

УДК: 536.24:532.55

ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МІНІ-КАНАЛІВ, ВИКОНАНИХ
ЗА ДОПОМОГОЮ АДИТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇХалатов А.А.,¹ академік НАН України, Борисов І.І.,¹ канд. техн. наук. Кулішов С.Б.²¹Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, вул. Марії Канніст, 2а, 03057, Україна²ДП НВКГ «Зоря»-Машпроект», Миколаїв, пр. Богоявленський, 42а, 54018, Україна<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.3>*Розглянуті особливості теплообміну та гідравлічного опору міні-каналів, виконаних за допомогою адитивних технологій, проведено порівняння їх теплогідравлічних характеристик.**The features of heat transfer and hydraulic resistance of additively manufactured mini-channels are considered, a comparison of their thermo-hydraulic characteristics has been carried out.*

Бібл. 15, рис. 14.

Ключові слова: адитивні технології, міні-канали, шорсткість, гідравлічний опір, теплообмін, теплогідравлічна ефективність. d_e – еквівалентний діаметр каналу;
 f – коефіцієнт гідравлічного опору;
 K_s – пісочна шорсткість;
 R_a – середньоарифметична шорсткість;
 Nu – число Нуссельта;
 Pr – число Прандтля; Re – число Рейнольдса;
 α – кут наряду будівництва.**Скорочення:**
АТ – адитивні технології.**Індекси:**
0 – параметри гладкого каналу.**Вступ**

Поява 3D друку, або адитивних технологій (АТ), дає можливість зробити значний крок у розробці нових високотемпературних теплообмінних пристроїв. Такі технології дозволяють не тільки реалізовувати складну геометрію теплообмінних поверхонь і каналів, але і зробити їх виготовлення більш швидким та дешевим. Ринок АТ інтенсивно розвивається, з'являються нові компанії в різних областях. Одним із напрямів АТ є лазерне спікання. Воно дозволяє створювати вироби із високотемпературних сплавів, що має суттєвий інтерес для розробників інноваційних систем охолодження високотемпературних газових турбін. АТ дозволяє створювати геометрії каналів, які до цього неможливо було реалізувати традиційними методами.

Як відмічається в роботі [1], на даний момент основна частина публікацій, присвячених морфології поверхонь, гідравлічному опору і теплообміну в міні-каналах з розмірами ~ 1 мм, виконаних за допомогою адитивних технологій (далі АТ каналів), приходить на дослідницьку команду, яка очолюється професором Карен Толе з Пенсильванського Державного Університету

(США). Важливим фактором, який стримує широкі дослідження в цьому напрямку, є унікальність устаткування як для виготовлення АТ каналів, так і для вивчення морфології виконаних зразків. В останні роки стали з'являтися і інші дослідження, в основному в США.

Структура поверхні при застосуванні адитивних технологій

Існує декілька параметрів для описання величини шорсткості. При аналізі результатів експериментів з теплообміну в АТ каналах використовують середньоарифметичну шорсткість. Спочатку вивчається мікроструктура поверхні, а потім визначається значення середньоарифметичної шорсткості по співвідношенню:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_{\text{surf}} - z_{\text{ref}}| \quad (1)$$

де z_{surf} і z_{ref} – значення поточної і опорної координат.

Внаслідок використання порошку при лазерному спіканні мікроструктура виробу кардинально відрізняється від виконаного традиційними методами. При лазерному спіканні можуть утворюватися якісно інші види шорсткості [1]: частково розплавлені частин-

ки, штриховка, кульки, неповне спікання (lack of fusion), окалина. Вид шорсткості залежить від параметрів процесу будівництва виробу. Неповне розплавлення частинок порошку є наслідком недостатності енергії лазерного променя. Штриховка викликана відстанню між лазерними доріжками, даний тип шорсткості інтенсифікує теплообмін. Утворення кульок пов'язано з нестійкістю Релея всередині розплавленого матеріалу. Число кульок зростає із підвищення швидкості сканування. Неповне злиття розплавленого матеріалу має місце внаслідок недостатності енергії, яка є необхідною для цього процесу, в результаті у застиглому шарі виникають порожнини і пористість. Окалина є наслідком надмірної подачі матеріалу. Вона зазвичай виникає на нависаючих поверхнях під дією сили тяжіння. Для дослідження морфології поверхонь застосовують різні методи, зокрема комп'ютерну томографію та електронну мікроскопію.

На рис. 1 показана комп'ютерна томографія плоского каналу з суцільними циліндричними ребрами, яка наведена в роботі [2].

Результати досліджень, виконаних в роботі [3] із застосуванням електронного мікроскопу, показують, що внаслідок високого рівня шорсткості АТ технологія має ліміт по якості при зменшенні розміру каналів. Цей ліміт оцінюється розмірами ~ 1 мм. З цієї точки зору АТ технологія програє іншим, наприклад, електроерозійній технології.

