej w procesie elektroerozji uzyskuje się za pomocą elektrodrażarki z pisakiem prowadzonym manualnie [6-9,11,12]. W efekcie procesu elektroerozji uzyskano miniwłgłębienia rozmieszczone nierównomiernie na powierzchni folii. Warstwa stopionego materiału folii i materiału elektrody, o wysokości kilku  $\mu\text{m}$ , lokalnie do 5  $\mu\text{m}$ , zwykle tworzy wypiętrzenia wokół wgłębień. Średnia głębokość kraterów zwykle nie jest wyższa niż 1  $\mu\text{m}$ . Na rys. 2b pokazano widok powierzchni przykładowego wycinka folii ze strukturą miniwłgłębień, otrzymanego w wyniku zastosowania procesu elektroerozji.

Na podstawie analizy wyników badań wymiany ciepła przy wrzeniu podczas przepływu płynu chłodniczego przez minikanaly zaobserwowano, że powierzchnie o niewielkim rozwinięciu, jak omówione i pokazane na rys. 2a i 2b, powodują dużą intensyfikację wymiany ciepła, nawet dwukrotną [7,12]. Z kolei zastosowanie w badaniach powierzchni o dużym rozwinięciu, ale i znacznie większych rozmiarach, jak pokazana na rys. 2c zlutowana do powierzchni folii struktura metalowo-włóknista, spowodowało pogorszenie procesu wymiany ciepła [13].

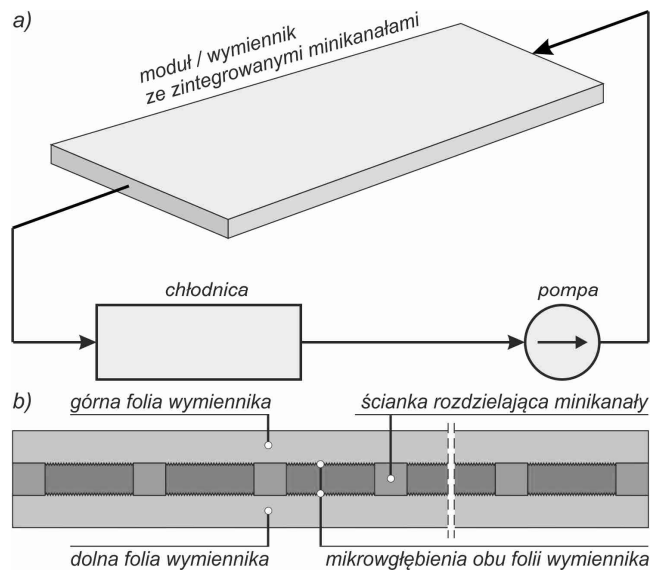
### **3. Propozycje wykorzystania powierzchni rozwiniętych w zastosowaniach praktycznych**

W związku z pracami nad powierzchniami rozwiniętymi intensyfikującymi wymianę ciepła przy wrzeniu uzyskano patent PL pt. Struktura intensyfikująca wymianę ciepła przy wrzeniu [14]. Opracowano koncepcję zastosowania zintegrowanych minikanalów w celu zwiększenia efektywności wymienników ciepła, pokazaną na rys. 3 [7]. W skład zwartego wymiennika ciepła wchodzi zespół zintegrowanych minikanalów o powierzchni rozwiniętej jako struktury intensyfikującej wymianę ciepła, rys. 3b. Na powierzchni folii metalowej wytworzone są mikro- lub miniwłgłębienia technikami teksturowania laserowego lub elektroerozcyjną. W koncepcji zaproponowano, aby uzyskana powierzchnia stanowiła dwie naprzeciwległe powierzchnie uformowanych minikanalów, przez które przepływa ciecz wrząca (czynniki chłodnicze). Ścianki boczne minikanalów stanowi materiał izolacyjny (np. PTFE). Układ przepływowy z modulem ze zintegrowanymi minikanalami o powierzchniach rozwiniętych zawiera ponadto pompę oraz wymiennik ciepła pracujący jako skraplacz (rys. 3a).

