

РОЗДІЛ II. ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИНОБУДУВАННЯ ТА АВТОТРАНСПОРТУ

УДК 621.923.42

Віталій Кальченко, Володимир Кальченко, Ярослав Кужельний

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОНАПРУЖЕНОСТІ ПІД ЧАС ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ

Віталій Кальченко, Володимир Кальченко, Ярослав Кужельний

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ ВО ВРЕМЯ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ

Vitalii Kalchenko, Volodymyr Kalchenko, Yaroslav Kuzhelnyi

ANALYSIS OF METHODS OF RESEARCH OF THERMAL STRESS DURING THE GRINDING PROCESS

Для досягнення високої якості поверхневого шару відповідальних деталей, необхідно максимально точно визначити параметри фінішної обробки. Саме процес шліфування найбільше впливає на якість виготовленої деталі. Високі температури, що виникають під час обробки, можуть негативно впливати на механічні властивості матеріалу деталі. Для забезпечення високої ефективності та оптимізації фінішної обробки деталі необхідно використовувати метод, що дає можливість найбільш точно описати теплонапруженість процесу шліфування.

Роботу присвячено аналізу теплонапруженості процесу шліфування, визначенню способів розрахунку температури та об'ємного розподілу тепла у процесі оброблення пластичних матеріалів. Розглянуто основні причини виникнення дефектів під час шліфування та методи їх усунення. Визначено фактори, що впливають на формоутворення та якість поверхневого шару обробленої деталі.

Ключові слова: процес шліфування, теплонапруженість, розподіл тепла, адіабатичні стержні, моделювання процесу різання.

Рис.: 6. Бібл.: 12.

Для досягнення високого якості поверхневого шару відповідальних деталей, необхідно максимально точно визначити параметри фінішної обробки. Іменно процес шліфування впливає на якість виготовленої деталі. Високі температури, що виникають в час обробки, можуть негативно впливати на механічні властивості матеріалу деталі. Для забезпечення високої ефективності та оптимізації фінішної обробки деталі, необхідно використовувати метод, який дає можливість найбільш точно описати теплонапруженість процесу шліфування.

Робота присвячена аналізу теплонапруженості процесу шліфування, визначенню способів розрахунку температури та об'ємного розподілу тепла при обробці пластичних матеріалів. Розглянуто основні причини виникнення дефектів при шліфуванні та методи їх усунення. Визначено фактори, що впливають на формоутворення та якість поверхневого шару обробленої деталі.

Ключевые слова: процесс шлифования, теплонапряженность, распределение тепла, адиабатические стержни, моделирование процесса резания.

Рис.: 6. Библ.: 12.

To achieve the high quality of the surface layer of critical parts, must be as accurate as possible to determine the parameters of finishing. This grinding process affects the quality of manufactured parts. The high temperatures, that occur during processing, may adversely affect the mechanical properties of the parts of the material. To ensure efficiency and optimization of the finishing details, you must use a method that makes it possible to more accurately describe the thermal stress grinding process.

This article seeks to analyze the thermal stress of the grinding process, the definition of the calculation methods of temperature and volumetric heat distribution in the processing of plastic materials. Examines the main causes of grinding defects and their rectification. The factors affecting the formation and quality of the surface layer of the treated parts.

Key words: the grinding process, thermal stress, heat distribution, adiabatic cores, modeling of the cutting process.

Fig.: 6. Bibl.: 12.

Постановка проблеми. Для забезпечення підвищених вимог до точності розмірів та якості поверхневого шару відповідальних деталей необхідно звертати особливу увагу на їх фінішну обробку. До таких фінішних операцій відносяться: шліфування, доведення, полірування.

Шліфування являє собою вид оброблення, що здійснюється за допомогою абразивного інструмента, ріжучим елементом якого є зерна абразивних матеріалів.

Складність дослідження процесу шліфування полягає у стохастичному характері процесу. Це пов'язано з імовірнісним розташуванням самих абразивних зерен та їх ку-

тів різання. При цьому сили різання постійно змінюються за величиною та напрямком дії, що негативно впливає на якість поверхні оброблюваних деталей.

