

*СТРЕЛЬЧУК Р. М.***РЕГУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИМИ ПРОЦЕСАМИ ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО ШЛІФУВАННЯ ЗІ ЗМІННОЮ ПОЛЯРНІСТЮ ЕЛЕКТРОДІВ**

Досліджено температурний режим під час електроерозійного шліфування з періодичною зміною полярності електродів. Особливу увагу приділено аналізу теплових явищ, що виникають у зоні різання, та їх впливу на якість обробленої поверхні. Використовуючи графічне середовище Thirdwavesys, було проведено моделювання процесу, що дозволило створити імітаційну модель, яка враховує вплив теплових імпульсів на активний опір міжелектродного зазору та параметри електророзрядних імпульсів. Експериментальні дослідження показали, що електричні процеси в міжелектродному зазорі мають коливальний характер, що впливає на тепловий режим. Отримані результати дозволили розробити математичну модель, яка точно відображає реальні електричні процеси, що відбуваються в зоні різання. Це забезпечує більш точне прогнозування поведінки різального інструменту і оброблюваного матеріалу, підвищуючи ефективність та якість процесу електроерозійного шліфування. Загалом, дослідження підтверджують важливість контролю температури для досягнення стабільної якості обробки і мінімізації термічних деформацій. Висновки цієї роботи сприятимуть подальшому розвитку технологій електроерозійного шліфування та їх застосуванню в промисловості для обробки високоякісних деталей з важкооброблюваних матеріалів.

Ключові слова: температурний режим, теплові явища, міжелектродний зазор, моделювання, якість обробки, термічні деформації, електророзрядні імпульси

*STRELCHUK R. M.***REGULATION OF THERMAL PROCESSES DURING ELECTROEROSIVE GRINDING WITH VARIABLE ELECTRODE POLARITY**

The temperature regime during electroerosive grinding with periodic change of electrode polarity was studied. Special attention is given to the analysis of thermal phenomena occurring in the cutting zone and their impact on the quality of the machined surface. Using the Thirdwavesys graphical environment, process modeling was conducted, allowing for the creation of a simulation model that considers the influence of thermal impulses on the active resistance of the interelectrode gap and the parameters of electrodischarge impulses. Experimental studies have shown that electrical processes in the interelectrode gap exhibit an oscillatory nature, affecting the thermal regime. The obtained results allowed for the development of a mathematical model that accurately reflects the real electrical processes occurring in the cutting zone. This ensures more precise prediction of the behavior of the cutting tool and the machined material, enhancing the efficiency and quality of the electroerosive grinding process. Overall, the research confirms the importance of temperature control to achieve stable machining quality and minimize thermal deformations. The conclusions of this work will contribute to the further development of electroerosive grinding technologies and their application in the industry for machining high-quality parts from hard-to-machine materials.

Keywords: temperature regime, thermal phenomena, interelectrode gap, modeling, machining quality, thermal deformations, electrodischarge impulses

Вступ. Електроерозійне шліфування є одним з ефективних методів обробки важкооброблюваних матеріалів, зокрема завдяки здатності впливати на мікроструктуру і поверхневий шар оброблюваного матеріалу [1]. Цей процес базується на використанні електричних розрядів, які виникають при пробі міжелектродного середовища, що створює складні електричні та теплові явища у зоні різання. Однією з важливих характеристик цього процесу є температура, яка значно впливає на якість обробленої поверхні та тривалість експлуатації інструменту [2]. В даній роботі досліджується температура у процесі електроерозійного шліфування з періодичною зміною полярності електродів. Зміна полярності є ключовим фактором, який впливає на тепловий режим процесу і дозволяє керувати розподілом тепла у зоні різання. Автор провів детальний аналіз теплових явищ, що виникають під час цього процесу, з використанням математичного моделювання та експериментальних даних. Це дозволило створити імітаційну модель, яка враховує вплив теплових імпульсів на активний опір міжелектродного зазору та параметри електророзрядних імпульсів.

Аналіз основних досягнень та літератури. Електроерозійне шліфування є однією з прогресивних технологій обробки важкооброблюваних матеріалів, таких як тверді сплави, композити та надтверді матеріали. Основною перевагою цього методу є можливість досягнення високої точності і якості обробленої поверхні при мінімальному механічному впливі на матеріал [3]. Цей розділ надає огляд основних досягнень у галузі електроерозійного шліфування та аналіз літературних джерел, які висвітлюють теплові явища та їх вплив на якість обробки.

Одним з головних досягнень у галузі електроерозійного шліфування є розвиток методів числового моделювання та симуляції, що дозволяє прогнозувати температурні поля і теплові ефекти під час процесу обробки. Використання таких програмних середовищ, як Thirdwavesys, стало важливим інструментом для аналізу і оптимізації технологічних параметрів. Це дозволяє більш точно контролювати процес та підвищувати його ефективність.

Підвищення якості обробленої поверхні є ще одним значущим досягненням. Зокрема, контроль за тепловими процесами і температурними полями дозволяє знижувати термічні деформації і покращувати структурні властивості поверхні. Зміна полярності електродів під час процесу електроерозійного шліфування забезпечує більш рівномірний розподіл тепла, що сприяє зменшенню термічних навантажень і підвищенню якості обробки [4].

