

Chropowatość powierzchni makro- i mikroelementów

MAŁGORZATA KMIOTEK, WOJCIECH ŻYŁKA, TOMASZ IWAN

Miniaturyzacja urządzeń i wdrażanie nowych technologii stwarzają konieczność stosowania małych przekrojów przewodów, stąd też rosną wymagania i zapotrzebowanie związane ze stosowaniem mini- i mikrokanalów. Modele przepływowe oraz dotyczące wymiany ciepła opracowane i sprawdzone dla makrokanalów nie uwzględniają zjawisk istotnych w mikrokanalach, a różnica zwiększa się wraz ze zmniejszaniem się wymiaru charakteryzującego przepływ i metodą obróbki powierzchni. W artykule przedstawiono przykłady mikrouządzeń i wpływ chropowatości powierzchni makro- i mikroelementów na parametry pracy urządzeń.

Wprowadzenie

Pierwsze koncepcje dotyczące mikro-urządzeń przedstawił Richard Feynman w 1959 r. podczas swojego wykładu „There's Plenty of Room at the Bottom”. Jednak prace w dziedzinie mikroprzepływów rozpoczęły się znacznie wcześniej. W 1846 roku francuski fizyk Jean Poiseuille studiował temat przepływu w kanałach o średnicy $30 \div 150 \mu\text{m}$. Następną fundamentalną pracą w zakresie mikrokanalów opublikował Martin Knudsen opisując w niej przepływ gazu przez szklane kapilary w zakresie przejściowym oraz zakresie swobodnego przepływu molekularnego. Następnie Wolfgang Gaede przeprowadził pierwszy eksperyment przepływu w mikrokanale. Badał on przepływ między dwiema równoległymi płytami usytuowanymi w odległości 4 mikrometrów [6].

Od tamtej pory następował ciągły rozwój mikrotechnologii. Obejmował on wiele dziedzin, takich jak: przemysł

samochodowy, lotnictwo, energetyka, medycyna, astronomia. Na początku budowane były relatywnie mało skomplikowane urządzenia zawierające mikrokanale: mikropompy, mikroawary lub mikroczujniki. Mikrokanalem określa się kanał, którego najmniejszy wymiar liniowy, jest mniejszy niż 1 mm, a większy niż $1 \mu\text{m}$. Jednak szybko zaczęto rozpowszechniać mikrokanale w innych dziedzinach nauki. Nastąpiła potrzeba badania białek, DNA, odczynników chemicznych i innych. Budowane były także mikroreaktory, które mieszają związki chemiczne przed wprowadzeniem ich do komory reakcyjnej. Szybki postęp elektroniki oraz informatyki sprawił, że komponenty komputera (mikroprocesory) zaczęły pobierać więcej mocy, którą trzeba rozpraszać poprzez opracowanie wydajnych miniaturowych wymienników ciepła. Lasery o dużej mocy wymagają zaprojektowania odpowiedniego rozmiaru systemów chłodzących. Szybko rozwinął się też segment mikro-systemów elektromechanicznych (MEMS),

które mają zastosowanie w różnych urządzeniach.

Nie można pominąć także postępu w dziedzinie inżynierii medycznej. By lepiej zrozumieć procesy zachodzące w organizmie ludzkim, nastąpiła potrzeba zasymulowania przepływu krwi w naczyniach krwionośnych, a także zbadania dwóch najbardziej wydajnych procesów wymiany ciepła i masy zachodzących w płucach i nerkach, gdzie średnice kanałów osiągają nawet $4 \mu\text{m}$ [14].

Kolejnym przykładem zastosowania w medycynie mikrouządzeń są mikrowymienniki ciepła stosowane w sondach kriochirurgicznych. Za pomocą tych sond wykonuje się ablację guzów lub leczy arytmie serca. Wykonuje się to poprzez schłodzenie tkanki do bardzo niskich temperatur – co w efekcie prowadzi do zniszczenia tkanki. W sondach, ze względu na ograniczenia geometryczne najczęściej stosuje się wymiennik ciepła Joule-Thomsona. Zawiera on kanały o średnicach najczęściej od dzie-

siętek do setek mikrometrów, jest to wymiennik przeciwprądowy o spiralnym kształcie. Czynnikiem chłodniczym jest argon podawany pod dużym ciśnieniem [25].