Один із основних факторів, що впливає на якість формоутворення поверхневого шару обробленої деталі, є величина температури та її розподіл під час процесу шліфування. Саме визначення оптимальних методів дослідження теплонапруженості під час процесу шліфування сприятиме підвищенню ефективності фінішної обробки деталей.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблемою розподілу теплоти під час шліфування займалися такі вчені: О. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Ю. А. Сизий, Л. Н. Филимонов [10], А. В. Рудик [6] та інші.

У роботі [11] розглянуто основні дефекти, що виникають під час шліфування. Запропоновано використання переривчастих шліфувальних кругів, що забезпечують оптимальний температурний режим процесу обробки. Проте не було описано використання цього методу для високошвидкісного шліфування.

У роботах [3; 4; 5; 8] були запропоновані методи визначення розподілу температури під час шліфування, використовуючи метод адиабатичних стержнів. Але цей метод не враховує виділення тепла в бокові сторони від вісі стержня.

У фундаментальній роботі [2] запропоновано використовувати комп'ютерне моделювання для опису процесу шліфування, використовуючи метод скінченних елементів. Такий спосіб дослідження теплонапруженості має недосконалі алгоритми моделювання процесів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Відсутність аналізу методів дослідження теплонапруженості під час шліфування з урахуванням об'ємного розподілу тепла.

Мета статті. Головною метою цієї роботи є аналіз методів дослідження теплонапруженості під час шліфування з урахуванням об'ємного розподілу тепла. Це дозволить визначити найбільш оптимальний метод дослідження, який максимально точно опише теплові процеси, що відбуваються під час процесу шліфування.

Виклад основного матеріалу. О. В. Якимов [11] розглядав різноманітні дефекти (прижоги, залишкові напруження, тріщини тощо), що виникають у процесі шліфування. Подібні дефекти відбуваються внаслідок нагрівання поверхневого шару деталі до високих температур. Для підвищення якості поверхневого шару шліфувальних деталей, необхідно підбирати режими шліфування, абразивний інструмент з відповідними характеристиками, вид змащувально-охолоджувальних рідин і спосіб їх підведення у зону різання, підвищенні якості шліфувальних кругів за рахунок розробки нових зв'язок та матеріалів для них.

Також у своїй роботі О. В. Якимов розглядав температурні процеси під час шліфування. Була введена формула (1) для визначення температури по глибині шліфувальної поверхні:

$$Q_y = \frac{q}{2} \sqrt{\frac{2\pi h}{\lambda C_\gamma V} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x\sqrt{V}}{2\sqrt{ah}} \right) \right]}, \quad (1)$$

де q – густина теплового потоку, Дж/см²·с;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу оброблюваної деталі, Вт/(м·К);

α – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

C – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

γ – густина матеріалу, що обробляється, кг/м³;

h – ширина джерела теплоти, м;

V – швидкість впливу джерела теплоти, м/с.

Для зменшення негативного впливу підвищених температур під час шліфування, Якимов О.В. запропонував використовувати переривчасті шліфувальні круги для запобігання збільшення температур до критичних значень. Цей метод отримав назву шліфування переривчастими кругами (рис. 1).

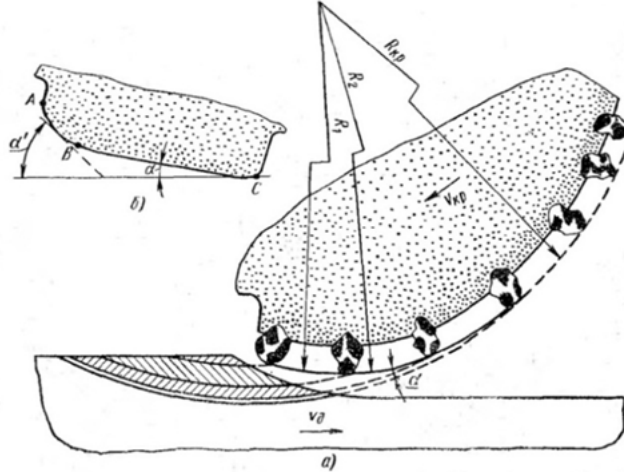


Рис. 1. Схема роботи абразивних зерен при переривчастому шліфуванні

Джерело: [11].

