

М.С. Степанов, д.т.н., проф.
П.І. Літовченко, к.т.н., доц.
Л.П. Іванова, асп.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Математична модель теплообміну у резервуарі МОР шліфувального верстату

Пропонується математична модель процесів теплообміну у резервуарі МОР круглошліфувального верстата. Приводяться послідовність і залежності для розрахунку середньої температури МОР у резервуарі і на виході із зони різання та результати тестових розрахунково-аналітичних досліджень.

Ключові слова: система подачі МОР; стаціонарний режим; нестаціонарний режим; температурний градієнт; коефіцієнт теплопередачі; коефіцієнт теплопровідності.

Постановка проблеми. Важливою умовою високої продуктивності обробки шліфуванням є підтримка стабільного теплового режиму у зоні різання, яка здійснюється ефективним відводом теплоти, що виділяється. Вказану функцію виконує МОР – мастильно-охолоджуюча рідина, яка знижує величину потужності і сили різання, пришвидшує теплообмін, забезпечує зменшення температури у зоні різання.

Дослідниками [5, с. 17; 9, с. 7–8; 15, 29–34] встановлено, що температурні деформації верстатів порушують їх геометричну точність і викликають похибки розмірів і форми оброблених деталей, однак роль МОР в цьому процесі не виявлено.

В роботі [12, с. 177–178] вирішена задача теплового балансу в зоні різання при круглому шліфуванні з урахуванням режимів різання, проте роль МОР в процесі відведення тепла із зони обробки також детально не досліджувалася.

В роботі [13, с. 74] було визначено вплив режимів шліфування на витрату МОР через зону контакту, введене поняття корисної витрати МОР, яка багато в чому визначає параметри режиму різання. Однак, механізм впливу корисної витрати МОР на зміну її теплофізичних параметрів не визначено.

Встановлено [5, с. 17; 9, с. 8], що подача МОР в зону різання призводить до зміщення елементів технологічної системи круглошліфувального верстата, проте функціональний зв'язок між температурою МОР і величиною цих зміщень не встановлено.

С.С. Шахновський [14, с. 14–15] зробив спробу прогнозування дії теплових потоків не тільки безпосередньо в зоні різання, а й в цілому в технологічній системі шліфувального верстата, в тому числі у системі подачі МОР. З аналізу всіх складових теплового потоку зроблено висновок, що найбільша його нестабільність характерна для теплоти, що поступає у верстат із системи подачі МОР.

Зі сказаного очевидно, що *актуальною проблемою* є зменшення впливу теплових потоків верстату на точність шліфування, яка може бути забезпечена, в тому числі, покращенням охолоджувальної здатності резервуару МОР.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню теплового режиму процесу шліфування і його впливу на точність обробки присвячені численні наукові роботи [1...3, 7, 9...10, 12...15 та ін.].

За деякими даними МОР в круглошліфувальних верстатах за п'ять годин роботи нагрівається на 2–3 °С. Однак практика говорить зовсім про інше. На підприємстві ВАТ «ХАРВЕРСТ» мали місце факти, коли МОР за 3 години роботи починала кипіти. Подібні явища спостерігалися особливо при силовому шліфуванні і при обробці на вальцешліфувальних верстатах.

В той же час, температурні деформації шліфувального верстата призводять до відхилення від перпендикулярності осі шпинделя до площини столу. При зміні температури на 5 °С зміна кутового положення осі шпинделя може скласти 0,1 мм на довжині 1000 мм. В результаті цього відхилення від паралельності торців шліфованої заготовки становить 0,012 мм на довжині 300 мм [15, с. 122].

За даними С.С. Шахновського [14, с. 15], якщо остаточна температура, що повернулася сумісно із МОР у зону різання перевищує температуру навколишнього середовища на 20 °С, то відхилення від паралельності кінців призматичної деталі може досягати 20 мкм. Якщо перевищення відсутнє, то відхилення від паралельності не перевищує 5 мкм.

