

ГОЛОБОРОДЬКО Володимир

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0001-8614-6606>

e-mail: holoborodkovolodymyr@gmail.com

ПЕРПЕРІ Людмила

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-6840-0241>

e-mail: perperi.l.m@op.edu.ua

ВЕРИФІКАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЗОВНІШНЬОГО ТОЧІННЯ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ЗОНИ РІЗАННЯ

У статті розглянуто підхід до оцінювання достовірності тепловізійного контролю процесів різання на операції зовнішнього точіння без використання мастильно-охолоджувального технологічного середовища. З цією метою було визначено підхід до моделювання теплового стану зони різання на основі рівняння теплопровідності з урахуванням початкових та крайових умов. Запропонована спрощена математична модель використовувалась для верифікації експериментальних температур отриманих методом тепловізійного контролю. Порівняльний аналіз отриманих експериментальних результатів методом тепловізійного контролю з теоретично обчисленими температурами отриманими з моделі, шляхом розрахунку похибок, підтвердив доцільність застосування термографічного методу при обробці матеріалів.

Ключові слова: процес різання, температура різання, неруйнівний контроль, тепловізор

GOLOBORODKO Volodymyr, PERPERI Liudmilla

Odessa National Polytechnic University

VERIFICATION OF THERMOGRAPHIC MONITORING RESULTS OF EXTERNAL TURNING THERMAL PROCESSES BASED ON MATHEMATICAL MODELLING OF THE THERMAL STATE IN THE CUTTING ZONE

The article presents an approach to evaluating the reliability of thermographic monitoring of cutting processes during external turning operations performed without the use of a lubricating and cooling technological medium. For this purpose, a modelling approach was defined for the thermal state of the cutting zone based on the heat conduction equation, incorporating initial and boundary conditions. The proposed simplified mathematical model was employed to verify the experimental temperatures obtained through thermographic monitoring. The comparative analysis of experimental results obtained by infrared thermographic measurements with the theoretical temperatures calculated from the model, based on error estimation, confirmed the applicability of the thermographic method in the machining of materials.

Keywords: cutting process, cutting temperature, non-destructive testing, thermal imaging camera

Стаття надійшла до редакції / Received 16.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.05.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Велика кількість досліджень відомих вчених присвячено вивченню питань оцінювання кількості тепла, яке виникає внаслідок механічної обробки різних матеріалів [1 - 3]. Відомо, що теплові явища, які виникають у процесі різання визначають температуру в зоні різання, котра впливає на характер пластичної деформації, утворення стружки, наріст, усадку стружки, сили різання та мікроструктуру поверхневого шару оброблюваної деталі [1, 3]. Про ще більший вплив температури різання на інтенсивність зношування та стійкість інструменту зазначено в роботах багатьох дослідників процесу різання [4, 5]. З цього випливає неабиякий вплив температури різання на якість готової продукції та забезпечення конкурентоспроможності в умовах економії витрат на різальний та оброблюваний матеріали. Одним з найпоширеніших методів механообробки є точіння. У процесі зовнішнього точіння відбувається інтенсивне утворення тепла в зоні контакту інструмента з заготовкою та стружкою. Температура в цій зоні впливає на знос інструменту, якість обробленої поверхні та стабільність отримуваних розмірів. Для вимірювання температури в зоні різання використовують багато різноманітних методів, оснований на різних фізичних принципах. Варто відмітити, що частина з них, дає лише обмежену інформацію про розподіл температури. Більшість з цих методів відносяться до контактних методів вимірювання та за частую потребують додаткової зміни конструкції різального інструменту, наприклад, просвердлювання отворів для розміщення в ньому термопар [2, 4]. Тому, доцільніше використовувати безконтактні методи вимірювання, які відносяться до методів неруйнівного

контролю. Останнім часом, дослідники з питань вивчення теплових процесів механообробки, приділяють увагу тепловізійним методам контролю, які дозволяють оперативно оцінювати розподіл температур на поверхні, однак слід зауважити, що такі роботи типу „case study” більш носять практичний характер та спрямовані дати відповідь на конкретні дослідницькі питання [6 - 8]. Для більш глибокого розуміння теплових процесів дослідники застосовують методи математичного моделювання. Математичне моделювання доцільно виконувати на етапі підготовки перед проведенням тепловізійних досліджень, оскільки воно дозволяє сформувати уявлення про очікуваний розподіл температур, визначити зони найбільшого інтересу та оптимізувати умови експерименту. Це забезпечує підвищення інформативності та метрологічної достовірності результатів тепловізійного спостереження, дозволяючи інтерпретувати дані з урахуванням фізичних закономірностей процесу.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою даного дослідження є верифікація результатів тепловізійного контролю теплових процесів зовнішнього точіння шляхом їх порівняння з математичною моделлю, що описує фізичні закономірності теплоутворення та теплообміну в зоні різання.