В [4] показано, що прямокутні АТ канали розміром 1 мм мають розкид гідравлічного діаметра 10% і відрізняються від тих, що задані проектувальником, на 20%, в залежності від напрямку будівництва. Вироби по АТ погано піддаються контролю по розмірам. Реальні

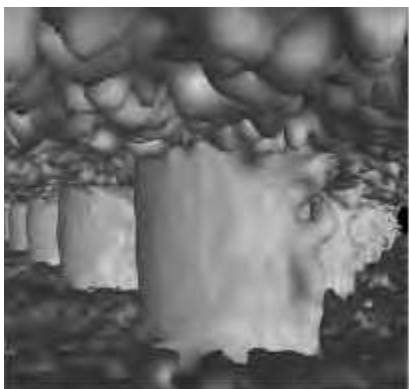


Рис. 1. Плоский АТ канал із суцільними циліндричними ребрами, комп'ютерна томографія [2]

надруковані розміри перевищують ті, що задані розробниками. Причому, периметр є ближчим до заданого, ніж прохідне січення.

Вплив параметрів процесу

В залежності від параметрів процесу лазерного спікання можна отримувати різні види шорсткості поверхні [1]. Основним параметром є потужність лазерного променя: з підвищенням енергії, що подається, шорсткість спочатку знижується, проходить через мінімум, і потім починає зростати. Іноді проводять повторне сканування для доплавлення великих утворень. Автори [1] відмічають, що до кінця фізичні процеси спікання є незрозумілими, і потрібні подальші дослідження.

Одним із основних факторів, які впливають на якість каналів, є напрям будівництва. Він визначається кутом між поверхнею порошку та віссю каналу (рис. 2). Від напрямку будівництва залежить деформація січення та шорсткість. В ряді випадків для усунення деформації вносяться коригування в комп'ютерну модель будівництва каналу.

На рис. 3 показана залежність деформації круглого каналу від напрямку будівництва [4]. Із рисунка видно, що при зміні напрямку будівництва від горизонтального до вертикального форма каналу трансформується від овальної до круглої.

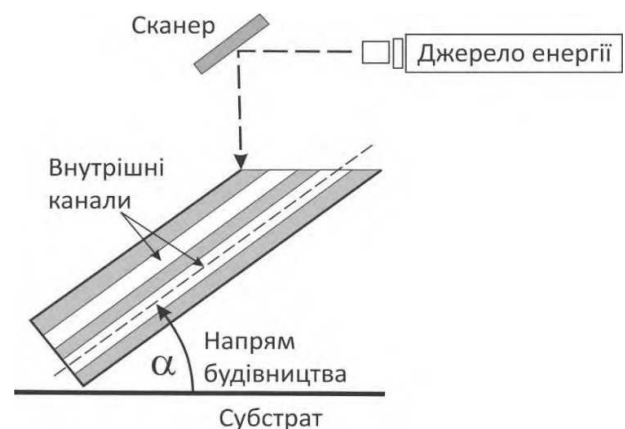


Рис. 2. Напрямок будівництва [1]

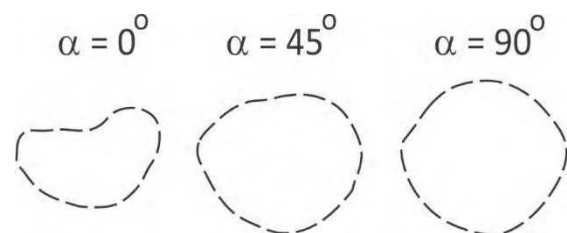


Рис. 3. Залежність геометричної деформації круглого каналу від напрямку будівництва [4]

Вимірювання шорсткості методом комп'ютерної томографії в круглому каналі діаметром ~ 1 мм при різних напругах будівництва, показало, що вона суттєво знижується при підвищенні кута будівництва від 0° до 60° (рис. 4, а). В діапазоні від 60° до 90° вона залишається приблизно незмінною.

Теплообмін і гідравлічний опір малорозмірних АТ каналів

На даний час є невелика кількість експериментальних досліджень порівняння теплообміну та гідравлічного опору гладких каналів і каналів, виконаних АТ технологією, з постійним поперечним січенням. В [5] представлені дані по теплообміну в прямокутному АТ каналі. В [6] отримані коефіцієнти опору і теплообміну для квадратного АТ каналу з еквівалентним діаметром $0,5$ мм і середньоарифметичною шорсткістю $R_a = 20$ μm , і зроблено порівняння зі стандартними співвідношеннями для ламінарного режиму. Перехід від ламінарного режиму до турбулентного відбувався при $Re_d = 600$. В літературі багато даних по течії в шорстких каналах, але мало даних по каналах міліметрового розміру з високими значеннями відносної шорсткості.

