

УДК 621.438.016.4

doi: 10.32620/aktt.2026.4sup2.04

О. В. ШЕВЧУК^{1,2}, О. І. ТАРАСОВ²¹ АТ «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна² Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЇ ВИКОНАННЯ ОТВОРІВ ПЛІВКОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ЛОПАТОК ГАЗОВИХ ТУРБІН З ТЕПЛОЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОХОЛОДЖЕННЯ

*Об'єктом дослідження є процес плівкового охолодження на плоскій пластині. Предметом дослідження є вплив технології виконання отворів плівкового охолодження лопаток газових турбін із теплозахисним покриттям на ефективність охолодження. Розглядаються чотири варіанти виконання пари отвір-ТЗП та їхній вплив на ефективність охолодження. Першим варіантом є передова технологія виконання отворів перфорації крізь наявне ТЗП, що за формою рівнозначно отвору в лопатці без ТЗП. Другим варіантом є традиційна технологія нанесення ТЗП вже після виконання отворів, яка призводить до часткового блокування отворів перфорації та відхилення струменя повітря від поверхні, що охолоджується. Іншими варіантами є нанесення ТЗП після виконання отворів з утворенням неглибокої траншеї висотою 0,4D. У дослідженні розглядається дві форми траншеї: ідеальна й широка. Вищенаведені варіанти пар отвір-ТЗП розглядаються для чотирьох типів отворів: стандартний циліндричний отвір, зворотний (проти потоку) циліндричний отвір, а також фасонні отвори типу *laidback fan-shaped* з кутами розширення 7° (отвір 7-7-7) і 15°. Метою дослідження є визначення величини впливу різних варіантів виконання пари отвір-ТЗП на ефективність охолодження. Для досягнення цієї мети було обрано метод чисельного експерименту та проведено серію розрахунків за допомогою комерційного тривимірного CFD-розв'язувача Ansys Fluent 2024 R2 у стаціонарній постановці з використанням моделі турбулентності *k-ε realizable* з покращеною функцією стінки. За результатами проведеного аналізу можна констатувати, що як для прямого, так і для зворотного циліндричних отворів виконання траншеї в шарі ТЗП підвищує ефективність охолодження. Виконання траншеї в шарі ТЗП для отвору 7-7-7 має сенс лише при високих значеннях параметра вдуву $m > 1,5$. Для широкого віялового отвору з кутами розширення 15° при параметрах вдуву $m > 1,0$ спостерігається дуже високий негативний вплив від блокування отвору, водночас виконання траншеї демонструє суттєве підвищення ефективності охолодження даного типу отвору. Практична цінність дослідження полягає в можливості введення отриманих даних у методику розрахунку плівкового охолодження для більш точного прогнозування ефективності в залежності від наявної технології виконання отворів.*

Ключові слова: плівкове охолодження, ефективність охолодження, траншея, фасонний отвір, теплозахисне покриття, CFD, модель турбулентності, газова турбіна.

Вступ

Сьогодні теплозахисні покриття (ТЗП) на лопатках газотурбінних двигунів відіграють ключову роль у забезпеченні їхньої довговічності та надійності. Зростання робочих температур на вході в турбіну (до 2000 К), спричинене прагненням підвищити термодинамічну ефективність двигунів, накладає на матеріали лопаток високі теплові навантаження. У таких умовах саме ТЗП дозволяє зменшити тепловий потік до металу лопатки, запобігаючи високим температурам основного матеріалу та його передчасному вигоранню. Нажаль, традиційні сучасні технології виготовлення отворів плівкового охолодження, такі як EDM (electrical discharge machining) практично не дозволяють формувати отвори вже після нанесення ТЗП. Причиною цього є пошкодження шару

ТЗП унаслідок утворення зон термічного впливу й значне відшарування (деламінацію) керамічного покриття.

Проте аерокосмічна галузь уже дійшла до впровадження передових лазерних технологій, що дозволяють формувати отвори безпосередньо крізь вже нанесене покриття. S. Marimuthu та ін. [1] показали можливість формування похилих отворів плівкового охолодження в жароміцних сплавах із ТЗП за допомогою сучасного мілісекундного волоконного лазера QCW (Quasi-Continuous Wave), а в [2] порівняли його з технологією лазера WJG (Water-jet guided).

S. Wang та ін. [3] дослідили формування похилих отворів плівкового охолодження через вже нанесене теплозахисне покриття за допомогою пікосекундного лазера. Експериментально встановлено, що метод практично не викликає відшарування ТЗП, не



призводить до утворення значних зон термічного впливу та не спричиняє пошкодження основного матеріалу лопатки.

J. Niu та ін. [4] запропонували двоетапну технологію лазерного формування похилих отворів плівкового охолодження через вже нанесене ТЗП. Суть методу полягає в попередньому формуванні наскрізного отвору меншого діаметра з подальшим виконанням остаточного свердління. Попередній отвір забезпечує ефективніше видалення розплаву та зменшує накопичення тепла на межі між ТЗП і металом.

Ці передові технології ще не знайшли масового використання при виготовленні лопаток турбін ГТД і залишаються рідкісними та високовартісними, тому отвори плівкового охолодження в переважній більшості виконуються до нанесення ТЗП. Звісно, це створює ризик часткового перекриття вихідних перерізів отворів.

Робота R. Bunker [5] є однією з перших робіт, що експериментально дослідила негативний ефект від часткового блокування отворів плівкового охолодження як для циліндричного, так і для фасонного отворів. Були отримані перші кількісні результати щодо ступеня зниження ефективності плівкового охолодження.

