

В.М. Тонконогий, д-р техн. наук, О.В. Рибак, Одеса, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ПРИ ШЛІФУВАННІ ДЕТАЛЕЙ З ПЛАЗМОВИМ ПОКРИТТЯМ

***Анотація.** Від розподілу теплової енергії при обробці плазмового покриття залежить вартість, якість та продуктивність технологічного процесу шліфування, адже надмірне збільшення температури призводить до розвитку поверхневих та структурних дефектів. У роботі наведено результати моделювання процесу шліфування плазмових покриттів, а також дані експериментального дослідження значень температур, що досягаються під час такої обробки. Аналіз профілю температурного поля дозволяє отримати відомості про розподіл теплової енергії в зоні шліфування, процеси теплопередачі, які при цьому відбуваються, та частку енергії, поглинутої поверхнею оброблюваної деталі. Така інформація є особливо важливою для запобігання утворенню дефектів та відшаровування нанесеного покриття від основного матеріалу деталі.*

***Ключові слова:** температурне поле, моделювання, теплопередача, шліфування, плазмові покриття, розподіл енергії.*

Вступ

В процесі шліфування велика частина виділеної енергії переходить у тепло, зосереджене на невеликій ділянці зони контакту шліфувального круга з оброблюваною поверхнею. Від розподілу цієї теплової енергії залежить вартість, якість та продуктивність технологічного процесу обробки покриття, адже надмірне збільшення температури на поверхні деталі може призвести до розвитку поверхневих та структурних дефектів, що зробить неприйнятним її подальше використання. При обробці деталей з плазмовим покриттям окрім ризику виникнення таких дефектів, як припалення, тріщини та сколювання додається ризик відшаровування покриття та його відриву від основного матеріалу деталі. Процеси теплопередачі під час шліфування за цих умов потребують детального вивчення, адже проведений аналіз може бути покладений за основу при розробці САПР ТП шліфування покриттів.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій

Спроби аналітичного описання теплової моделі процесу шліфування ґрунтуються на роботах Блока та Джейгера, які розглядають зростання температури між поверхнями тертя як наслідок руху теплового джерела площиною напівнескінченного фізичного тіла [1 – 3]. Незважаючи на деякі розбіжності з приводу теорій щодо механізму виділення тепла [4, 5],

більшість дослідників послуговуються принципом розподілення енергії шліфування між контактуючими тілами. Відтак, частина тепла поглинається поверхнею оброблюваної деталі, частина – шліфувальним кругом, стружкою та охолоджуючою рідиною за її наявності. Щоб передбачити, яким чином виділене тепло розподіляється між елементами системи та який вплив на температурне поле має процес охолодження, у роботах [6, 7] спираються на припущення щодо конкретного профілю теплового джерела та теплових властивостей матеріалу оброблюваної поверхні.

Шліфування деталей з плазмовим покриттям характеризується різними тепловими властивостями нанесеного шару та основи, що може призвести до розриву адгезійних зв'язків та відриву покриття. Такі дефекти є причиною втрати експлуатаційної придатності деталі і, разом з магістральними тріщинами та припаленнями, неприпустимі при обробці покриття [8]. У роботах [9, 10] визначено максимальну температуру оброблюваної поверхні, при якій зберігається тріщиностійкість деталі в процесі шліфування. Однак, попри велику кількість напрацювань з моделювання різних умов абразивної обробки поверхонь [11, 12], особливості шліфування деталей з нанесеним покриттям потребують подальшого дослідження.

Мета роботи полягає у вивченні процесів теплопередачі під час абразивної обробки деталей з покриттям шляхом побудови температурного поля системи шліфувальний круг – оброблюване покриття для різних характеристик режиму шліфування.

Основна частина

Згідно з теорією відшаровування захисних покриттів, розробленої у роботі [13], зміна стану системи основа – покриття під впливом теплових, механічних та інших чинників може бути зумовлена зміною енергії напружень у шарі покриття та енергії, необхідної для утворення поверхні розподілу, що характеризується рівнянням:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_{12} + \varepsilon_r, \quad (1)$$

де ε_1 , ε_2 , ε_{12} – поверхневі енергії відповідно нанесеного шару, основи та межі розподілу основи і покриття; ε_r – робота пластичної деформації при утворенні одиниці площі з порушеними адгезійними зв'язками.