Автори роботи [7] вперше дослідили гідравлічний опір та теплообмін в міліметрових АТ каналах. В експериментах [8] досліджено вплив напрямку будівництва на структуру течії. В обох дослідженнях середньоарифметична шорсткість складала $\sim 25 \mu\text{m}$. Експерименти

показали, що навіть при малих числах Рейнольдса є вплив шорсткості на гідравлічний опір та теплообмін. Було показано, що відомі співвідношення для розрахунку гідравлічного опору та теплообміну не підходять для такої високої шорсткості. В роботі [7] було проаналізовано ряд масштабних факторів, і було зроблено висновок, що краще за все для узагальнення даних підходить значення середньоарифметичної шорсткості R_a . С підвищенням шорсткості інтенсифікація опору та теплообміну зростає. Перехід відбувається при $700 < Re < 2000$, інтенсифікація теплообміну узгоджується з інтенсифікацією гідравлічного опору.

Наведена в роботі [1] залежність інтенсифікації теплообміну від фактору підвищення опору (рис. 5) показує значний розкид даних. Це, в першу чергу, пов'язано з недостатньою прогнозованістю якості та величини шорсткості. Можна бачити тенденцію, що після досягнення певного рівня f/f_0 інтенсифікація теплообміну перестає зростати.

Вплив напрямку будівництва на гідравлічний опір та теплообмін

Оскільки структура поверхонь каналів суттєво залежить від напрямку будівництва, даний фактор також вносить суттєвий внесок у гідравлічний опір та теплообмін. На рис. 4 б, в наведено залежності факторів підвищення гідравлічного опору та інтенсифікації теплообміну від напрямку будівництва при $Re = 20000$ [4]. Як вид-

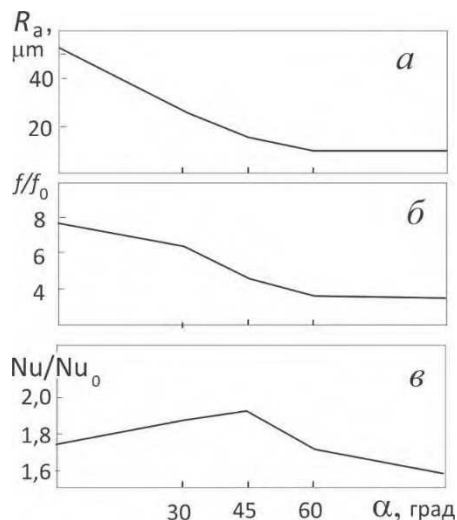


Рис. 4. Вплив напрямку будівництва на середньоарифметичну шорсткість (а), фактор підвищення опору (б) та інтенсифікацію теплообміну (в) для $d_e = 1$ мм, $Re = 20000$ [4]

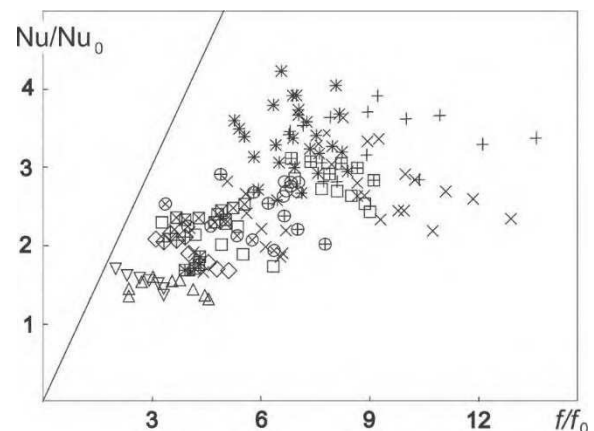


Рис. 5. Залежність інтенсифікації теплообміну від фактору підвищення гідравлічного опору для АТ каналів квадратного та круглого перерізів [1]. Лінія – аналогія Рейнольдса

но із рисунка, з підвищенням кута будівництва фактор підвищення опору монотонно знижується, а фактор інтенсифікації теплообміну має максимум в діапазоні від 30° до 45° . Оскільки зі зростанням кута величина шорсткості знижується, максимум теплообміну можна пояснити зміною виду шорсткості. Це вказує на необхідність детального вивчення морфології поверхні, рівня сплавлення частинок з поверхнею, який впливає на процес передачі теплоти теплопровідністю. Даний результат дозволяє отримувати канали з підвищеною теплогідралічною досконалістю.

Співвідношення для розрахунку гідравлічного опору і теплообміну в АТ каналах

В [9] запропоновано співвідношення для розрахунку гідравлічного опору та теплообміну в АТ каналах. Досліджувались канали прямокутного перерізу, виконані при напрямі $\alpha = 45^\circ$, з еквівалентним діаметром від 0,4 до 1,26 мм, з відносною шорсткістю R_a/d_e до 0,025. Розглядалися різні характерного розміру шорсткості, і в результаті було вибрано середньоарифметичну шорсткість R_a , яка дає найменший розкид даних.

