

М. Степанов, П. Литовченко, М. Иванова,
Л. Иванова, Харьков, Украина

ТЕПЛООБМЕН В СИСТЕМЕ ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ

***Аннотация.** Тепловые процессы, проходящие в шлифовальных станках, оказывают большое влияние на качество и точность обрабатываемой поверхности. При этом, важную роль в формировании тепловых потоков играет система применения СОЖ, каждый элемент которой оказывает определенное воздействие на температуру СОЖ и шлифовального станка в целом. В данной статье рассмотрена структурная схема передачи тепла в элементах системы применения СОЖ. Предложены математические зависимости для определения количества теплоты, выделяемой при прохождении СОЖ через каждый элемент системы, учитывающие ее гидравлические параметры. Определены те элементы системы применения СОЖ, которые оказывают наибольшее влияние на температуру СОЖ. Предложена методика определения теплового баланса в системе применения СОЖ, учитывающая её структурные, конструктивные, режимные параметры, а также другие факторы процесса шлифования.*

Ключевые слова: *шлифовальный станок; теплообмен; тепловой поток; температура; система применения СОЖ; давление; расход.*

Введение и постановка проблемы. Возрастающие требования к точности шлифуемых деталей обуславливают необходимость создания условий для уменьшения температурных деформаций шлифовальных станков. Известны попытки прогнозирования действия тепловых потоков не только в зоне резания, но и на некоторые элементы технологической системы станка. При этом было установлено, что СОЖ является одним из источников и потребителей тепла [1, 2].

В связи с этим, актуальным является разработка и исследование систем применения СОЖ, обеспечивающих оптимальный тепловой режим работы станков.

Анализ последних достижений и публикаций. Металлорежущие станки, в том числе и шлифовальные, имеют большое количество источников выделения тепла. Температурным деформациям различных элементов станков и их влиянию на точность обработки посвящен значительный объем исследований. Разработаны методы прогнозирования характеристик металлорежущих станков, работающих в условиях переменных тепловых режимов, и управления ими за счет компенсации температурных погрешностей станка [3]. Установлено, что СОЖ может оказывать как положительное, так и отрицательное действие на формирование температурных потоков [4].

Предприняты попытки изучения тепловых потоков в отдельных элементах системы применения СОЖ [5].

Считается, что наибольшие температурные изменения СОЖ получает при прохождении через зону резания [6-9], при этом влияние других элементов системы применения СОЖ на ее температуру практически не рассматривалось.

Изложение основного материала. Знание характера изменений тепловых потоков в системе применения СОЖ важно, т.к. в современных станках могут часто применяться насосы с давлением 500-600 кг/см² для получения моющего действия на режущую поверхности шлифовального круга. Кроме того, для улучшения охлаждающего действия, т. е. снижения теплообразования в зоне резания в условиях возрастающих скоростей резания, СОЖ подается с высоким расходом, что также является причиной нарушения теплового баланса в системе, которая становится дополнительным тепловым источником.

Допустимый тепловой режим системы применения СОЖ характеризует процесс, при котором количество поглощаемого жидкостью тепла при движении через элементы системы и зону резания в установившемся режиме равно количеству тепла, отдаваемого системой во внешнюю среду. Такому общему условию соответствует структурная схема передачи тепла, приведенная на рис. 1. На структурной схеме, которая дает возможность качественно оценить передачу тепла от элемента к элементу приведены следующие обозначения: ЗР – зона резания; Н – насос; КО – обратный клапан; ПК – предохранительный клапан; УК – клапан управления подачей СОЖ; ФС – фильтр сетчатый; ГЦ – гидроциклон; Д – дроссель; С – станина; СЛ – сливной лоток; МС – магнитный сепаратор; УП – устройство подачи СОЖ в зону резания; РСОЖ – резервуар СОЖ; ШБГ – шламовый бак гидроциклона; Т₁,...Т₇ – трубопроводы; М – манометры.