Причиною вказаного явища є зміна кутового положення шліфувальних кругів під дією надлишкових температур у резервуарах систем застосування МОР [2, с. 31–32]. Якщо надлишкова температура перевищує 30 °С, то зміна кутового положення круга може досягати 0,3 мм, причому однією з головних причин відхилення положення шліфувального шпинделя від баз верстату є недостатня тепловіддавальна здатність резервуарів системи подачі МОР.

© М.С. Степанов, П.І. Літовченко, Л.П. Іванова, 2017

Такі явища потребують окремих більш детальних досліджень при врахуванні значної кількості факторів: параметрів режиму різання при обробці, характеристики оброблюваного матеріалу, характеристики МОР і системи її застосування (склад, обсяг, витрата і т.д.) і ряд інших чинників.

Метою статті є побудова математичної моделі процесу теплообміну у резервуарі МОР шліфувального верстата з індивідуальною її подачею у зону різання.

Виклад основного матеріалу. Для рішення поставленої задачі потрібно дослідити тепловий баланс резервуару МОР і створити математичну модель для визначення температури у будь якій точці резервуару, в тому числі і на вході у насос.

Температура МОР у резервуарі залежить від багатьох факторів, найважливішими з яких є:

- габаритні розміри і просторова геометрична форма резервуара, товщина його стінок;
- матеріал стінок резервуара та його теплопередавальні здатності;
- характер процесу теплообміну між МОР та стінками резервуара, а також, між резервуаром та повітрям;
- властивості використаної МОР (густина, маса, теплоємність, теплопровідність, тощо).

У даному дослідженні розглядалась найбільш ймовірна схему роботи системи подачі МОР, яка полягає в наступному.

Верстат включається вперше після тривалого часу і працює протягом часу $\tau_{\text{доп}}$, тобто протягом допоміжного часу, потрібного для установки і закріплення заготовки (вважаємо, що на момент включення верстат налагоджений і готовий до роботи). Початкова температура МОР у резервуарі дорівнює температурі навколишнього середовища: $t_{01} = t_{\text{nc}}$ (рисунку 1).