За такого методу шліфування кількість ріжучих зерен кругів з переривчастою робочою поверхнею менше, ніж у звичайних кругів. Переривчасті круги мають високу вентиляційну здатність, тобто подають у зону різання потужний потік повітря, що видуває стружку із зони різання та зменшує засалювання круга. Це дає змогу зменшити величину температури під час шліфування, що у свою чергу зменшує такі дефекти, як припінання, тріщини тощо.

Ф. В. Новиков у своїх роботах [3; 4] здійснював розроблення математичної моделі формування температури під час шліфування, що ґрунтується на врахуванні балансу тепла, яке відводиться в стружку та оброблювану деталь.

У цій роботі при вирішенні задачі визначення температури у процесі шліфування, було враховано рух теплового джерела у глибину поверхневого шару оброблюваної деталі. Тобто оброблюваний матеріал було умовно зображено у вигляді адіабатичних стержнів (рис. 2).

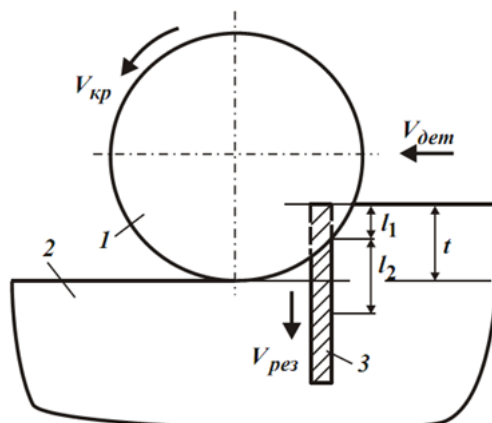


Рис. 2. Розрахункова схема процесу шліфування:

1 – шліфувальний круг; 2 – оброблювана деталь; 3 – адіабатичний стержень

Джерело: [4].

Автором було розроблено метод визначення температури шліфування, що базується на основі аналітичних залежностей (2).

$$\theta = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot z, \quad (2)$$

де σ – умовне напруження різання, Н/м²;

c – питома теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(кг·К);

ρ – густина оброблюваного матеріалу, кг/м³;

z – відносна величина температури ($z=0\dots 1$), що визначається із рівняння (3):

$$\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot t \cdot V_{\text{піз}} = -\ln(1-z) - z, \quad (3)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/(м·К);

t – глибина шліфування, м;

$V_{\text{піз}}$ – швидкість переміщення теплового джерела по нормалі до напрямку руху круга, м/с.

Як показано в роботі [4], зменшення відносної величини температури пов'язано з підвищенням кількості тепла, що переміщується в оброблювану деталь. При цьому суттєво збільшується глибина, на яку проникає температура в поверхневий шар оброблюваної деталі.

Грунтуючись на роботах [3; 4; 11], Ю. А. Сизий продовжив дослідження процесу теплонапруженості під час шліфування, використовуючи метод адіабатичних стержнів (рис. 3). Цей метод ґрунтується на представленні шару металу, що зрізується шліфувальним кругом (зерном), як сукупність адіабатичних стержнів.

У роботі [8] Ю. А. Сизий надає рішення задачі розподілу тепла на основі класичного рівняння теплопровідності.

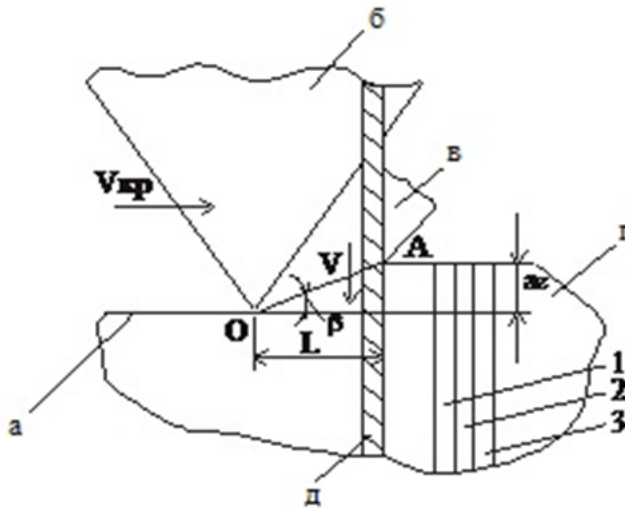


Рис. 3. Розрахункова схема мікрорізання:

а – оброблена поверхня; *б* – абразивне зерно; *в* – стружка; *г* – оброблювана поверхня; *д* – адіабатичний стержень; $V_{\text{кр}}$ – швидкість обертання шліфувального круга; 1,2,3 – адіабатичні стержні; az – товщина шару стружки, що зрізується; L – довжина від абразивного зерна до адіабатичного стержня
Джерело: [8].

Для спрощення задачі теплопровідності було прийнято, що адіабатичні стержні не випромінюють тепло в боки від вісі стержня сторони.

Задача описання температури у стружці була зведена до задачі описання температурного поля в адіабатичному стержні та плоского перпендикулярного джерела тепла, що рухається вздовж стержня (рис. 4).

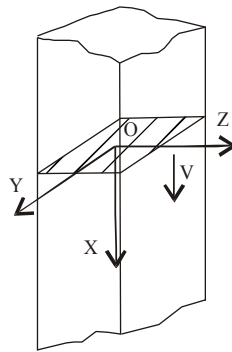


Рис. 4. Адіабатичний стержень з плоским джерелом тепла у площині ZOx, що рухається вздовж вісі X зі швидкістю V

Джерело: [8].

Задача теплопровідності для джерела тепла, що рухається в адіабатичному стержні, буде мати такий вигляд (4):

$$T(x,t) = \frac{q}{2 \cdot C\rho \cdot \sqrt{\pi \cdot \alpha}} \cdot \int_0^\tau \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \exp\left(-\frac{[x + V(\tau-t)]^2}{4 \cdot \alpha \cdot (\tau-t)}\right), \quad (4)$$

де q – щільність теплового потоку на площині зсуву, Дж/см²·с;

α – коефіцієнт температуропровідності, см²/с;

$C\rho$ – об’ємна теплоємність, Дж/см³·град;

x – координата вздовж вісі стержня;

τ – час спостереження за температурним полем, с.

Питання теплонапруженості під час різання одиничним абразивним зерном шліфувального круга, також були розглянуті в роботах Ю. А. Сизого [6; 7].

Метод адіабатичних стержнів значно спрощує процес описання теплонапруженості під час шліфування.

За останній час технології віртуального моделювання набули достатньо великого розвитку. За їх допомогою можливо з найменшими затратами виконувати моделювання різноманітних процесів та їх оптимізацію. При цьому натуральні експерименти використовуються як перевірочні.

Використовуючи досягнення новітніх технологій, Д. В. Криворучко у своїй роботі [2] здійснював моделювання процесів лезової обробки. Процес моделювання був оснований на методі скінченних елементів [1].

Дослідження моделювання процесів різання класифікують за трьома напрямками (рис. 5): створення моделей та дослідження їх точності, дослідження робочих процесів, оптимізація робочих процесів.