Для досягнення поставленої мети, необхідно вирішити наступні завдання:

- ✓ провести аналіз літературних джерел з визначеної тематики;
- ✓ визначити підходи до математичного моделювання теплових процесів у зоні різання;
- ✓ сформулювати постановку математичної задачі з послідовним аналітичним розв’язанням для температури різання;
- ✓ провести порівняння експериментально отриманих результатів методом тепловізійного контролю з теоретично обчисленими температурами, отриманими з моделі.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Питанням визначення температури різання присвячено багато наукових досліджень. Це обумовлено доведеним впливом температури що виникає в зоні різання як на точність та якість виготовлення деталей машин, їх експлуатаційні характеристики при роботі в механізмах та вузлах через вплив температури на формування поверхневих напружень так і на стійкість різального інструменту [1, 6, 7]. Досі виникає інтерес дослідників до цієї тематики, пов’язаний з постійною появою нових оброблюваних та інструментальних матеріалів, нових технологій обробки, технологічного обладнання й вимірювальних технологій і приладів. Так автори статі [9], описують дослідження температури різання при обробці сталей після термообробки твердістю 45 HRC і вище стандартними пластинами з кераміки з покриттям TiN за допомогою моделювання методом кінцевих елементів із застосуванням програмного забезпечення DEFORM 3D у поєднанні з експериментальними дослідженнями. Оцінювалися вплив геометричних параметрів різальних пластин на температуру вимірювану тепловізором FLUKE Ti400. Результати моделювання підтверджені експериментальними даними з допустимою похибкою. Авторами досліджувалися вплив радіуса заокруглення пластини, переднього кута γ та кута нахилу різальної кромки λ . Встановлено при обробці термооброблених сталей керамічними пластинами вирішальний вплив має кут нахилу різальної кромки λ .

Робота [10] присвячена моделюванню середньої температури системи інструмент-заготовка при обробці загартованих сталевих заготовок твердосплавними пластинами з покриттям (TiCN, WC, Co). Порівняння даних отриманих моделюванням здійснювалися проведенням досліджень термпарою, для запобігання виникнення паразитної термоелектрорушійної сили (ТЕРС) розширення вставки інструмента було виготовлено за допомогою стрижня з карбіду, в якості тепловода використано графітовий блок, що окружався фарфоровою трубкою. Моделюванням за допомогою дисперсійного аналізу (ANOVA) досліджувався вплив твердості оброблюваного матеріалу, подачі та швидкості різання при сухому різанні та із застосуванням мастильно-охолоджувальної рідини. Встановлено вирішальний вплив твердості оброблюваного матеріалу на температуру різання 67% при сухій обробці та 64% із застосуванням МОР.

Автори статті [11] представили розробку математичної моделі розподілу температури сів в різальній пластині на основі локально одномірної схеми Самарського, що дозволяє вивчати вплив температури різання на процес зношування різального інструменту.

Аналіз вищенаведених сучасних досліджень присвячених дослідженню впливу як різних параметрів на виникнення температури різання так і її вплив на точність та якість деталі, стійкість та знос інструменту підтверджує актуальність цієї тематики. Всіх дослідників об’єднує загальне судження про необхідність моделювання теплових процесів різання з метою прогнозування температури і розподілом її між інструментом, стружкою і заготовкою. Це дозволяє заздалегідь оцінити теплові навантаження без проведення дорогартісних, а іноді і складних експериментів та заощадити час.

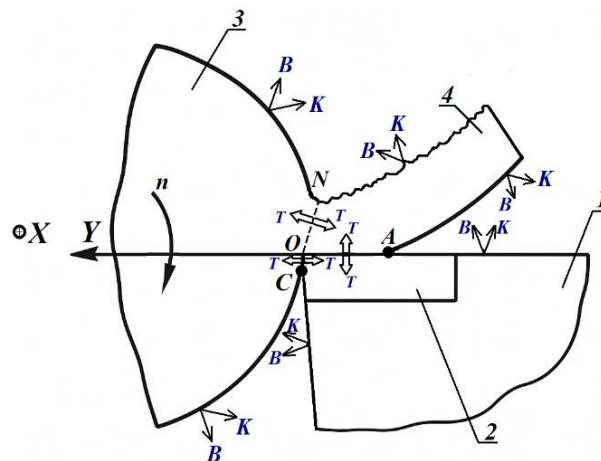
ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

В наукових дослідженнях або при виконанні аналізу використовують наступні підходи до моделювання теплових процесів у зоні різання: аналітичне моделювання, сутність якого полягає у застосуванні

математичних формул для розрахунку температури на основі фізичних законів; комбіноване моделювання, сутність якого полягає у поєднанні аналітичних рівнянь з емпіричними або експериментальними коефіцієнтами; чисельне моделювання, сутність якого пов'язано з просторово-часовим моделюванням температурних полів для інструмента, заготовки та стружки; емпіричне моделювання, сутність якого полягає у застосуванні статистичних залежностей температури від параметрів різання (швидкість, подача, матеріал тощо) з послідовним регресійним аналізом; гібридне моделювання, сутність якого полягає у поєднанні аналітичних, чисельних і експериментальних підходів.