Postęp w zakresie wytwarzania mikrokanalów i mikrouządzeń umożliwia budowanie zaawansowanych mikroprzepływomierzy. Mikroczipy w odróżnieniu do ich tradycyjnych odpowiedników cechują się możliwością mierzenia przepływów w kanałkach o bardzo małych średnicach (w zakresie od 0,1 do 5 μm), dużą dokładnością i czułością. Pomiar natężenia przepływu i prędkości płynu są wykorzystywane w instrumentacji medycznej. Stosowane są w maszynach do znieczulenia (by zmierzyć i wymieszać odpowiednią dawkę tlenu, powietrza i podtlenku azotu), koncentratorach tlenu (wykrywając ilość wydychanego powietrza przez pacjenta i decydując czy system powinien zmniejszyć przepływ powietrza – ułatwiając wydech), respiratorach i innych instrumentach medycznych [1, 29].

Mikrokanaly są także niezbędne w wielu zastosowaniach komercyjnych. Znajdują np. coraz liczniejsze zastosowania w sektorze energetycznym. Używa się ich do budowy reaktorów mikrokanalowych. Jest on najczęściej zbudowany z równoległych płytek pokrytych katalizatorem pomiędzy którymi występuje przepływ. W porównaniu do standardowych reaktorów są dużo mniejsze, bardziej optymalne, osiągają większe szybkości mieszania (poprzez zwiększenie stosunku powierzchni do objętości), sam proces prowadzony jest w bardziej kontrolowanych warunkach. Mikroreaktory dzielą się na dwa typy: o podłożu ceramicznym lub o podłożu metalicznym. W takim reaktorze występuje najczęściej połączenie wielu warstw, co pozwala na skalowanie produkcji (poprzez dokładanie lub zdejmowanie określonej liczby warstw). Dzięki takiej budowie przy zmianach produkcyjnych nie ma potrzeby przeprojektowania reaktora [25, 31].

Przykładowym zastosowaniem reaktorów mikrokanalowych jest system ogniw paliwowych pokazany na rysunku 1, które produkują prąd elektryczny w wyniku utleniania paliwa – np. wodoru.

Gazy o wysokiej temperaturze przepływają przez warstwy niereagujące pod-

grzewając paliwo w kanałach reaktywnych (inicjując i przyspieszając przekształcanie paliwa). Ogniwa takie mogą być wykorzystywane jako pomocniczy zespół napędowy.

Chropowatość makroelementów

Powierzchnię obrobioną najczęściej można scharakteryzować jako złożenie dwóch profili – chropowatości oraz falistości (niektóre powierzchnie wykazują także odchyłki kształtu).

Chropowatością powierzchni nazywa się zbiór nierówności, tj. wzniesień i wgłębień na powierzchni rzeczywistej przedmiotu o stosunkowo małych odstępach między wierzchołkami. Chropowatość powierzchni zależy przede wszystkim od jego obróbki: rodzaju, warunków i parametrów, a także od rodzaju materiału [17].

Chropowatość powierzchni powstaje w wyniku jednoczesnego oddziaływania wielu niezależnych czynników, zarówno losowych, jak i zdeterminowanych [8]. Chropowatość ma wpływ, m.in. na współczynnik tarcia, zużycie powierzchni trących, odporność termiczną, wytrzymałość zmęczeniową itp. [33].

Na chropowatość wpływa wiele czynników, jak: procesy dekohezji, odkształcenia plastyczne w strefie skrawania i tworzenia segmentów wióra, tarcie powierzchni przyłożenia narzędzia o powierzchnię obrobioną, tarcie wióra o powierzchnię obrobioną, budowa krystaliczna metali itp. Pomiar, kontrola chropowatości powierzchni ma za zadanie zapewnienie spełnienia przez obrabiany element przewidzianych przez konstruktora funkcji, np. szczelności połą-

czenia, refleksyjności, przewodnictwa styku, odporności na zużywanie ściernie, zmęczeniowe itp. [23].

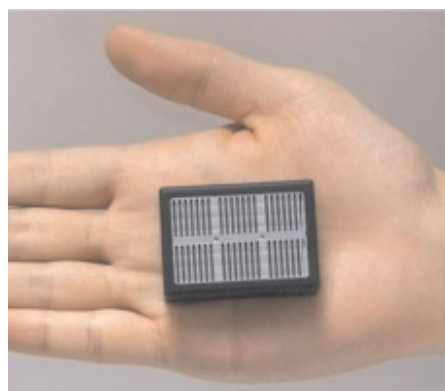
Struktura geometryczna powierzchni (w tym chropowatość) niesie zapis informacji dotyczących: obrabiarki, narzędzia, procesu i przedmiotu obrabianego [3]. W zależności od wartości stosunku długości fali nierówności S_r do jej wysokości R rozróżnia się – rys. 2:

– chropowatość powierzchni, gdy $S_r/R < 50$,

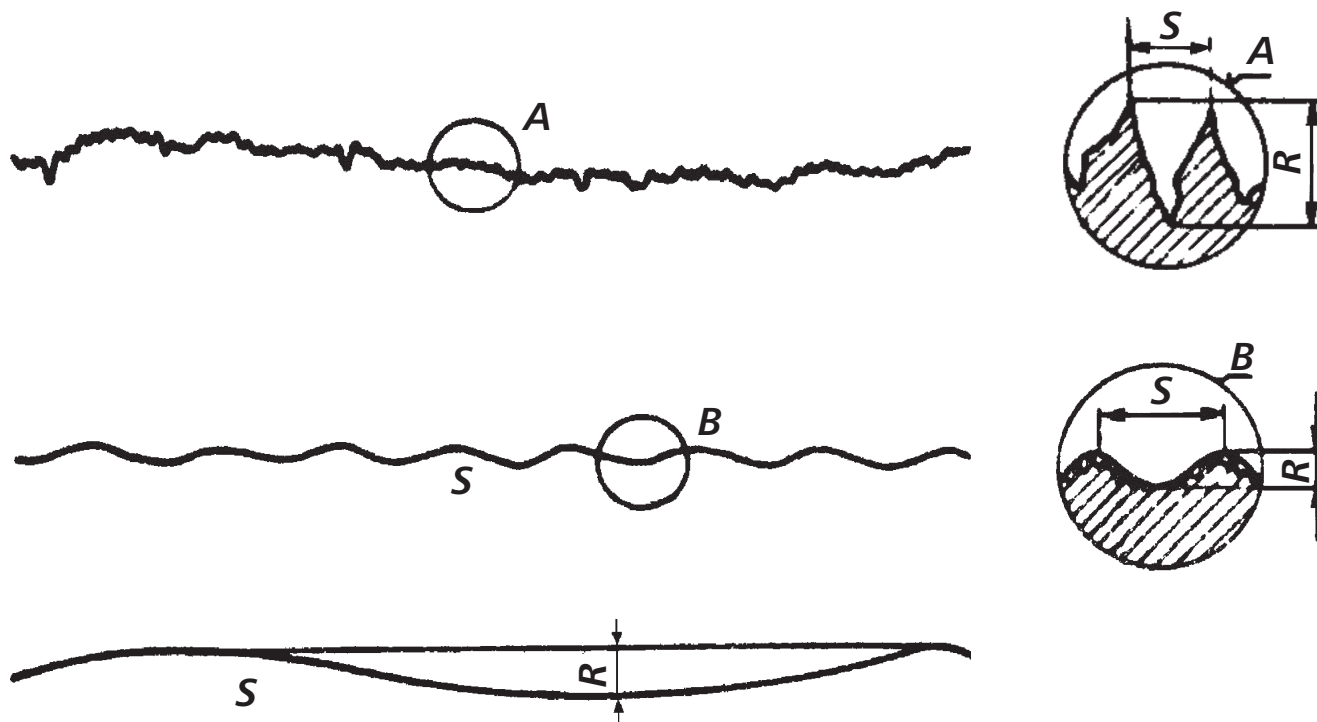
– falistość powierzchni, gdy $50 \leq S_r/R < 1000$,

– odchyłkę kształtu, gdy $S_r/R > 1000$.