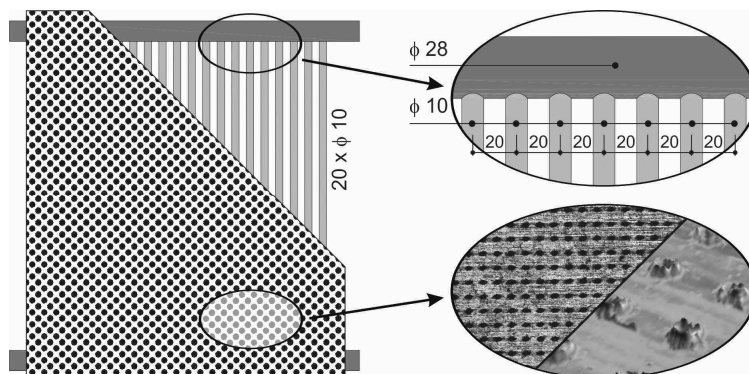
W pracy [7] zaproponowano własne propozycje wykorzystania powierzchni rozwiniętych w zastosowaniach praktycznych - konstrukcjach urządzeń wykorzystano powierzchnie rozwinięte. Zaprojektowano, wykonano i przetestowano cztery warianty prototypowych kolektorów słonecznych płaskich, w trzech z nich zastosowano rozwiniętą powierzchnię absorbera. Jeden z kolektorów słonecznych płaskich, z rozwiniętą powierzchnią absorbera teksturowaniem laserowym, pokazano na rys. 4. Z kolei w pracy [15] omówiono propozycję prototypowego hybrydowego kolektora cieplnego z rozwiniętą powierzchnią absorpcyjną, uzyskaną na powierzchni miedzianych rur, którego schemat wraz z pozostałymi elementami instalacji pokazano na rys. 5.

### **3. Model matematyczny**

Modelując zagadnienie wymiany ciepła występujące przy przepływie czynnika chłodniczego FC-72 przez minikanal założono, że w module testowym panuje stan ustalony, a zmiany temperatury folii grzejnej oraz płynu wzdłuż szerokości kanału są niewielkie. W modelu pomijane są straty ciepła do otoczenia [5, 6]. W zaproponowanym

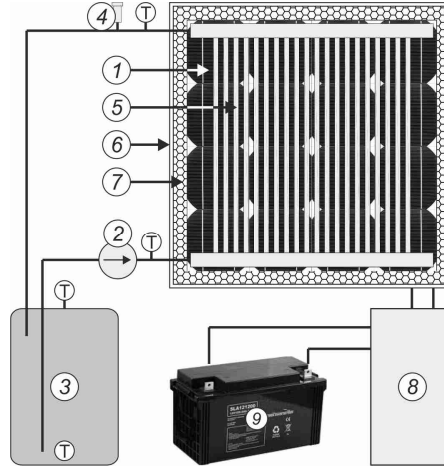


Rys. 3. Koncepcja modułu z zintegrowanymi minikanalami o powierzchniach rozwiniętych w układzie przepływowym, wraz z pozostałymi elementami instalacji przepływowej



Rys. 4. Schemat konstrukcyjny prototypowego kolektora słonecznego płaskiego harfowego z rozwiniętą powierzchnią absorpcyjną przy wykorzystaniu teksturowania laserowego [7]

podejściu uwzględniono dwa wymiary: wymiar  $x$  w kierunku przepływu oraz prostopadły do niego wymiar  $y$  odnoszący się do grubości szklanej szyby ( $\delta_G$ ), folii grzejnej ( $\delta_F$ ) oraz głębokości minikanalu ( $\delta_M$ ). Dalsze rozważania dotyczą tylko środkowego przekroju modułu pomiarowego. W stosowanym zapisie parametry odnoszące się do szklanej szyby, folii grzejnej, cieczy oraz pary oznaczone są indeksami dolnymi:  $G$  dla szklanej przegrody,  $F$  dla folii grzejnej,  $L$  dla cieczy i  $v$  dla pary.