Вибір підходу до моделювання теплових процесів у зоні різання залежить від типу та умов обробки, поставлених завдань дослідження й призначення отриманої моделі. У науково-практичних дослідженнях одним з ефективних способів є поєднання чисельного моделювання з експериментальною верифікацією. Пов'язано це з можливістю адаптації до реальних виробничих умов, підвищенням точності без надмірної обчислювальної складності при моделюванні та подальшою інтеграцією з методами контролю (наприклад, з використанням термопар). Однак вони можуть впливати на саме поле температур та ускладнювати експериментальне дослідження. Натомість, застосування тепловізного контролю дозволяє здійснювати безконтактні вимірювання розподілу температури у режимі реального часу, що робить цей метод перспективним для вивчення теплових процесів при точінні.

Для визначення теплового балансу процесу різання при точінні необхідно описати теплові явища, які виникають в процесі різання та саме вони визначають температуру в зоні різання. Проаналізуємо тепловий стан технологічної підсистеми на операції зовнішнього точіння. Як правило, в зоні обробки (рисунк 1) виділяють три основних види теплопередачі: теплопровідність, конвекція та випромінювання.



X, Y – напрямки осей, n – частота обертання заготовки, T – теплопровідність, K – конвекція, B – випромінювання, 1 – різальний інструмент, 2 – різальна пластина, 3 – заготовка, 4 – стружка
Рис. 1. Тепловий стан технологічної підсистеми на операції зовнішнього точіння (види теплообміну, опрацьовано на основі [12, 13])

Генерація тепла в зоні контакту різального інструменту з поверхнею заготовки відбувається: на ділянці ON – за рахунок пластичного деформування зони зсуву (первинне джерело); на ділянці OA – за рахунок роботи сил тертя між передньою поверхнею різальної пластини та внутрішньою поверхнею стружки (вторинне джерело); на ділянці OC – за рахунок роботи сил тертя між задньою поверхнею різальної пластини та оброблюваною поверхнею заготовки (третинне джерело). Передача тепла між передньою поверхнею різальної пластини та внутрішньою поверхнею стружки, між задньою поверхнею різальної пластини та оброблюваною поверхнею заготовки, а також на ділянці ON відбувається за рахунок теплопровідності, T. Передача тепла між передньою та задньою поверхнями різального інструменту з навколишнім середовищем, оброблюваною поверхнею заготовки, а також поверхнями стружки з навколишнім середовищем відбувається за рахунок теплообміну конвекцією K та випромінюванням B.

Відомо, що для визначення теплового балансу процесу різання при точінні користуються тривимірною моделлю теплового поля зі зміною у часі $\Theta = f_{\Theta}(x, y, z, \tau)$ та для розрахунку температури в твердих тілах використовують диференціальне рівняння теплопровідності [1, 3, 12]:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right),$$

де Θ – температура в будь-якій точці тіла з координатами x, y, z в будь-який момент часу τ ;

$a = \frac{\lambda}{\rho c}$ – температуропровідність.

Математичне моделювання здійснюється з використанням рівняння теплопровідності, визначенням початкових та крайових умов в зоні різання. Такий підхід дозволяє отримати картину теплового стану та порівняти з результатами отриманої радіометричної інформації за допомогою термограм. Варто відмітити, що в метрології та моделюванні процес верифікації використовується для перевірки правильності реалізації моделі.

Враховуючи, що відповідно до мети дослідження має бути перевірено достовірність результатів тепловізійного контролю (радіометрична інформація з термограми), а термограма дає 2D зображення, то приймаємо спрощення для опису – двовимірну нестационарну математичну модель із зміною за координатами x (напрямок повздовжньої осі заготовки або напрямку подачі), y (радіальний напрямок до центру заготовки) та τ – часу. Тобто рівняння теплопровідності матиме вигляд:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right),$$

де $\theta = f_{\theta}(x, y, \tau)$.

Геометрія джерела теплоти, яке надходить в зоні різання може бути визначено через довжину активної різальної кромки $x \in [-l/2, l/2]$, де l — довжина активної різальної кромки:

$$l = \frac{a_p}{\sin \varphi}.$$

де a_p – глибина різання, мм;

φ – головний кут в плані, °.

Початкові та крайові умови:

Початкова температура – $\theta_0 = f_{\theta}(x, y, \tau_{\text{навк.сер.}})$.

Крайова умова II роду з просторовою залежністю за y :

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = q(x, y, \tau).$$

де $q(x, y, \tau)$ – функція, яка описує розподіл теплового потоку не тільки відносно повздовжньої осі x (напрямок подачі), але і в радіальному напрямку y (напрямок глибини різання).

Крайова умова III роду (умова на нескінченності) означає, що далеко від джерела тепла температура знов наближається до початкового значення θ_0 . Враховуючи, що нас цікавить зона різання (контакт різального інструменту із заготовкою), варто ще розглянути залежності, які описують види теплообміну T, K, B (рис. 1).

Теплопровідність:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla \theta,$$

де $\vec{q}$ – вектор густини теплового потоку, Вт/м²;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·°C);

$\nabla \theta$ – градієнт температури (зміна температури у просторі), °C/м.