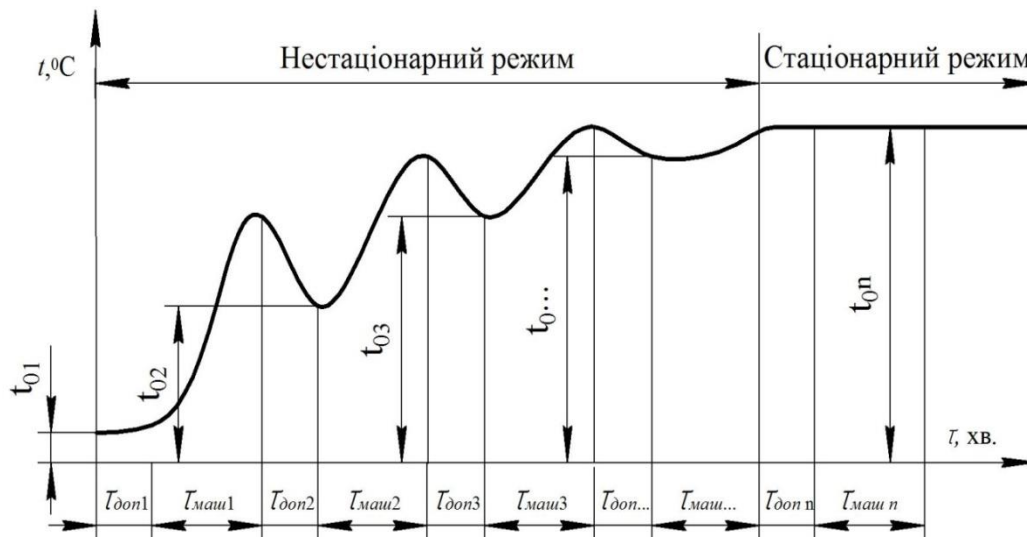


Рис. 1. Діаграма роботи системи подачі МОР при включенні верстата

Після безперервної роботи протягом часу $\tau_{\text{доп}}$ у перепускному режимі верстат переходить у режим виконання операції шліфування, а система подачі МОР – у робочий режим і працює в ньому протягом основного операційного часу $\tau_{\text{маши}}$. Температура на вході у насос буде такою, яка встановилася на момент переходу системи до робочого режиму – $t_0 = t_{\tau_{\text{доп}}}$.

За час роботи системи у робочому режимі МОР отримує Q кДж теплоти.

Надалі, система повертається у нестационарний режим і знаходиться у ньому у ньому протягом допоміжного операційного часу $\tau_{\text{доп}}$, а температура на вході у насос буде така, яка встановиться у резервуарі після першого виконання операції шліфування, тобто: $t_0 = t_{\tau_{\text{маши1}}}$.

Надалі система знов переходить у робочий режим і т. д., тобто, процес повторюється циклічно n разів, де n – кількість оброблених заготовок.

Загальний час роботи системи у такому циклічному режимі може бути визначений за залежністю:

$$\tau_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n (\tau_{\text{доп}i} + \tau_{\text{маши}i}), \quad (1)$$

де $\tau_{\text{доп}i}$ – допоміжний час на i -тому повторенні циклу, хв.; $\tau_{\text{маши}i}$ – машинний час на i – тому повторенні циклу, хв.;

Кожного разу температура на вході у насос змінюється в залежності від:

- кількості теплоти, отриманої нею під час виконання операції шліфування;
- машинного та допоміжного часу операції;
- охолоджуючої дії резервуара МОР.

Як раніше було відзначено, система подачі МОР працює у двох теплових режимах:

- нестационарний, коли поточна температура МОР у резервуарі при роботі системи протягом кінцевого часу τ не досягла сталої величини і зростає після кожного чергового виконання циклу (операції шліфування), тобто $t_0 \neq const$;
- стаціонарний, коли поточна температура МОР у резервуарі досягла сталої величини і залишається постійною навіть при $\tau \rightarrow \infty$, тобто $t_0 = const$.

При роботі у нестационарному режимі температура у певній точці залежить не тільки від координат точки, а й часу, тобто:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad \frac{dt}{d\tau} \neq 0,$$

де $\frac{dt}{d\tau}$ – градієнт зміни температури у часі.

При роботі у стаціонарному режимі за умовою наявності резервуара достатнього об'єму температура не залежить від часу, тобто:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad \frac{dt}{d\tau} = 0$$

Зауважимо, що час переходу системи подачі МОР із нестационарного режиму у стаціонарний залежить від початкового значення температури t_0 , а також від раніше перелічених вище факторів.

Крім розглянутої схеми роботи системи подачі МОР, вона може працювати і по іншій схемі, яка є відмінною від описаної вище лише початковим значенням температури на вході у насос. Наприклад, верстат включається після підналагодження, технічного обслуговування, обідньої перерви, тощо. В цих випадках початкова температура МОР на вході у насос може бути більше за температуру навколишнього середовища, тобто: $t > t_0$, оскільки МОР у резервуарі на встигла охолдитися за короткий проміжок часу.

Побудуємо математичну модель для визначення температури МОР у резервуарі для обох вказаних режимів роботи системи подачі МОР.

У реальній системі подачі МОР, забірна частина насоса знаходиться у резервуарі на відстані l_1 по горизонталі від основного джерела теплоти – точки зливу МОР з робочого контуру (рис. 2).