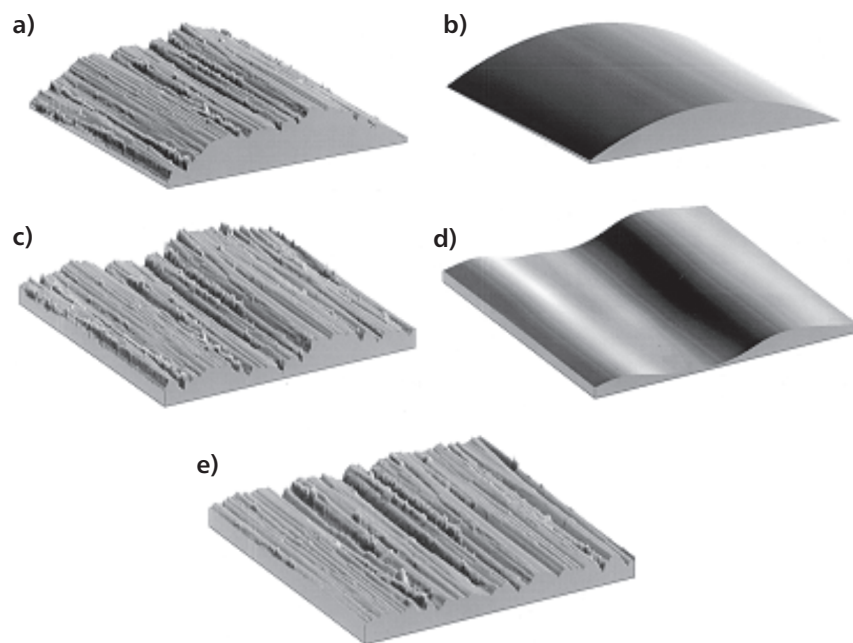
Odkształcenia układów OUPN oraz niedokładność wykonania lub zużycie powierzchni roboczych: łóż, suportów i przyrządów obróbkowych są w procesach obróbki skrawaniem powodem powstawania nierówności. Obejmują one swym zasięgiem całą lub znaczną część obrobionej powierzchni. Nierówności te, nazywane odchyłkami kształtu i położenia, charakteryzują się tym, że ich odstęp jest większy od odstępu falistości. Wynikiem cyklicznych zmian wzajemnego położenia przedmiotu i narzędzia, powodowanych zwykle przez drgania układu OUPN, jest powstawanie falistości, tj. nierówności powierzchni charakteryzujących się odstępem nierówności znacznie większym niż chropowatość, a mniejszym od długości odcinka pomiaru falistości oraz kształtem zbliżonym do sinusoidalnego. Falistość powstaje wskutek oddziaływania drgań, zarówno swobodnych, jak i wymuszonych i może być efektem nakładania się na siebie drgań o różnych amplitudach, okresach oraz przesunięciach fazowych [16]. Przyjmuje się, że zmierzona odchyłka kwalifikuje się jako falistość gdy stosunek odstępu między cyklicznie powtarzającymi się nierównościami do jego głębokości mieści się między 50:1 a 1000:1 [30]. W niektórych źródłach falistość przyjmuje się jako zbiór okresowo powtarzających się nierówności charakteryzujący się tym, że stosunek odstępu między wierzchołkami nierówności do ich wysokości jest równy co najmniej 40. W przeciwnym przypadku nierówności są zaliczane do chropowatości powierzchni [12]. Składowe struktury geometrycznej powierzchni przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 1. Przykład zastosowania mikrokanalów w ogniwach paliwowych [32]



Rys. 2. Wielkości charakteryzujące obrabiane powierzchnie: a) chropowatość, b) falistość, c) odchyłka kształtu [17]



Rys. 3. Elementy topografii powierzchni: a) powierzchnia rzeczywista, b) powierzchnia nominalna, c) falistość + chropowatość, d) falistość, e) chropowatość [24]

Istotnym elementem każdego pomiaru chropowatości jest operacja filtrowania ocenianego profilu, która ma na celu wyodrębnienie poszczególnych rodzajów nierówności [22]. Dzięki tej operacji

można wyeksponować jej składowe – rys. 3.

Pomiar mikrogeometrii powierzchni można przeprowadzić za pomocą me-

tod stykowych i bezstykowych, np. optycznych.

Pomiary stykowe polegają na wyznaczeniu liczbowych wartości parametrów profilu chropowatości lub odwzorowaniu go w formie profilogramu o znanym powiększeniu: pionowym i poziomym [23]. Podczas mierzenia następuje stykanie się elementów roboczych narzędzia lub przyrządu z powierzchniami mierzonego przedmiotu w miejscu mierzenia. W celu przeprowadzenia pomiaru metodą stykową wykorzystuje się igłę pomiarową o znanej geometrii, przesuwaną się po powierzchni ze stałą prędkością, a pionowe jej przemieszczenia są przekształcane na sygnał elektryczny lub optyczny. Sygnał ten zostaje w komputerze wzmocniony i przetworzony na wartości liczbowe zadanych parametrów chropowatości (rys. 4 na s. 26).

Pomiary bezstykowe przeprowadza się bez kontaktu elementów roboczych przyrządu z powierzchniami przedmiotu w miejscu mierzenia. Pomiary bezstykowe mogą być dokonywane przez

wykorzystanie np. metody optycznej, pneumatycznej, interferencyjnej, przekroju świetlnego, rzutowania siatek periodycznych i inne. Do pomiarów chropowatości powierzchni metodami optycznymi używane są przyrządy działające na zasadzie nieniszczącego przekroju badanej powierzchni za pomocą promieni świetlnych.

reklama

Chropowatość w mikroelementach

W czasie obróbki zarówno makro- jak i mikroelementów powstanie chropowatości powierzchni jest nieuniknione. Istnieje wiele rodzajów metod mikroobróbki, takich jak EDM (obróbka elektroerozyjna), ECM (obróbka elektro-chemiczna), wytrawianie, mikrofrezowanie. Dokładność obróbki tymi metodami waha się od 0,01 do 5 μm [5, 18, 27, 28, 36].