Rys. 5. Schemat prototypowego hybrydowego kolektora słonecznego z panelami fotowoltaicznymi z absorberem z rozwiniętą powierzchnią absorpcyjną, wraz z pozostałymi elementami instalacji: 1-ogniwa fotowoltaiczne, 2-pompa obiegowa, 3-zasobnik ciepłej wody, 4-odpowietrznik automatyczny, 5-miedziane rurki kolektora o powierzchni rozwiniętej przy wykorzystaniu w procesie elektroerozji, 6-obudowa prototypu, 7-izolacja cieplna, 8-sterownik wraz z regulatorem ładowania, 9-akumulator żelowy

Zakładamy, że temperatura  $T_F$  folii grzejnej spełnia równanie Poissona

$$\Delta T_F = -\frac{q_F}{\lambda_F}, \quad (x, y) \in \Omega_F \quad (1)$$

gdzie  $q_F$  to objętościowy strumień ciepła dostarczany do folii,  $\lambda$  – współczynnik przewodzenia ciepła,  $\Omega_F = \{(x, y) \in R^2 : 0 < x < H, \delta_G < y < \delta_G + \delta_F\}$ ,  $H$  – długość folii.

W modelu przyjęto, że temperatura folii spełnia następujące warunki brzegowe [6]

$$T_F(x_k, \delta_G) = T_k \quad \text{dla } k=1, 2, \dots, K \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_F}{\partial x} = 0 \quad \text{dla } \delta_G \leq y \leq \delta_G + \delta_F \quad \text{oraz a) } x = 0, \quad \text{b) } x = H \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_F}{\partial y} = 0 \quad \text{dla } y = \delta_G \quad \text{oraz } 0 \leq x \leq H \quad (4)$$

gdzie  $T_k$  są dyskretnymi pomiarami temperatury folii w punktach pomiarowych  $(x_k, \delta_G)$ .

W teoretycznym modelu wymiany ciepła założono, że temperatura cieczy spełnia równanie energii [4, 5]

$$\lambda_L \Delta T_L = w_x(y) c_p \rho_L \frac{\partial T_L}{\partial x} - \mu_L \Phi - w_x(y) \frac{dp}{dx} - \rho_L g w_x(y) \sin \omega, \quad (x, y) \in \Omega_L \quad (5)$$

gdzie

$$\Omega_L = \{(x, y) \in R^2 : 0 < x < H, \delta_G + \delta_F < y < \delta_G + \delta_F + \delta_M\} \quad (6)$$

funkcja  $\Phi = \frac{q_F}{\mu_L} = \left( \frac{dw_x}{dy} \right)^2$  jest funkcją dyssypacji Rayleigha,  $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $c_p$  – ciepło właściwe cieczy przy stałym ciśnieniu,  $p$  – ciśnienie,  $\rho$  – gęstość,  $\mu$  – współczynnik lepkości dynamicznej,  $\omega$  – kąt nachylenia minikanalu do poziomu,  $\frac{dp}{dx} \approx \frac{\Delta p}{H}$ .

Dla równania (5) przyjęto następujące warunki brzegowe, [1,4]:

- przepływ cieczy w minikanale jest laminarny (liczba Reynoldsa  $Re < 2000$ ) i stacjonarny o stałej gęstości strumienia masy,
- powstała w trakcie przepływu przez minikanal mieszaninę dwufazową charakteryzuje stopień zapełnienia  $\varphi$  stały w danym przekroju poprzecznym minikanalu,
- prędkość płynu w minikanale ma tylko jedną składową niezerową  $w_x = w_x(y)$ , równoległą do powierzchni grzejnej minikanalu i kierunku przepływu, spełniająca warunek wynikający z równania zachowania pędu

$$-\rho_L g \sin \omega - \frac{dp}{dx} + \mu_L \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