Аналіз літературних джерел показує, що основи електроерозійного шліфування були закладені ще в середині 20 століття. Фундаментальні дослідження тих часів висвітлювали природу електричних розрядів і їх вплив на матеріали. З того часу відбувся значний прогрес у розумінні і контролі цього процесу. Сучасні дослідження зосереджуються на детальному аналізі теплових явищ і їх впливу на мікроструктуру матеріалу. Наприклад, роботи з моделюванням температурних полів і їх взаємодією з електричними параметрами розрядів стали основою для розробки нових технологічних рішень, що дозволяють покращити якість і ефективність обробки [5, 6].

Експериментальні дослідження, проведені з використанням високошвидкісних камер та інших методів візуалізації, показують важливість контролю температури для забезпечення стабільної якості обробки. Ці дослідження дозволяють отримати детальні зображення процесів, що відбуваються у зоні різання, і краще розуміти механізми, які впливають на кінцевий результат.

Загалом, аналіз основних досягнень і літератури показує, що електроерозійне шліфування продовжує залишатися актуальною і перспективною технологією обробки важкооброблюваних матеріалів. Інноваційні підходи до моделювання і контролю теплових процесів відкривають нові можливості для підвищення ефективності та якості обробки. Відповідні дослідження та розробки у цій галузі сприяють розвитку промисловості та вдосконаленню технологічних процесів, забезпечуючи високоякісну обробку матеріалів для різних застосувань.

Матеріали дослідження. Внутрішні кордони в структурі шліфувальних матеріалів можна розділити на два типи: 1) поверхні розділу двох фаз; 2) поверхні, на яких змінюються теплофізичні та механічні властивості в різних напрямках. Наявність двох фаз пов'язана, наприклад, із виділенням на межах зерен металу цементитної, нітридної або інтерметалідної сіток, із наявністю карбідної строчковості або інших неметалічних включень.

Математичну постановку задачі, що враховує вплив внутрішніх кордонів першого типу на теплонапруженість електроерозійного шліфування, розглянемо для двох найпоширеніших варіантів: перший – теплове джерело зустрічає межу розділу металу з чужорідним включенням або рухається уздовж межі розділу, другий варіант – під шаром основного металу завтовшки Δ залягає тонкий шар чужорідного включення завтовшки δ з теплофізичними константами $(\lambda_2, a_2, \gamma_2, C_2)$, які різко відрізняються від констант $(\lambda_1, a_1, \gamma_1, C_1)$ основного металу (рис. 1). Ширина джерела дорівнює l , швидкість у напрямку осі y становить V , повний час знаходження над точкою поверхні, тепло поширюється вглиб у першому варіанті за віссю z , у другому – за віссю x . За досить великих швидкостей теплових процесів для розв'язання теплофізичних задач можна скористатися теорією джерел тепла, що швидко рухаються [6].

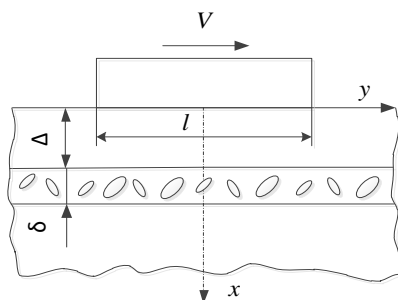


Рис. 1– Теплова схема для розрахунку температур під час шліфування

Завдання для першого варіанта формулюється так. На поверхні $y=0$ задано тепловий потік q . Область простору $y > 0$ має теплофізичні параметри λ_1, γ_1, C_1 , а область $y < 0$ – λ_2, γ_2, C_2 . Необхідно розв'язати систему рівнянь:

$$\frac{1}{a_i} \frac{\partial \Theta_i}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta_i}{\partial z^2}, (i=1,2) \quad (1)$$

з граничними умовами:

$$\lambda_1 \frac{\partial \Theta_i}{\partial z} \Big|_{z=0} = -q, (i=1,2) \quad (2)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial \Theta_1}{\partial y} \Big|_{y=0} = \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (3)$$

$$\Theta_1 \Big|_{y=0} = \Theta_2 \Big|_{y=0} \quad (4)$$

З метою спрощення розв'язання поставленої задачі (1–4) скористаємося таким прийомом. Уздовж осі z за умови $y = 0 + \varepsilon$ (ε – нескінченно мала величина) і за умови $y = 0 - \varepsilon$ помістимо фіктивні джерела $q_1(z, \tau)$. Це робиться для того, щоб врахувати перехід тепла з одного середовища в інше за рахунок різниці теплофізичних параметрів. Неважко бачити, що за такого способу завдання фіктивних джерел умова (3) виконується

автоматично, а для виконання умови (4) необхідно, щоб була справедливою певна система рівнянь, що підлягають розв'язанню.

Таким чином, для отримання розв'язку задачі рівностей (1–4) слід провести згортку відомого одновимірного фундаментального розв'язку з джерелами постійної потужності – q і з фіктивними джерелами змінної потужності – $q_1(z', \tau)$:

$$\begin{aligned} \Theta_i(y, z, \tau) = & \frac{q}{\pi\lambda_i} \int_0^\tau \frac{d\tau'}{\tau - \tau'} \int_0^\infty dy' \exp\left[-\frac{z^2 + y'^2}{4a_i(\tau - \tau')}\right] + \\ & + \frac{(-1)^{i+1}}{2\pi\lambda_i} \int_0^\tau \frac{d\tau'}{\tau - \tau'} \int_0^\infty dz' q_1(z', \tau') \exp\left[-\frac{y^2 + (z - z')^2}{4a_i(\tau - \tau')}\right] + \\ & + \exp\left[-\frac{y^2 + (z + z')^2}{4a_i(\tau - \tau')}\right], (i=1,2). \end{aligned} \quad (5)$$

