УДК 621.923 DOI: 10.20998/2079-004X.2020.2.13

СТЕПАНОВ М.С., ІВАНОВА Л. П., ЛІТОВЧЕНКО П.І., ІВАНОВА М.С.

ОЦІНКА ТЕПЛООБМІНУ ПРИ СПІЛЬНІЙ ДІЇ СТРУМЕНІВ ПОВІТРЯ І ПОТОКУ ЗОР ПРИ ШЛІФУВАННІ

Одним з основних і перспективних методів підвищення продуктивності і якості обробки при шліфуванні є застосування удосконаленої техніки подачі ЗОР. Для практичного здійснення зазначених методів на виробництві розробляють і впроваджують різні пристрої подачі ЗОР в зону різання. У деяких пристроях для забезпечення відсутності контакту нагрітої ЗОР з деталями верстата створюють повітряну завісу, в результаті чого виникає комплексна теплова взаємодія струменів ЗОР і повітря. У даній статті розглянута схема передачі тепла на різних ділянках потоків ЗОР і повітря в пристрої подачі ЗОР. Запропоновано математичні моделі теплового балансу на цих ділянках і кількості теплоти, що виділяється з нагрітої ЗОР і відводиться струменями повітря. Наведені математичні залежності можуть бути використані при проектуванні техніки подачі ЗОР, яка забезпечує усунення можливості контакту нагрітої рідини з елементами верстата.

Ключові слова: пристрій подачі ЗОР, повітряний екран, газонасичена рідина, температура ЗОР, теплообмін..

СТЕПАНОВ М. С., ИВАНОВА Л. П., ЛИТОВЧЕНКО П .И., ИВАНОВА М.С.

ОЦЕНКА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ СТРУЙ ВОЗДУХА И ПОТОКА СОЖ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Одним из основных и перспективных методов повышения производительности и качества обработки при шлифовании является применение усовершенствованной техники подачи СОЖ. Для практического осуществления указанных методов на производстве разрабатывают и внедряют различные устройства подачи СОЖ в зону резания. В некоторых устройствах для обеспечения отсутствия контакта нагретой СОЖ с деталями станка создают воздушную завесу, в результате чего возникает комплексное тепловое взаимодействие струй СОЖ и воздуха. В данной статье рассмотрена схема передачи тепла на разных участках потоков СОЖ и воздуха в устройстве подачи СОЖ. Предложены математические модели теплового баланса на этих участках и количества теплоты, которое выделяется из нагретой СОЖ и отводится струями воздуха. Приведенные математические зависимости могут быть использованы при проектировании техники подачи СОЖ, которая обеспечивает устранение возможности контакта нагретой жидкости с элементами станка.

Ключевые слова: устройство подачи СОЖ, воздушный экран, газонасыщенная жидкость, температура СОЖ, теплообмен.

STEPANOV M. S., IVANOVA L. P., LITOVCHENKO P. I., IVANOVA M. S.

ASSESSMENT OF HEAT TRANSFER WITH THE COMBINED ACTION OF AIR JETS AND LIQUID COOLANT FLOW WHEN GRINDING

One of the main and promising methods for increasing productivity and processing quality during grinding is the use of advanced coolant supply technology. Various devices for supplying coolant to the cutting zone are developed and implemented for the practical realization of these methods in production. To ensure the absence of contact of the heated coolant with the grinding machine parts, an air curtain is created in some devices, as a result of which there is a complex thermal interaction of the coolant jets and air. This article discusses the heat transfer scheme for different sections of the coolant and air flows in the coolant supply device. Mathematical models of the heat balance in these areas and the amount of heat that is released from the heated coolant and removed by jets of air are proposed. The above mathematical dependences can be used in the design of the coolant supply technique, which eliminates the possibility of contact of the heated fluid with the elements of the machine tool.

Keywords: coolant supply device, air curtain, gas-saturated liquid, coolant temperature, heat transfer.