- temperatura płynu na wlocie ( $T_{in}$ ) i wylocie ( $T_{out}$ ) z minikanalu jest znana,
- temperatura płynu na styku z folią grzejną spełnia warunek zależny od temperatury saturacji ( $T_{sat}$ )

$$T_L = \begin{cases} T_F, & \text{gdzie } T_F < T_{sat} \\ T_{sat}, & \text{gdzie } T_F \geq T_{sat} \end{cases} \quad (8)$$

- cały strumień ciepła generowany w folii grzejnej jest przekazywany do fazy ciekłej w proporcji wynikającej ze stopnia zapełnienia

$$\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial y} = \lambda_F (1 - \varphi(x)) \frac{\partial T_F}{\partial y} \quad \text{dla } y = \delta_G + \delta_F \quad \text{oraz } 0 \leq x \leq H \quad (9)$$

przy czym stopień zapełnienia  $\varphi$  został wyliczony oparciu o korelację Chisholma [3]

$$\varphi(x) = \left( 1 + \left( \frac{1 - X(x)}{X(x)} \right) \left( \frac{\rho_v}{\rho_L} \right) S \right)^{-1}, \quad S = \sqrt{1 - X(x) + \frac{X(x)\rho_L}{\rho_v}} \quad (10)$$

Termodynamiczny stopień suchości  $X(x)$  wyznaczono ze wzoru [2]

$$X(x) = \frac{q_F H (x - x_{sat})}{AG h_{Lv}} \quad (11)$$

gdzie  $A$  – jest polem powierzchni przekroju minikanalu,  $G$  – strumieniem masy,  $h_{LV}$  – entalpią,  $x_{sat}$  – punktem początku wrzenia

$$x_{sat} = \frac{m \rho_L c_p (T_{sat} - T_{in})}{q_F H} \quad (12)$$

gdzie  $m$  – oznacza masę.

Gdy rozkład oraz gradient temperatury folii grzejnej są znane, współczynnik przewodzenia ciepła  $\alpha(x)$  na styku folia cieciz może być wyznaczony z warunku brzegowego trzeciego rodzaju

$$\alpha(x) = \frac{-\lambda_F \frac{\partial T_F}{\partial y}(x, \delta_G + \delta_F)}{T_F(x, \delta_G + \delta_F) - T_{ave}(x)} \quad (15)$$

gdzie  $T_{ave}$  jest temperaturą odniesienia będącą średnią temperaturą cieciz wzdłuż głębokości minikanalu.

$$T_{ave}(x) = \frac{1}{0.5\delta_M} \int_{\delta_G + \delta_F}^{\delta_G + \delta_F + 0.5\delta_M} T_L(x, y) dy \quad (16)$$

### 3.1. Metoda obliczeniowa

W pracy nieznane aproksymaty temperatury folii grzejnej i płynu wyznaczono wykorzystując funkcje Trefftza dla równania Laplace'a i równania zachowania energii przy parabolicznym profilu prędkości wynikającym z równania (9), [4, 5]. W pierwszej kolejności, poprzez rozwiązanie zagadnienia prostego przewodzenia ciepła, z wykorzystaniem w metodzie Trefftza funkcji harmonicznich, wyznaczono aproksymatę temperatury folii grzejnej  $T_F$ . W drugim końcowym etapie, gdzie było rozwiązywane zagadnienie odwrotne, wyznaczono metodą Trefftza aproksymatę temperatury cieciz  $T_L$ .