F. Wang та ін. [6] наводять чисельне дослідження ефекту блокування перфораційного отвору плівкового охолодження при нанесенні ТЗП вже після виконання отворів з величинами блокування площі прохідного перетину $B = 10\%$ і $B = 20\%$ і порівняння з вихідним варіантом ("по кресленню"). Тут коефіцієнтом блокування отвору B є відношення товщини шару ТЗП на вихідній частині отвору до діаметра отвору, що виражене у відсотках. При параметрі вдуву $m = 0,5$ зниження осередненої по площі ефективності охолодження при блокуванні склало $15,2\%$ ($B = 10\%$) і $33,9\%$ ($B = 20\%$). При параметрі вдуву $m = 1,0$ зниження ефективності охолодження при блокуванні склало $31,9\%$ ($B = 10\%$) і $70,1\%$ ($B = 20\%$). При параметрі вдуву $m = 1,5$ зниження ефективності охолодження при блокуванні склало $34,7\%$ ($B = 10\%$) і $69,4\%$ ($B = 20\%$). Тобто при більш високих значеннях блокування отвору спостерігається більше зниження ефективності охолодження, що особливо видно при високих параметрах вдуву. Автори роблять висновок, що збільшення діаметра отвору до нанесення ТЗП може розв'язати проблему зниження ефективності плівкового охолодження, спричиненого блокуванням отвору.

Але блокування отворів може сприяти зміні форми вихідної частини отвору (нахилу отвору) і, як наслідок, прониканню плівки в газовий потік, у результаті чого ефективність охолодження й площа пок-

риття охолоджуваною плівкою знижуються. У такому випадку струмінь охолодного повітря відхиляється від проектного напрямку, що призводить до зниження ефективності плівкового охолодження.

На рисунку 1 представлено металографічне дослідження формування покриття в перфораційних отворах плівкового охолодження однієї з лопаток соплового апарата АТ «Івченко-Прогрес». Як видно з рисунка, на стінці внутрішньої поверхні отвору, запиленою керамічним покриттям, спостерігається плавне зменшення товщини шарів покриття від зовнішньої поверхні до внутрішньої порожнини.

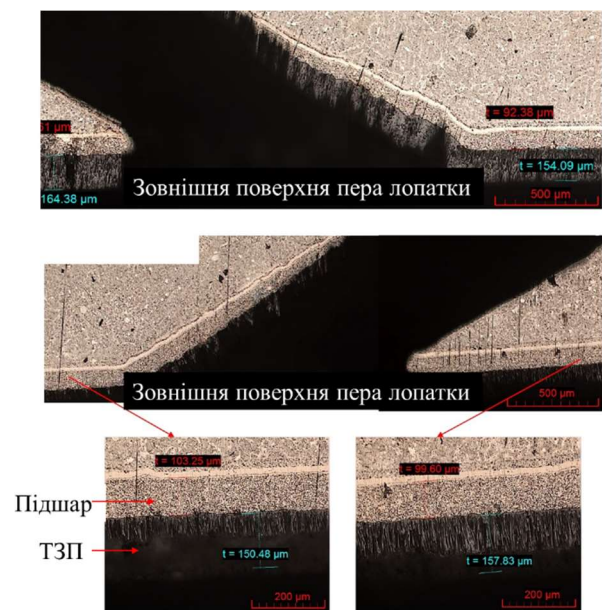


Рис. 1. Металографічне дослідження формування покриття лопатки АТ «Івченко-Прогрес» у перфораційних отворах плівкового охолодження (зверху отвір на кориті лопатки, знизу – отвір на спинці лопатки)

Тому виконання траншеї в шарі ТЗП уздовж ряду отворів перфорації виглядає перспективним. Така траншея може запобігти відхиленню струменя повітря внаслідок блокування отвору й не потребує поглиблення в матеріал лопатки, що могло б знизити її характеристики міцності. У теорії траншея створює тонке й рівномірне покриття охолоджувача над поверхнею, що охолоджується.

Огляд сучасних статей вказує на те, що більшість траншей, що використовуються в дослідженнях, мають відносну глибину $0,75D$. Це вважається оптимальною глибиною траншеї. Доказом цього є робота L. Fischer та ін. [7], у якій за допомогою адаптованої моделі $k-\omega$ GEKO на плоскій пластині провели багатопараметричну оптимізацію траншей, що розташована в шарі ТЗП. Похідною для оптимізації була v-подібна форма траншеї, що наведена

Р. Schreivogel та ін. [8]. Дев'ять геометричних параметрів варіювалися, щоб забезпечити 3D форму траншеї та знайти її оптимальний дизайн. Глибина траншеї варіювалася в діапазоні $0,5D \dots 0,75D$. Отримана внаслідок оптимізації форма мала відносну висоту $0,74D$, що є близьким до максимуму значенням.

Але при сумарній товщині під шарів покриття біля $0,25$ мм (рисунк 1) відношення h/d при стандартному отворі плівкового охолодження діаметром $0,5$ мм дорівнюватиме лише $0,5$. Робочі лопатки, як правило, мають ще меншу товщину під шарів покриття, що дорівнює $0,15 \dots 0,2$ мм. У такому випадку відношення h/d при стандартному отворі плівкового охолодження діаметром $0,5$ мм дорівнюватиме $0,3 \dots 0,4$, що в 2 рази менше за оптимальні значення. При збільшенні діаметрів отвору така траншея стає вже малоефективною. Зменшення діаметрів отвору до мінімальних $0,3^{+0,1}$ мм дозволяє виконувати траншеї на робочих лопатках з відношенням h/d , не більшим за $0,4$.