Функція $\Theta_i(y, z, \tau)$ задовольняє диференціальному рівнянню (1) і граничним умовам (2–4). Використовуючи умову рівності температур на межі розділу (5.16), отримуємо рівняння для визначення функції $q(z', \tau)$:

$$\begin{aligned} \Theta_{1o}(z, \tau) + \frac{1}{2\pi\lambda_1} \int_0^\tau \frac{d\tau'}{\tau - \tau'} \int_0^\infty dz' q_1(z', \tau') \exp\left[\left(-\frac{z^2 - z'^2}{4a_1(\tau - \tau')}\right)\right] + \\ + \exp\left[-\frac{(z + z')^2}{4a_1(\tau - \tau')}\right] = \Theta_{2o}(z, \tau) - \frac{1}{2\pi\lambda_2} \int_0^\tau \frac{d\tau'}{\tau - \tau'} \int_0^\infty dz' q_1(z', \tau') \times \\ \times \left[\exp\left(-\frac{z^2 - z'^2}{4a_2(\tau - \tau')}\right) + \exp\left(-\frac{(z + z')^2}{4a_2(\tau - \tau')}\right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

де

$$\Theta_1 = \frac{2q\sqrt{\tau}}{\varepsilon_i} i \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_i\tau}}\right), (i=1,2), \varepsilon_i = \frac{\lambda_i}{\sqrt{a_i}}. \quad (7)$$

Рівняння 5.13 за вказаних граничних умов (2–4) зводиться до подвійного інтегрального рівняння типу Абеля за часом і рівняння Вінера – Гопфа за координатою [7]. Після обчислення інтегралів виразу (6) в асимптотичному випадку великих швидкостей (за малих τ) отримаємо:

$$\Theta_{2o}(\tau, z) - \Theta_{1o}(\tau, z) = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_1\varepsilon_2\sqrt{\pi}} \int_0^\tau \frac{d\tau' q_1(z, \tau')}{\sqrt{\tau - \tau'}}. \quad (8)$$

Застосовуючи перетворення Лапласа, отримуємо розв'язок рівняння (8):

$$q_1(z, \tau) = \frac{d}{dt} \int_0^\tau \frac{\Theta_{2o}(z, \tau') - \Theta_{1o}(z, \tau')}{\sqrt{\tau - \tau'}} d\tau' \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\sqrt{\pi}}. \quad (9)$$

Після підстановки рівняння (9) у рівність (57) та інтегрування за z знаходимо:

$$\begin{aligned} \Theta_i(y, z, \tau) = \Theta_{io}(z, \tau) + \frac{(-1)^{i+1} \varepsilon_1 \varepsilon_2}{\pi \varepsilon_i (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \int_0^\tau \frac{d\tau'}{\sqrt{\tau' - \tau}} \exp \times \\ \times \left[-\frac{y'}{4a_i(\tau - \tau')} \right] \frac{d}{d\tau'} \int_0^\tau \frac{\Theta_{2o}(z, \tau'') - \Theta_{1o}(z, \tau'')}{\sqrt{\tau' - \tau''}} d\tau''. \end{aligned} \quad (10)$$

Температура Θ_1 визначається виразом (7). Вираз (10) являє собою розв'язок поставленої задачі, оскільки до нього входять тільки відомі параметри середовищ і потужність джерела тепла, що рухається поверхнею $y = 0$. На поверхні $y = 0$ за $i=1,2$ маємо:

$$\Theta_1(y, z) = \frac{2q\sqrt{\tau}}{\varepsilon_1\sqrt{\pi}} \left[1 + \frac{(-1)^{i+1}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{a_i\tau}}\right) \right]. \quad (11)$$

З аналізу отриманого виразу видно, що зміна температури поблизу межі розділу відбувається в області:

$$\Delta_i \approx 4\sqrt{a_i\tau} = 4\sqrt{a_i l / V},$$

де l – ширина зони контакту круга з виробом.

Відношення температури на поверхні розділу двох середовищ під джерелом до температури в цій самій точці, але за наявності тільки одного середовища $\Theta_{однор}$, характеризує підвищення температури на межі розділу відповідно до значень теплофізичних параметрів обох середовищ:

$$\frac{\Theta_{неодн}}{\Theta_{однор}} = 2 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}.$$

Отриманий результат має досить ясне фізичне тлумачення. З фізичної точки зору наявність нетеплопровідних (адіабатичних) стінок у ділянці дії теплового джерела відповідає появі додаткових джерел тепла, що призводить до більшої теплонапруженості процесу шліфування і, як наслідок, до погіршення якості поверхневого шару.

Цей ефект з'являється, наприклад, під час електроерозійного шліфування вирубних штампів зі сталей Р6М5, Х12. Помічено, що під час шліфування площин матриць вирубних штампів тріщини утворюються незалежно від напрямку шліфування відносно карбідної строчковості, що формується в процесі виготовлення прокату зі злитків. Наявність у сталі двох фаз (карбідів і основної матриці), що різко відрізняються за фізичними властивостями, створює умови для концентрації теплових напружень і крихкого руйнування матеріалу на межі розділу. Це свідчить про те, що тепловий режим шліфування в поєднанні з карбідною строчечністю визначають формування поверхневого шару. У зв'язку з цим великий інтерес представляє розгляд теплових явищ під час шліфування сталей, у яких на певній глибині від поверхні залягають шари у вигляді цементитної або інтерметалічної сіток, теплофізичні контакти яких відрізняються від констант основного матеріалу (рис. 1). Для цього випадку математична постановка задачі формується таким чином. Необхідно розв'язати систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{1}{a_i} \frac{\partial G_i(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 G_i(x, \tau)}{\partial x^2}, i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