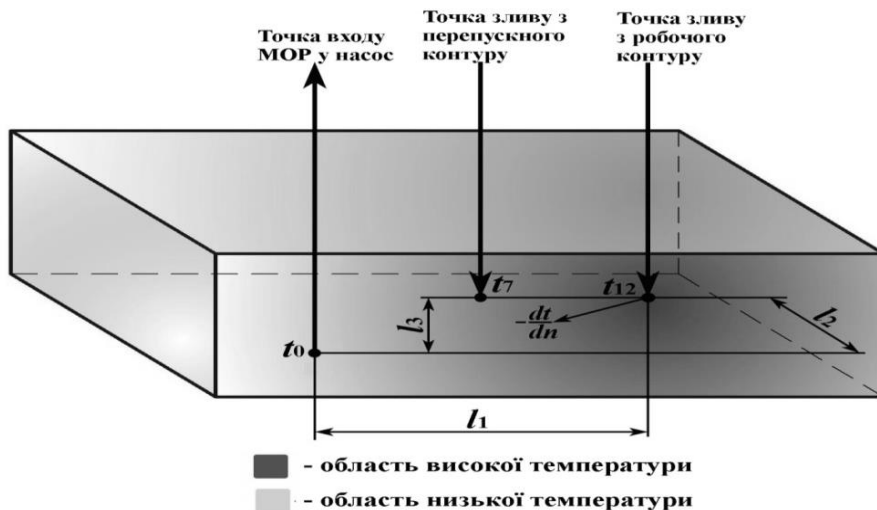


Рис. 2. Схема зміни температурного поля у резервуарі МОР

Крім того, забірна частина насоса занурена на глибину l_3 відносно рівня зливного патрубку, по якому МОР поступає у резервуар із зони різання, і віднесена на відстань l_2 по ширині резервуара.

Температура по мірі видалення від точки 12 зливу з робочого контуру зменшується з градієнтом $-\frac{dt}{dn}$.

При цьому вважаємо, що резервуар, застосований у системі, має достатній об'єм, який забезпечує неперевикнення допустимої величини сталої температури.

Враховуючи сказане, необхідно вирішити дві задачі:

- отримати залежності для визначення поточної температури МОР у резервуарі для певного значення τ при роботі системи у нестационарному режимі;
- отримати залежності для визначення сталої температури МОР у резервуарі при роботі системи у стаціонарному режимі.

Для рішення цих задач розглядалося рівняння теплового балансу у резервуарі МОР:

$$Qd\tau = (cm + c_1m_1)dt + kF \cdot d\tau \left(\frac{dt}{2} + t_p - t_{nc} \right), \quad (2)$$

де Q – кількість теплоти, що отримує МОР у поточному (перепускному або робочому режимі), кДж;

dt , °С – приріст температури за час $d\tau$, год; t_{nc} – температура навколишнього середовища,

°С; t_p – температура МОР у розглядуваній проміжок часу, °С;

c – теплоємність МОР при поточній температурі, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$;

m – маса МОР у резервуарі, кг;

c_1 – теплоємність матеріалу резервуара, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$;

m_1 – розрахункова маса сухого резервуара, кг;

F – розрахункова площа поверхні резервуара, м²;

k – коефіцієнт теплопередачі від резервуара до повітря, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{С}}$.

Розрахункова площа поверхні при відомому об'ємі резервуара, визначається за емпіричною формулою:

$$F = 0,065 \sqrt[3]{V^2}, \quad (3)$$

Коефіцієнт k теплопередачі від резервуара до повітря визначається за залежністю:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (4)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від МОР до стінки резервуара, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$;

α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від стінки резервуара до повітря, $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$;

$\delta = 0,003 \dots 0,004$ – товщина стінки резервуара, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки резервуара, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}}$.

Значення коефіцієнтів тепловіддачі α_1 і α_2 залежать від типу застосованої МОР і швидкості її руху у резервуарі, температури МОР, стінок резервуара і навколишнього середовища і можуть змінюватися у достатньо широких межах.