1. Вступ. Збільшення швидкості шліфувального круга та подачі викликає різку інтенсифікацію теплового режиму обробки і пов'язаного з цим нагрівання ЗОР. Контакт нагрітої ЗОР з деталями та вузлами верстата є однією з причин їх температурних деформацій, які негативно впливають на параметри точності обробки. Зменшення теплового впливу на елементи верстата вимагає створення відповідної техніки подачі ЗОР в зону різання.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій.

За даними дослідників [1, 2], на теперішній час відомо більше 200 способів подачі ЗОР, особливості використання яких залежить від конструкції інструмента, режимів та схем обробки [3]. Удосконалення техніки застосування ЗОР вважається одним з найбільш перспективних напрямків підвищення продуктивності та якості процесу шліфування, який сприяє розширенню його технологічних можливостей [4, 5]. Тому, розробка і дослідження параметрів пристроїв для подачі ЗОР, що забезпечують підвищення точності шліфованих деталей, зменшення температурних деформацій деталей верстата, збереження властивостей ЗОР та збільшення терміну її використання є актуальною науково-практичною задачею.

З цією метою було розроблено пристрій [6], принцип роботи якого полягає в тому, що потік ЗОР попадає в сопло, далі, омиваючи заготовку, рухається до патрубку відведення ЗОР і виводиться в підсистему подачі та очищення ЗОР. Разом з тим, через канал подається стиснуте повітря, яке утворює роздільний екран, який запобігає витіканню та розприскуванню ЗОР по торцям пристрою.

Для розробленого пристрою [6] характерною є наявність ефектів, які забезпечують різні дії, серед яких можна виділити наступні:

- ізолюючий ефект, який дає можливість мінімізувати контакт нагрітої ЗОР з елементами верстата, зокрема зі шліфувальною бабкою;

- підтримуючий ефект, який сприяє зниженню пружних відтискань заготовки, що сприятливо позначається на параметрах точності шліфованих деталей.

Визначено фактори впливу струменя повітря на потік ЗОР в розробленому пристрої.

Крім того, в пристрої можуть проявлятися ряд дій, ефективність яких слід оцінити. Наприклад, наскільки зменшиться температура повітря, яке створює ізолюючий екран на виході з сопел.

© М. С. Степанов, Л.П. Иванова, П.И. Литовченко, М.С. Иванова, 2020

3. Мета дослідження. Визначення параметрів процесу теплообміну при шліфуванні деталей з використанням пристроїв подачі ЗОР, принцип дії яких полягає у створенні захисного повітряного екрану, що спричиняє виникнення теплових потоків від одночасної дії повітряних струменів та ЗОР.

4. Викладення основного матеріалу.

Зміна температури повітря на вході в пристрій і на виході в зазор можна визначити скориставшись формулою

$$n = \left(1 - \frac{\lg T_{\text{вих}} - \lg T_{\text{вх}}}{\lg \frac{p_{\text{вих}}}{p_{\text{вх}}}}\right)^{-1}, \qquad (1)$$

де $T_{\text{вих}}, T_{\text{вх}}, p_{\text{вих}}, p_{\text{вх}}$ – температура і тиск повітря на виході з зазору і на вході в пристрій; n – показник політропи.

Якщо наповнення (спорожнення) газової ємності відбувається через канал або отвір, в якому відсутній помітний теплообмін з зовнішнім середовищем, то показник політропи приймають n = 1,4.

Приблизні розрахунки показують, що зниження температури повітря на виході із сопел в розробленому пристрої знаходяться в межах 0,5…1,5°С, що відповідає результатам ефекту Джоуля-Томсона для повітря $\alpha_{if} = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i = \frac{1}{4}$ °С/(кг·см^2).

Параметр α_{if} характеризує швидкість зміни температури у рівнянні

$$T_{\text{вих}} - T_{\text{вх}} = \int_{p_{\text{вх}}}^{p_{\text{вих}}} \alpha_{if}\, dp_i \,. \qquad (2)$$

Очевидно, що теплообмін від різних ділянок поверхні заготовки різний і слід враховувати характер розподілу коефіцієнта тепловіддачі в площині, перпендикулярній лінії контакту, що раніше було зроблено[7-9].