з граничними та початковими умовами

$$\lambda_1 \frac{\partial G_1}{\partial x} \Big|_{x=\Delta} = \lambda_2 \frac{\partial G_2}{\partial x} \Big|_{x=\Delta}; \lambda_2 \frac{\partial G_2}{\partial x} \Big|_{x=\Delta+\delta} = \lambda_3 \frac{\partial G_3}{\partial x} \Big|_{x=\Delta+\delta}; \quad (13)$$

$$G_i(\Delta, \tau) = G_2(\Delta, \tau); G_2(\Delta + \delta, \tau) = G_3(\Delta + \delta, \tau); G_i(x, 0) = 0; i = 1, 2, 3, \quad (14)$$

де G_i – функція миттєвого впливу теплового джерела. Застосовуючи до системи рівнянь (12) перетворення Лапласа в часі та враховуючи умови (13, 14), розв'язок для функції $G_L(x, S)$ отримуємо в такому вигляді:

$$G_{L1}(x, S) = \frac{1}{\varepsilon_1 \sqrt{S}} \left\{ \exp\left(-\sqrt{\frac{S}{a_1}} x\right) + \exp\left(-\sqrt{\frac{S}{a_1}} \Delta\right) \times \right. \\ \times ch \sqrt{\frac{S}{a_1}} x \left\{ [\varepsilon_2 ch \sqrt{\frac{S}{a_2}} \Delta + \varepsilon_3 ch \sqrt{\frac{S}{a_2}} \delta] \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \times \right. \\ \left. \left. \times [\varepsilon_2 ch \sqrt{\frac{S}{a_2}} \Delta + \varepsilon_3 ch \sqrt{\frac{S}{a_2}} \delta] \right\} \right\} Det^{-1}, 0 \leq x \leq \Delta. \quad (15)$$

$$G_{L2}(x, S) = \frac{1}{\sqrt{S}} \left\{ \left(\varepsilon_2 ch \sqrt{\frac{S}{a_2}} \delta + \varepsilon_3 ch \sqrt{\frac{S}{a_2}} \delta \right) \times \right. \\ \times ch \sqrt{\frac{S}{a_2}} (x - \Delta) - \left(\varepsilon_3 ch \sqrt{\frac{S}{a_2}} \delta + \right. \\ \left. + \varepsilon_3 ch \sqrt{\frac{S}{a_2}} \delta \right) sh \sqrt{\frac{S}{a_2}} (x - \Delta) \left. \right\} Det^{-1}, \Delta < x \leq \Delta + \delta. \quad (16)$$

$$G_{L3}(x, S) = \frac{1}{\sqrt{S}} \exp\left[-\sqrt{\frac{S}{a_3}} (x - \Delta - \delta)\right] Det^{-1}, \quad (17)$$

$$\infty > x > \Delta + \delta, \\ \text{де } Det = \varepsilon_1 sh\left(\sqrt{\frac{S}{a_1}} \Delta\right) \left(\varepsilon_2 ch \sqrt{\frac{S}{a_2}} \delta + \varepsilon_3 sh \sqrt{\frac{S}{a_2}} \delta \right) + \quad (18)$$

$$+ \varepsilon_2 ch\left(\sqrt{\frac{S}{a_1}} \Delta\right) \left(\varepsilon_2 sh \sqrt{\frac{S}{a_2}} \delta + \varepsilon_3 ch \sqrt{\frac{S}{a_2}} \delta \right),$$

$$\varepsilon_i = \frac{\lambda_1}{\sqrt{a_i}} \quad (i = 1, 2, 3). \quad (19)$$

Вирази (16-18) після деяких перетворень зводяться до табличних інтегралів:

$$G_{L1}(x, \tau) = \frac{1}{\varepsilon_1 \sqrt{\pi \tau}} \left\{ \exp\left(-\frac{x^2}{4a_1 \tau}\right) + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \sum_{m=0}^k H_{nkm} \times \right. \\ \times \left[h_{12} \left[\exp\left(-\frac{1}{4\tau} \left(\frac{2\Delta - x}{\sqrt{a_1}} + \alpha_{12} \right)^2 \right) + \exp\left(-\frac{1}{4\tau} \left(\frac{2\Delta - x}{\sqrt{a_1}} + \alpha_{12} \right)^2 \right) \right] + \right. \\ \left. + h_{23} \left[\exp\left(-\frac{1}{4\tau} \left(\frac{2\Delta - x}{\sqrt{a_1}} + \alpha_{12} + \frac{2\delta}{\sqrt{a_2}} \right)^2 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \exp\left(-\frac{1}{4\tau} \left(\frac{2\Delta - x}{\sqrt{a_1}} + \alpha_{12} + \frac{2\delta}{\sqrt{a_2}} \right)^2 \right) \right] \right\}, \quad (20)$$

$$G_{L2}(x, \tau) = \frac{2}{\sqrt{\pi \tau} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \sum_{m=0}^k H_{nkm} \times \\ \times \left\{ h_{23} \exp\left[-\frac{1}{4\tau} \left(\frac{2\delta - x + \Delta}{\sqrt{a_2}} + \frac{\Delta}{\sqrt{a_1}} + a_{12} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. + \exp\left[-\frac{1}{4\tau} \left(\frac{x - \Delta}{\sqrt{a_2}} + \frac{\Delta}{\sqrt{a_1}} + a_{12} \right)^2 \right] \right\}, \quad (21)$$

$$G_{L3}(x, \tau) = \frac{4\varepsilon_2}{\sqrt{\pi \tau} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \sum_{m=0}^k H_{nkm} \times \\ \times \exp\left[-\frac{1}{4\tau} \left(\frac{x - \Delta - \delta}{\sqrt{a_3}} + a_{12} + \frac{\Delta}{\sqrt{a_1}} + \frac{\delta}{\sqrt{a_2}} \right)^2 \right], \quad (22)$$