Конвекція [14]:

$$q_{\text{conv}} = h \cdot A \cdot (\theta - \theta_{\text{навк.сер.}}),$$

де q_{conv} – тепловий потік за рахунок конвекції, Вт;

h – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·K);

A – поверхня теплообміну, м²;

θ – температура поверхні, °C;

$\theta_{\text{навк.сер.}}$ – температура навколишнього середовища, °C.

Випромінювання [14]:

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (\theta^4 - \theta_{\text{навк.сер.}}^4).$$

де q_{rad} – тепловий потік випромінювання, Вт;

ε – коефіцієнт випромінювання;

σ – стала Стефана-Больцмана: $5,670 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·°K⁴).

Варто зазначити, що у залежності для випромінювання слід використовувати значення температури в Кельвінах.

Основне джерело тепла в процесі різання – механічна робота сили різання. Залежність для визначення теплової потужності Q , Вт:

$$Q = F_c \cdot v,$$

де F_c – сила стружкоутворення, Н;

v – швидкість різання, м/с;

Сила стружкоутворення F_c може бути знайдена за допомогою залежності через рівнодіючу складових сил різання R . Залежності для визначення цих сил було отримано за допомогою діаграми Мерченета для зовнішнього точіння:

$$R = \frac{F_z}{\cos(90-\beta-\phi)},$$
$$F_c = R \cdot \sin \beta,$$

де F_z – тангенційна складова сили різання, Н;

$\beta = \arctan(\mu)$ – кут тертя, °;

μ – коефіцієнт тертя;

ϕ – кут зсуву, °;

Основне тепло Q витрачається на нагрів матеріалу. Як відомо, переважна частина цієї теплоти йде до стружки, яка утворюється з певною швидкістю. Тобто маса матеріалу, що утворюється за одиницю часу m [12]:

$$m = \rho \cdot V_{\text{стр}},$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м³.

Формування об'єму стружки $V_{\text{стр}}$ в площині зсуву за секунду:

$$V_{\text{стр}} = a_p \cdot f \cdot v,$$

де v – швидкість різання, м/с;

f – подача, м/об;

Фізична модель, в спрощеній формі, базується на формулі теплового балансу [15]:

$$\Delta\theta = \frac{Q}{m \cdot c},$$

де c – питома теплоємність матеріалу.

Температурний приріст визначається для двох джерел тепла:

- первинна зона – у якій враховується тепло від роботи затрачуваної на деформацію зрізаного шару, зона пружно-пластичної деформації зсуву ($\Delta\theta_c$);
- вторинна зона – у якій враховується тепло виділене від роботи затрачуваної на подолання сил тертя стружки о передню поверхню різальної пластини ($\Delta\theta_T$).

Відповідно:

- для первинної зони:

$$\Delta\theta_c = \frac{Q_c}{m \cdot c} = \frac{\eta \cdot F_c \cdot v}{\rho \cdot a_p \cdot f \cdot v \cdot c} = \frac{\eta \cdot F_c}{\rho \cdot a_p \cdot f \cdot c};$$

- для вторинної зони:

$$\Delta\theta_T = \frac{Q_T}{m \cdot c} = \frac{\eta \cdot F_T \cdot v_{\text{стр}} \cdot t}{m \cdot c} = \frac{\eta \cdot F_T \cdot v_{\text{стр}} \cdot l / v_{\text{стр}}}{\rho \cdot a \cdot b \cdot l \cdot c} = \frac{\eta \cdot F_T}{\rho \cdot a \cdot b \cdot c}$$

де $F_T = R \cdot \cos \beta$ – сила тертя стружки о передню поверхню різальної пластини;

η – частка від повного тепловиділення ($\eta=0,45 - 0,95$);

$v_{\text{стр}} = v/r$ – швидкість стружки, м/с;

r – коефіцієнт вкорочення стружки;

a – товщина зрізаного шару, м;

b – ширина зрізаного шару, м.

З отриманих формул видно, що температура залежить від подачі (товщини зрізаного шару), глибини (ширини зрізаного шару). Але реальна форма стружки змінюється за формою за різних умов різання при обробці одного і того ж матеріалу, що також впливає на формування температурного поля в зоні різання. Це пов'язано з тим, що площа зсувної поверхні змінюється із зміною a_p та f не лише лінійно. Для різних матеріалів, в залежності від співвідношення величин подачі/глибини/швидкості може утворюватися стружка від елементної до суцільної, яка має інший контакт з різальною пластинкою інструменту, інакше проводить тепло та змінює площу джерела тепла. Тож відповідно, доцільно ввести коригуючий коефіцієнт K_c для врахування зміни геометрії зрізаного шару при зміні режимів різання, який враховує вплив зміни форми стружки та дозволить уточнити розрахунок складових $\Delta\theta_c$ і $\Delta\theta_T$. За умови отримання типової форми стружки – $K_c = 1$, за умови більш високих величин подач та швидкостей відбувається зміна форми стружки та ускладняється тепловідведення – $K_c > 1$, при менших подачах та швидкостях теплова енергія розсіюється ефективніше – $K_c < 1$. Визначення величин коригуючого коефіцієнту K_c здійснювалось за допомогою апроксимації результатів розрахунку, отриманих за моделлю та результатів отриманих за допомогою програмного симулятора (який було побудовано на основі даних отриманих методом контактного вимірювання природними термопарами [6]).