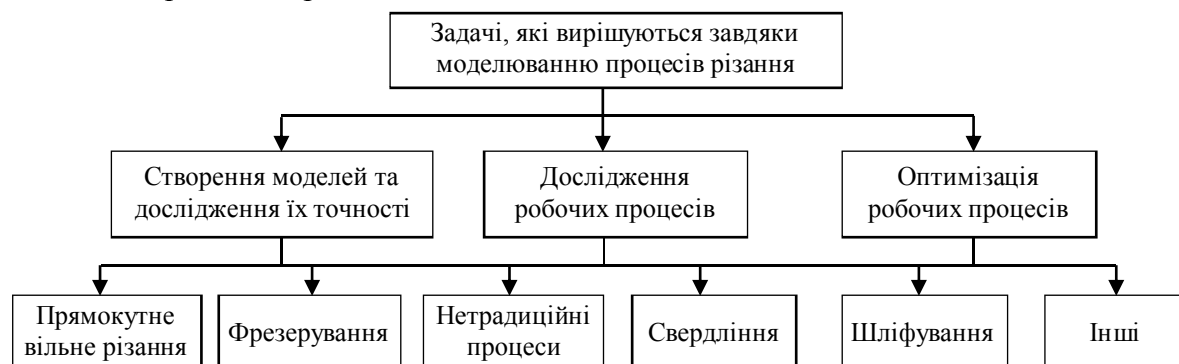


Рис. 5. Класифікація напрямків досліджень при постановці задачі прогнозованого моделювання
Джерело: [2].

Використовуючи комп'ютерне моделювання, можливо створити віртуальну модель високошвидкісного різання із широким діапазоном вхідних даних, оптимізувати його та змоделювати принципово нові процеси.

Цей метод дає можливість спрогнозувати напружено-деформований стан, форми і розміри стружки, форму обробленої поверхні, проекції сил різання, розподіл температури під час процесу шліфування та змоделювати точки контакту зерна з деталлю залежно від напрямку швидкості різання.

За допомогою високошвидкісної відеозйомки ми маємо можливість порівняти результати моделювання процесу різання з реальним експериментом (рис. 6).

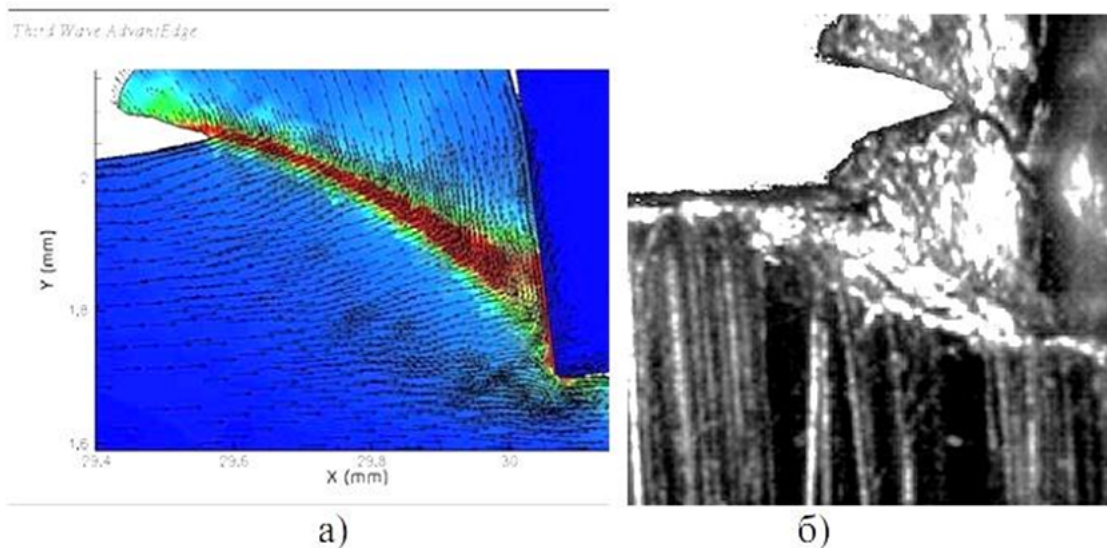


Рис. 6. Порівняння результатів моделювання елементного стружкоутворення (а) та високошвидкісної відеозйомки (б)

Джерело: [12].

Існує достатньо велика кількість програмного забезпечення для моделювання процесу різання. До них відносяться: DEFORM, THIRD WAVE ADVANTEDGE (TWA), ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS, FORGE.

Проте 3D-моделювання процесів різання має достатньо велику похибку в порівнянні з натуральними експериментами. До основних причин виникнення похибок можна віднести недостатній розвиток алгоритмів моделювання процесу руйнування, а також неточність вихідних даних.