Крім того, характер теплообміну може змінюватися і вздовж лінії контакту [10]. Це пояснюється наявністю ділянок, на яких охолодження зони різання здійснюється повітряним, газорідинним або рідинним струменями. Для точного визначення тепла, що передається із зону різання у ЗОР слід проаналізувати картину теплообміну в пристрої більш детально. Для цього проаналізовано схему передачі тепла на ділянках, розташованих в пристрої (рис. 1).

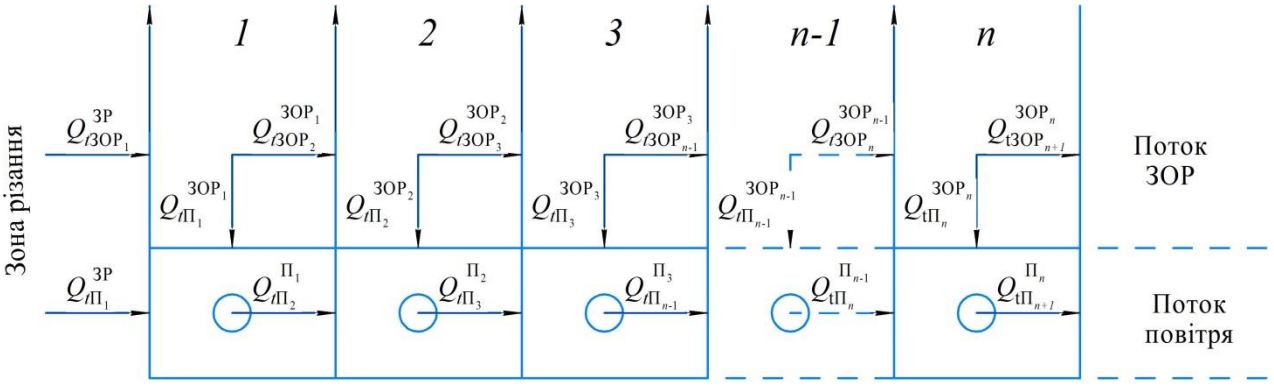

Рис. 1 – Схема передачі тепла на різних ділянках потоків ЗОР та повітря в пристрої подачі ЗОР

На схемі передачі тепла на ділянках потоків ЗОР і повітря в пристрої подачі ЗОР введено такі позначення: $Q^{\text{ЗР}}_{t\text{ЗОР}_1}, Q^{\text{ЗР}}_{t\text{П}_1}$ – теплові потоки, що передаються із зони різання відповідно у ЗОР та у повітря (ділянка *1*); $Q^{\text{ЗОР}_1}_{t\text{ЗОР}_2}, Q^{\text{ЗОР}_{n-1}}_{t\text{ЗОР}_n}$ – теплові потоки, що передаються в ЗОР від *1*-ої до *n*-ої ділянки; $Q^{\text{ЗОР}_1}_{t\text{П}_1}, Q^{\text{ЗОР}_n}_{t\text{П}_n}$ – теплові потоки, що передаються від ЗОР у повітря на *1*-ій, *n*-ій ділянках відповідно; $Q^{\text{П}_1}_{t\text{П}_2}, Q^{\text{П}_{n-1}}_{t\text{П}_n}$ – теплові потоки, що передаються в ЗОР від *1*-ої до *n*-ої ділянки. Кількість ділянок відповідає числу повітряних сопел, а довжина ділянок дорівнює відстані між осями сопел.