Для розрахунку гідравлічного опору використано співвідношення Колбрука для гідравлічного опору при турбулентному режимі з урахуванням пісочної шорсткості K_s :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \cdot \lg \left(\frac{K_s/d_e}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

При підстановці в це співвідношення експериментальних даних по коефіцієнту гідравлічного АТ каналів були визначені «віртуальні» значення пісочної шорсткості K_s і зіставлені з вимірними значеннями середньоарифметичної шорсткості. В результаті була отримана емпірична залежність, яка зв'язує пісочну та середньоарифметичну шорсткість:

$$\frac{K_s}{d_e} = 18 \frac{R_a}{d_e} - 5 \quad (3)$$

Дане співвідношення пригодно при $R_a/d_e > 0,028$. Таким чином, використовуючи співвідношення (2) і (3), можна розраховувати коефіцієнт гідравлічного опору АТ каналів.

Для відомого коефіцієнту гідравлічного опору в роботі [9] запропоновано співвідношення для розрахунку теплообміну в АТ каналах:

$$\text{Nu} = \frac{(\text{Re}^{0,5} - 29) \cdot \text{Pr} \cdot \sqrt{f/8}}{0,6 \cdot (1 - \text{Pr}^{2/3})} \quad (4)$$

Розрахунок по співвідношенням (2--4) дає розкид даних до 30%, і співвідношення (3) потребує подальшого уточнення. Крім цього, воно розроблено лише для прямокутного каналу з напрямом будівництва 45° . В роботі [1] дається уточнене співвідношення:

$$\frac{K_s}{d_e} = 11 \frac{R_a}{d_e} \quad (5)$$

Воно дозволяє знизити середню погрішність розрахунку до величини $\pm 12\%$.

Дослідження різних форм каналів

З появою адитивних технологій розробники отримали значно більшу свободу в проектуванні систем охолодження у порівнянні з традиційним литтям. Виникла необхідність у більш детальному дослідженні різних форм каналів, зокрема, багатокутних, яким до цього часу не приділялось багато уваги. Форма каналу впливає на вторинні течії, які призводять до відмінності теплообміну і опору.

В дослідженнях [11] отримані дані по втратах тиску і теплообміну в прямих каналах з круглим, гексагональним, п'ятикутним, еліптичним, ромбічним, прямокутним, трапецеподібним, трикутним поперечними сиченнями з однаковим периметром. Також вивчалась морфологія поверхонь, з використанням комп'ютерної томографії. Середньоарифметична шорсткість змінювалась від $5 \mu\text{m}$ до $30 \mu\text{m}$. На горизонтальних поверхнях вона була суттєво вищою, ніж на вертикальних. Відношення R_a/d_e складало величину $0,0037 \dots 0,015$.

Найбільший теплообмін показали канали квадратного і трапецеподібного перерізу. Залежність інтенсифікації теплообміну від фактору підвищення гідравлічного опору (рис. 7) показує, що еліпс, ромб, круг, шестикутник та п'ятикутник мають менший опір при такому ж числі Нуссельта, як у прямокутника та трикутника.

Всі варіанти знаходяться у проміжку між ромбом та квадратом, Еліпс, шестикутник, круг, ромб і п'ятикутник при тому ж числі Нуссельта, що у прямокутника і трикутника, мають більш низький опір.

В роботі [11] досліджувались хвилеподібні по довжині АТ канали прямокутного поперечного перерізу, з різною довжиною хвилі (рис. 7, а). Відносна шорсткість R_a/d_e складала $0,015 \dots 0,018$.

Такі канали дозволяють суттєво інтенсифікувати теплообмін (рис. 8) – у 2 рази у порівнянні з прямими АТ каналами. Запропоновані також переривчасті хвилеподібні канали (рис. 7, б) [1], з метою покращення теплогідралічної характеристики.

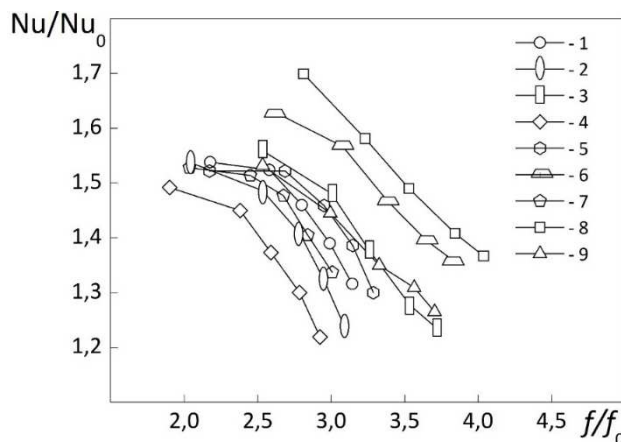


Рис. 6. Інтенсифікація теплообміну в залежності від фактору підвищення опору у прямих каналах різного поперечного перерізу [10]:

1 – круг; 2 – еліпс; 3 – прямокутник; 4 – ромб; 5 – шестикутник;
6 – трапеція; 7 – п'ятикутник; 8 – квадрат; 9 – трикутник

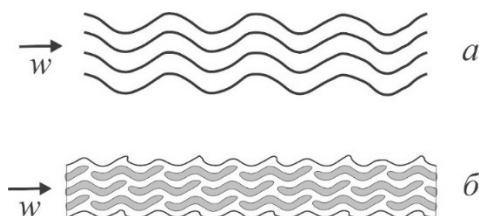


Рис. 7. Хвилеподібні канали (а) [12], та переривчасті хвилеподібні канали (б) [1]