У роботі [2] Д. В. Криворучко пропонує методи усунення цих похибок:

- розроблення та впровадження основних принципів практичної реалізації прогнозуючих моделей, які передбачують прогнозування допустимої похибки розрахунку показників процесу різання з урахуванням невизначеності вхідних даних;
- здійснення раціонального спрощення розрахункової схеми задачі;
- визначення раціональних параметрів розв'язувача та порівняння результатів розрахунків з результатами натурального експерименту в еквівалентних умовах.

Висновки і пропозиції. Проаналізовано теплонапруженість процесу шліфування, способи розрахунку температури та об'ємний розподіл тепла під час оброблення пластичних матеріалів. Розглянуто основні причини виникнення дефектів при шліфуванні та методи їх усунення. Визначено фактори, що впливають на формоутворення та якість поверхневого шару обробленої деталі.

Нині одним із прогресивних методів дослідження теплонапруженості процесу шліфування є використання комп'ютерного моделювання. Цей метод дає можливість створювати різноманітні моделі процесу шліфування з широким діапазоном вхідних даних.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Хоч цей метод і має певні недоліки, проте вже існують практичні рекомендації, що дають змогу мінімізувати похибки, які виникають під час моделювання різноманітних процесів.

Отже, метод комп'ютерного моделювання дає можливість детально дослідити теплонапруженість процесу шліфування та має потужні резерви для подальшого розвитку.

Список використаних джерел

1. Дубенець В. Г. Основи методу скінченних елементів : навч. посіб. / В. Г. Дубенець, В. В. Хільчевський, О. В. Савченко. – Чернігів : ЧДТУ, 2007. – 348 с.
2. Криворучко Д. В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы : монография / Д. В. Криворучко, В. А. Залого. – Сумы : Университетская книга, 2012. – 496 с.
3. Новиков Ф. В. Исследования теплонапряженности процессов шлифования / Ф. В. Новиков, И. А. Рябенков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – Вып. 2, № 4 (32). – С. 41–44.
4. Новиков Ф. В. Математическая модель определения температуры при шлифовании на основе учета баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь / Ф. В. Новиков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2007. – Вип. 61. – С. 23–33.
5. Новиков Ф. В. Теоретический анализ условий повышения качества обработки по температурному критерию / Ф. В. Новиков, И. А. Рябенков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2007. – Вип. 61. – С. 164–171.
6. Рудик А. В. Взаемозв'язок товщини зрізу з температурою торцевого шліфування під час врахування технологічних факторів / А. В. Рудик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2012. – № 2 (57). – С. 58–62.
7. Сизый Ю. А. О балансе тепла от работы деформации на плоскости сдвига при резании единичным абразивным зерном / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский, А. Н. Ушаков // Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування машинознавство. – 2010. – Вип. 7 (166). – С. 65–75.
8. Сизый Ю. А. О мгновенной температуре шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский, А. Н. Ушаков // Вестник национального технического университета ХПИ. – 2009. – № 2. – С. 97–116.
9. Сизый Ю. А. Температура самоподогрева при шлифовании / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский, А. Н. Ушаков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2009. – Вип. 1, № 5 (37). – С. 24–37.
10. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л. : Машиностроение, 1979. – 248 с. : ил.
11. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М. : Машиностроение, 1975. – 175 с.
12. Sekhon G. S. Numerical simulation of continuous chip formation during non-steady orthogonal cutting / G. S. Sekhon, J. L. Chenot // Engng Computations. – 1993. – Issue 10. – P. 31–48.