Анализируя схему (рис. 1) можно записать уравнение теплового баланса для системы применения СОЖ, обеспечивающее оптимальный тепловой режим.

$$\begin{aligned} & Q_{\text{ФС}} + Q_{T_1} + Q_{\text{КО}} + Q_{T_2} + Q_{\text{Н}} + Q_{T_3} + Q_{\text{Д}} + Q_{T_4} + Q_{\text{ГЦ}} + \\ & + Q_{T_5} + Q_{\text{ШБГ}} + Q_{\text{ПК}} + Q_{T_6} + Q_{\text{УК}} + Q_{T_7} + Q_{\text{УП}} + Q_{\text{ЗР}} = \quad (1) \\ & = + Q_{\text{С}} + Q_{\text{СЛ}} + Q_{\text{МС}} + Q_{\text{РСОЖ}}, \end{aligned}$$

где

$$Q_{\text{ФС}}, Q_{T_1}, \dots, Q_{T_7}, Q_{\text{КО}}, Q_{\text{Н}}, Q_{\text{Д}}, Q_{\text{ГЦ}}, Q_{\text{ШБГ}}, Q_{\text{ПК}}, Q_{\text{УК}}, Q_{\text{УП}}, Q_{\text{ЗР}}, Q_{\text{С}}, Q_{\text{СЛ}}, Q_{\text{МС}},$$

$Q_{tPCOЖ}$ – тепло выделяющееся при прохождении СОЖ соответственно фильтра сетчатого, трубопроводов, обратного клапана, насоса, дросселя, гидроциклона, шламового бака гидроциклона, предохранительного клапана, клапана управления, устройства подачи СОЖ, зоны резания, станины, сливного лотка, магнитного сепаратора и резервуара СОЖ.

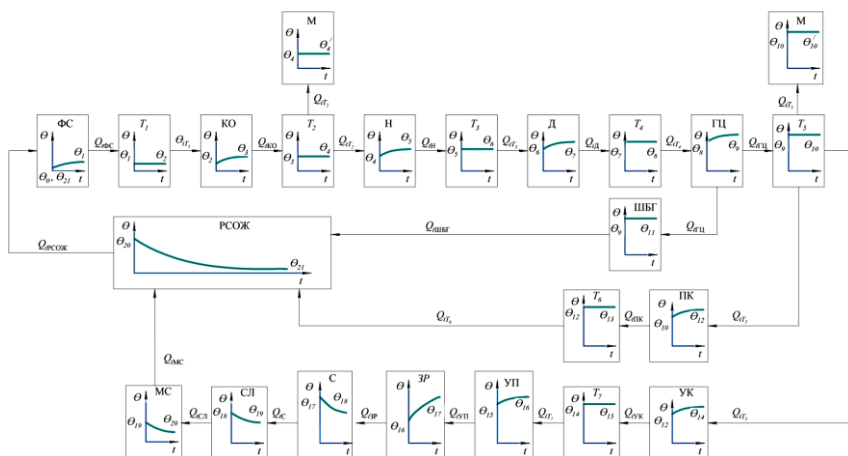


Рисунок 1 – Структурная схема передачи тепла в элементах системы применения СОЖ круглошлифовального станка

Часть энергии потока при прохождении через элемент системы превращается в тепловую и вызывает нагрев СОЖ, элемента и системы в целом. Из-за относительно большой скорости СОЖ теплоотдачей к стенкам элементов системы, работающих под давлением, можно пренебречь и считать, что всё тепло идет на нагрев жидкости $\Delta\theta$. В этом случае изменение температуры СОЖ зависит только от перепада давления на устройстве.

Величина изменения температуры $\Delta\theta$ определяется, если приравнять энергию, теряемую на протекание СОЖ через элемент, к энергии, расходуемой на нагрев СОЖ.