## 4. Wyniki

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla zestawów danych z eksperymentu dotyczącego wymuszonego przepływu czynnika chłodniczego FC-72 przez asymetrycznie ogrzewany pionowy minikanal o wymiarach: długość 0,35 m, głębokość 0,001 m, szerokość 0,04 m, [7]. Rozważono cztery rodzaje powierzchni grzejnej rozwiniętej: teksturowanej laserowo na całej długości (oznaczenie LC), teksturowanej laserowo na wybranym fragmencie powierzchni (oznaczenie LK), teksturowanej elektroerozyjnie na całej długości (oznaczenie EC) oraz teksturowanej elektroerozyjnie na wybranym fragmencie powierzchni (oznaczenie EK). Dla każdego typu teksturowania wybrano dwie serie pomiarów o zbliżonych parametrach cieplno-przepływowych:

–LC1 (seria pomiarowa nr 1):  $Re=729$ ,  $G=207$  kg/(m<sup>2</sup>s),  $p_{in}=141$  kPa,  $q_F=1,74 \cdot 10^5$  kW/m<sup>3</sup>,

–LC2 (seria pomiarowa nr 2):  $Re=763$ ,  $G=204$  kg/(m<sup>2</sup>s),  $p_{in}=144$  kPa,  $q_F=2,30 \cdot 10^5$  kW/m<sup>3</sup>,

–LK1 (seria pomiarowa nr 1):  $Re=780$ ,  $G=233$  kg/(m<sup>2</sup>s),  $p_{in}=140$  kPa,  $q_F=1,75 \cdot 10^5$  kW/m<sup>3</sup>,

–LK2 (seria pomiarowa nr 2):  $Re=827$ ,  $G=230$  kg/(m<sup>2</sup>s),  $p_{in}=141$  kPa,  $q_F=2,46 \cdot 10^5$  kW/m<sup>3</sup>,

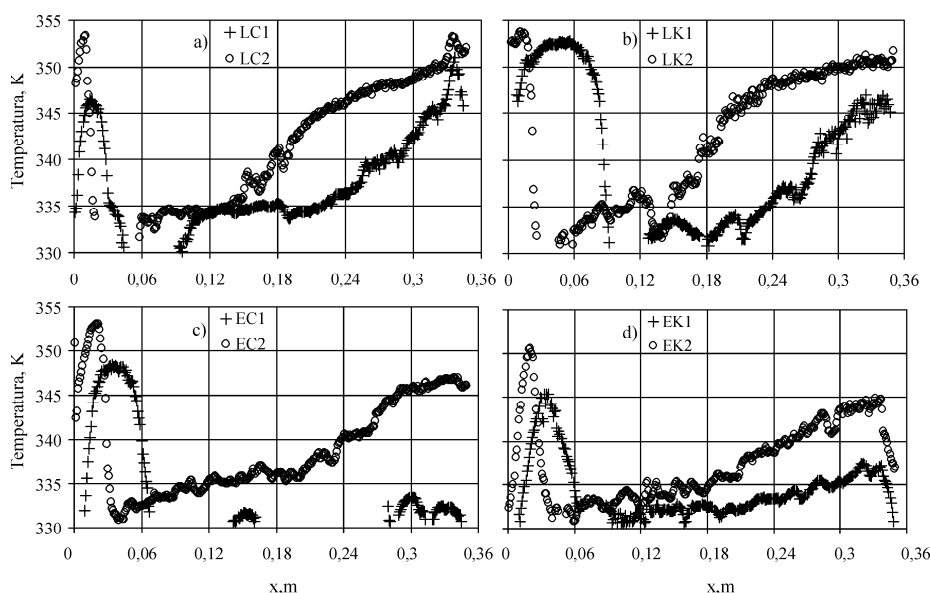
–EC1 (seria pomiarowa nr 1):  $Re=916$ ,  $G=284$  kg/(m<sup>2</sup>s),  $p_{in}=139$  kPa,  $q_F=1,71 \cdot 10^5$  kW/m<sup>3</sup>,

–EC2 (seria pomiarowa nr 2):  $Re=966$ ,  $G=280$  kg/(m<sup>2</sup>s),  $p_{in}=155$  kPa,  $q_F=2,38 \cdot 10^5$  kW/m<sup>3</sup>,

–EK1 (seria pomiarowa nr 1):  $Re=936$ ,  $G=282$  kg/(m<sup>2</sup>s),  $p_{in}=134$  kPa,  $q_F=1,73 \cdot 10^5$  kW/m<sup>3</sup>,



–EK2 (seria pomiarowa nr 2):  $Re=983$ ,  $G=278 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$ ,  $p_m=139 \text{ kPa}$ ,  $q_F=2,39 \cdot 10^5 \text{ kW/m}^3$ , gdzie:  $p_m$  – ciśnienie cieczy na wlocie do minikanalu. Rozkład temperatury powierzchni grzejnej (folii) na styku z szybą otrzymany metodą termografii ciekłokrystalicznej przedstawia rys. 6.