У даному дослідженні для всіх типів отворів використовується сумарна товщина шарів ТЗП, яка дорівнює $0,4D$, що одночасно має місце як для соплових, так і для робочих лопаток турбіни. Метою цього дослідження є чисельне визначення величини впливу різних варіантів виконання пари отвір-ТЗП на ефек-

тивність охолодження та визначення доцільності застосування неоптимальних траншей малої глибини. При цьому дослідження ефективності траншей виконується як для ідеальної траншеї, так і для реалістичної (широкої) траншеї. Подібне дослідження виконувалось D. Kistenmacher та ін. у роботі [9] для товщини шару покриття $1,2D$.

Опис розрахункової моделі

Розрахунки виконувались у комерційному тривимірному CFD - розв'язувачі Ansys Fluent 2024R2, що базується на тиску (pressure-based solver).

За результатами оглядової роботи [10], RANS модель турбулентності $k-\epsilon$ realizable використовується в задачах плівкового охолодження на плоских пластинах з фасонними отворами найчастіше. Дослідження впливу сіткової збіжності й валідація розрахункової моделі наведені в роботі [11]. За результатами валідації розрахункової моделі обрана модель із поліедральною розрахунковою сіткою розміром близько 5,8 млн. елементів і моделлю турбулентності $k-\epsilon$ realizable з покращеною функцією стінки зі стандартними коефіцієнтами. Геометричні параметри розрахункового домену на прикладі класичного циліндричного отвору наведено на рис. 2.

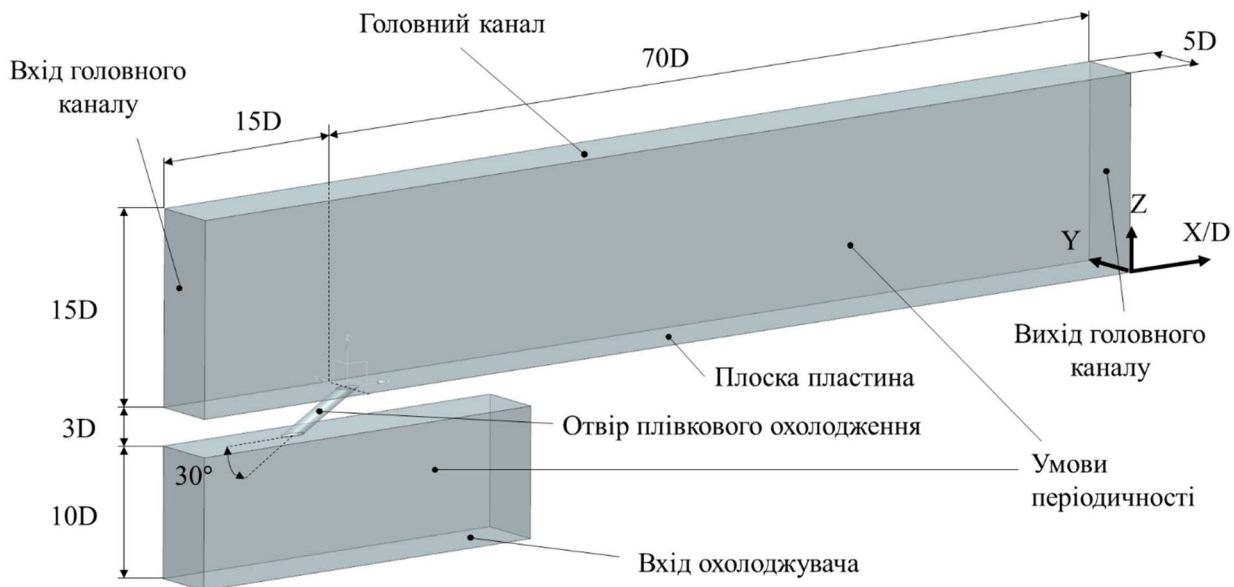


Рис. 2. Геометрична модель плівкового охолодження зі стандартним круглим отвором плівкового охолодження з діаметром $D = 10$ мм

Швидкість основного потоку становила 20 м/с, а його температура дорівнювала 12 °С. Абсолютний тиск у каналі основного потоку був рівним $1,025$ атмосфери. Температура повітря, що подавалося в отвори, дорівнювала 42 °С. Усі отвори плівкового

охолодження розташовано під кутом $\alpha = 30^\circ$ з кроком $5D$. Величина діаметра D витратної ділянки дорівнює 10 мм, а товщина стінки L_w , у якій розташований отвір, дорівнює $3D$. Інтенсивність турбулентності основного потоку дорівнює $0,5$ %.

У цьому дослідженні розглядаються 4 типи отворів із циліндричною ділянкою L_c діаметром 10 мм: круглий отвір, направлений по потоку (модель 1), круглий отвір, направлений проти потоку (модель 2), отвір 7-7-7 з кутами розширення 7° (модель 3), складний отвір типу laidback fan-shaped з двома ділянками розширення 15° (модель 4). Кожен з отворів розглядається у чотирьох виконаннях: отвір, виконаний крізь покриття або покриття відсутнє (варіант 1), традиційне нанесення ТЗП з частковим блокуванням отвору як на рис. 1 (варіант 2), виконання ідеальної траншеї в шарі ТЗП шириною, що дорівнює ширині отвору на виході (варіант 3), виконання реалістичної широкої траншеї в шарі ТЗП (варіант 4). Фрагмент поліедральної розрахункової сітки для отвору 7-7-7 у виконанні з реалістичною траншеєю представлено на рис. 3.



Рис. 3. Фрагмент поліедральної розрахункової сітки розміром 5,8 млн. елементів для отвору 7-7-7 у виконанні з реалістичною траншеєю глибиною 0,4D

Геометричні властивості розглянутих отворів представлено на рис. 4 і в табл. 1. Фрагменти ділянок сіткових моделей усіх розглянутих у дослідженні варіантів представлено на рис. 5.