Если при прохождении некоторых элементов (в зависимости от режима работы системы, ее параметров, конструкции и назначения) их тепловое состояние не изменяется, то отдельными составляющими уравнения (1) можно пренебречь, например, составляющими $Q_{tT_1} \dots Q_{tT_7}, Q_{tШБГ}$. Тогда уравнение (1) имеет вид

$$\begin{aligned} Q_{\text{фс}} + Q_{\text{КО}} + Q_{\text{тн}} + Q_{\text{ид}} + Q_{\text{тЦ}} + Q_{\text{тПК}} + Q_{\text{тУК}} + Q_{\text{тУП}} + Q_{\text{тЗР}} = \\ = +Q_{\text{тС}} + Q_{\text{тСЛ}} + Q_{\text{тМС}} + Q_{\text{тРСОЖ}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Эвакуация тепла в системе применения СОЖ от элементов и участков его образования во многом зависит от значения коэффициента теплопроводности жидкости, характеризующего её свойства проводить тепло. Значение этого коэффициента для водных жидкостей при $t = 15^\circ\text{C}$ составляет $9,61 \cdot 10^{-4}$ ккал/см²·с·град. Для определения и обеспечения отвода тепла из системы при её работе, а также для эффективного его рассеивания, необходимо, чтобы СОЖ обладала определённым значением теплоёмкости. Для жидкости на водной основе теплоёмкость в зависимости от температуры (от 10° до 80°C) может составлять $0,72 \dots 1,023$ ккал/кг·град. Следовательно, теплоёмкость водоземлюльсионных СОЖ более чем в 1,5 раза выше теплоёмкости углеводородных жидкостей.

Тепло, возникающие в зоне резания, можно оценить анализируя тепловой баланс, при этом охлаждение при помощи СОЖ, как правило, не учитывается, так как охлаждающая жидкость отводит тепло от заготовки и стружки уже после того, как они получили его в результате резания [8]. Как следствие, до $15 \dots 75\%$ тепла (в зависимости от условий) переходит в СОЖ [9].

Количество выделенного тепла при прохождении СОЖ через элемент системы определяется по формуле, Дж

$$Q_{\text{Э}} = N_{\text{пот}} \cdot t_{\text{Э}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{пот}}$ – потерянная мощность Вт; $t_{\text{Э}}$ – время работы элемента, с.

Потерянная мощность определяется по формуле, кВт

$$N_{\text{пот}} = Q_{\text{СОЖ}} \cdot \Delta p / 612, \quad (4)$$

где $Q_{\text{СОЖ}}$ – расход СОЖ через элемент, дм³/мин; Δp – перепад давления на элементе, кг/см².

Таким образом, тепло, выделяемое при работе элемента системы применения СОЖ, определяется как

$$Q_{\text{Э}} = Q_{\text{СОЖ}} \cdot \Delta p \cdot t_{\text{Э}} / 612. \quad (5)$$

Величина перепада давления с учетом изменения температуры θ на элементе определяется по формуле, кг/см²

$$\Delta p = \rho_{\text{СОЖ}} \cdot c_{\text{СОЖ}} \cdot m \cdot (\Theta_{\text{вх}} - \Theta_{\text{вых}}), \quad (6)$$

где $c_{\text{СОЖ}}$ – удельная теплоёмкость СОЖ, ккал/кг·град; $\rho_{\text{СОЖ}}$ – плотность СОЖ, кг/см³; m – механический эквивалент теплоты, $m = 4,27 \cdot 10^4$ кг·см/ккал.

Учитывая (5) и (6) можно определить тепло, выделяемое при прохождении СОЖ через элемент системы

$$Q_{\text{Э}} = Q_{\text{СОЖ}} \cdot \rho_{\text{СОЖ}} \cdot c_{\text{СОЖ}} \cdot m \cdot (\Theta_{\text{вх}} - \Theta_{\text{вых}}) \cdot t_{\text{Э}} / 612. \quad (7)$$

На практике в современных системах нет возможности контролировать параметр Θ . Однако, есть возможность контролировать Δp практически на каждом элементе, работающем под давлением.

Таким образом, основываясь на приведённом положении и рассчитав перепад давления СОЖ на элементе, можно по формуле (5) определить тепло, возникающие в СОЖ при её прохождении через элемент системы применения СОЖ. В качестве примера приведем расчетные формулы для определения тепла в некоторых элементах системы.