O ile przepływy w makrokanalach chropowatych zostały bardzo dobrze poznane, to ich skala mikro jest jeszcze nie do końca zbadana. Po to, aby prawidłowo zaprojektować mikrourządzenia konieczne jest zidentyfikowanie praw fizycznych dotyczących przepływu płynu i wymiany ciepła w mikrogeometrii uwzględniając metodę wykonania mikrourządzenia, co wiąże się z określeniem struktury geometrycznej powierzchni mikrokanatów [10, 11].

Przy rozpatrywaniu przepływów (makro lub mikro) wykorzystuje się bezwymiarową liczbę podobieństwa – liczbę Reynoldsa (Re). Określa ona stosunek sił bezwładności do sił lepkości (dyssypacji). Pozwala ona określić charakter przepływu (laminarny czy turbulentny) oraz oszacować granicę stateczności danego przepływu [2, 4].

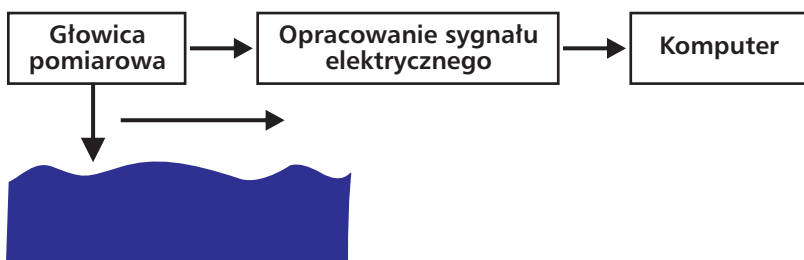
Przykłady badań mikroelementów

Zjawiska w mikroskali różnią się od tych w odpowiednikach makroskopowych. Badaniem eksperymentalnym i numerycznym wpływu chropowatości na przepływ i wymianę ciepła zajmuje się wielu badaczy.

Jednymi z pierwszych badań eksperymentalnych przepływu wody w mikrokanale był eksperyment Mala i Li w 1999 roku [21]. Zbadane zostały kanały o średnicy od 50 do 254 μm . Przy chropowatości względnej na poziomie $0,69 \div 3,5$. Badania wykazały, że dla stałej objętościowej wartości przepływu, gradient ciśnienia był większy niż przewidywany. Dla małych wartości liczby Reynoldsa wyniki eksperymentalne są w zgodzie z przewidywaniami literaturowymi. Przy większych wartościach Re różnica jest znacznie większa, zwiększa się jeszcze bardziej wraz z zmniejszaniem się średnicy kanału. Wpływ na przepływ zaobserwowany był także wraz ze zmianą materiału (badana była stal nierdzewna i topiona krzemionka) oraz jego chropowatością [21].

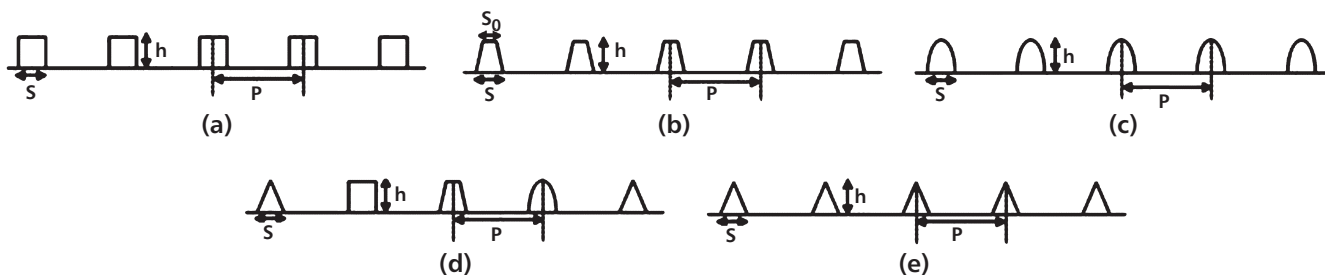
Inne badanie przeprowadzono w 2000 roku w mikrokanalach o średnicy hydraulicznej w zakresie od 30 do 344 μm . Kanały zostały wykonane z aluminium (chropowatość nie przekraczała 0,5 μm) oraz wafli krzemowych (o maksymalnej chropowatości 20 nm). Relatywna chropowatość nie przekraczała 3%, liczba Reynoldsa zawierała się w zakresie od 20 do 4000. Badania wykazały dużą zgodność z teorią (przepływ laminarny). Dla mikrokanatów aluminiowych wykazano, że zmiana charakteru przepływu z laminarnego na turbulentny występuje już przy $Re = 1500$. Zjawisko wystąpiło