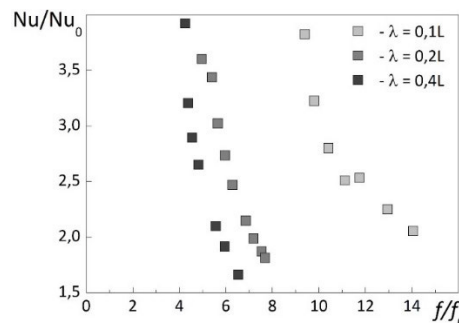


Рис. 8. Інтенсифікація теплообміну у хвилеподібних каналах (рис. 7,а) в залежності від фактору підвищення опору [11]

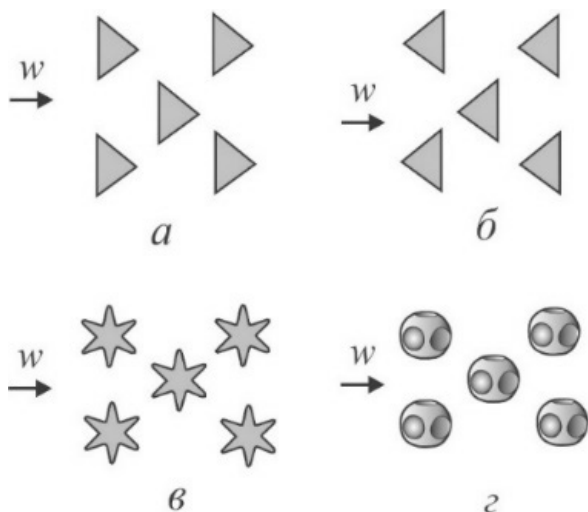


Рис. 9. АТ канали з ребрами трикутного перерізу (а, б), перерізу у вигляді зірки (в), а також у вигляді сфери з лунками (г) [12]

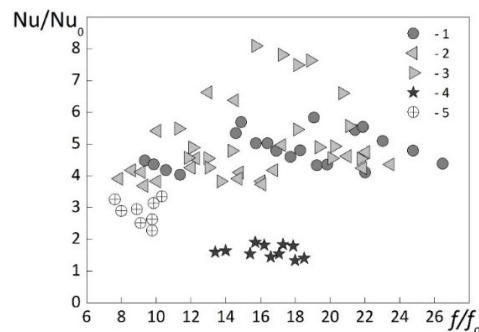


Рис. 10. Інтенсифікація теплообміну в каналах з ребрами різного перерізу [12]: 1 – круглі циліндричні ребра; 2 – ребра трикутного перерізу з вершиною до потоку; 3 – ребра трикутного перерізу гранню до потоку; 4 – ребра з перерізом у вигляді зірки; 5 – ребра сферичної форми з лунками

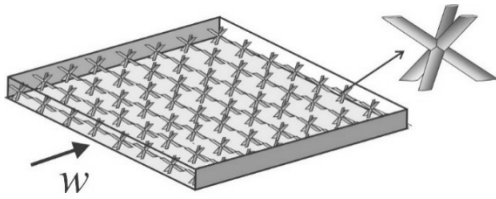


Рис. 11. Плоский АТ канал з решіткою всередині

Канали з суцільними ребрами і з внутрішньою решіткою

В роботі [2] досліджувались АТ канали з суцільними циліндричними ребрами круглого перерізу (рис. 1), а в [12] – с циліндричними ребрами трикутного перерізу, перерізу у вигляді зірки, а також сферичних ребер з лунками на поверхні сфери (рис. 9). Реалізовані на практиці дані складні геометрії показують широкі можливості адитивних технологій, які є недосяжними для традиційних методів. Такі канали дозволяють досягати дуже високої інтенсифікації теплообміну (рис. 10).

В роботі [14] досліджувались плоскі АТ канали з внутрішніми гратчастими структурами (рис. 11) двох типів, які відрізняються ступенем загромодження каналу.

На рис. 12 показана залежність інтенсифікації теплообміну від фактору підвищення опору для АТ каналів з двома різними варіантами внутрішньої решітки – зменшим та більшим рівнями загромодження перерізу. Як видно із рисунка, такі канали забезпечують високий рівень інтенсифікації теплообміну, але мають дуже високі гідравлічні втрати.

Теплогідравлічна характеристика АТ міні-каналів

На рис. 13 приведена залежність параметра аналогії Рейнольдса від фактору підвищення опору для АТ каналів. Як видно із рисунка, прямолінійні канали всіх досліджених форм укладаються на одну залежність, яка є близькою до нижньої граничної кривої, яка описує обтікання поперечних ребер при високих числах Рейнольдса [14]. Такі канали мають порівняно низький гідравлічний опір.