Поверхнева енергія, у свою чергу, дорівнює сумі механічної роботи з утворення одиниці площі поверхні та кількості теплоти, що при цьому поглинається. Згідно з термодинамічними залежностями:

$$\varepsilon = \sigma - T \frac{\partial \sigma}{\partial T}, \quad (2)$$

де σ – питома вільна поверхнева енергія; T – температура; $\frac{\partial \sigma}{\partial T}$ – питома поверхнева ентропія, яка зазвичай є від’ємною величиною. Таким чином, збереження адгезійних зв’язків між покриттям і основою залежить як від температури на оброблюваній поверхні, так і на межі розподілу основа – покриття. Отже, при розробці моделі процесу абразивної обробки особливу увагу слід приділити дослідженню зміни температурного поля вздовж різних напрямків зони шліфування.

Імітаційне моделювання та подальші експериментальні дослідження проводилися для покриттів, нанесених з композиційного порошку карбиду титану, плакованого твердим розчином фосфору в нікелі, властивості яких були детально описані в роботі [14].

Моделювання процесу шліфування плазмових покриттів здійснювалось у програмному комплексі САПР SolidWorks. Загальний вигляд температурного поля при плоскому шліфуванні деталі з нанесеним шаром TiC, плакованого Ni(P), зображено на рис. 1. Теоретичні значення температури, отримані в результаті моделювання, ґрунтуються на аналізі руху плоского теплового джерела по поверхні оброблюваного матеріалу.

У побудованій моделі в центрі зони шліфування було розміщено прямокутну систему координат, де вісь Ox відповідає напрямку вздовж глибини шліфування, вісь Oy визначає напрямок руху шліфувального круга (поздовжньої подачі), вісь Oz співпадає з напрямком поперечної подачі (товщини круга). Параметри режиму шліфування були наступними: швидкість шліфувального круга з кубічного нітриду бору становила 35 м/с, його діаметр – 200 мм, товщина – 25 мм. Експериментальне вимірювання температури проводилось за допомогою попередньо відкаліброваної термопари.

При плоскому шліфуванні оброблювана поверхня потрапляє під вплив рухливого теплового джерела, внаслідок чого густина теплового потоку та температура змінюється з часом. На рисунках 2а і 2б зображені графіки залежності температури від часу на різній глибині від поверхні зразка з покриттям. З графіків видно, що значення температури, отримані в результаті моделювання (криві 1), добре узгоджуються з даними експериментального дослідження температурного поля за тих же умов (криві 2).

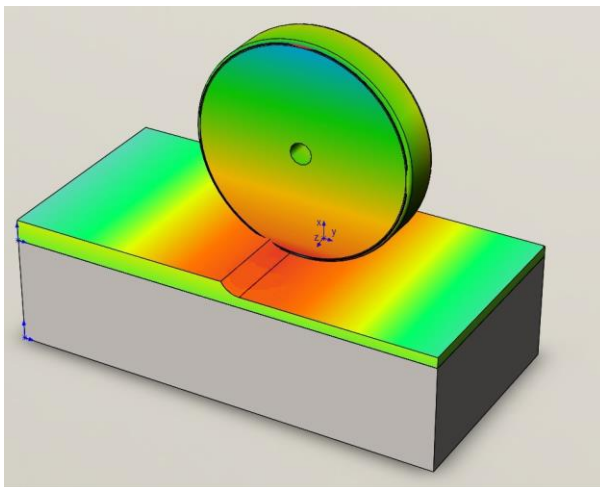
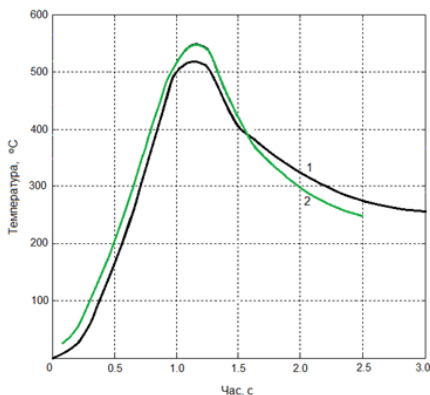
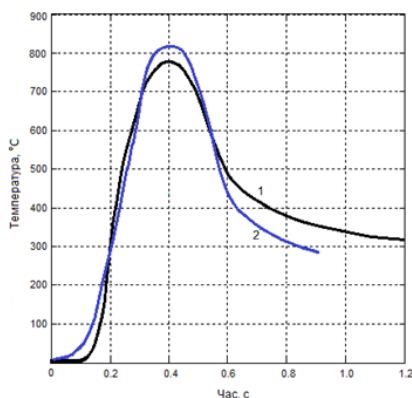


Рисунок 1 – Результат моделювання температурного поля деталі з покриттям



а

Рисунок 2а – Розподіл температури на глибині 1,05 мм та швидкості поздовжньої подачі 0,01 м/с



б

Рисунок 2б – Розподіл температури на глибині 0,25 мм та швидкості поздовжньої подачі 0,03 м/с

Графік залежності температури від глибини під поверхню шліфування при стабілізації температурного поля зображений на рис. 3, де крива 1 відповідає швидкості поздовжньої подачі 0,01 м/с, а крива 2 – швидкості поздовжньої подачі 0,03 м/с.