Відповідно, температуру в зоні різання можна визначити, користуючись наступною залежністю:

$$\theta_{\text{розр.}} = \theta_{\text{навк.сер.}} + \Delta\theta_c \cdot Kc + \Delta\theta_T \cdot Kc.$$

Але ця залежність не враховує втрати на випромінювання та на конвекцію $Q_{\text{втр}} = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}}$, то відповідно:

$$\theta_{\text{втр}} = \frac{Q_{\text{втр}}}{m \cdot c},$$

$$\theta_{\text{розр.}} = \theta_{\text{навк.сер.}} + \Delta\theta_c \cdot Kc + \Delta\theta_T \cdot Kc - \theta_{\text{втр.}}$$

В спрощеній формі, для коректного розрахунку, звичайно визначають ефективну площу теплообміну A в зоні контакту користуючись відомою залежністю: $A = l \cdot f$. Враховуючи дуже малу площу активної зони контакту інструмента і заготовки, теплові втрати за 1 с майже не впливають на загальний стан щодо температури. Відомо, що в реальності температура знижується не миттєво. Стружка втрачає свою температуру після зняття від початку переміщення в сторону стружковідведення, через дотики з іншими поверхнями та вільно переміщуючись у повітрі, тому для уточнення – модель може бути розглянута за часом впливу теплових втрат (швидкоплинність) та площею теплообміну. Також відомо, що більша частина теплоти, яка генерується в зоні контакту відноситься стружкою, тому можна врахувати час тепловіддачі стружки $t_{\text{т.с.}} = l_{\text{ш.стр.}}/v_{\text{стр.}}$. Уточнення для площі теплообміну за часом руху стружки – $A = l_{\text{ш.стр.}} \cdot (a_{\text{стр.}} + b_{\text{стр.}}) \cdot 2$, $l_{\text{ш.стр.}} = t_{\text{р.стр.}} \cdot v_{\text{стр.}}$. При розрахунках за уточненою моделлю було отримано величину втрат тепла $\theta_{\text{втр}}$ від 0,1 до 1 °C щосекунди в залежності від параметрів умов обробки. Але якщо це врахувати за тривалістю процесу різання при обробці, то це вже можуть бути відчутні втрати, але які не перевищувати в середньому 1 – 2 %.

Дані розрахунків для різних матеріалів та умов обробки подано у таблиці 2.

Таблиця 2

№ експ.	Матеріал заготовки / інструменту	коэф. випром. ε	d , мм	a_p , мм	f , мм/об	n , хв ⁻¹	v , м/хв.	P_z , Н	$\Delta\theta_c$, °C	$\Delta\theta_T$, °C	$\theta_{\text{розр.}}$, °C
1	сталь AISI321 (12X18H10T) / T5K10	0,86	35	1,0	0,32	760	83,5	671	95	117	220
2				1,5	0,52	760	83,5	1449	138	152	310
3				2,0	0,32	560	61,5	1322	132	150	306
4				2,0	0,52	760	83,5	1993	137	155	338
5	сталь AISI5140 (40X) / T15K6	0,62	35	1,0	0,32	760	83,5	624	153	206	378
6				1,5	0,52	760	83,5	1121	174	233	426
7				2,0	0,32	560	61,5	1307	195	254	469
8				2,0	0,52	760	83,5	1797	208	268	496

Термографічні дослідження процесу точіння проводилися на універсальному токарно-гвинторізному верстаті моделі 1A616 без застосування мастильно-охолоджувального технологічного середовища. В якості засобу вимірювальної техніки використовувався тепловізор UTi720e від виробника UNI-T. Головні метрологічні та технічні характеристики наведено у таблиці 3.