References

1. Dubenets, V.H., Khilchevskiy, V.V., Savchenko, O.V. (2007). *Osnovy metodu skinchennykh elementiv [Fundamentals of finite element method]*. Chernihiv: ChDTU (in Ukrainian).
2. Kryvoruchko, D.V., Zaloha, V.A. (2012). *Modelirovanie protsessov rezaniia metodom konechnukh elementov: metodologicheskie osnovu [Simulation of the cutting process using finite element method: methodological bases]*. Sumu: Unyversytetskaia knyha (in Russian).
3. Novikov, F.V., Riabenkov, I.A. (2008). *Issledovaniia teplonapriazhennosti protsessov shlifovaniia [Research thermal stress of grinding processes]*. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovukh tekhnologii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, issue 2, no. 4 (32), pp. 41–44 (in Russian).
4. Novikov, F.V. (2007). *Matematicheskaia model opredeleniia temperatury pri shlifovanii na osnove ucheta balansu tepla, ukhodiashchego v obrazuiushchiesia struzhki i obrabatuvaemuiu detal [A mathematical model for determining the temperature during grinding by taking into account the heat balance, leaving in formed chips and work piece]*. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho*

universytetu silskoho hospodarstva im. Petra Vasylenka – Journal of Kharkov National Technical University of Agriculture. Peter Vasilenko, issue 61, pp. 23–33 (in Russian).

5. Novikov, F.V., Riabenkov, Y.A. (2007). Teoretycheskii analiz uslovii povusheniia kachestva obrabotki po temperaturnomu kriteriiu [Theoretical analysis of the conditions for improving the quality of thermal processing criteria]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva im. Petra Vasylenka – Journal of Kharkov National Technical University of Agriculture. Peter Vasilenko, issue 61, pp. 164–171 (in Russian).*

6. Rudyk, A.V. (2012). Vzaiemozviazok tovshchyny zrizu z temperaturoiu tortsevoho shlifuvannia pid chas vrakhuvannia tekhnolohichnykh faktoriv [Relationship slice thickness with temperature mechanical polishing process while taking into account factors]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu – Visnyk of Chernihiv State Technological University, no. 2(57), pp. 58–62 (in Ukrainian).*

7. Sizi, Y.A., Stalinskiy, D.V., Ushakov, A.N. (2010). O balanse tepla ot rabotu deformatsii na ploskosti sdviga pri rezanii edinichnym abrazivnym zernom [On the balance of heat from the working strain at the shear plane in cutting single abrasive grain]. *Zbirnyk naukovykh prats Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Mashynobuduvannia mashynoznavstvo – Collection of scientific papers the Donetsk National Technical University. Series: Machine Engineering, issue 7 (166), pp. 65–75 (in Russian).*

8. Sizi, Y.A., Stalinskiy, D.V., Ushakov, A.N. (2009). O mhnovennoi temperature shlifovaniia [About instantaneous temperature grinding]. *Vestnyk natsionalnoho tekhnicheskoho unyversyteta KhPY – Herald of National Technical University KPI, no. 2, pp. 97–116 (in Russian).*

9. Sizi, Y.A., Stalinskiy, D.V., Ushakov, A.N. (2009). Temperatura samopodogreva pri shlifovanii [The temperature during grinding, the self]. *Vostochno-evropeiskii zhurnal peredovukh tekhnologii – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, issue 1, no. 5 (37), pp. 24–37 (in Russian).*

10. Filimonov, L.N. (1979). *Vusokoskorostnoe shlifovanie [High-speed grinding]. Leningrad: Mashinostroenie (in Russian).*

11. Yakimov, A.V. (1975). *Optimizatsiia protsessa shlifovaniia [Optimization of the grinding process]. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).*

12. Sekhon, G.S., Chenot, J.L. (1993). Numerical simulation of continuous chip formation during non-steady orthogonal cutting. *Engngr Computations, issue 10, pp. 31–48.*

Кальченко Віталій Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Кальченко Виталий Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Kalchenko Vitalii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Automobile Transport and Mechanical Engineering Industry Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: kalchenkovi@mail.ru

Кальченко Володимир Віталійович – доктор технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Кальченко Владимир Витальевич – доктор технических наук, профессор, проректор по научно-педагогической работе, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Kalchenko Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-rector for scientific and pedagogical work, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: vvkalchenko@rambler.ru

Кужельний Ярослав Володимирович – аспірант кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Кужельный Ярослав Владимирович – аспирант кафедры автомобильного транспорта и отраслевого машиностроения, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Kuzhelnyi Yaroslav – PhD student of the Automobile Transport and Mechanical Engineering Industry Department, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: k.y.v.immortal@gmail.com