Для ділянки *1* тепловий баланс має вигляд

$$Q^{\text{ЗР}}_{t\text{ЗОР}_1} = Q^{\text{ЗОР}_1}_{t\text{ЗОР}_2} + Q^{\text{ЗР}}_{t\text{П}_1} \,. \qquad (3)$$

Звідки, тепло, яке передається від *1*-ої ділянки потоку ЗОР до *2*-ої

$$Q^{\text{ЗОР}_1}_{t\text{ЗОР}_2} = Q^{\text{ЗР}}_{t\text{ЗОР}_1} - Q^{\text{ЗР}}_{t\text{П}_1} \,. \qquad (4)$$

Для ділянки *1* повітряного потоку тепловий баланс має вигляд

$$Q^{\text{ЗР}}_{t\text{П}_1} = Q^{\text{П}_1}_{t\text{П}_2} - Q^{\text{ЗОР}_1}_{t\text{П}_1} \,. \qquad (5)$$

Звідки, тепло, яке передається від *1*-ої ділянки потоку повітря до *2*-ої

$$Q^{\text{П}_1}_{t\text{П}_2} = Q^{\text{ЗР}}_{t\text{П}_1} - Q^{\text{ЗОР}_1}_{t\text{П}_1} \,. \qquad (6)$$

Тепло, що передається від ЗОР до повітря на *1*-ій ділянці

$$Q^{\text{ЗОР}_1}_{t\text{П}_1} = Q^{\text{П}_1}_{t\text{П}_2} - Q^{\text{ЗР}}_{t\text{П}_1} \,. \qquad (7)$$

З іншого боку, тепло, що передається на цій же ділянці

$$Q^{\text{ЗОР}_1}_{t\text{П}_1} = Q^{\text{ЗР}_1}_{t\text{ЗОР}_1} - Q^{\text{ЗОР}_1}_{t\text{ЗОР}_2} \,. \qquad (8)$$

Після перетворення можна отримати тепло, що передається в ЗОР від зони різання до *n*-ої ділянки потоку

$$Q_{t\text{ЗОР}_{n+1}}^{\text{ЗОР}_n} = Q_{t\text{ЗОР}_1}^{\text{ЗР}} - Q_{t\text{П}_1}^{\text{ЗОР}_1} - Q_{t\text{П}_2}^{\text{ЗОР}_2} - Q_{t\text{П}_3}^{\text{ЗОР}_3} - Q_{t\text{П}_{n-1}}^{\text{ЗОР}_{n-1}} - Q_{t\text{П}_n}^{\text{ЗОР}_n}$$

або

$$Q_{t\text{ЗОР}_{n+1}}^{\text{ЗОР}_n} = Q_{t\text{ЗОР}_1}^{\text{ЗР}} + Q_{t\text{П}_1}^{\text{ЗР}} - Q_{t\text{П}_{n+1}}^{\text{П}_n}. \quad (9)$$

Обдув зони різання потоком повітря недостатньо ефективний, а потужність теплового джерела може знизитися на 2…3% [11]. Це показала оцінка охолодження поверхні, що шліфується, потоками повітря, які циркулюють навколо кола. Це пов'язано з невисокою теплопровідністю повітря і малим температурним напором.

У запропонованому пристрої потоки повітря, що генеруються кругом у зону контакту, практично не проникають. У цю зону може потрапляти повітря, яке виривається з сопел, що створюють повітряний екран на торцях.

Для кожної ділянки внутрішньої поверхні пристрою слід визначити параметри теплообміну. Для потоку повітря наведемо наступні.

Як відомо, процеси конвективного теплообміну досліджують, головним чином, експериментально, а коефіцієнт тепловіддачі визначають за допомогою критерію подібності за формулою

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l_д}, \quad (10)$$

де *Nu* – критерії Нуссельта; λ – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·К); $l_д$ – визначальний розмір, м.

Для визначення *Nu* можна скористатися формулою, отриманою при обтіканні циліндра поперечним потоком повітря

$$Nu = c \cdot \mathrm{Re}^n \cdot \varepsilon, \quad (11)$$

де Re – число Рейнольдса, Re = (5…10) 10^5; *c*, *n* – коефіцієнт та показник степені, які залежать від числа Рейнольдса, c = 0,197…0,81, *n* = 0,6…0,4; ε – поправочний коефіцієнт, що враховує ступінь турбулентності набігаючого потоку, ε = 1…16.

Для системи застосування ЗОР при шліфуванні природною є наявність газової складової. Параметри газовмісту при цьому визначається структурою і конструктивними особливостями технологічної системи [12].