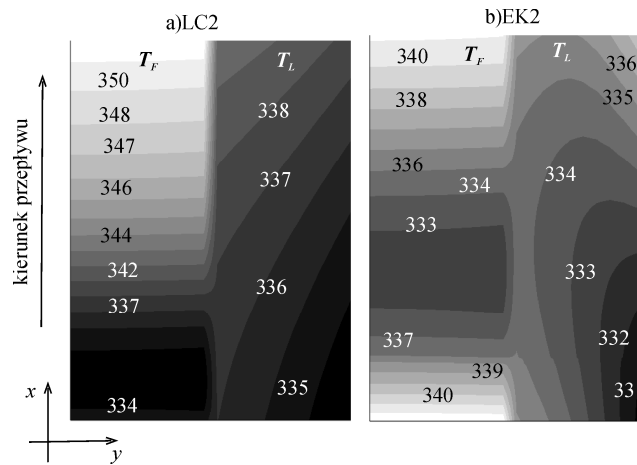


Rys. 6. Rozkład temperatury folii grzejnej w funkcji odległości od wlotu do minikanalu otrzymany metodą termografii ciekłokrystalicznej dla powierzchni: a) LC, b) LK, c) EC, d) EK

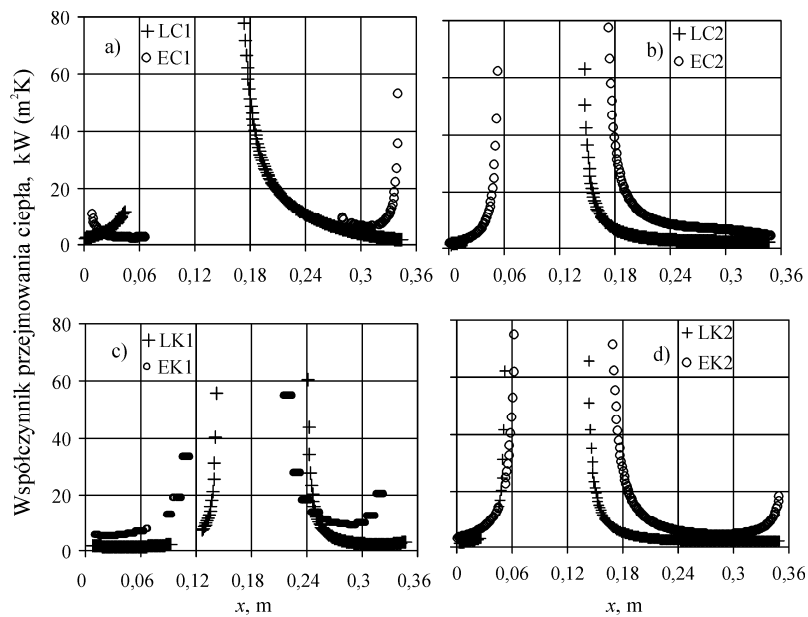
Obliczony z (10) stopień zapełnienia nie przekracza 60%, zaś temperatura saturacji zmienia się w zakresie 336K – 339K. Liczba funkcji Trefftza była tak dobrana, aby aproksymaty temperatury powierzchni grzejnej  $T_F$  oraz cieczy  $T_L$  były tego samego stopnia. W pierwszej kolejności obliczono dwuwymiarową aproksymatę temperatury folii grzejnej, a następnie – cieczy. Rysunek 7 przedstawia dwuwymiarowe rozkłady temperatury folii grzejnej  $T_F$  i czynnika chłodniczego  $T_L$  wyliczone metodą Trefftza dla danych LC1 (rys. 7a) oraz EK2 (rys. 7b).