Перепад давления, создаваемый насосом, определяется по формуле

$$\Delta p = \frac{N_{\text{T}}}{Q_{\text{H}} + \Delta Q_{\text{m}}}, \quad (8)$$

где N_{T} – теоретическая (индикаторная) мощность насоса; Q_{H} – фактическая производительность насоса; ΔQ_{m} – утечка жидкости.

Учитывая (5) и (8), тепло, выделяемое при работе насоса, определяется как

$$Q_{\text{H}} = \frac{Q_{\text{СОЖ}} \cdot N_{\text{T}} \cdot t_{\text{Э}}}{612 \cdot (Q_{\text{H}} + \Delta Q_{\text{m}})}. \quad (9)$$

Перепад давления на гидроциклоне можно определить, преобразуя формулу Честона, кг/см²

$$\Delta p_{\text{ГЦ}} = 0,0018 \left(\frac{Q_{\text{ГЦ}}}{F_{\text{вГЦ}}} \right)^2, \quad (10)$$

где $Q_{\text{ГЦ}}$ – расход СОЖ через гидроциклон, дм³/мин; $F_{\text{вГЦ}}$ – площадь сечения входного патрубка, см².

С учетом (5) и (10), тепло, выделяемое при прохождении СОЖ через гидроциклон

$$Q_{\text{ГЦ}} = 3 \cdot 10^{-6} \frac{Q_{\text{ГЦ}}^3}{F_{\text{вГЦ}}^2} \cdot t_{\text{Э}}, \quad (11)$$

Приведенные на рис. 2 диаграммы дают возможность оценить тепловой поток, переходящий в СОЖ при прохождении ею насоса, который является одним из источников тепла. Величина $Q_{\text{Н}}$ при этом может изменяться на несколько порядков. Если в станках для обычного шлифования ($v_{\text{к}}=15...30\text{м/с}^2$) его можно не учитывать, то в других шлифовальных станках им пренебрегать нельзя.

Тепло, выделяемое при прохождении СОЖ через дроссель, определяется по формуле

$$Q_{\text{Д}} = \frac{Q \cdot \rho_{\text{СОЖ}} \cdot t_{\text{ч}}}{1,224 \cdot 10^3 \cdot \mu^2 \cdot f^2}, \quad (12)$$

где $\rho_{\text{СОЖ}}$ – плотность СОЖ, кг/м^3 ; Q – расход СОЖ, $\text{м}^3/\text{с}$; μ – коэффициент расхода, $\mu = 0,62$; f – площадь проходного сечения щели, м^2 .

На рис. 3 приведены графики зависимости выделяемого тепла от расхода СОЖ проходящего через элемент системы применения СОЖ. Зависимость 1 построена для перепада давления $\Delta p = 0,1 \text{ кг/см}^2$. Зависимости 2 и 3 построены при перепадах $\Delta p = 0,38$ и $1,5 \text{ кг/см}^2$, что соответствует эксплуатационным условиям.

Графики зависимости (рис. 3) показывают, что тепло, выделяемое в гидроциклоне, следует учитывать особенно в условиях обработки, требующих применения больших расходов СОЖ.

Если трубопровод создает большое сопротивление и при его прохождении возникает перепад давления, то тепло, выделяемое при прохождении СОЖ по трубопроводу, определяется по формуле

$$Q_{\text{Т}} = 2 \cdot 10^3 \frac{\lambda_{\text{Т}} \cdot L_{\text{Т}} \cdot Q^3 \cdot t_{\text{ч}}}{612 \cdot d_{\text{Т}}^5}, \quad (13)$$

где $L_{\text{Т}}$ – длина трубопровода, м; $d_{\text{Т}}$ – диаметр трубопровода, мм; Q – расход СОЖ, $\text{мм}^3/\text{мин}$; λ – коэффициент сопротивления, $\lambda = 75/\text{Re}$ (Re – число Рейнольдса).