Для ділянок, з наявністю газової складової, характерне наступне: повітря в ЗОР знаходиться у механічній суміші, причому в залежності від розмірів бульбашок суміш володіє певною стійкістю. При наявності в ЗОР нерозчиненого повітря її в'язкість збільшується. Зміна в'язкості може визначатися за формулою

$$\frac{\mu_П}{\mu_0} = 1 + k_П \cdot b_П, \quad (12)$$

де $\mu_П, \mu_0$ – в'язкість ЗОР з бульбашкми та без відповідно; $b_П$ – вміст повітря, %; $k_П$ – емпіричний коефіцієнт, $k_П = 0,015$ для вуглеводневих ЗОР.

При підведенні повітря на ділянці, що розглядається, може утворитися піна для якої є характерним те, що на границі з повітряним прошарком розмір бульбашок більший, ніж в глибині потоку ЗОР. Водоповітряна суміш потоку ЗОР зменшує змащувальну дію, проте значно зростає охолоджуюча дія, що збільшує коефіцієнт тепловіддачі.

Для ділянок зони контакту можна припустити що для кожної області поверхні

$$\alpha_1 = v_{ox1} \frac{m_1 \cdot c}{\Delta T_1 \cdot F_1},$$
$$\alpha_2 = v_{ox2} \frac{m_2 \cdot c}{\Delta T_2 \cdot F_2}, \quad (13)$$
$$...,$$
$$\alpha_i = v_{oxi} \frac{m_i \cdot c}{\Delta T_i \cdot F_i},$$

$v_{ox1}, v_{ox2}, ..., v_{oxi}$ – швидкість охолодження *1*-ї, *2*-ї, *i*-ї ділянок відповідно; $m_1, m_2, ..., m_i$ – маса *1*-ї, *2*-ї, *i*-ї ділянок відповідно, *c* – тепломісткість матеріалу заготовки; $\Delta T_1, \Delta T_2, ..., \Delta T_i$ – різниця температур поверхні та середовища для *1*-ї, *2*-ї, *i*-ї ділянок відповідно; F_1, $F_2, \ldots, F_i$ – площина *1*-ї, *2*-ї, *i*-ї ділянок охолоджуваної поверхні.

відведення тепла пропорційний масі ділянки, що охолоджується [13].

$$\Delta Q_t = \sum_{i=1}^{n} m_i \cdot c \cdot v_{oxi} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot \Delta T_i \cdot F_i. \quad (14)$$

Суміш повітря з рідиною можна розглядати у вигляді гомогенного середовища, щільність якого близька до щільності рідини, а термодинамічні параметри визначаються через газовмісткість рідини. При цьому, кількість тепла, відведена на кожній конкретній ділянці, визначається за формулою

$$\Delta Q_{t_i} = G_i \cdot \Delta i_i, \quad (15)$$

де *G* – масові витрати; Δi_i – зміни ентальпії середовища.

Зміна ентальпії середовища визначається за формулою

$$\Delta i = c_p \cdot \Delta T_j, \quad (16)$$

де ΔT_j – зміна температури середовища в результаті підведення тепла.

Параметри ЗОР залежать від газовмісту, наприклад:

- щільність середовища

$$\rho = \rho_{\text{ЗОР}}(1-\varphi) + \rho_П \varphi, \quad (17)$$

де $\rho_{\text{ЗОР}}, \rho_П$ – щільність ЗОР та повітря відповідно; φ – об'ємний газовміст;

- ентальпія

$$i = i_{\text{ЗОР}}(1-x) + i_П x, \quad (18)$$

де $i_{\text{ЗОР}}, i_{\text{П}}$ – ентальпія ЗОР та повітря відповідно; x – масовий газовміст, що визначається $x = \dfrac{\rho_{\text{П}}\varphi}{\rho_{\text{ЗОР}}(1-\varphi)+\rho_{\text{П}}\varphi}$.