де

$$H_{nkm} = \binom{n}{k} \binom{k}{m} h_{12}^{n-m} (-h_{23})^k (-1)^m, \quad (23)$$

$$\alpha_{12} = \frac{2\Delta(n-k+m)}{\sqrt{a_1}} + \frac{2\delta k}{\sqrt{a_2}}, \quad (24)$$

$$h_{12} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}; h_{23} = \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)}, \quad (25)$$

$\binom{n}{k}$ – біноміальні коефіцієнти,

$$\binom{n}{k} = \frac{n(n-1)\dots(n-k+1)}{1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot k}; \binom{n}{0} = 1.$$

Вирази (20–22) є узагальненням рішень А. В. Ликова [302]. Температуру в будь-якій точці матеріалу можна знайти, здійснивши згортку за часом $G(x, \tau)$ і $q(\tau)$:

$$\Theta(x, \tau) = \int_0^{\tau} G(x, \tau') q(\tau') d\tau',$$

де q – щільність теплового потоку.

Аналіз виразів (20–22) показує, що за малих значень τ можна обмежуватися одним членом з усього ряду і тоді розрахункові формули набувають простого вигляду. Приймаючи $h_{12} = -h_{23} = h > 0$, що відповідає початковому завданню, і нехтуючи величиною δ/Δ , отримуємо:

$$\begin{aligned} \Theta_1(x < \Delta, \tau) &= \frac{2q}{\lambda_1} \sqrt{\tau} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1\tau}}\right) + \frac{2h\delta q \sqrt{a_1}}{\lambda_2} \times \\ &\times \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{2\Delta+x}{2\sqrt{a_1\tau}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{2\Delta-x}{2\sqrt{a_1\tau}}\right) \right], \\ \Theta_2(x > \Delta, \tau) &= \frac{8q}{\lambda_1} \sqrt{a_1\tau} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1\tau}}\right) \frac{K_\varepsilon}{(1+K_\varepsilon)^2}, \end{aligned} \quad (26)$$

$$\text{де } K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}.$$

У виразі (26) перший доданок відповідає одновимірному завданню за відсутності теплового бар'єру на шляху просування тепла в глиб виробу, другий дає надбавку до температури, зумовлену наявністю цементної, нітридної або інтерметалідної сіток, які залягають на деякій глибині від поверхні. Величина цього приросту пропорційна товщині адіабатичної стінки δ , вона убуває з віддаленням від шліфувальної поверхні (зі збільшенням Δ) і залежить від теплофізичних параметрів включень (стінки) і матриці матеріалу. На поверхні $x = 0$

$$\Theta = \frac{2q\sqrt{\tau}}{\varepsilon_1\sqrt{\pi}} \left[1 + \frac{2\delta h\sqrt{\pi}}{\sqrt{a_2\tau}} \operatorname{erfc}\left(\frac{\Delta}{\sqrt{a_1\tau}}\right) \right].$$

Зі збільшенням швидкості руху теплового джерела (зменшення τ) включення мають менший вплив на зміну температури. Градієнт температури, що виникає в тонкому проміжному шарі (перепад температури, віднесений до товщини цього шару),

$$\left| \frac{d\Theta}{dx} \right|_{x=\Delta} = \frac{2(1+h)q}{\sqrt{a_2}(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \operatorname{erfc}\left(\frac{\Delta}{2\sqrt{a_1\tau}}\right). \quad (27)$$

Відношення температурного градієнта неоднорідного середовища до такого ж градієнта однорідного матеріалу в тій самій точці:

$$\frac{\left(\frac{d\Theta}{dx}\right)_{\text{неод}}}{\left(\frac{d\Theta}{dx}\right)_{\text{однор}}} = \frac{2(1+h)}{\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}\right)}.$$

Як видно з формули, наявність у матеріалі чужорідних включень із різними теплофізичними характеристиками призводить до підвищення градієнта температури. Щоб зменшити вплив чужорідних включень на теплонапруженість поверхневого шару шліфувального матеріалу, необхідно збільшити швидкість руху теплового джерела, що еквівалентно перериванню процесу оброблення за електроерозійного алмазного шліфування, наприклад, за періодичної зміни полярності електродів у зоні різання. Тобто зі збільшенням швидкості руху теплового джерела температурне поле проникає на меншу глибину і чужорідне включення виключається із зони дії теплового джерела.

Теплонапруженість зростає не тільки на кордонах розділу фаз, що перешкоджають вільному проходженню теплового потоку в глиб виробу, а й на кордонах, обумовлених анізотропією теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу. Наприклад, швидкорізальна сталь Р6М5 являє собою ортотропне середовище, для якого коефіцієнт теплопровідності має різне значення в трьох взаємоперпендикулярних напрямках, прийнятих за координатні осі x, y, z . Фундаментальний розв'язок для точкового миттєвого джерела тепла, поміщеного в ортотропне середовище, має вигляд:

$$\begin{aligned} \delta\Theta &= \frac{(C\gamma)^{0.5}}{\left[4\pi(\tau - \tau')\right]^{1.5} (\lambda_x \lambda_y \lambda_z)^{0.5}} \exp\left\{-\frac{C\gamma}{4(\tau - \tau')} \times \right. \\ &\times \left. \left[\frac{(x-x')^2}{\lambda_x} + \frac{(y-y')^2}{\lambda_y} + \frac{(z-z')^2}{\lambda_z} \right] \right\}, \end{aligned}$$

де C – питома теплоємність; γ – щільність; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – коефіцієнти теплопровідності в напрямі координатних осей x, y, z .