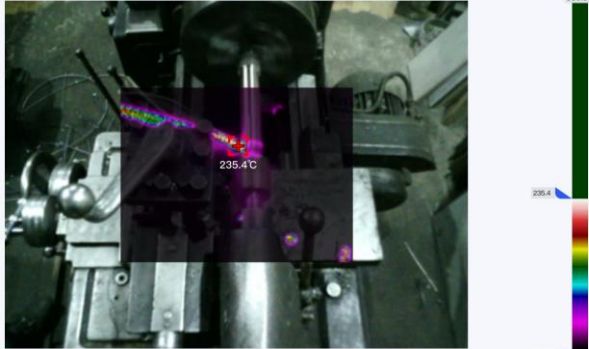
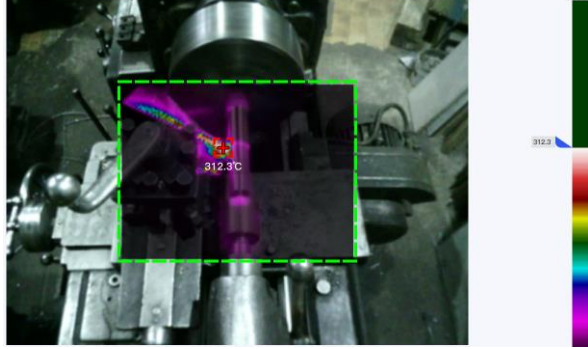
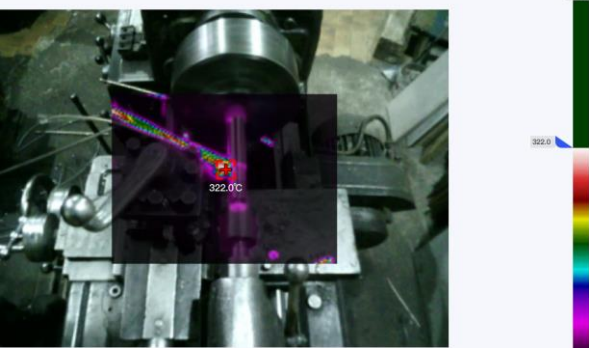
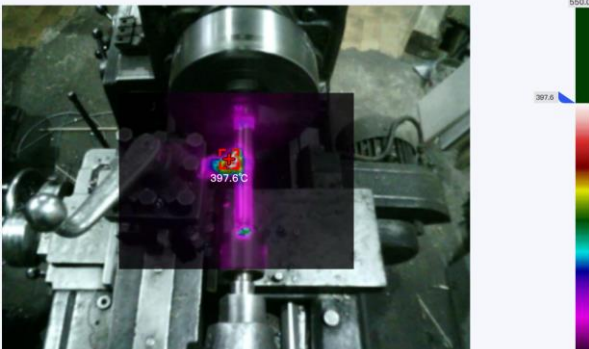
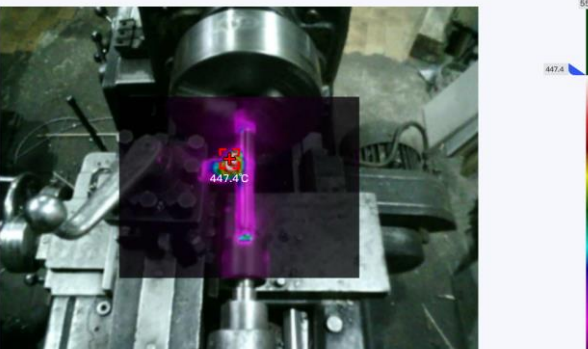
Таблиця 3

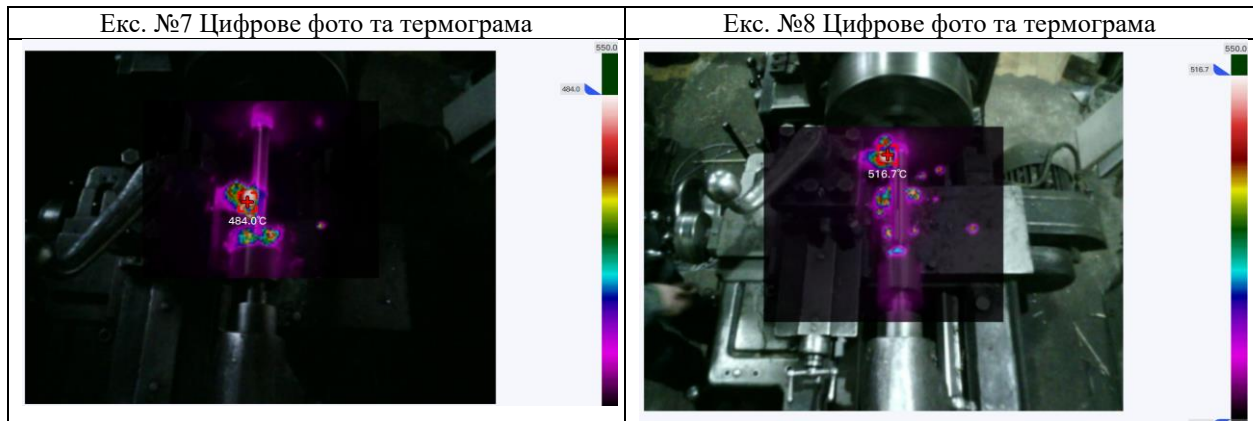
Назва характеристики	Значення
Метрологічні характеристики	
Діапазон температур камери	від -20°C до 550°C
Точність	±2°C або ±2% (більше з двох значень)
Спектральний діапазон	8 – 14 мкм
Теплова чутливість NETD	≤50 мК
Поле зору (FOV)	56×42.2
Фокусування	вільне
Просторова роздільна здатність (IFOV)	3,8 мрад
Корекція емісійності (регулюється)	0,1 – 1,0
Технічні характеристики	
ІЧ-роздільна здатність	256 × 152 пікселів
Цифрова камера, роздільна здатність	640 × 480 пікселів
Вологість	95 %
Частота кадрів	≤25 Гц
Цифровий зум	2×, 4×

Результати вимірювань та термограми наведено у таблиці 4. Умови навколишнього середовища при проведенні досліджень в механічному цеху – температура навколишнього середовища 15 °С, відносна вологість 50 %. Для отримання чіткості об'єкту дослідження на термограмах здійснювалось фокусування камери та враховувалась відстань до об'єкту, кут спостережень та діапазон вимірювальних температур (камера працює в двох діапазонах).