»»



Rys. 4. Zasada pomiaru stykowego SGP powierzchni [26]

jeszcze pełnej interpretacji wszystkich aspektów zachowania przepływu w mikroskali. W modelowaniu przepływów w tej skali wykorzystuje się m.in. metody numeryczne, gdyż obliczeniowe ujęcie, może być przydatne do zrozumienia podstawowego problemu w mikroskali, ponieważ możliwa jest jednoczesna analiza kilka aspektów trudnych do uchwycenia w eksperymencie, wskazując przy tym kierunek działań w za-



Rys. 5. Uprozczone modele chropowatości [19]

trochę wcześniej, niż w makroskopowym świecie. Autorzy doszli do wniosku, że zjawisko to można wyjaśnić efektem powierzchniowym, gdyż jest to skutek większej chropowatości aluminium niż próbki krzemowej, na której nie zauważono tak szybkiej zmiany typu przepływu [34].

W praktyce nie jest możliwe uzyskanie idealnie gładkiej powierzchni ciała stałego zarówno makro- jak i mikroelementów. Zgodnie z wiedzą dotyczącą makrosystemów, gdy względna chropowatość jest mniejsza niż 5%, jej wpływ na współczynnik tarcia jest znikomy [13, 15]. W przypadku mikrokanalów, wyniki eksperymentalne i numeryczne wykazały, że chropowatość powierzchni ma znaczący wpływ na przepływ i wymianę ciepła. Na przykład eksperyment Kandlikara wykazał, że dla rurki ϕ 0,62 mm o względnej wysokości chropowatości 0,355% wpływ chropo-

watości na współczynnik tarcia i przewodzenie ciepła był znaczący [13].

Bardzo rozległe badanie literaturowe zostało przeprowadzone w 2013 roku. Głównym celem było zbadanie wpływu chropowatości na współczynnik tarcia oraz krytyczną wartość liczby Reynoldsa. Badanie zostało oparte o 33 artykuły naukowe (w sumie zostało zebranych 5569 danych) dla przepływów w mikrokanalach o różnych chropowatościach ścianki. Autorzy doszli do wniosku, że jeśli względna wysokość chropowatości jest $<1\%$, ma ona niewielki wpływ na współczynnik tarcia i krytyczną liczbę Reynoldsa. Wartość 1% została zasugerowana jako próg rozróżnienia gładkich i chropowatych mikrokanalów. W rzeczywistych zastosowaniach nie jest jednak łatwo uzyskać tak gładką powierzchnię spełniającą to kryterium [7].

Dostępny jest już liczny zbiór danych eksperymentalnych, jednak nie ma

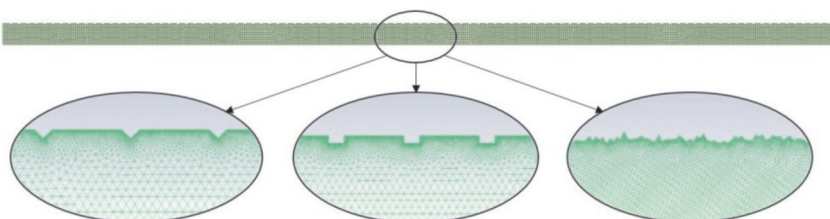
kresie obróbki powierzchni mikro-urządzeń i mikrokanalów.

W literaturze chropowatość powierzchni najczęściej modelowana jest za pomocą prostych geometrycznych kształtów, np. trójkątów, prostokątów, kwadratów, elips, trapezów [19, 35]. Przykłady takiego ujęcia przedstawiono na rys. 5. W artykule [19] autorzy symulują przepływ w mikrokanalach, gdzie chropowatość modelowana jest za pomocą trójkątów, trapezów, prostokątów, elips.

Badana relatywna chropowatość zawierała się w zakresie od 2,5 do 15%. Z analizy wynika, że chropowatość wpływa na rozkład linii prądu. Zwiększa się w ten sposób tarcie i różnice ciśnień pomiędzy wejściem, a wyjściem. Przy dużej wartości chropowatości może to prowadzić do oderwania przepływu w pobliżu ściany i utworzeniu się stref recyrkulacyjnych. Oderwanie przepływu i recyrkulacja to najprawdopodobniej główne przyczyny zwiększonego współczynnika tarcia oraz spadku ciśnienia.