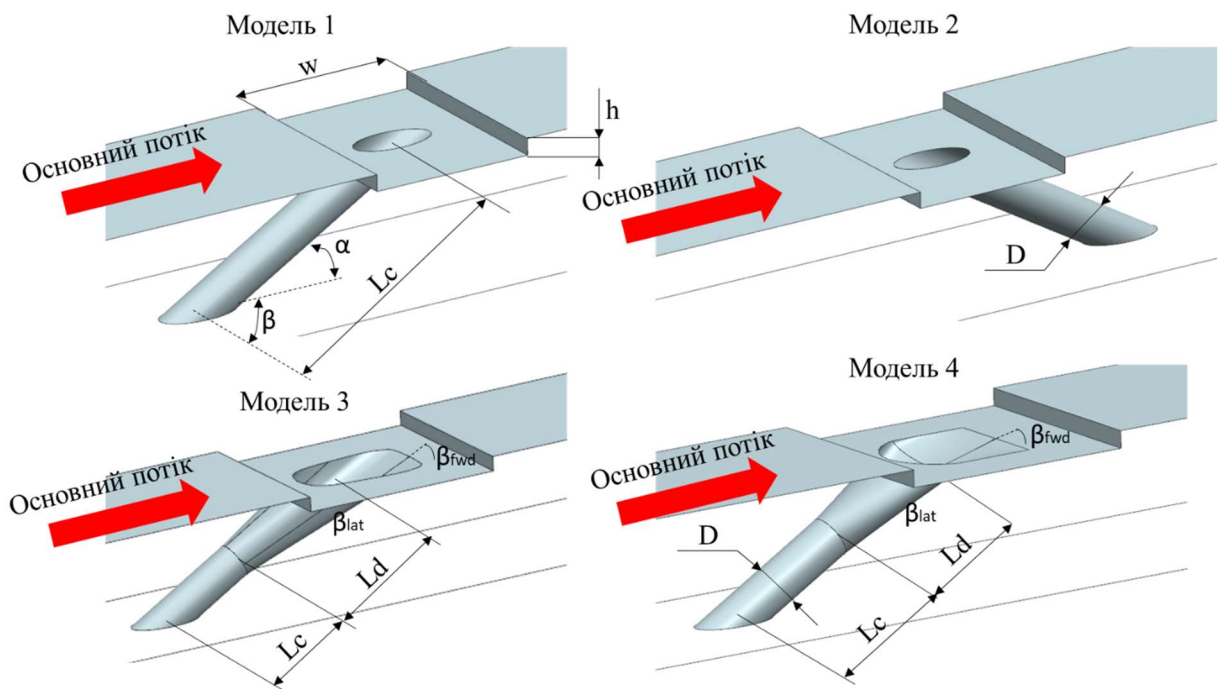


Рис. 4. Геометрія отворів плівкового охолодження

Таблиця 1

Геометричні параметри отворів плівкового охолодження

№	α	β	β_{lat}	β_{fwd}	L_c	L_d	Варіанти виконання ТЗП					
							Вар. 2		Вар. 3		Вар. 4	
							w	h	w	h	w	h
Модель 1	30°	0°	0°	0°	6D	0	0	0,4D	2D	0,4D	4D	0,4D
Модель 2		180°	0°	0°	6D	0			2D		4D	
Модель 3		0°	7°	7°	2,5D	3,5D			3,5D		5,5D	
Модель 4		0°	15°	15°	3D	3D			3D		5,5D	

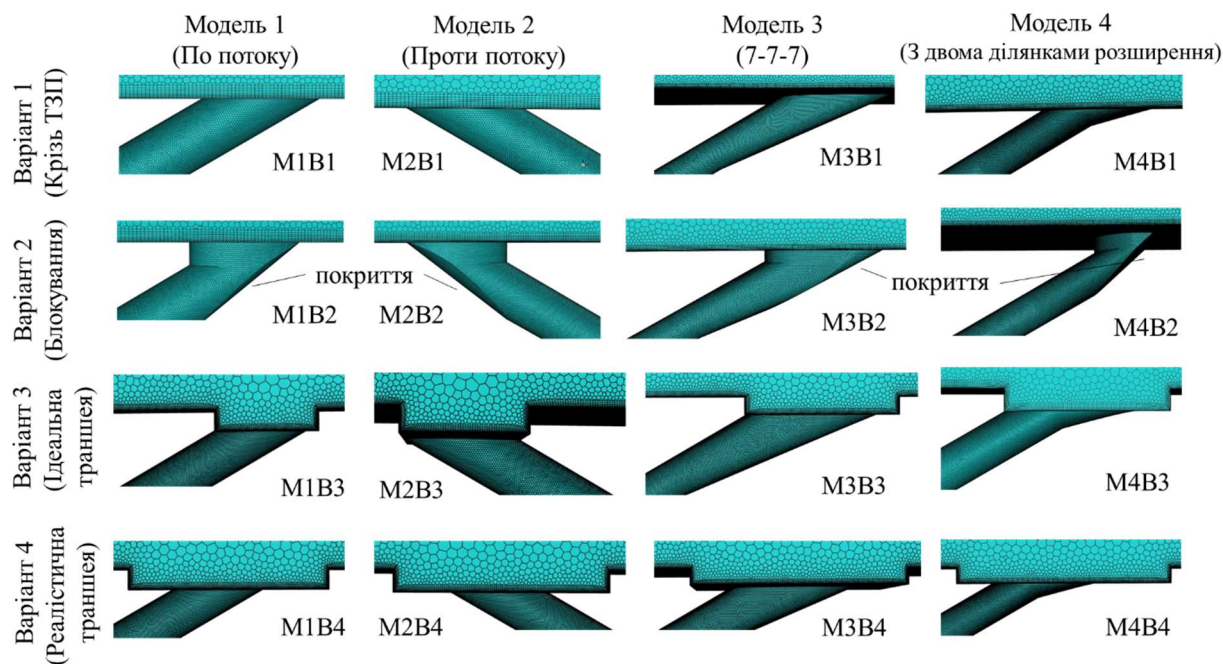


Рис. 5. Фрагменти сіткових моделей отворів плівкового охолодження та варіантів їхнього виконання