Дані по каналам з суцільними ребрами мають великий розкид. Ряд точок знаходиться вище верхньої граничної лінії, побудованої для каналів, виконаних по традиційним технологіям, і які мають звичайний, характерний для таких технологій, рівень шорсткості поверхні [15].

Можна також відмітити дані по хвиляподібним каналам, які при низьких числах Рейнольдса знаходяться вище верхньої граничної лінії.

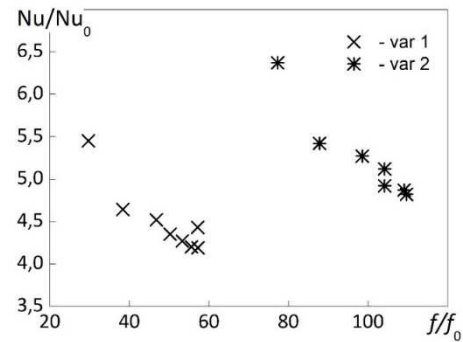


Рис. 12. Інтенсифікація теплообміну в залежності від фактору підвищення опору в каналах з внутрішньою решіткою [13]

Висновки

При лазерному синтезі можуть утворюватися різні види шорсткості, вид шорсткості залежить від технологічних параметрів процесу виготовлення виробу. Адитивна технологія має ліміт по якості внаслідок високого рівня шорсткості, цей ліміт оцінюється розмірами ~ 1 мм.

Основним параметром процесу є потужність лазерного променя: з підвищенням енергії, що подається, шорсткість спочатку знижується, проходить через мінімум, а потім починає зростати.

Одним із основних факторів, які впливають на якість каналів, є напрям будівництва. Від нього залежить ступінь деформації каналу та рівень шорсткості. Шорсткість суттєво знижується при підвищенні кута будівництва від 0 до 60° . В діапазоні від 60° до 90° вона залишається приблизно незмінною.

Відомі співвідношення для розрахунку гідравлічного опору і теплообміну не підходять для такої високої шорсткості. Дані по коефіцієнту опору АТ каналів показують, що навіть при малих числах Рейнольдса має місце внесок шорсткості. С підвищенням шорсткості інтенсифікація опору і теплообміну зростає. Перехід виникає при $700 < Re < 2000$.

Коефіцієнт опору АТ каналів суттєво вищий за коефіцієнт опору гладких каналів. Інтенсифікація теплообміну у хвиляподібних каналах у 2 рази перевищує інтенсифікацію у прямих каналах.

Канали з суцільними ребрами дозволяють досягати дуже високої інтенсифікації теплообміну (до 8).

Канали с внутрішніми решітками забезпечують високу інтенсифікацію, але мають найбільш високі гідравлічні втрати.

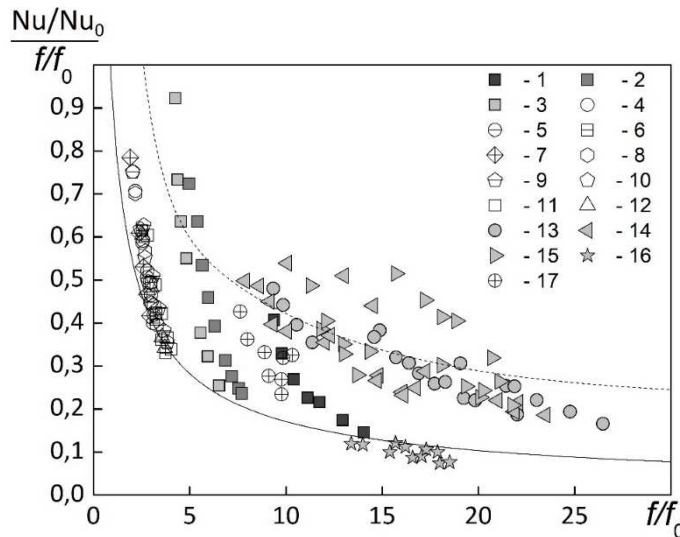


Рис. 13. Залежність параметра аналогії Рейнольдса від фактора підвищення опору для АТ каналів:
1 – 3 – хвиляподібні канали [13] з різною довжиною хвилі; 6 – 12 – прямолінійні канали з різними перерізами [11]; 13 – 17 – канали з суцільними ребрами різного перерізу [12]: 13– круглі циліндричні ребра; 14 – ребра трикутного перерізу з вершиною до потоку; 15 – ребра трикутного перерізу з гранню до потоку; 16 – ребра с перерізом у вигляді зірки; 17 – ребра сферичної форми з лунками. Нижня лінія – залежність із роботи [14] для обтікання поперечних ребер при високих числах Рейнольдса. Верхня гранична лінія – дані роботи [15] для каналів з низькою шорсткістю

Порівняння залежності фактору аналогії Рейнольдса від фактору підвищення опору показала, що прямолінійні канали всіх досліджених форм укладаються на одну залежність, яка є близькою до нижньої граничної лінії, і мають низький гідравлічний опір.