Процес теплового насичення стабілізується досить швидко, тому межі інтегрування за τ' можна прийняти рівними 0 і ∞ . Приймаючи $\lambda_x = \lambda_y$ і переходячи до системи відліку, пов'язаної з серединою джерела, після інтегрування за координатами і часом отримуємо:

$$\Theta = \frac{q}{\pi(\lambda_x \lambda_z)^{0.5}} \left\{ \int_{-0.5l}^{0.5l} \exp \left[\frac{V(z-z')}{2a_z} \right] K_0 \left[\frac{VC\gamma}{2\sqrt{\lambda_z}} \times \left(\frac{(z-z')^2}{\lambda_z} + \frac{x^2}{\lambda_x} \right)^{0.5} \right] dz' \right\},$$

де K_0 - модифікована функція Бесселя другого роду; l - ширина джерела; q - густина теплового потоку; az - коефіцієнт температуропровідності в напрямку руху джерела. Для точок на поверхні $y = 0$.

$$\Theta = \frac{q}{\pi(\lambda_x \lambda_z)^{0.5}} \left\{ (z+0.5l) \exp \left[-\frac{V(z+0.5l)}{2a_z} \right] \left[K_0 \left(\frac{V(z+0.5l)}{2a_z} \right) - K_1 \left(\frac{V(z+0.5l)}{2a_z} \right) \right] - (z-0.5l) \exp \left[-\frac{V(z-0.5l)}{2a_z} \right] \times \left[K_0 \left(\frac{V(z-0.5l)}{2a_z} \right) - K_1 \left(\frac{V(z-0.5l)}{2a_z} \right) \right] \right\}.$$

Для визначення максимальної температури на задній кромці теплового джерела використовується рівняння:

$$\Theta_{\max} = \frac{ql}{\pi(\lambda_x \lambda_x)^{0.5}} \left\{ \frac{2a_z}{lV} + \exp \left(\frac{Vl}{2a_z} \right) \left[K_0 \left(\frac{Vl}{2a_z} \right) + K_1 \left(\frac{Vl}{2a_z} \right) \right] \right\}. \quad (28)$$

Результати. На підставі проведених досліджень та аналізу виразу (28) впливає, що за незмінної потужності шліфування найменші значення температур на задній кромці джерела спостерігаються в тому разі, якщо джерело рухається в напрямку максимальної теплопровідності. Це пов'язано з тим, що в цьому разі з'являється можливість додаткового відведення тепла в напрямку більшої теплопровідності матеріалу.

Теоретичні положення підтверджено експериментально і проведено моделювання температури шліфування під час обробки швидкорізальної сталі Р6М5 на різних режимах обробки. Залежності сил різання, температури та потужності шліфування під час обробки швидкорізальної сталі Р6М5 кругом 12А2-45° 150×10×3×32 на зв'язці М1-01 з алмазними зернами АС6, зернистістю 100/80 та концентрацією - 4 представлено на рис. 2. Як видно, наявність меж, що перегороджують поширення теплового потоку, у всіх випадках призводить до зростання локальної теплонапруженості. Зміна температури в ділянці меж пов'язана з геометрією оброблюваної деталі та відносним рухом джерела тепла. Велике значення мають параметри самого джерела тепла і характер тепловиділення в часі.

Рівень теплонапруженості шліфуваної поверхні можна зменшити за рахунок зниження енергоємності процесу обробки або за рахунок вибору оптимального переміщення різальних зерен і теплового джерела з урахуванням індивідуальних особливостей конфігурацій деталей і структури матеріалу.

Перший варіант реалізується підбором режимів шліфування, характеристик кругів і СОТС. Другий вимагає під час шліфування враховувати особливості структури, що сформувалися під час термічного оброблення (наприклад, у цементованих сталях часто на кордонах зерен виділяється цементитна сітка, у жароміцних сплавах типу ЖС-6К - інтерметалідна сітка).

Зміна полярності електродів під час електроерозійного шліфування зменшує вплив як внутрішніх (структурних), так і зовнішніх меж деталей. З особливою ефективністю цей метод шліфування застосовується для обробки деталей, що виготовляються з цементованих, азотованих і загартованих сталей, твердих сплавів, а також із надтвердих матеріалів. У зв'язку з тим, що імпульсні розряди чинять теплову дію не тільки на оброблювану поверхню і зв'язку круга, а й на алмазні зерна, тому що вони виникають у безпосередній близькості від алмазних зерен. Відносно невисока температурна межа (700°С на повітрі) графітизації алмазних зерен може призвести до зниження ріжучої здатності алмазного круга. Однак, за даними роботи [8], інтенсивність окислення алмазу незначна і при температурі 700°С становить близько 0,2% за 1 хв, а при збільшенні температури до 1000°С зростає до 1,5% за 1 хв.