Коефіцієнт λ для найбільш застосованих водоемільсійних МОР звичайно приймають у межах

$$\lambda = 0,15 \dots 0,65 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}} \quad [6].$$

При практичних розрахунках систем подачі МОР при конвективному теплообміні з достатньою точністю можна прийняти значення коефіцієнтів:

$$- k = 75 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{С}};$$

$$- c_1 = 300 \dots 500 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}} \text{ – для зварних сталевих резервуарів};$$

$$- C \text{ – приймається в залежності від температури за довідковими таблицями у межах } 2 \dots 4,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}.$$

При безперервній роботі системи подачі МОР протягом часу $\tau_{\text{сум}}$, год. поточна температура МОР у резервуарі визначиться за залежністю, отриманою з рівняння теплового балансу (2):

$$t = t_{nc} + (t_0 - t_{nc}) e^{-\frac{kF}{cm+c_1m_1}t} + \frac{Q}{kF} \left(1 - e^{-\frac{kF}{cm+c_1m_1}t} \right), \quad (5)$$

де t_0 – початкова температура МОР у резервуарі.

Використовуючи рівняння (5) можна визначити температуру МОР у резервуарі для будь якого τ при роботі системи у нестационарному режимі.

Перетворенням рівняння (5) при $\tau \rightarrow \infty$ отримується залежність для визначення сталої температури у резервуарі при роботі системи у стаціонарному режимі:

$$t_0 = t_{nc} + \frac{Q}{kF} = t_{nc} + \frac{Q}{\sqrt[3]{V^2}}, \quad (6)$$

де t_{nc} – температура навколишнього середовища, °C ;

V – об'єм рідини у резервуарі, дм³;

Значення Q визначається за формулою:

$$Q = 860 N_{nio} \tau, \text{ кДж}, \quad (7)$$

де N_{nio} – підведена потужність системи, кВт; τ – час роботи насоса у поточному режимі, год.

Як встановлено вище, система працює у двох режимах – перепускному і робочому, відповідно підведена потужність у системі подачі МОР має різні значення для кожного з цих режимів.

При роботі у *перепускному режимі* формула (7) прийме вигляд:

$$Q = 5,85 \frac{p Q_n \tau}{\eta_{zag}}, \text{ кДж} \quad (8)$$

де p – тиск, який розвиває насос, $\frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$;

Q_n – продуктивність насоса, $\frac{\text{дм}^3}{\text{хв}}$; τ – час роботи у перепускному режимі, хв.;

η_{zag} – повний ККД насоса.

При роботі системи у *робочому режимі* крім теплоти, що виділяється за рахунок власних втрат у системі подачі МОР, додається теплота, яка виділяється у процесі різання. В цьому випадку повна теплота, що виділяється у системі визначається за формулою:

$$Q = 5,85 \frac{p Q_n \tau_{piz}}{\eta_{zag}} + Q_{MOP}, \quad (9)$$

де Q_{MOP} – теплота, яку МОР отримує в результаті охолодження заготовки та круга при шліфуванні і передається у резервуар, кДж;

τ_{piz} – основний час виконання даного етапу операції, хв.

Величина Q_{MOP} залежить від етапу технологічного циклу шліфування (врізання, попереднє, остаточне, виходжування), а для всієї операції – визначається як сумарна теплота на всіх її етапах.

Оскільки залежності (8) і (9) не включають у себе геометричних параметрів, визначена за ними температура є усередненою по резервуару, яку на даному етапі будемо використовувати у розрахунках.

Отримані залежності для визначення температури реалізовані у вигляді окремого розрахункового модуля у комп'ютерній програмі Heat, раніш розробленої авторами для визначення параметрів теплового режиму системи подачі МОР. За допомогою програми проведено цикл розрахунково-аналітичних досліджень.

Визначались залежності температури охолоджуючої рідини у резервуарі системи подачі МОР від об'єму резервуара та її температура на виході із зони різання.