W modelowaniu chropowatości używana jest również teoria pseudolosowych liczb [20]. Inny przykład wygenerowanej siatki służącej do obliczeń numerycznych przepływu w mikrokanale przedstawiono na rys. 6.

W tym przypadku chropowatość została modelowana również jako proste



Rys. 6. Przykład siatki użytej w modelowaniu mikrokanalu

figury geometryczne: trójkąty, prostokąty, a także jako zbiór pseudolosowych punktów spełniających warunek rozkładu normalnego (symulujących realną powierzchnię).

Znaczenie chropowatości w mikrouządzeniach

Badania dotyczące chropowatości, spadku ciśnienia oraz wymianie ciepła w mikrokanalach pomogły w opracowaniu mikrowymienników ciepła. Jednym z przykładów takich mikrowymienników są pulsacyjne chłodnice rurowe. Do ich produkcji wykorzystywana jest obróbka ultradźwiękowa, pozwalająca na zachowaniu cienkiej warstwy krzemu na żebrach grubości 45 μm . Występują różne konfiguracje szerokości kanałów (najczęściej jednak w granicach od 50 do 150 μm).

Rurowe chłodnice pulsacyjne są używane w celach komercyjnych (chłodzenie komponentów elektronicznych), jak i w celach militarnych (odprowadzanie ciepła z czujników działających na podczerwień). Wykorzystywane są również w astronomii do chłodzenia detektorów astronomicznych (takich jak teleskop Atacama). Znalazły zastosowanie w teleskopach (teleskop Jamesa Webba), gdzie nie jest możliwa wymiana płynów kriogenicznych.

Opisywane wymienniki bardzo mocno zaznaczyły się w historii kriogeniki: w 1984 roku pozwoliły osiągnąć temperaturę 105 K, natomiast dalsze usprawnienia konstrukcyjne oraz zmiana medium pozwoliła osiągnąć temperaturę około 2 K. Ostatecznie chłodnice rurowe osiągają sprawność cieplną 20% (przy temperaturze 80 K) [9, 27].

Innym z problemów mikroświata było stworzenie łożysk, charakteryzujących się małą wartością oporów ruchu. Dokonano tego stosując mikrołożyska powietrzne. W takich łożyskach współpracujące powierzchnie oddzielone są cienką warstwą gazu. Przy opracowywaniu modelu tego typu łożysk wymagane jest branie pod uwagę efektów gazu rozrzedzonego, wpływu ściśliwości i chropowatości. Wyniki pokazały, że chropowatość powierzchni znacząco wpływa na rozkład ciśnienia, nośność, rozkład prędkości i współczynnik tarcia. Wykazano także, że efekt gazu rozrzedzonego ma duże znaczenie przy projektowaniu mikrołożysk i musi być uwzględniane w zakresach przepływu z poślizgiem i przepływem przejściowym [9, 27].

Podsumowanie

Obserwowany od wielu lat postęp w dziedzinie techniki dotyczy wielu zagadnień, poczynając od wytwarzania urządzeń powszechnego użytku, kończąc na niezwykle precyzyjnych miniaturowych układach elektronicznych, gdzie bardzo ważna jest dokładność i jakość powierzchni.

Przedstawione w artykule przykłady pokazują ważną rolę zjawisk towarzyszących przepływowi płynu i wymianie ciepła, a zwłaszcza w kontekście parametrów związanych z obróbką powierzchni w makro- i mikroskali.

Modele przepływowe oraz dotyczące wymiany ciepła opracowane i sprawdzone dla makrokanalów nie uwzględniają zjawisk istotnych w mikrokanalach, a różnica zwiększa się wraz ze zmniejszaniem się wymiaru charakteryzującego przepływ, a chropowatość powierzchni jest najczęściej



jednym z kluczowych parametrów wpływających na efektywność pracy urządzenia mikroprzepływowego.

Literatura

1. Billat S. i in.: Monolithic integration of micro-channel on disposable flow sensors for medical applications. *Sensors and Actuators*, 145–146, 2007 s. 66-74.

2. Błoński S.: Analiza przepływu turbulentnego w mikrokanale. Rozprawa doktorska, IPPT PAN, Warszawa 2009.

3. Boryczko A.: Metoda analizy częstotliwościowej nierówności powierzchni toczonych w diagnozowaniu układu obróbkowego. Monografie Nr 42, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2003.

4. Cengel Y.A.: *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, New York 2014.

5. Chu W.S. i in.: Hybrid micro-machining processes. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, 1 (1) (2014), s. 75-92.