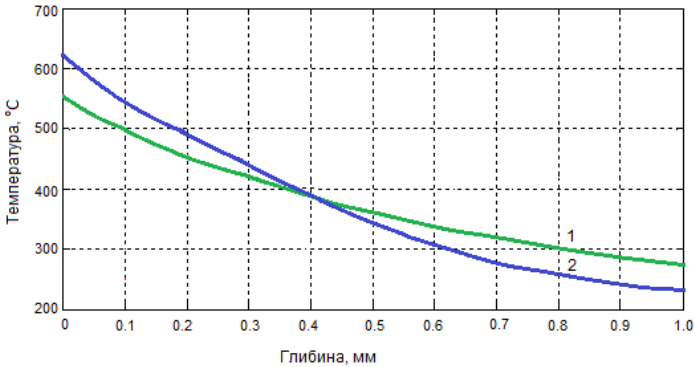


Рисунок 3 – Зміна температури з глибиною від поверхні шліфування

На процеси теплопередачі при шліфуванні значний вплив має використання змащувально-охолоджувальних рідин, які не лише поглинають частину утвореної теплової енергії, але й відводять стружку та пил з зони шліфування, мають змащувальну та диспергуючу дію. На рис. 4 наведено графік залежності температури від глибини під поверхнею в умовах сухого тертя (без подачі ЗОР – крива 1), граничного тертя (обмежена подача ЗОР – крива 2) та при достатній кількості ЗОР (крива 3).

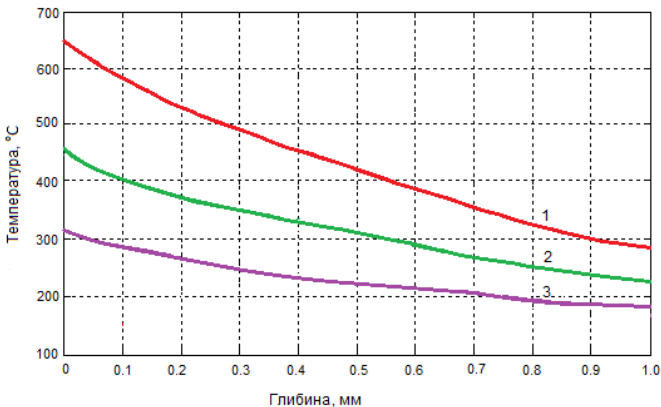


Рисунок 4 – Зміна температури з глибиною для різних умов змащення та охолодження

На рис. 5 представлено розподіл температури, визначений вздовж напрямку поздовжнього руху шліфувального круга, а рис. 6 відображає розподіл температури вздовж товщини шліфувального круга. Криві 1, 2 і 3 відповідають різним умовам використання змащення та охолодження так само, як і на попередньому графіку.

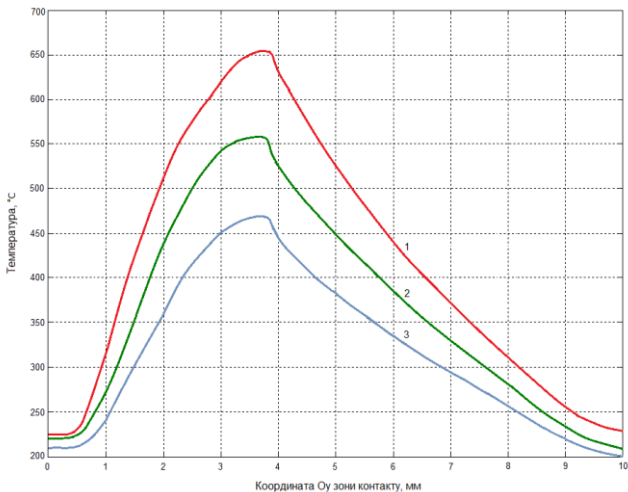


Рисунок 5 – Розподіл температури вздовж напрямку поздовжнього руху шліфувального круга

З рисунків 4, 5 та 6 видно, що загальний вигляд профілю температурного поля для кожного з напрямків зони шліфування залишається незмінним при використанні змащувально-охолоджуючої рідини, при її обмеженій подачі чи за повної відсутності. Проте середні та максимальні значення температур завдяки змащенню та гарній теплопровідності ЗОР вдається значно зменшити. Це дозволяє запобігати припаленням та іншим дефектам, що розвиваються в процесі шліфування.