Результати

Розрахунки виконувались для чотирьох моделей M1 – M4, чотирьох варіантів технології виконання отворів B1 – B4 (рис. 5) і чотирьох значень параметру вдуву $m = 0,25; 0,50; 1,0; 1,5$ (1)

$$m = \frac{\rho_o c_o}{\rho_\infty c_\infty}, \quad (1)$$

де ρ_o і ρ_∞ – густина охолоджувача й основного потоку відповідно, c_o і c_∞ – швидкості охолоджувача й основного потоку відповідно. Для розрахунку параметра вдуву використовувались осереднені по масі (weighted averaged) швидкість і густина охолоджувача на циліндричній частині отвору.

Результати розподілу бічної ефективності η_{lat} (2) плівкового охолодження за повздовжньою координатою X/D представлено на рис. 6 – 9.

$$\eta_{lat} = \frac{T_\infty - T_{пл}}{T_\infty - T_o}, \quad (2)$$

де T_∞ – температура основного потоку, $T_{пл}$ – температура плівки, яка є сумішшю газу та охолоджувальної рідини, тобто повітря з температурою T_o . Осереднення η_{lat} виконувалось за 26 точками в бічному напрямі по кожній координаті X/D .

Контролюючим параметром щодо збіжності розрахунку, окрім нев'язок, була середня по площині температура плоскої пластини, тобто зміна загальної

температури поверхні між ітераціями була не повинна перевищувати $0,01^\circ\text{C}$.

Згідно розрахунків, звичайні циліндричні отвори, що направлені за потоком (M1B1), мають перевагу над зворотно розташованими циліндричними отворами (M2B1) при малих параметрах вдуву. При $m = 1$ і вище вже зворотно розташовані отвори мають перевагу в ефективності охолодження порівняно з прямоточними. Такі результати повністю корелюють із тими, що отримано J. Wang [12]. Профільовані отвори (M3B1 і M4B1) демонструють вищу бічну ефективність охолодження порівняно з циліндричними отворами при всіх параметрах вдуву m . Зі зростанням m ефективність охолодження фасонних отворів збільшується. Цей ефект більш наочно спостерігається для моделі M4 з двома ділянками розширення. Результати розподілу ефективності плівкового охолодження на адіабатичній поверхні плоскої пластини представлено для малого й великого значень m для моделі 4 для всіх варіантів виконання на рис. 10 – 11.

Традиційний спосіб нанесення ТЗП, що призводить до часткового блокування отвору (M1B2), дещо знижує бічну ефективність охолодження від циліндричного отвору порівняно з M1B1. Ця величина зниження ефективності охолодження оцінюється як $0,01 \dots 0,02$ для шару ТЗП товщиною $0,4D$. Проте для зворотного виконання отвору M2B2 блокування не має ніякого негативного впливу на ефективність. Для отвору типу 7-7-7 (M3B2) негативний вплив часткового блокування проявляється при параметрах вдуву $m > 1$. Найвищий негативний ефект від часткового

блокування отворів проявляється для фасонного отвору з двома ділянками розширення М4В2. Падіння бічної ефективності охолодження для отвору М4В2 порівняно з М4В1 є суттєвим вже при параметрі вдуву $m = 0,5$ і зі зростанням m ця величина падіння ефективності стає більшою. Причиною цього є перекриття теплозахисним покриттям вихідної ділянки отвору з кутом розширення β_{fwd} .

Траншея в шарі ТЗП нівелює ефект блокування та нахил отвору, а також створює тонке й рівномірне покриття охолоджувача над поверхнею, що охолоджується. Ідеальна траншея підвищує бічну ефективність плівкового охолодження як для прямого (М1В3), так і для зворотного (М2В3) циліндричних отворів на всьому діапазоні параметрів вдуву m на величину приблизно до 0,05 порівняно з В2. Однак виконання траншеї не має сенсу при умові наявності фасонних отворів при їхній роботі при малих m . Так, для моделі М3В3 позитивний ефект від виконання такої траншеї можна спостерігати при $m = 1,5$ і вище. При $m = 1,0$ ефект від виконання траншеї навколо нульовий. При $m = 0,25$ і $m = 0,5$ траншея навіть погіршує бічну ефективність охолодження отвору 7-7-7. Для моделі М4В3 позитивний ефект від виконання такої траншеї порівняно з варіантом В2 можна спостерігати при $m = 0,5$ і вище. Слід підкреслити, що при більшому значенні m виконання траншеї для моделі М4В3 є більш оправданим. При малому $m = 0,25$ траншея погіршує бічну ефективність охолодження отвору з двома ділянками розширення (рис. 10). У реальних лопатках технологія виконання отворів перфорації плівкового охолодження потребує розгляду більш ширшої траншеї. Виконання реалістичної траншеї (М1В4 і М2В4) дещо знижує ефективність порівняно з В3. Для отвору М3В4 ширина траншеї суттєво не впливає на ефективність охолодження. Для отвору М4В4 при $m = 1$ і вище при $X/D > 5$ ефективність охолодження порівняно з В3 навіть зростає.