6. Cotta R. M., Knupp, D., Naveira-Cotta, C.: *Analytical Heat and Fluid Flow in Microchannels and Microsystems*. Springer, 2016.

7. Dai B. i in.: Effect of surface roughness on liquid friction and transition characteristics in micro- and mini-channels, *Aslied Thermal Engineering*, 47, 2014, s. 283-293.

8. Dul-Korzyńska B.: *Obróbka skrawaniem i narzędzia*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.

9. Fan Y. i in.: Recent Applications of Advances in Microchannel Heat Exchangers and Multi-Scale Design Optimization. *Heat Transfer Engineering*, 29, 2008, s. 461-474.

10. Gad-el-Hak M.: The Fluid Mechanics of Microdevices. *Journal of Fluids Engineering*, 121, 1999, s. 5-33.

11. Guo L. i in.: Influence of wall roughness models on fluid flow and heat transfer in microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 84, 2015, s. 399-408.

12. Hebda M., Wachal A.: *Trybologia*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.

13. Kandlikar S.G.: Roughness effects at microscale – reassessing Nikuradse's

experiments on liquid flow in rough tubes. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, 53 (4)(2005), s. 343-349.

14. Kandlikar S. G.: *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*. Elsevier, 2014.

15. Khadem M. i in.: Numerical simulation of roughness effects on flow and heat transfer in microchannels at slip-flow regime. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, 2008, s. 69-77.

16. Kowalski M.: Metodyka wyboru parametrów chropowatości do opisu topografii powierzchni. Rozprawa doktorska, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2005.

17. Krawczyk M.: *Metrologia i kontrola jakości*, wydanie VIII, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1998.

18. Lai L.J., Zhou H., Zhu L.M.: Fabrication of microlens array on silicon surface using electrochemical wet stamping technique. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 364, 2016, s. 442-445.

19. Lalegani F., Effects of different roughness elements on friction and pressure drop of laminar flow in microchannels. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 7 (28) 2018, s. 1664-1683.

20. Lu H., M. Xu M., Gong L., Duan X., Chai J.C.: Effects of surface roughness in microchannel with passive heat transfer enhancement structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 148 (2020).

21. Mala G. M., Li. D.: Flow characteristics of water in microtubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2 (20) 1999, s. 142-148.

22. Norma ISO 11562: 1996: Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Metrological characteristics of phase correct filters — Technical Corrigendum 1.

23. Nowicki. B.: *Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni*. WNT, Warszawa 1991.

24. Oczóś K., Liubimov V.: *Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowych*.

Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.

25. Ohadi M., Choo. K., Dessiatoun S., Cetegen E.: *Next Generation Micro-channel Heat Exchangers*. Springer, 2013.

26. Pawlus P.: *Topografia powierzchni, pomiar, analiza, oddziaływanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.

27. Radebaugh R.: Development of the Pulse Tube Refrigerator as an Efficient and Reliable Cryocooler. *Proc. Institute of Refrigeration*, 96, 2000, s. 11-29.

28. Richard J., Demellayer R., *Micro-EDM-milling Development of new machining technology for micro-machining*. *Proceedings of the CIRP*, 6 (2013), s. 292-296.

29. Wang Y-H. i in.: MEMS-based gas flow sensors. *Microfluid Nanofluid*, 6, 2008, s. 333-346.

30. Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J.: *Nowe kierunki w pomiarach chropowatości powierzchni*. *Prace naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wroclawskiej z. 24*, 1999. *Zagadnienia inżynierii powierzchni w obróbce skrawaniem*, s. 213-220.

31. Wodołażski A.: *Modelowanie syntezy metanolu w mikroreaktorze płytowym*. *Przegląd Elektrotechniczny*, 40, 2014, s. 76-79.

32. www.fuelcellstore.com/blog-section/considerations-micro-electro-mechanical-system-fuel-cells [data dostępu: 17.02.2021].

33. www.wim2.utp.edu.pl/dok/Instrukcje-wyklady/W8.pdf [data dostępu: 17.02.2021].

34. Xu B. i in.: Experimental investigation of fluid friction for liquid in microchannels. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 27, 2000, s. 1165-1176.

35. Zhang G. M., Chen Y., Shi M.: Effects of roughness elements on laminar flow and heat transfer in microchannels. *Chemical Engineering and Processing*, 49, 2010 s. 1188-1192.

36. Zhang S.J., To S., Wang S.J., Zhu Z.W.: A review of surface roughness generation in ultra-precision machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 91, 2015, s. 76-95. ■