За умови відсутності змащувально-охолоджуючих рідин, частка енергії, що поглинається оброблюваною поверхнею та шліфувальним кругом, не буде сталою. Розподіл енергії в зоні шліфування зображений на рис. 7, де визначальним є співвідношення координати вздовж напрямку поздовжнього руху шліфувального круга та довжини зони контакту круга з оброблюваною поверхнею. Частка енергії, що поглинається зразком, зменшується від переднього краю зони шліфування до її заднього краю, а частка енергії, поглинута шліфувальним кругом, – збільшується.

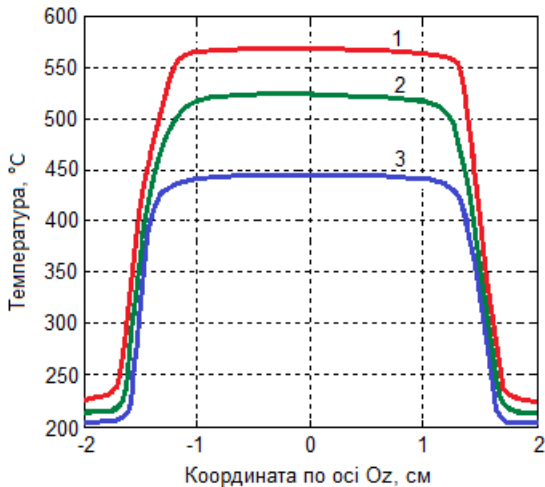


Рисунок 6 – Розподіл температури вздовж товщини шліфувального круга

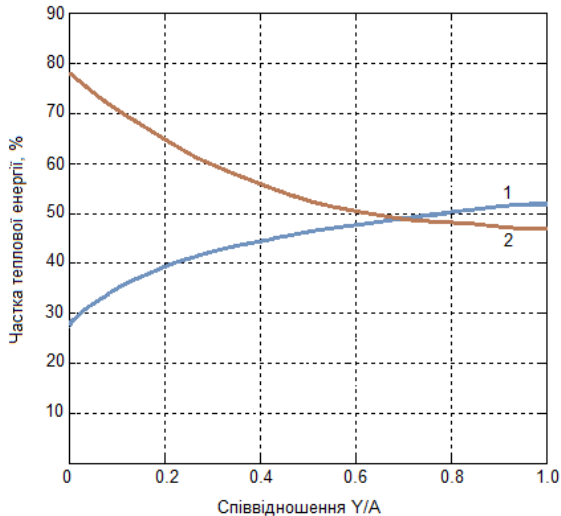


Рисунок 7 – Розподіл енергії в системі оброблювана деталь – шліфувальний круг

Висновки

1. Теплова енергія, виділена під час шліфування, поглинається оброблюваною поверхнею, шліфувальним кругом, стружкою та охолоджуючою рідиною. Проте розподіл енергії в даній системі не є сталим. Частка тепла, поглинута поверхнею деталі, залежить від низки чинників, які слід враховувати при подальшій розробці САПР ТП шліфування покриттів.

2. Результати, отримані при моделюванні процесу шліфування плазмових покриттів, добре узгоджуються з даними експериментального дослідження температурного поля за тих самих умов.

3. Завдяки використанню змащувально-охолоджуючої рідини можна значно зменшити максимальні та середні значення температур в різних напрямках зони шліфування при незмінному профілі температурного поля, що підтверджують результати проведених досліджень.