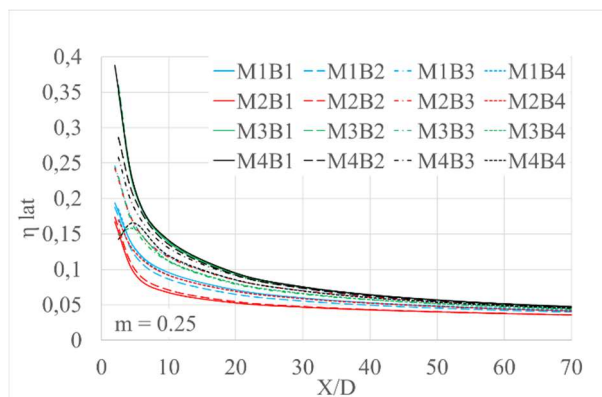


Рис. 6. Результати розподілу бічної ефективності плівкового охолодження за повздовжньою координатою X/D при $m = 0,25$

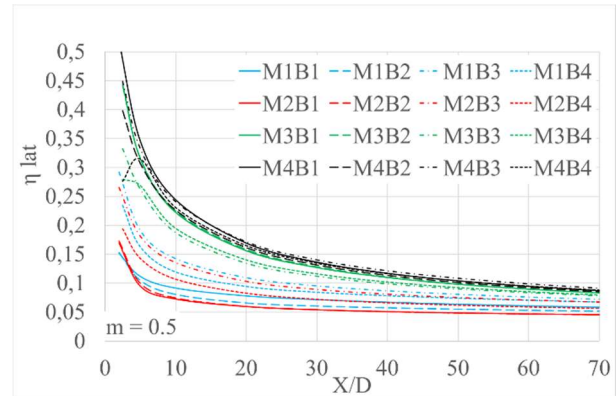


Рис. 7. Результати розподілу бічної ефективності плівкового охолодження за повздовжньою координатою X/D при $m = 0,5$

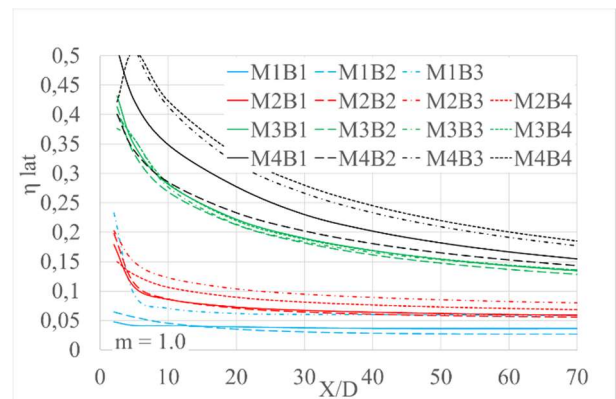


Рис. 8. Результати розподілу бічної ефективності плівкового охолодження за повздовжньою координатою X/D при $m = 1,0$

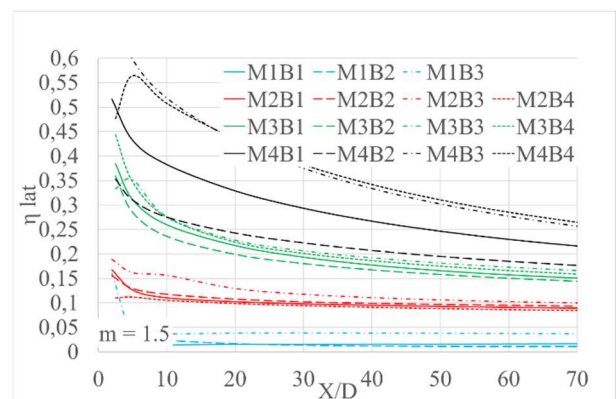


Рис. 9. Результати розподілу бічної ефективності плівкового охолодження за повздовжньою координатою X/D при $m = 1,5$

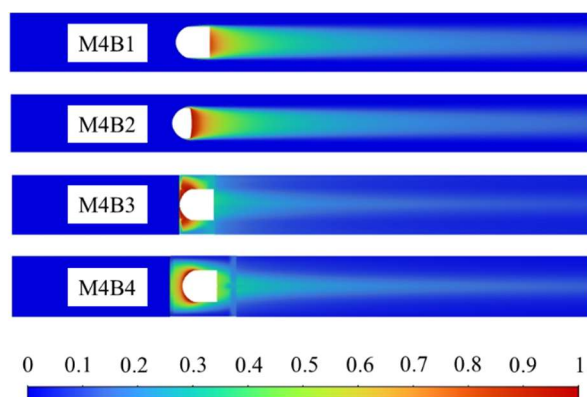


Рис. 10. Результати розподілу ефективності плівкового охолодження для моделі 4 при $m = 0,25$

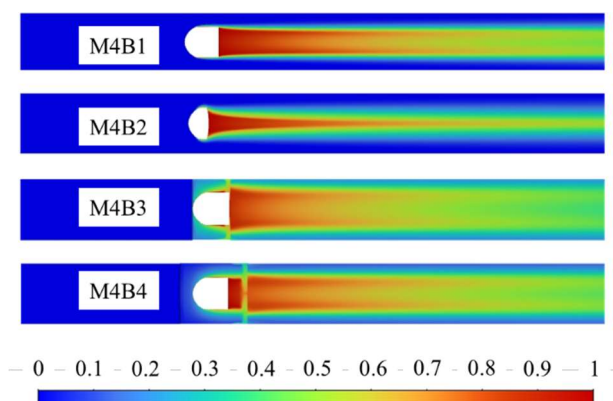


Рис. 11. Результати розподілу ефективності плівкового охолодження для моделі 4 при $m = 1,5$

Таким чином, у більшості випадків виконання траншеї в шарі покриття позитивно впливає на ефективність охолодження не тільки завдяки забезпеченню більш рівномірного охолодження, а й завдяки відсутності часткового блокування отвору при традиційній схемі нанесення ТЗП. Широка траншея в більшості випадків погіршує ефективність охолодження порівняно з ідеальною траншеєю. Ще одним недоліком широкої траншеї є більша площа непокритої ТЗП ділянки лопатки. Тому слід якомога максимально зменшувати ширину w траншеї.