Експерименти проводились для обробки заготовок із сталей 12Х18Н10Т та 40Х. Параметри режимів різання для зазначених матеріалів та інструментальний матеріал наведено у таблиці 2 за відповідними номерами експериментів. Для аналізу термограм використовувалось спеціальне програмне забезпечення UTI Thermal від фірми виробника. Результат вимірювання, відображений на термограмі отриманий за допомогою точкового вимірника, який відображує максимальну температуру на термограмі. Положення точки перевірялось на цифровому фото за допомогою режиму «картинка в картинці». Результати вимірювань наведено в таблиці 5 для кожного відповідного експерименту.

Таблиця 4

Умови проведення: Температура $\theta_{\text{навк.сер.}}$ – 15 °С, температура відбиття – 15 °С, коефіцієнт випромінювання $\varepsilon = 0,86$, відстань зйомки – 0,5 м, відносна вологість – 50 %	
Екс. №1 Цифрове фото та термограма	Екс. №2 Цифрове фото та термограма
	
Екс. №3 Цифрове фото та термограма	Екс. №4 Цифрове фото та термограма
	
Умови проведення: Температура $\theta_{\text{навк.сер.}}$ – 15 °С, температура відбиття – 15 °С, коефіцієнт випромінювання $\varepsilon = 0,86$, відстань зйомки – 0,5 м, відносна вологість – 50 %	
Екс. №5 Цифрове фото та термограма	Екс. №6 Цифрове фото та термограма
	



Для оцінювання достовірності отриманих результатів вимірювань зафіксованих тепловізором $\theta_{\text{екс.}}$, було проведено порівняльний аналіз з розрахунковими температурами за уточненою моделлю $\theta_{\text{розн.}}$, наведених в таблиці 2. Таблиця 5 містить розрахунки абсолютної та відносної похибок.

Таблиця 5

№ експ.	$\theta_{\text{розн.}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{екс.}}, ^\circ\text{C}$	Абсолютна похибка $\theta_{\text{екс.}} - \theta_{\text{розн.}}, ^\circ\text{C}$	Відносна похибка $[(\theta_{\text{екс.}} - \theta_{\text{розн.}})/\theta_{\text{розн.}}] \times 100, \%$
1	220	235,4	15,4	7,0
2	310	312,3	11,3	3,6
3	306	322	16	5,2
4	338	357	19	5,6
5	378	397,6	19,6	5,1
6	426	447,4	21,4	5,0
7	469	484	15	3,1
8	496	516,7	20,7	4,1

Відносна похибка експериментальної температури по відношенню до температури розрахункової становить 3,1 до 7 %, що є прийнятним для інженерних задач (7 % < 15 %). Було відмічено, що для менших величин температур було отримано вище похибку. Це може бути пов'язано з чутливістю тепловізійної камери при роботі в більш низькому діапазоні вимірювальних температур.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО АНАЛІЗУ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В цій статті запропоновано спрощену для інженерних розрахунків математичну модель теплового стану зони різання під час зовнішнього точіння з урахуванням теплообміну та розподілу потоку теплоти. Для дослідження температури в зоні різання застосовано тепловізійний контроль. Для визначення достовірності отриманих даних з термограм здійснено порівняння результатів моделювання з тепловізійними даними, що підтвердило якісну та кількісну узгодженість температурних даних шляхом оцінки похибки тепловізійного методу. Оцінювання похибки зроблено на основі аналізу розбіжностей з моделлю, що дає підстави для підтвердження достовірності результатів вимірювання. В результаті проведених досліджень підтверджено доцільність застосування запропонованої моделі в якості інструменту метрологічної верифікації оцінювання теплових процесів що виникають в процесі зовнішнього точіння за допомогою тепловізійного контролю.

Література

1. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів: підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов; під заг. ред. М.П. Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів: Новий світ – 2000, 2011. – 422 с.
2. Якимов А.В. Теплофизика механической обработки: Учеб.пособие / А.В.Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов. – К.; Одесса: Лыбидь, 1991. – 240с.
3. Якимов О.В. Теплофизика механической обработки: Підручник / О.В. Якимов, А.В. Усов, П.Т. Слободяник, Д. В. Юргачов. – Одесса: Астропрінт, 2000. – 256 с.
4. Bacci da Silva, M., Wallbank, J.: Cutting temperature: prediction and measurement methods—a review. Journal of Materials Processing Technology, 88(1–3), 195202 (1999). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00395-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00395-1)
5. Childs, T., Maekawa K., Obikawa T. & Yamane Y. Metal Machining.: Theory and Applications. Butterworth-Heinemann, London-New York-Toronto (2000).