Дослідження проводилися для наступних даних: хвилинна подача 45 л/хв., робочий тиск 0,06 МПа; тип МОР – УКРІНОЛ-1 з концентрацією 3 %. Результати досліджень показані у вигляді графіків вказаних температур на скріншоті графічного вікна програми Heat (рисунок 4).

Як показав аналіз результатів, значне збільшення температури МОР після теплообміну із заготовкою і кругом пояснюється високою теплонапруженністю процесу врізного шліфування, особливо на стадії попереднього шліфування, де температура навіть при застосуванні МОР коливається у діапазоні 200...900 °C [10]. Очевидно, що для прийнятих параметрів подачі МОР умовою підтримання середньої температури МОР у межах 30...50 °C у резервуарі його об'єм повинен бути 1000...2500 л.

Як видно з графіків, система подачі МОР працює у нестационарному режимі більшість робочого часу – від 20 до 80 годин, причому цей час збільшується зі збільшенням об'єму резервуару, що пояснюється більшою інерційністю теплообміну у більшому об'ємі рідини.

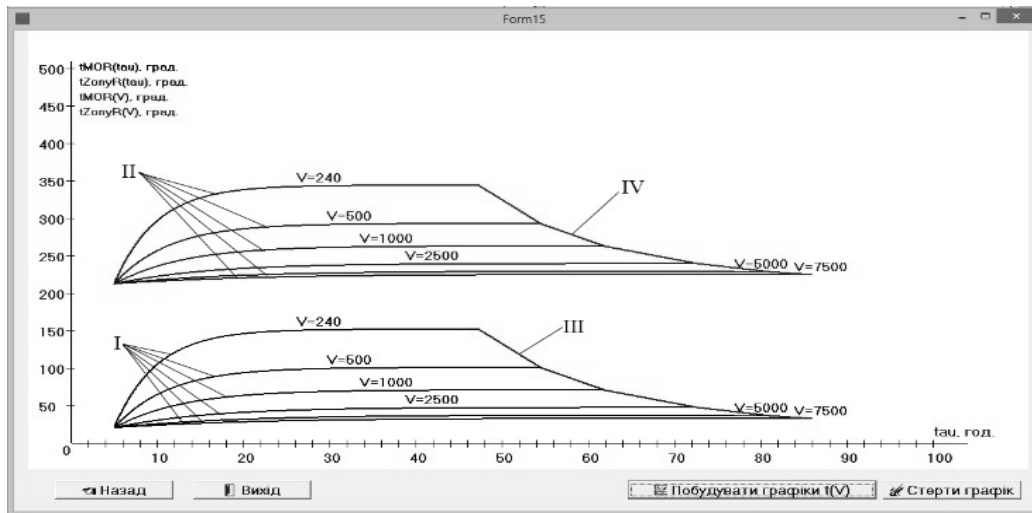


Рис. 3. Графіки залежностей температури МОР від об'єму резервуара:
 I – середня температура МОР у резервуарі; II – температура МОР на виході із зони різання;
 III – залежність усталеної середньої температури МОР у резервуарі;
 IV – залежність усталеної температури МОР на виході із зони різання

Дослідження показало, що інструментами забезпечення раціонального теплового режиму системи подачі МОР вибір є підбір потрібного об'єму резервуара і відповідних характеристик насоса.

Висновки. Вперше розроблена математична модель температурного режиму системи застосування МОР із врахуванням теплових характеристик етапів циклу технологічної операції. При цьому резервуар розглядався як елемент системи, що працює у двох режимах:

- робочому, коли МОР проходить через зону різання;
- перепускному, коли МОР оминає зону різання і зливається у резервуар.

Модель дає можливість оцінити стаціонарну і нестаціонарну температуру МОР у резервуарі в залежності від протікання етапів циклу обробки.