Список використаних джерел: 1. *Blok H.A.* Theoretical study of temperature rise at surfaces of actual contact under oiliness lubricating conditions / *H.A. Blok* // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – London, 1937. – Vol. 2. – pp. 222-235. 2. *Jaeger J.C.* Moving sources of heat and temperature at sliding contacts / *J.C. Jaeger* // Proceedings: Royal Society – New South Wales, 1942. – Is. 76. – pp. 203-224. 3. *Lavine A.S.* An exact solution for surface temperature in down grinding / *A.S. Lavine* // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000. – Vol. 43. – pp. 4447-4456. 4. *Landman U.* Molecular dynamics simulations of adhesive contact formation and friction/*U.Landman, W.D. Luedtke, E.M. Ringer* // Fundamentals of Friction: Macroscopic and Microscopic Processes – Springer, Dordrecht, 1992. – pp. 463-510. 5. *Rigney D.A.* Plastic deformation and sliding friction of metals / *D.A. Rigney, J.P. Hirth* // Wear, 1979. – Vol. 53, Is.2. – pp. 345-370. 6. *Zhang L.* New heat flux model in surface grinding / *L. Zhang, P.Q. Ge et al.* // Materials Science Forum, 2004. – Vols. 471-472. – pp. 298-301. 7. *Deivanathan R.* Theoretical analysis of thermal profile and heat transfer in grinding / *R. Deivanathan, L. Vijayaraghavan* // International Journal of Mechanical and Materials Engineering (IJMME), 2013. – Vol. 8, No. 1. – pp. 21-31. 8. *Deng Z.H.* Critical Grinding Condition Model for Predicting Grinding Induced Lateral Cracks in Nanostructured Ceramic Coatings / *Z.H. Deng, Q.Y. Jin, B. Zhang* // Key Engineering Materials, 2004. – Vols. 259-260. – pp. 273-277. 9. *González-Santander J.* Maximum Temperature in Dry Surface Grinding for High Peclet Number and Arbitrary Heat Flux Profile / *J.L. González-Santander* // Mathematical Problems in Engineering, 2016. – Vol. 2016. – p. 9. 10. *Усов А.В.* Исследование термомеханических явлений при шлифовании материалов и сплавов, склонных к трещинообразованию / *А.В. Усов, Л.А. Воробьева, С.Г. Смирный* // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2/7 (74), 2015. – с. 48-56. 11. *Brinksmeier E.* Advances in modelling and simulation of grinding processes / *E. Brinksmeier, J.C. Aurich et al.* // CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2006. – Vol. 55, issue 2. – pp. 667-696. 12. *Широков А.В.* Повышение эффективности шлифования заготовок на основе имитационного моделирования процесса формирования шероховатости поверхности: дис. канд. техн. наук / *А.В. Широков.* – Самара, 2012. – 171 с. 13. *Соловьев В.А.* Теория отслаивания пленок и защитных покрытий / *В.А.Соловьев, В.Н. Сачко, Т.Д. Шермергор* // Поверхность. Физика, химия, механика. – № 10, 1982. – с. 51-58. 14. *Тонконогий В.М.* Врахування властивостей композиційних порошоків на основі TiC, плакованого Ni(P), при розробці САПР ТП / *В.М. Тонконогий, А.С. Сінківський,*

О.В. Рибак // Сучасні технології в машинобудуванні. – Вип.12. – Харків: ХТУ «ХП», 2017. – с. 31 – 41.

Volodymyr Tonkonogyi, Olga Rybak, Odesa, Ukraine

MODELLING AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE HEAT TRANSFER PROCESSES WHILE GRINDING WORKPIECES WITH PLASMA COATINGS

Abstract. *In the process of grinding, high values of thermal energy are generated due to the friction and stresses that occur when an abrasive grain removes the material of the surface layer. The major part of the produced energy flows into the workpiece that may have a negative impact on serviceability of the processed tool. Therefore productivity, quality and cost of the technological process of plasma coatings grinding depends on distribution of thermal energy, since an excessive increase of temperature within the contact zone between the grinding wheel and the workpiece causes surface and structural defects generation and propagation. Results of modelling of the temperature thermal field of plasma coatings during the grinding process are considered in the presented research. The obtained experimental data confirms estimated results on temperatures produced while the workpieces are being processed. Experimental testings are carried out for different conditions of dry and lubricated friction to define maximum values of temperatures for grinding regimes with the use of the cutting fluid. Analysis of the temperature field profile is required to obtain information about the heat energy distribution within a grinding zone, occurring heat transfer processes and energy fraction transported to the workpiece with a coating layer. This data is especially important in order to reduce grinding defects such as grinding burns and cracks, structural changes of plasma coating material and other intrinsic defects propagation as they tend to become centers of the possible crack formation. Another common type of defects, that makes it inappropriate to use a workpiece after being processed, is debonding of a coating layer from a substrate. In order to avoid the destruction of adhesive contacts between the coating layer and the substrate and to provide the required quality of the processed surface, modelling of temperature field and heat transfer distribution is necessary while setting optimal conditions for grinding plasma coatings.*

Keywords: *temperature field, modelling, heat transfer, grinding, plasma coatings, energy distribution.*