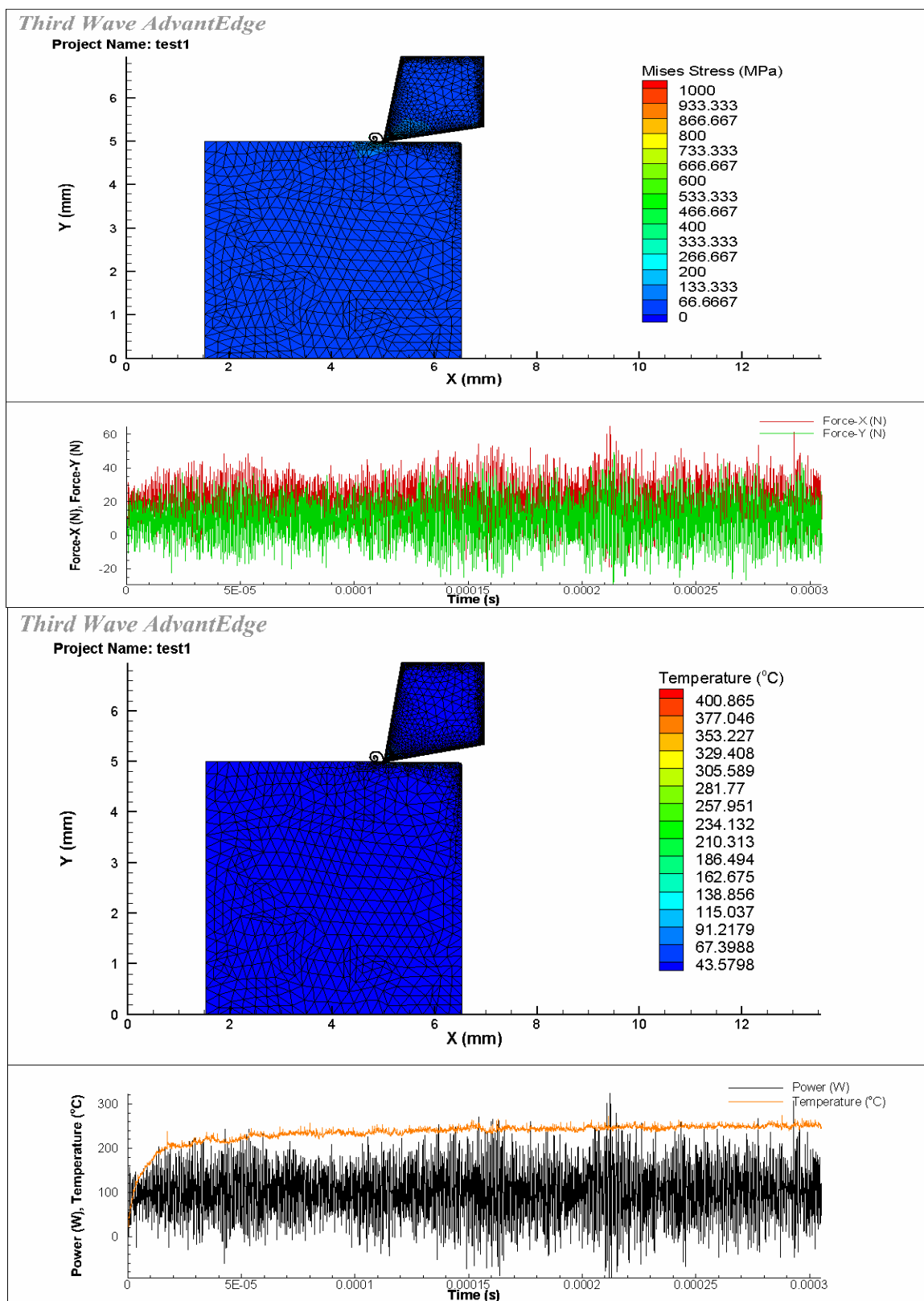


Рис. 2 - Залежності сил різання, температури і потужності шліфування (сталь Р6М5, круг 12А2-45°-150×10×3×32-АС6-100/80 -М1-01-4).

Висновки. На підставі аналізу та результатів експериментальних досліджень і моделювання процесу, середня контактна температура при електроерозійному алмазному шліфуванні має невеликі значення, що пояснюється низкою причин. Насамперед, у процесі шліфування вимірювалася не миттєва температура контакту алмазного зерна з оброблюваним матеріалом, а середня температура на поверхні контакту, що значно менша за миттєву температуру. Однією з причин невеликих значень середньої контактної температури під час електроерозійного шліфування є високі теплопровідність і питома теплоємність алмазних зерен і металевої

зв'язки круга, які сприяють зниженню температури в зоні різання. Застосування СОТС у процесі електроерозійного шліфування також істотно знижує температуру в зоні шліфування. Для твердого сплаву ВК6 вона зменшується з 800°C до 280°C [266]. Під час алмазного шліфування цього ж сплаву кругом на бакелітовій зв'язці без охолодження температура шліфування має близькі значення з температурою електроерозійного шліфування без зміни полярності та в 1...1,5 рази вища, ніж під час зміни полярності електродів.

Дослідження температури в процесі електроерозійного шліфування під час зміни полярності електродів і аналіз теплових явищ дають змогу оцінити ступінь впливу теплового чинника на формування залишкових напружень у поверхневому шарі твердого сплаву.