Відносну щільність можна визначити з урахуванням режиму течії ЗОР по формулі

$$\rho_{\text{відн}} = 1 - k_{в} \cdot \text{Re}, \quad (19)$$

де $\rho_{\text{відн}}$ – відносна щільність двофазної рідини, яка дорівнює відношенню щільності двофазної рідини до щільності ЗОР при температурі 20 °С; $k_{в}$ – коефіцієнт в'язкості; Re – число Рейнольдса.

Коефіцієнт в'язкості $k_{в}$ залежить від в'язкості рідини і може бути визначений за формулою

$$k_{в} = f_{\lambda} \cdot \nu, \quad (20)$$

де f_{λ} – коефіцієнт пропорційності, для вуглеводневих ЗОР $f_{\lambda} = 0{,}0055$; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

Ефективність охолодження потоку ЗОР обдувом струменями повітря, яке виривається з сопел, залежить від відносних швидкостей ЗОР і повітря.

Кількість тепла, відведеного повітрям від потоку ЗОР

$$Q_{t\text{П}_1} = Q_{\text{П}} \cdot \rho_{\text{П}} \cdot c_{\text{П}} \cdot \left(T_{\text{П}}^{\text{вих}} - T_{\text{П}}^{\text{вх}}\right), \quad (21)$$

де $Q_{t\text{П}_1}$ – кількість тепла, що відводиться з ділянки потоком повітря; $Q_{\text{П}}$ – витрати повітря; $\rho_{\text{П}}, c_{\text{П}}$ – щільність та питома тепломісткість повітря відповідно; $T_{\text{П}}^{\text{вих}}, T_{\text{П}}^{\text{вх}}$ – температура повітря на виході та вході в ділянку відповідно.

Кількість тепла, що виділяється із потоку ЗОР

$$Q_{t\text{ЗОР}_1} = Q_{\text{ЗОР}} \cdot \rho_{\text{ЗОР}} \cdot c_{\text{ЗОР}} \cdot \left(T_{\text{ЗОР}}^{\text{вих}} - T_{\text{ЗОР}}^{\text{вх}}\right), \quad (22)$$

де $Q_{t\text{ЗОР}_1}$ – кількість тепла, що відводиться потоком ЗОР на ділянці; $Q_{\text{ЗОР}}$ – витрати ЗОР; $\rho_{\text{ЗОР}}, c_{\text{ЗОР}}$ – щільність та питома тепломісткість ЗОР відповідно; $T_{\text{ЗОР}}^{\text{вих}}, T_{\text{ЗОР}}^{\text{вх}}$ – температура ЗОР на виході та вході в ділянку відповідно.

Висновки. Таким чином, зменшення температурних деформацій за рахунок керування тепловим станом ЗОР є важливим засобом поліпшення точностних параметрів шліфувальних верстатів. Причому, це можна здійснити за рахунок вдосконалення технології подачі ЗОР в зону різання, що має велике значення для підвищення ефективності шліфування. Наведені залежності можуть бути використані при проектуванні техніки подачі ЗОР, яка забезпечує усунення можливості контакту нагрітої рідини з елементами верстату.

Список літератури:

1. Василенко О.А. *Улавливающее действие СОЖ при шлифовании и оценка его эффективности* / О.А. Василенко, А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко // Вестник ЮУрГу. Серия «Машиностроение». – Южноуральск: ЮУрГу, 2016. – Т. 16, № 4. – С. 59–66.
2. Степанов Ю.С. *Обзор основных способов подачи СОЖ при шлифовании периферией круга* / Ю.С. Степанов, Ю.В. Василенко //Орловский государственный технический университет. Орел, 1999. 42. – Рус. – Деп. в ВИНИТИ15.12.99, № 3701-В99.
3. Василенко О.А. *Эффективность действия СОЖ при шлифовании* / О.А. Василенко, А.В. Тюхта, Ю.В. Василенко // ИзвестияТулГУ. Технические науки. – Тула, 2016. – Вып. 8., Ч. 1. – С. 215-219.
4. Ефимов, В.В. *Научные основы техники подачи СОЖ при шлифовании* / В.В. Ефимов. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1985. – 142 с.
5. Худобин, Л.В. *Смазочно-охлаждающие технологические средства. Справочник* / Л.В. Худобин и др. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
6. Патент на кор. мод. № 136095 Україна, МПК(2019.01), B24B 55/00. *Пристрій подачі мастильно-охолоджувальної рідини* / Степанов М.С., Літовченко П.І., Котляр О.В., Іванова М.С., Іванова Л.П., Басова Є.В.; заявник і патентовласник Нац. техн. ун-т "ХПІ". – № u 2018 11969; заявл. 03.12.18; опуб. 12.08.19, Бюл. № 15.
7. Степанов М. С. *Теплообмін при шліфуванні з застосуванням ЗОР* / М.С. Степанов // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків, 2002. – Вип. 19. – С. 62-67.
8. Степанов М. С. *Определение влияния гидравлических параметров подачи СОЖ на коэффициент теплоотдачи в зоне резания при шлифовании* / М.С. Степанов // Вестник НТУ «ХПИ». – Харків, 2001. – Вып. 10. – С. 168-172.
9. Сизый Ю. А. *Математическое моделирование температурного поля в шлифуемой заготовке периферией круга* / Ю.А. Сизый, М.С. Степанов // Восточно-европейский журнал передовых технологий, – 2004. – № 2. – С. 52 – 63.
10. Степанов М. С. *Дослідження процесу теплообміну в зоні шліфування при використанні спеціального пристрою подачі МОР* / М.С. Степанов, М.С. Іванова та ін. // Сучасні технології у промисловом виробництві : Матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 21-24 квітня 2020 р.). – Суми : Сумський державний університет, 2020. – С. 59-60.
11. Лебедев В. Г. *Некоторые особенности шлифования деталей оборудования атомной энергетики* / В. Г. Лебедев, Н.Н. Клименко // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. – Одеса: ОНПУ, 2015. – С. 78-75.
12. Степанов М. С. *Оценка газосодержания СОЖ при шлифовании* / М.С. Степанов, Д. В. Ходоков // Смазочно-охлаждающие жидкости в процессах абразивной обработки. – Ульяновск, 1992. – С. 16-22.
13. Макаров С. С. *Управление теплообменом при струйном воздушном охлаждении* / С.С. Макаров, В.Б Дементьев // Химическая физика и мезоскопия. – 2007. – Т9, № 4. –С. 370-376.

References (transliterated)

1. Vasilenko O.A. Ulavlivajushhee dejstvie SOZh pri shlifovanii i ocenka ego jeffektivnosti [The capture action of coolant during grinding and evaluation of its effectiveness]/ O.A. Vasilenko, A.V. Tjuhta, Ju.V. Vasilenko // Vestnik JuUrGu. Serija «Mashinostroenie». – Juzhnoural'sk: JuUrGu, 2016. – T. 16, № 4. – pp. 59–66.
2. Stepanov Ju.S. Obzor osnovnyh sposobov podachi SOZh pri shlifovanii periferiej kruga [An overview of the main methods of supplying coolant when grinding the periphery of the wheel]/ Ju.S. Stepanov, Ju.V. Vasilenko //Orlovskij gosudars-tvennyj tehnicheskij universitet. Orel, 1999. 42. – Rus. – Dep. v VINITI15.12.99, № 3701-V99.
3. Vasilenko O.A. Jeffektivnost' dejstvija SOZh pri shlifovanii [The effectiveness of the coolant during grinding] / O.A. Vasilenko, A.V. Tjuhta, Ju.V. Vasilenko // IzvestijaTulGU. Tehnicheskienauki. – Tula, 2016. – Vyp. 8., Ch. 1. – pp. 215-219.
4. Efimov, V.V. Nauchnye osnovy tehniki podachi SOZh pri shlifovanii [Scientific fundamentals of grinding coolant technology] / V.V. Efimov. – Saratov: Izd-vo Saratovskogo un-ta, 1985. – 142 p.
5. Hudobin, L.V. Smazochno-ohlazhdajushhie tehnologicheskie sredstva. Spravochnik [Lubricating and cooling technological means. Handbook]/ L.V. Hudobin i dr. – M.: Mashinostroenie, 2006. – 544 p.
6. Patent na kor. mod. № 136095 Ukraïna, MPK(2019.01), V24V 55/00. Pristrij podachi mastil'no-oholodzhuval'noï ridini [Lubricating and coolant supply device] / Stepanov M.S.,