Na rysunku 8 przedstawiono wartości lokalnego współczynnika przejmowania ciepła wyliczony z (15) dla wybranych typów powierzchni grzejnych rozwiniętych.

Przy wrzeniu w przepływie zaobserwowano wzrost wartości współczynnika przejmowania ciepła ( $\alpha$ ) w początkowym odcinku, minikanalu co związane jest z wystąpieniem inicjacji wrzenia. W miarę przemieszczania się czynnika chłodniczego w głąb kanału wzrasta udział fazy gazowej w mieszaninie dwufazowej, pojawia się wrzenie nasycone. Większy udział fazy gazowej w mieszaninie ciekło-parowej powoduje spadek wartości współczynnika  $\alpha$  obserwowanej dla obszaru wrzenia nasyconego wraz ze wzrostem odległości od wlotu do kanału. Zaobserwowany, zwłaszcza na rys. 8a, i rys. 8d, nieznaczny wzrost wartości  $\alpha$  w końcowej fazie przepływu związany jest prawdopodobnie z niedostateczną izolacją tego odcinka minikanalu. Dla niektórych wyższych nastaw strumienia ciepła zaobserwowano, że zastosowanie rozwiniętej powierzchni grzejnej teksturowanej elektroerozyjnie (na całej długości minikanalu EC oraz na wybranym



Rys. 7. Wyznaczone metodą Treffitza dwuwymiarowe rozkłady temperatury folii grzejnej  $T_F$  i cieczy  $T_L$  dla danych: a) LC2, b) EK2



Rys. 8 Współczynnik przyjmowania ciepła dla danych ze wskazanych serii pomiarowych:

- a) serii pomiarowej nr 1 i powierzchni teksturowanej typu LC, EC,
- b) serii pomiarowej nr 2 i powierzchni teksturowanej typu LC, EC,
- c) serii pomiarowej nr 1 i powierzchni teksturowanej typu LK, EK,
- d) serii pomiarowej nr 2 i powierzchni teksturowanej typu LK, EK

fragmencie powierzchni EK) pozwoliło na otrzymanie nieco wyższych wartości współczynnika przyjmowania ciepła, rys. 8b i rys. 8d. W literaturze [7,12] szerzej omówiono wyniki analizowanych serii eksperymentalnych i stwierdzono, że zastosowanie obu rozwiniętych powierzchni grzejnych, o niedużym rozwinięciu, powoduje uzyskiwanie wyższych wartości współczynnika przyjmowania ciepła, w porównaniu do wyników

otrzymanych dla folii gładkiej. Z kolei użycie powierzchni o dużym rozwinięciu spowodowało pogorszenie procesu wymiany ciepła [13].

## 5. Wnioski

Zaproponowany w pracy model matematyczny opisujący wymianę ciepła przy wrzeniu w przepływie w minikanalach prowadził do rozwiązania zagadnienia prostego (w folii grzejnej) oraz zagadnienia odwrotnego (w cieczy). Zastosowanie w rozwiązaniu numerycznym funkcji Trefftza dało wyniki, zgodne z fizyką zagadnienia. Uzyskane wyniki eksperymentalne potwierdzają możliwość zwiększenia współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie poprzez zastosowanie powierzchni grzejnych rozwiniętych. Intensyfikację wymiany ciepła uzyskano dla powierzchni o niewielkim rozwinięciu, natomiast zastosowanie w badaniach powierzchni o dużym rozwinięciu i większych rozmiarach spowodowało pogorszenie procesu wymiany ciepła. W artykule ponadto przedstawiono propozycje wykorzystania powierzchni rozwiniętych w zastosowaniach praktycznych, w tym: koncepcję modułu z zintegrowanymi minikanalami o powierzchniach rozwiniętych, prototypowe kolektory słoneczne płaskie oraz hybrydowe kolektor ciepły, z rozwiniętą powierzchnią absorberów.