На основі отриманих результатів модернізована комп'ютерна програма розрахунку параметрів теплового режиму системи подачі МОР, що дозволяє використовувати її як інструмент автоматизованого розрахунку поточної температури у резервуарі МОР і у будь якій контрольній точці систем подачі МОР.

Перспективою досліджень є визначення температурного градієнту і точної температури у будь якій точці резервуара, а також проведення досліджень при змінних характеристиках насоса і різних режимах шліфування.

Список використаної літератури:

1. Адрианова И.А. Уменьшение тепловых деформаций торцешлифовальных станков : дис. ... канд. техн. наук / И.А. Адрианова. – Москва, 1984.
2. Адрианова И.А. Повышение точности торцевого шлифования методом терморегулирования / И.А. Адрианова, С.С. Шахновский // Станки и инструмент. – 1984. – № 11. – С. 31–32.
3. Адрианова И.А. Влияние тепла, выделяемого при торцевом шлифовании на стабильность положения кругов. / И.А. Адрианова, С.С. Шахновский // Станки и инструмент. – 1983. – № 8. – С. 30–31.
4. Бровкина Ю.И. Автоматизированная система оценки влияния температурных процессов на точность позиционирования станков с параллельной кинематикой : автореф. дис. канд. техн. наук / Ю.И. Бровкина. – Москва, 2006.
5. Вектерис В.Ю. Стабилизация температурного поля круглошлифовальных станков / В.Ю. Вектерис // Станки и инструмент. – 1986. – № 7. – С. 17.
6. Воицинин А.И. Гидравлические и пневматические устройства на строительных и дорожных машинах / А.И. Воицинин, И.Ф. Савин. – М. : Машиностроение, 1965. – 452 с.
7. Кондратюк О.Л. Влияние температурных деформаций узлов багатокруговых круглошлифовальных верстатів на точність обробки / О.Л. Кондратюк // Машинобудування. – 2016. – № 17. – С. 68–73.
8. Куликов М.Ю. Повышение точности тонкого точения на основе анализа возникающих тепловых деформаций и износа инструмента / М.Ю. Куликов, Н.А. Можин // Вестник машиностроения. – 2006. – № 12. – С. 47–49.
9. Марцинкявичус А.-Г.Ю. Снижение температурных деформаций круглошлифовального станка / А.-Г.Ю. Марцинкявичус // Станки и инструмент. – 1991. – № 5. – С. 7–10.
10. Никитин С.П. Влияние режимов резания на средние температуры при глубинном шлифовании / С.П. Никитин // Вестник УГАТУ. Серия : Технология машиностроения. – Уфа : УГАТУ, 2012. – Т. 16, № 4 (49). – С. 78–84.
11. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
12. Сизый Ю.А. Тепловой баланс процесса шлифования / Ю.А. Сизый, М.С. Степанов // Резание и инструмент в технологических системах. – Х. : НТУ «ХПИ», 2000. – С. 177–190.

13. Степанов М.С. Влияние режимов шлифования на удельный полезный расход СОЖ через зону контакта / М.С. Степанов // Вестник НТУ «ХПИ». Серія : Технологія машиностроєння. – X : НТУ «ХПИ», 2012. – Т. 1, № 9. – С. 71–76.
14. Шахновский С.С. Баланс тепловых потоков в торцешлифовальном станке / С.С. Шахновский // Станки и инструмент. – 1989. – № 6. – С. 13–15.
15. Теплофізика механічної обробки / О.В. Якимов, А.В. Усов, П.Т. Слободяник, Д.В. Горгачов. – Одеса : Астропринт, 2000. – 256 с.