Litovchenko P.I., Kotljar O.V., Ivanova M.S., Ivanova L.P., Basova Є.V.; zajavnik i patentovlasnik Nac. tehn. un-t "HPI". – № u 2018 11969; zajavl. 03.12.18; opub. 12.08.19, Bjul. № 15.
7. Stepanov M. S. Teploobmin pri shlifuvanni z zastosuvannjam ZOR [Heat transfer during grinding with the use of coolant] / M.S. Stepanov // Visnik NTU «HPI». – Harkiv, 2002. – Vip. 19. – pp. 62-67.
8. Stepanov M. S. Opredelenie vlijanija gidravlicheskih parametrov podachi SOZh na kojefficient teplootdachi v zone rezanija pri shlifovanii [Determination of the influence of hydraulic parameters of the coolant supply on the heat transfer coefficient in the cutting zone during grinding] / M.S. Stepanov // Vestnik NTU «HPI». – Harkiv, 2001. – Vyp. 10. – pp. 168-172.
9. Sizyj Ju. A. Matematicheskoe modelirovanie temperaturnogo polja v shlifuemoj zagotovke periferiej kruga [Mathematical modeling of the temperature field in a grinding workpiece by the periphery of a wheel] / Ju.A. Sizyj, M.S. Stepanov // Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij, – 2004. – № 2. – S. 52 – 63.
10. Stepanov M. S. Doslidzhennja procesu teploobminu v zoni shlifuvannja pri vikoristanni special'nogo pristroju podachi MOR [Investigation of the heat exchange process in the grinding zone using a special coolant supply device] / M.S. Stepanov, M.S. Ivanova ta in. // Suchasni tehnologiï u promislovom virobnictvi : Materiali ta programa VII Vseukraïns'koï naukovo-tehnichnoï konferenciï (m. Sumi, 21-24 kvitnja 2020 r.). – Sumi : Sums'kij derzhavnij universitet, 2020. – pp. 59-60.
11. Lebedev V. G. Nekotorye osobennosti shlifovanija detalej oborudovanija atomnoj jenergetiki [Some features of grinding parts of nuclear power equipment] / V. G. Lebedev, N.N. Klimenko // Suchasni sistemi tehnologij u mashinobuduvanni. – Odesa: ONPU, 2015. – pp. 78-75.
12. Stepanov M. S. Ocenka gazosoderzhanija SOZh pri shlifovanii [Assessment of gas content of coolant during grinding] / M.S. Stepanov, D. V. Hodokov // Smazochno-ohlazhdajushhie zhidkosti v processah abrazivnoj obrabotki. – Ul'janovsk, 1992. – pp. 16-22.
13. Makarov S. S. Upravlenie teploobmenom pri strujnom vozdushnom ohlazhdenii [Air-cooled heat transfer control]/ S.S. Makarov, V.B Dement'ev // Himicheskaja fizika i mezoskopija. – 2007. – T9, № 4. –pp. 370-376.

Поступила (received) 14.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Степанов Михайло Сергійович (Степанов Михаил Сергеевич, Mykhailo Stepanov) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2224-6509; тел.: (057) 720-66-25.

Іванова Лариса Петрівна (Иванова Лариса Петровна, Larysa Ivanova) – аспірант кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2390-7372, тел.: (057) 720-66-25, e-mail: larisanangu@gmail.com.

Літовченко Петро Іванович (Литовченко Петр Иванович, Petro Litovchenko) – кандидат технічних наук, доцент, Національна академія Національної гвардії України, доцент кафедри інженерної механіки, м. Харків, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4483-597X, e-mail: pilitovchenko1950@gmail.com.

Іванова Марина Сергіївна (Иванова Марина Сергеевна, Maryna Ivanova) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0848-6805; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: ivanovamaryna1@gmail.com.