Висновки

У рамках проведеного розрахункового дослідження було отримано результати розподілу бічної ефективності плівкового охолодження для чотирьох форм отворів і чотирьох варіантів виконання пари отвір-ТЗП. Можна виділити наступні основні результати розрахунків:

— циліндричні отвори, що направлені за потоком, мають перевагу над зворотно розташованими циліндричними отворами при малих параметрах

вдуву. При $m = 1$ і вище вже зворотно розташовані отвори мають перевагу в ефективності охолодження порівняно із прямоточними;

— профільовані отвори демонструють вищу бічну ефективність охолодження порівняно з циліндричними отворами при всіх параметрах вдуву m . З ростом m ефективність охолодження фасонних отворів збільшується;

— традиційний спосіб нанесення ТЗП, що призводить до часткового блокування отвору, дещо знижує бічну ефективність охолодження порівняно з циліндричним отвором. Ця величина зниження ефективності охолодження оцінюється як $0,01 \dots 0,02$ для шару ТЗП товщиною $0,4D$. Проте для зворотного виконання отвору блокування не має ніякого негативного впливу на ефективність. Найвищий негативний ефект від часткового блокування отворів проявляється для фасонного отвору з двома ділянками розширення;

— ідеальна траншея в шарі покриття товщиною $0,4D$ підвищує бічну ефективність плівкового охолодження як для прямого, так і для зворотного циліндричних отворів на всьому діапазоні параметрів вдуву m на величину приблизно до $0,05$ порівняно з варіантом традиційного методу нанесення ТЗП. Для фасонних отворів позитивний ефект від виконання такої траншеї можна спостерігати при високих параметрах вдуву, в той час як при низьких параметрах вдуву виконання траншеї погіршує ефективність охолодження таких отворів;

— широка (реалістична) траншея в більшості випадків погіршує ефективність охолодження порівняно з ідеальною траншеєю.

— при $m \geq 1$ найвищі значення ефективності показала модель 4 із двома ділянками розширення у виконанні з траншеєю в шарі кераміки.

Внесок авторів: формулювання мети та постановка задач дослідження – **О. В. Шевчук, О. І. Тарасов**, пошук, огляд і аналіз інформаційних джерел – **О. В. Шевчук**, проведення CFD досліджень – **О. В. Шевчук**, аналіз результатів дослідження, формулювання висновків – **О. В. Шевчук, О. І. Тарасов**, написання й редагування статті – **О. В. Шевчук**.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автор прочитав і погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Delamination-free millisecond laser drilling of thermal barrier coated aerospace alloys / S. Marimuthu, B. Smith, A. Kiely, Y. Liu // *Journal of Laser Applications*. – 2019. – Vol. 31, iss. 4. – 14 p. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.5090781>
2. Marimuthu, S. Water-jet guided laser drilling of thermal barrier coated aerospace alloy / S. Marimuthu, B. Smith // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2021. – Vol. 113, iss. 1-2. – P. 177–191. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06584-0>
3. Investigation on thermal barrier coating damages for ultrafast laser drilling of cooling holes / S. Wang, Y. Hu, Y. Zuo et al. // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, iss. 15. – 14 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155395>
4. Reduction of TBC delamination through a two-step strategy in nanosecond laser drilling of inclined film cooling holes / J. Niu, J. Yang, J. Tan et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2025. – Vol. 36. – P. 7219–7227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.05.003>
5. Bunker R. S. Effect of partial coating blockage on film cooling effectiveness / R. S. Bunker // *ASME Turbo Expo 2000: Power for Land, Sea, and Air, Munich, Germany, 8–11 May 2000*. – 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/2000-gt-0244>
6. Numerical investigation of effects of blockage, inclination angle and hole-size on film cooling effectiveness at concave surface / F. Wang, J. Pu, J. Wang, W. Xia // *ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Virtual, Online, 21–25 September 2020*. – 14 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/gt2020-15182>
7. Optimizing the trench shaped film cooling design / L. Fischer, D. James, S. Jeyaseelan, M. Pfitzner // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2023. – Vol. 214. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheat-masstransfer.2023.124399>
8. Schreivogel, P. Study of an optimized trench film cooling configuration using scale adaptive simulation and infrared thermography / P. Schreivogel, B. Kröss, M. Pfitzner // *ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, Düsseldorf, Germany, 16–20 June 2014*. – 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/gt2014-25144>

9. Kistenmacher, D. A. Realistic trench film cooling with a thermal barrier coating and deposition / D. A. Kistenmacher, F. T. Davidson, D. G. Bogard // *Journal of Turbomachinery*. – 2014. – Vol. 136, iss. 9. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4026613>

10. Shevchuk, O. V. Analysis of modern numerical approaches to film cooling simulation on a flat surface: trends, errors and correlation dependencies / O. V. Shevchuk // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2025. – Vol. 28, iss. 4. – P. 11–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2025.04.011>

11. Shevchuk, O. Development of a validated computational fluid dynamics model for film cooling efficiency calculation / O. Shevchuk, O. Tarasov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2026. – Vol. 2, iss. 1 (140). – P. 78–90. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.356502>

12. Wang, J. Effect and optimization of backward hole parameters on film cooling performance by Taguchi method / J. Wang, C. Liu, Z. Zhao et al. // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – Vol. 214. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112809>