Дані по каналам з суцільними ребрами мають великий розкид. Ряд точок знаходиться вище верхньої граничної лінії, побудованої для каналів, виготовлених за допомогою традиційних технологій, і які мають низький рівень шорсткості

ЛІТЕРАТУРА

1. Thole, K. A., Lynch, S., Wildgoose, A. J. (2021) Review of Advances in Convective Heat Transfer Developed through Additive Manufacturing,” Adv. Heat Transf., 53, p. 249-325 <https://doi.org/10.1016/bs.aiht.2021.06.004>
2. Kirsch, K. L., and Thole, K. A. (2017) Pressure Loss and Heat Transfer for additively and conventionally manufactured pin fin arrays. Int. J. Heat Mass Transfer, 108 (Pt. B), p. 2502–2513.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.095>

3. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D. (2018) Effectiveness measurements of additively manufactured film cooling holes, J. Turbomach. 140 (1) 1–11. 011009. <https://doi.org/10.1115/1.4038182>
4. Wildgoose, A. J., Thole K.A., Sanders P. L., Wang L. Impact of additive manufacturing on internal cooling channels with varying diameters and build directions, J. Turbomach. 143 (7) (2021) 1–11. 071003. <https://doi.org/10.1115/1.4050336>
5. Parbat S.N., L. Yang L., Min, Z., M.K. Chyu M.K. (2019) Experimental and numerical analysis of additively manufactured coupons with parallel channels and inline wall jets, J. Turbomach. 141 (6) 1–10. 061004. <https://doi.org/10.1115/1.4041821>
6. Collins I.L., Weibel J.A., Pan L., Garimella S.V. Experimental characterization of a microchannel heat sink made by additive manufacturing, in: Proceedings of the 17th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITHERM 2018, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 171–177. Doi:10.1109/ITHERM.2018.8419588
7. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D. (2016) Roughness effects on flow and eat transfer for additively manufactured channels, J. Turbomach. 138 (5) (2016) 051008. DOI:10.1115/1.4032167

8. *Snyder J.C., Stimpson C.K., Thole K.A., Mongillo D.* (2016) Build direction effects on additively manufactured channels, *J. Turbomach.* 138 (5) 051006. <https://doi.org/10.1115/1.4032168>
9. *Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D.* (2017) Scaling roughness effects on pressure loss and heat transfer of additively manufactured channels, *J. Turbomach.* 139 (2) 021003. <https://doi.org/10.1115/1.4034555>
10. *Wildgoose A.J., Thole K.* Heat transfer and pressure loss of additively manufactured internal cooling channels with various shapes (2022) ASME Paper GT2022-82298 <https://doi.org/10.1115/1.4056775>
11. *Kirsch K.L., Thole K.A.* (2016) Heat transfer and pressure loss measurements in additively manufactured wavy microchannels, *J. Turbomach.* 139 (1) 011007. <https://doi.org/10.1115/1.4034342>
12. *Ferster, K. K., Kirsch, K. L., Thole, K. A.* (2018) Effects of geometry, spacing, and number of pin fins in additively manufactured microchannel pin fin arrays. *J. Turbomach.* 140(1): 011007. <https://doi.org/10.1115/1.4038179>
13. *Parbat S., Min Z., Yang L., Chyu M.* (2020) Experimental and numerical analysis of additively manufactured Inconel 718 coupons with lattice structure, *J. Turbomach.* 142 (6) (2020) 1–9. 061004. <https://doi.org/10.1115/1.4046527>
14. *Haasenritter A, Weigand B.* Optimization of the rib structure inside a 2-D cooling channel. 2004; ASME Paper GT2004–53187: 167-76. <https://doi.org/10.1115/GT2004-53187>
15. *Khalatov, AA, Borisov, II, Severin, SD, Romanov, VV, Spitsyn, VY, Dashevskyy, YY.* Heat Transfer, Hydrodynamics and Pressure Drop in the Model of a Blade Leading Edge Cyclone Cooling. 2011: ASME Paper GT2011–41150: 1057-1065. <https://doi.org/10.1115/GT2011-45150>

THERMO-HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF ADDITIVELY MANUFACTURED MINI-CHANNELS

Khalatov A.A.,¹ Borisov I.I.,² Kulishov S.B.³

¹Full member of the NAS of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist str. Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-7659-4234, e-mail: artem.khalatov1942@gmail.com

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist str. Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0001-7696-3901, e-mail: borisov010@gmail.com

³Industrial Machinery Manufacturing «Zorya-Mashproekt», Mykolayiv, 42a Bogoyavlensky av, Ukraine, e-mail: office@zorya.com.ua