## Literatura

1. Bohdal T.: Modeling the process of bubble boiling on flows. Archives of Thermodynamics, 21, 2000, 34-75.
2. Celata G.P., Saha S.K., Zummo G., Dossevi D.: Heat transfer characteristics of flow boiling in a single horizontal microchannel. International Journal of Thermal Science, 49, 2010, 1086-1094.
3. Chisholm D.: Pressure gradients due to friction during the flow of evaporating two phase mixtures in smooth tubes and channels. International Journal of Heat and Mass Transfer, 16, 1973, 347-358.
4. Hożejowska S., Kaniowski R., Poniewski M.E.: Application of adjustment calculus to the Trefftz method for calculating temperature field of the boiling liquid flowing in a minichannel. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 24, 2014, 811 - 824.
5. Hożejowska, S., Maciejewska, B., Piasecka, M.: Zastosowanie funkcji Trefftza do wyznaczania pól temperatury i współczynnika przejmowania ciepła przy wrzeniu w przepływie. Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2014.
6. Maciejewska B., Strąg K., Piasecka M.: Determination of the heat transfer coefficient from IRT measurement data using the Trefftz method. Proc. Int. Conf. Experimental Fluid Mechanics, 17-20.11.2015 Prague, 2015, 463-467.
7. Piasecka M.: Wrzenie w przepływie na powierzchniach rozwiniętych minikanalów. Monografie, studia, rozprawy, seria Budowa i Eksploatacja Maszyn, 61, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2014.
8. Piasecka M.: An application of enhanced heating surface with mini-recesses for flow boiling research in minichannels. Heat Mass Transfer, 49, 2013, 261-271.
9. Piasecka M.: The use of enhanced surface in flow boiling heat transfer in a rectangular minichannels. Experimental Heat Transfer, 27, 231-255.
10. Piasecka M.: Flow boiling heat transfer in a minichannel with enhanced heating surface. Heat Transfer Engineering, 35, 10, 2014, 903-912.

11. Piasecka M.: Laser texturing, spark erosion and sanding of the surfaces and their practical applications in heat exchange devices. *Advanced Material Research*, 874, 2014, 95-100.
12. Piasecka M.: Impact of selected parameters on boiling heat transfer and pressure drop in minichannels. *International Journal of Refrigeration*, 56, 2015, 198-212.
13. Piasecka M., Strąg K.: Effect of the heating surface enhancement on the heat transfer coefficient for a vertical minichannel. *Proc. Int. Conf. Experimental Fluid Mechanics*, 17-20.11.2015 Prague, 2015, 624-629.
14. Piasecka M., Depczyński W.: Struktura intensyfikująca wymianę ciepła przy wrzeniu. patent PL nr PL 217287 B1 (dec. 2013-06-11).
15. Piasecka M.: Applying enhanced heating surfaces in heat transfer devices. *Proc. 15th Int. Conf. Heat Transfer and Renewable Sources of Energy HTRSE-2014*, 10-13.09.2014 Międzyzdroje, 2014, 267-274.

Dr hab. Sylwia HOŻEJOWSKA  
Dr hab. Artur MACIĄG, prof PŚk  
Wydział Zarządzania i Modelowania Komputerowego  
Politechnika Świętokrzyska  
25-314 Kielce, Al. 1000-lecia P. P. 7  
tel.: (0-41) 342 43 94  
(0-41) 342 43 62  
e-mail: ztpsf@tu.kielce.pl  
maciag@tu.kielce.pl

Dr hab. inż. Magdalena PIASECKA  
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn  
Katedra Mechaniki  
Politechnika Świętokrzyska  
25-314 Kielce, al. 1000-lecia P. P. 7  
tel.: (0-41) 342 43 20  
e-mail: tmpmj@tu.kielce.pl