References

1. Marimuthu, S., Smith, B., Kiely, A., Liu, Y. Delamination-free millisecond laser drilling of thermal barrier coated aerospace alloys. *Journal of Laser Applications*, 2019, vol. 31, iss. 4. 14 p. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.5090781>
2. Marimuthu, S., Smith, B. Water-jet guided laser drilling of thermal barrier coated aerospace alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, vol. 113, iss. 1-2, pp. 177–191. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06584-0>
3. Wang, S., Hu, Y., Zuo, Y., Yang, Z., Jiang, R. Investigation on thermal barrier coating damages for ultrafast laser drilling of cooling holes. *Materials*, 2023, vol. 16, iss. 15. 14 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155395>
4. Niu, J., Yang, J., Tan, J., Qin, Z., Xu, H. Reduction of TBC delamination through a two-step strategy in nanosecond laser drilling of inclined film cooling holes. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2025.05.003
5. Bunker, R. S. Effect of partial coating blockage on film cooling effectiveness. *ASME turbo expo 2000: power for land, sea, and air, Munich, Germany, 8–11 May 2000*. 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/2000-gt-0244>
6. Wang, F.-q., Pu, J., Wang, J.-h., Xia, W.-d. Numerical investigation of effects of blockage, inclination angle and hole-size on film cooling effectiveness at concave surface. *ASME turbo expo 2020: turbomachinery technical conference and exposition, Virtual, Online, 21–25 September 2020, American Society of Mechanical Engineers*. 14 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/gt2020-15182>

7. Fischer, L., James, D., Jeyaseelan, S., Pfitzner, M. Optimizing the trench shaped film cooling design. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, vol. 214. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124399>
8. Schreivogel, P., Kröss, B., Pfitzner, M. Study of an optimized trench film cooling configuration using scale adaptive simulation and infrared thermography. *ASME turbo expo 2014: turbine technical conference and exposition, Düsseldorf, Germany, 16–20 June 2014*. 11 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/gt2014-25144>
9. Kistenmacher, D. A., Todd Davidson, F., Borgard, D. G. Realistic trench film cooling with a thermal barrier coating and deposition. *Journal of Turbomachinery*, 2014, vol. 136, iss. 9. 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4026613>
10. Shevchuk, O. V. Analysis of modern numerical approaches to film cooling simulation on a flat surface: trends, errors and correlation dependencies. *Journal of Mechanical Engineering*, 2025, vol. 28, iss. 4, pp. 11–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/pmach2025.04.011>
11. Shevchuk O., Tarasov O. Development of a validated computational fluid dynamics model for film cooling efficiency calculation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2026, vol. 2, iss. 1 (140), pp. 78–90. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.356502>
12. Wang, J., Liu, C., Zhao, Z., Baleta, J., Sundén, B. Effect and optimization of backward hole parameters on film cooling performance by Taguchi method. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 214, 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112809>

Надійшла до редакції 10.07.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 01.08.2026.

Дата ухвалення 19.08.2026, дата публікації 04.09.2026

STUDY OF THE EFFECT OF THE HOLE-DRILLING TECHNOLOGY FOR FILM COOLING OF GAS TURBINE BLADES WITH A THERMAL BARRIER COATING ON COOLING EFFICIENCY

Oleg Shevchuk, Oleksandr Tarasov

The object of this study is the film cooling process on a flat plate. The subject of this study is the effect of film-cooling hole design in gas turbine blades with a thermal barrier coating on cooling efficiency. Four variants of the hole-thermal barrier coating pair are considered, along with their impact on cooling efficiency. The first option is an advanced technology for drilling holes through the existing TBC, which is geometrically equivalent to a hole in a blade without TBC. The second option is the traditional method of applying the TBC after the holes have been drilled, which results in partial blockage of the holes and deflection of the air jet away from the surface being cooled. Other options include applying the TBC after drilling the holes, creating a shallow trench with a depth of $0.4D$. The study examines two types of trenches: ideal and wide. The above-mentioned hole-TBC pair configurations are considered for four types of holes: a standard cylindrical hole, a backward (upstream) cylindrical hole, and shaped holes of the laidback fan-shaped type with expansion angles of 7° (7-7-7 hole) and 15° . The objective of this study is to determine the extent to which different designs of the hole-TBC pair affect cooling efficiency. To achieve this goal, a numerical simulation method was chosen, and a series of numerical experiments was conducted using the commercial 3D CFD solver Ansys Fluent 2024 R2 in a steady-state configuration, employing the $k-\varepsilon$ realizable turbulence model with enhanced wall function. Based on the results of the analysis, it can be concluded that for both forward and backward cylindrical holes a trench in the TBC layer improves cooling efficiency. A trench in the TBC layer for hole 7-7-7 is only beneficial at high blowing ratio ($m > 1.5$). For a wide fan-shaped hole with expansion angles of 15° and blowing ratio of $m > 1.0$, a very significant negative effect from hole blockage is observed; at the same time, the use of a trench demonstrates a substantial increase in the cooling efficiency of this type of hole. The practical value of this study lies in the ability to incorporate the data obtained into the film-cooling calculation methodology to more accurately predict efficiency for the specific hole-drilling technology used.

Keywords: film cooling, cooling efficiency, trench, shaped hole, thermal barrier coating, CFD, turbulence model, gas turbine.

Шевчук Олег Володимирович – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; провідний інженер, АТ «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Тарасов Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Oleg Shevchuk – Postgraduate, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”; Lead Engineer, JSC “Ivchenko-Progress”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: Shevoleg1984@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1837-6287.

Oleksandr Tarasov – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine, alx.tarasov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5952-3258.