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.3>

The aim of this work is to analyze the heat transfer, hydraulic resistance and thermo-hydraulic performance of a new type of heat exchange channels made by additive technology. The main factors affecting the quality of products and determining the heat transfer and hydraulic resistance of the channels are noted. Well-known ratios for calculating hydraulic resistance and heat transfer are not suitable for such high roughness. Data on the AT resistance coefficient of the channels show that even at low Reynolds numbers there is a contribution of roughness. With increasing roughness, the intensification of resistance and heat exchange increases. The transition occurs at $700 < Re < 2000$. Comparison of data on heat transfer augmentation and increase of hydraulic losses, as well as their thermo-hydraulic characteristics has been carried out. The hydraulic resistance coefficient of AT channels is significantly higher than the resistance coefficient of smooth channels. Heat transfer augmentation in wave-shaped channels is 2 times higher than augmentation in straight channels. Channels with pin fins allow to achieve a very high heat transfer augmentation (up to 8). Channels with internal grids provide high intensification, but have the highest hydraulic losses. The dependence of the Reynolds analogy factor on the resistance increase factor showed that the straight channels of all geometric forms fit on one dependence closed to the lower boundary line, and have a low hydraulic resistance. Data on channels with pin fins have a large spread. A number of points are above the upper boundary line, which refers to channels with low surface roughness.

Key words: additive technology, mini-channels, roughness, hydraulic resistance, heat transfer, thermo-hydraulic characteristics.

References 15, figures 13.

1. Thole, K. A., Lynch, S., Wildgoose, A. J. (2021) Review of Advances in Convective Heat Transfer Developed through Additive Manufacturing,” *Adv. Heat Transf.*, 53, p. 249-325 <https://doi.org/10.1016/bs.aiht.2021.06.004>

2. Kirsch, K. L., and Thole, K. A. (2017) Pressure Loss and Heat Transfer for additively and conventionally manufactured pin fin arrays. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 108 (Pt. B), p. 2502–2513.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.095>

3. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D. (2018) Effectiveness measurements of additively manufactured film cooling holes, *J. Turbomach.* 140 (1) 1–11. 011009. <https://doi.org/10.1115/1.4038182>

4. Wildgoose, A. J., Thole K.A., Sanders P. L., Wang L. Impact of additive manufacturing on internal cooling channels with varying diameters and build directions, *J. Turbomach.* 143 (7) (2021) 1–11. 071003. <https://doi.org/10.1115/1.4050336>

5. Parbat S.N., L. Yang L., Min, Z., M.K. Chyu M.K. (2019) Experimental and numerical analysis of additively manufactured coupons with parallel channels and inline wall jets, *J. Turbomach.* 141 (6) 1–10. 061004. <https://doi.org/10.1115/1.4041821>

6. Collins I.L., Weibel J.A., Pan L., Garimella S.V. Experimental characterization of a microchannel heat sink made by additive manufacturing, in: *Proceedings of the 17th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm 2018*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018, pp. 171–177. [DOI:10.1109/ITHERM.2018.8419588](https://doi.org/10.1109/ITHERM.2018.8419588)

7. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D. (2016) Roughness effects on flow and heat transfer for additively manufactured channels, *J. Turbomach.* 138 (5) (2016) 051008. [DOI:10.1115/1.4032167](https://doi.org/10.1115/1.4032167)

8. Snyder J.C., Stimpson C.K., Thole K.A., Mongillo D. (2016) Build direction effects on additively manufactured channels, *J. Turbomach.* 138 (5) 051006. <https://doi.org/10.1115/1.4032168>

9. Stimpson C.K., Snyder J.C., Thole K.A., Mongillo D. (2017) Scaling roughness effects on pressure loss and heat transfer of additively manufactured channels, *J. Turbomach.* 139 (2) 021003. <https://doi.org/10.1115/1.4034555>

10. Wildgoose A.J., Thole K. Heat transfer and pressure loss of additively manufactured internal cooling channels with various shapes (2022) *ASME Paper GT2022-82298* <https://doi.org/10.1115/1.4056775>

11. *Kirsch K.L., Thole K.A.* (2016) Heat transfer and pressure loss measurements in additively manufactured wavy microchannels, *J. Turbomach.* 139 (1) 011007. <https://doi.org/10.1115/1.4034342>
12. *Ferster, K. K., Kirsch, K. L., Thole, K. A.* (2018) Effects of geometry, spacing, and number of pin fins in additively manufactured microchannel pin fin arrays. *J. Turbomach.* 140(1): 011007. <https://doi.org/10.1115/1.4038179>
13. *Parbat S., Min Z., Yang L., Chyu M.* (2020) Experimental and numerical analysis of additively manufactured Inconel 718 coupons with lattice structure, *J. Turbomach.* 142 (6) (2020) 1–9. 061004. <https://doi.org/10.1115/1.4046527>
14. *Haasenritter A, Weigand B.* Optimization of the rib structure inside a 2-D cooling channel. 2004; ASME Paper GT2004–53187: 167-76. <https://doi.org/10.1115/GT2004-53187>
15. *Khalatov, AA, Borisov, II, Severin, SD, Romanov, VV, Spitsyn, VY, Dashevskyy, YY.* Heat Transfer, Hydrodynamics and Pressure Drop in the Model of a Blade Leading Edge Cyclone Cooling. 2011: ASME Paper GT2011–41150: 1057-1065. <https://doi.org/10.1115/GT2011-45150>

Отримано 19.02.2023

Received 19.02.2023