References:

1. Adrianova, I.A. (1984), *Umenshenie teplovyih deformatsiy tortseshlifovalnyih stankov*, Moskva, diss. kand. tehn. nauk.
2. Adrianova, I.A. and Shahnovskiy, S.S. (1984), «Povyishenie tochnosti tortsevoogo shlifovaniya metodom termoregulirovaniya», *Stanki i instrument*, No. 11, pp. 31–32.
3. Adrianova, I.A. and Shahnovskiy, S.S. (1983), «Vliyanie tepla, vyidelyaemogo pri tortsevom shlifovanii na stabilnost polozheniya krugov», *Stanki i instrument*, No. 8, pp.30–31.
4. Brovkina, Yu.I. (2006), «Avtomatizirovannaya sistema otsenki vliyaniya temperaturnyih protsessov na tochnost pozitsionirovaniya stankov s parallelnoy kinematikoy», Abstact of Ph. D. dissertation kand. tehn. nauk, Moskva.
5. Vekteris, V.Yu. (1986), «Stabilizatsiya temperaturnogo polya krugloshlifovalnyih stankov», *Stanki i instrument*, No. 7, P. 17.
6. Voschinin, A.I. and Savin, I.F. (1965), *Gidravlicheskie i pnevmaticheskie ustroystva na stroitelnyih i dorozhnlh mashinah*, Mashinostroenie, Moskva, 452 p.
7. Kondratyuk, O.L. (2016), «Vpliv temperaturnih deformatsiy vuzliv bagatokrugovih krugloshlifovalnih verstativ na tochnist obrobki», *Mashinobuduvannya*, No. 17, pp. 68–73.
8. Kulikov, M.Yu. and Mozhi, N.A. (2006), «Povyishenie tochnosti tonkogo tocheniya na osnove analiza voznikayuschih teplovyih deformatsiy i iznosa instrumenta», *Vestnik mashinostroeniya*, No. 12, pp. 47–49.
9. Martsinkyavichus, A.-G.Yu. (1991), «Snizhenie temperaturnyih deformatsiy krugloshlifovalnogo stanka», *Stanki i instrument*, No. 5, pp. 7–10.
10. Nikitin, S.P. (2012), «Vliyanie rezhimov rezaniya na srednie temperatury pri glubinnom shlifovanii», *Vestnik UGATU, Serija Tehnologiya mashinostroeniya*, Vol. 16, No. 4 (49), UGATU, Ufa, pp. 78–84.
11. Reznikov, A.N. and Reznikov, L.A. (1990), *Teplovyie protsessy v tehnologicheskikh sistemah*, Mashinostroenie, Moskva, 288 p.
12. Sizyiy, Yu.A. and Stepanov, M.S (2000), «Teplovy balans protsessa shlifovaniya», *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah*, NTU «HPI», Harkiv, pp. 177–190.
13. Stepanov, M.S. (2012), «Vliyanie rezhimov shlifovaniya na udelny rashod SOZh cherez zou kontakta», *Vestnik NTU «HPI», Serija Tehnologiya mashinostroeniya*, Vol. 1, No. 9, NTU «HPI», Harkiv, pp. 71–76.
14. Shahnovskiy, S.S. (1989), «Balans teplovyih potokov v tortseshlifovalnom stanke», *Stanki i instrument*, No. 6, pp. 13–15.
15. Yakimov, O.V., Usov, A.V., Slobodyanik, P.T. and Gorgachov, D.V. (2000), *Teplofizika mehanichnoyi obrobki*, Astroprint, Odessa, 256 p.

Степанов Михайло Сергійович – доктор технічних наук, професор, декан Машинобудівного факультету Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- алмазна і абразивна обробка із застосуванням МОР;
- гідравлічні і пневматичні системи металоріжучих верстатів.

E-mail: tkacheva@kpi.kharkov.ua.

Літовченко Петро Іванович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

Наукові інтереси:

- процеси механічної обробки та ріжучі інструменти;
- автоматизація проектування у машинобудуванні.

E-mail: pilitevchenko1950@gmail.com.

Іванова Лариса Петрівна – аспірант кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України.

Наукові інтереси:

- теплові процеси при абразивній обробці із застосуванням МОР.

E-mail: larisangu@gmail.com.

Стаття надійшла до редакції 20.10.2017.