6. Gugnin, V., Perperi, L., Oborskyi, G., Goloborodko, G., Goloborodko, V. (2025). Development of a Simulator Program for Studying the Effect of Cutting Modes on Cutting Temperature. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_25
7. Jinghui Han, Zhiyong Liu, Kaiwei Cao, Long Xu, Tieli Shi, Guanglan Liao Cutting temperature measurement in turning using fiber-optic multi-spectral radiation thermometry and its application in tool wear status recognition., Measurement, Volume 198, 2022, Page111413 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111413>
8. Oborsky, G., Goloborodko, V. and Perperi, L. 2024. Implementation of the hybrid binarization method for thermogram analysis. Proceedings of Odessa Polytechnic University. 2(70) (Dec.2024), 123–130. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.14>
9. Minh Duc, P., Hieu Giang, L., & Nguyen, V. T. (2025). Analyzing Cutting Temperature in Hard-Turning Technique with Standard Inserts Through Both Simulation and Experimental Investigations. *Applied Sciences*, 15(2), 983. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020983>
10. Mozammel Mia, Nikhil R Dhar, Response surface and neural network based predictive models of cutting temperature in hard turning, Journal of Advanced Research, Volume 7, Issue 6, 2016, Pages 1035-1044. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2016.05.004>
11. А. В. Агулов, Р. Ю. Бондаренко, Л. В. Васильева, А. А. Гончаров Моделирование тепловых процессов в режущей пластине. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Серія «Мат. моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління», вип. 27. 2015. С. 5 – 12
12. Резников А. Н., Резников Л. А. Тепловые процессы в технологических системах: Учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты». — М.: Машиностроение, 1990. — 288 с.
13. Shaw, M. C. (2005). Metal cutting principles (2nd ed.). Oxford University Press.
14. Minkina, W., & Dudzik, S. (2009). Infrared thermography: Errors and uncertainties. Wiley.
15. Boothroyd, G., & Knight, W. A. (1989). Fundamentals of machining and machine tools. Marcel Dekker, Inc.

References

1. Mazur, M.P., Vnukov, Yu.M., Dobroskok, V.L., Zoloha, V.O., Novosolov, Yu.K., Yakubov, F.Ia. 2000 (2013): Fundamentals of the theory of cutting material. 3rd ed. Lviv, New World. (in Ukrainian).
2. Yakimov, A. V., Slobodyanik, P. T., & Usov, A. V. (1991). Thermophysics of mechanical processing (Textbook). Kyiv & Odesa: Lybid. (in Russian).
3. Yakimov, O. V., Usov, A. V., Slobodyanik, P. T., & Iorgachov, D. V. (2000). Thermophysics of mechanical processing: Textbook. Odesa: Astroprint. (in Ukrainian).
4. Bacci da Silva, M., Wallbank, J.: Cutting temperature: prediction and measurement methods—a review. Journal of Materials Processing Technology, 88(1–3), 195202 (1999). DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00395-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00395-1)
5. Childs, T., Maekawa K., Obikawa T. & Yamane Y. Metal Machining.: Theory and Applications. Butterworth-Heinemann, London-New York-Toronto (2000).
6. Gugnin, V., Perperi, L., Oborskyi, G., Goloborodko, G., Goloborodko, V. (2025). Development of a Simulator Program for Studying the Effect of Cutting Modes on Cutting Temperature. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds) Advanced Manufacturing Processes VI. Interpartner 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_25
7. Jinghui Han, Zhiyong Liu, Kaiwei Cao, Long Xu, Tieli Shi, Guanglan Liao Cutting temperature measurement in turning using fiber-optic multi-spectral radiation thermometry and its application in tool wear status recognition., Measurement, Volume 198, 2022, Page111413 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111413>
8. Oborsky, G., Goloborodko, V. and Perperi, L. 2024. Implementation of the hybrid binarization method for thermogram analysis. Proceedings of Odessa Polytechnic University. 2(70) (Dec.2024), 123–130. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.2.70.2024.14>
9. Minh Duc, P., Hieu Giang, L., & Nguyen, V. T. (2025). Analyzing Cutting Temperature in Hard-Turning Technique with Standard Inserts Through Both Simulation and Experimental Investigations. *Applied Sciences*, 15(2), 983. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020983>
10. Mozammel Mia, Nikhil R Dhar, Response surface and neural network based predictive models of cutting temperature in hard turning, Journal of Advanced Research, Volume 7, Issue 6, 2016, Pages 1035-1044. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2016.05.004>
11. Agulov, A. V., Bondarenko, R. Yu., Vasilieva, L. V., & Goncharov, A. A. (2015). Modeling of thermal processes in a cutting insert. Kharkiv Visnyk of V. N. Karazin National University, Series: Mathematical Modeling, Information Technologies, and Automated Control Systems, (27), 5–12. (in Russian).
12. Reznikov, A. N., & Reznikov, L. A. (1990). Thermal processes in technological systems: A textbook for universities in the fields of "Machining Technology" and "Metal-cutting machines and tools". Moscow: Mashinostroyeniye. (in Russian).
13. Shaw, M. C. (2005). Metal cutting principles (2nd ed.). Oxford University Press.
14. Minkina, W., & Dudzik, S. (2009). Infrared thermography: Errors and uncertainties. Wiley.
15. Boothroyd, G., & Knight, W. A. (1989). Fundamentals of machining and machine tools. Marcel Dekker, Inc.