Спільна дія відносно невеликих середніх контактних температур і великих миттєвих локальних температур позначиться як на макро-, так і мікромеханізмі формування залишкових напружень. Причому, якщо макромеханізм, що залежить від неоднорідності властивостей поверхневого шару і серцевини твердого сплаву, реагуватиме здебільшого на зміну середньої контактної температури, то мікромеханізм, який залежить від неоднорідності теплофізичних властивостей фаз, що складають твердий сплав, може реагувати і на високу локальну температуру. Її внесок у середню контактну температуру зростатиме в посиленні режимів шліфування, що відіб'ється в підвищенні Отже, за зміною величини температури шліфування можна судити про характер залежностей макро- і мікронапруг від режимів різання, враховуючи при цьому підвищену чутливість мікронапруг до дії теплового чинника.

Список літератури:

1. Strelchuk R. Optimization of the Interelectrode Gap in Electrical Discharge Grinding with Changing Electrode Polarity // Roman Strelchuk , Oleksandr Shelkovi // Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange: Book of Abstracts of the 4th International Conference, Lviv, Ukraine, June 8-11, 2021 – Sumy: IATDI, 2021. – P.65. Presented at the .
2. Strelchuk R. Experimental study of the process of electrical discharge diamond grinding with changing polarity of electrodes / R. Strelchuk , A. Shelkovi, C. Iancu, Y. Gutsalenko, O. Volkov // Annals of the „Constantin Brancusi University of Targu Jiu, Romania, Engineering Series, Iss. 2/2021. – pp. 132–141.
3. Rudyk, A.V., Chupryna, V.M.: MATCHING THE THEORETICAL MODEL AND THE RESULTS OF TEMPERATURE AND POWER MEASUREMENTS OF THE GRINDING PROCESS. Transp. dev. 83–96 (2022). <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.07>.
4. Marchuk V.I., Grinyuk S.V., Marchuk I.V.: INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GRINDING MODES AND PARAMETERS OF THE INTERMITTENT GRINDING WHEEL ON THE TEMPERATURE OF GRINDING OF ROLLER BEARING RINGS. 78–81 (2022). <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2022-20-12>.
5. Lapenko, G.O., Yakhin, S.V., Lapenko, T.G., Pavlik, O.G.: OBSERVATION OF VIBRATION OF SHLFING CROWNING PARAMETERS THAT MODES OF SHLFING. BPSAA. 205-212 (2022). <https://doi.org/10.31210/visnyk2022.03.26>.
6. Muñoz Rivera, J.E., Racke, R.: Transmission Problems in (Thermo)Viscoelasticity with Kelvin–Voigt Damping: Nonexponential, Strong, and Polynomial Stability. SIAM J. Math. Anal. 49, 3741–3765 (2017). <https://doi.org/10.1137/16M1072747>.
7. Tönshoff, H.K., Peters, J., Inasaki, I., Paul, T.: Modelling and Simulation of Grinding Processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 41, 677–688 (1992). [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63254-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63254-5).
8. Yadava, V., Jain, V.K., Dixit, P.M.: Temperature Distribution During Electro-Discharge Abrasive Grinding. Machining Science and Technology. 6, 97–127 (2002). <https://doi.org/10.1081/MST-120003188>.

References (transliterated):

1. Strelchuk R. Optimization of the Interelectrode Gap in Electrical Discharge Grinding with Changing Electrode Polarity // Roman Strelchuk , Oleksandr Shelkovi // Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange: Book of Abstracts of the 4th International Conference, Lviv, Ukraine, June 8-11, 2021 – Sumy: IATDI, 2021. – P.65. Presented at the .
2. Strelchuk R. Experimental study of the process of electrical discharge diamond grinding with changing polarity of electrodes / R. Strelchuk , A. Shelkovi, C. Iancu, Y. Gutsalenko, O. Volkov // Annals of the „Constantin Brancusi University of Targu Jiu, Romania, Engineering Series, Iss. 2/2021. – pp. 132–141.
3. Rudyk, A.V., Chupryna, V.M.: MATCHING THE THEORETICAL MODEL AND THE RESULTS OF TEMPERATURE AND POWER MEASUREMENTS OF THE GRINDING PROCESS. Transp. dev. 83–96 (2022). <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.07>.
4. Marchuk V.I., Grinyuk S.V., Marchuk I.V.: INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GRINDING MODES AND PARAMETERS OF THE INTERMITTENT GRINDING WHEEL ON THE TEMPERATURE OF GRINDING OF ROLLER BEARING RINGS. 78–81 (2022). <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2022-20-12>.
5. Lapenko, G.O., Yakhin, S.V., Lapenko, T.G., Pavlik, O.G.: OBSERVATION OF VIBRATION OF SHLFING CROWNING PARAMETERS THAT MODES OF SHLFING. BPSAA. 205-212 (2022). <https://doi.org/10.31210/visnyk2022.03.26>.
6. Muñoz Rivera, J.E., Racke, R.: Transmission Problems in (Thermo)Viscoelasticity with Kelvin–Voigt Damping: Nonexponential, Strong, and Polynomial Stability. SIAM J. Math. Anal. 49, 3741–3765 (2017). <https://doi.org/10.1137/16M1072747>.
7. Tönshoff, H.K., Peters, J., Inasaki, I., Paul, T.: Modelling and Simulation of Grinding Processes. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 41, 677–688 (1992). [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63254-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63254-5).
8. Yadava, V., Jain, V.K., Dixit, P.M.: Temperature Distribution During Electro-Discharge Abrasive Grinding. Machining Science and Technology. 6, 97–127 (2002). <https://doi.org/10.1081/MST-120003188>.

Поступила (received) 15.03.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Стрельчук Роман Михайлович (Strelchuk Roman) – кандидат технічних наук, доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-7221-031X>; e-mail: r.m.strelchuk@gmail.com.