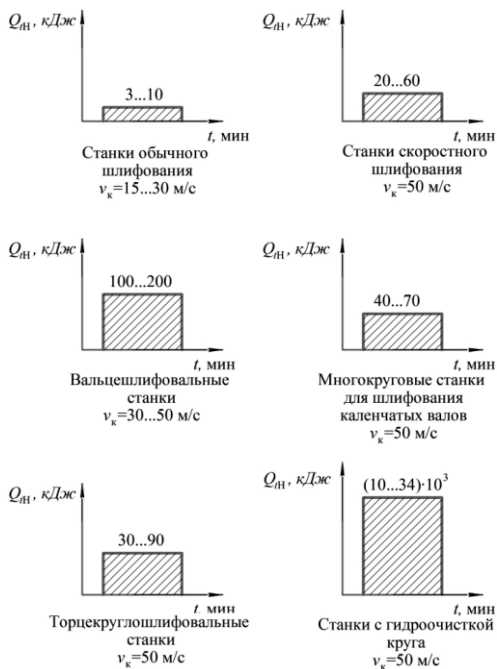


Рисунок 2 – Тепло, переходящее в СОЖ при прохождении через насос системы применения СОЖ. Время цикла обработки 2,2 мин

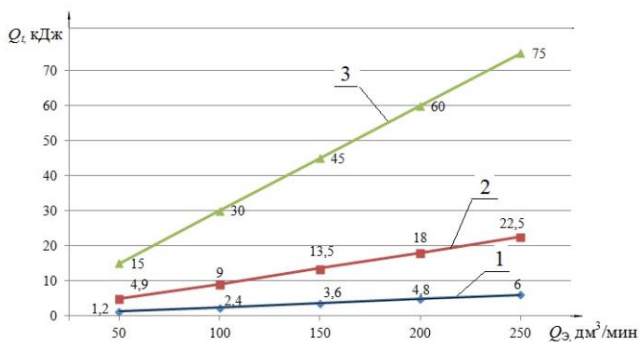


Рисунок 3 – Тепло, выделяемое при прохождении СОЖ через элементы системы применения СОЖ:

1 – дроссель; 2 – фильтр сетчатый; 3 – гидроциклон

Тепло, возникающее при прохождении СОЖ через устройство её подачи в зону резания, также определяется перепадом давления на нём, которое зависит от конструкции сопла и может быть определено по методике расчета насадков Вентури, Борда и др. [7, 10]

Величина $Q_{гСОЖ}$ зависит от теплоемкости и массы (объема) СОЖ в резервуаре, площади поверхности резервуара и коэффициента передачи тепла от стенок резервуара к воздуху. Величину $Q_{гСОЖ}$ можно определить на основе уравнение теплового баланса в резервуаре для СОЖ [11].

Для приближённой оценки теплообмена уравнение (1) можно представить в упрощенном виде, оставив только составляющие $Q_{гЗР}$ и $Q_{гСОЖ}$. Тогда уравнение оптимального теплового режима примет вид

$$Q_{гЗР} = Q_{гСОЖ}.$$

То есть тепло, приходящее с охлаждающей жидкостью из зоны резания за один оборот СОЖ в системе успевает рассеиваться в окружающую среду через резервуар СОЖ. Такое допущение можно применить при очень ограниченных условиях. Например, при относительно невысоких скоростях резания ($v_k = 15 \dots 30 \text{ м/с}^2$), использовании способа подачи СОЖ поливом свободно падающей струей с малыми расходами и давлениями (когда используются маломощные насосы), когда система применения СОЖ очень проста и не содержит большого количества элементов, работа которых требует энергозатрат. В современных условиях высокопроизводительной обработки требующих обеспечения точностных параметров высокого уровня вышеназванные допущения некорректны.

Выводы.

1. Разработана методика определения характера распределения тепловых потоков в системе применения СОЖ, учитывающая её структурные, конструктивные, режимные параметры и факторы процесса обработки.

2. Исследования показали, что если тепло, поглощённое СОЖ при прохождении через насос в станках для обычного шлифования ($v_k = 15 \dots 30 \text{ м/с}^2$) можно не учитывать, то в других шлифовальных станках им пренебрегать нельзя.

3. Установлено, что следует учитывать тепло, выделяемое в гидроциклоне и других элементах, особенно в условиях обработки, требующих применения больших расходов и давлений СОЖ.

References: 1. Brecher C., Bäumlner S., et al. Energy Efficient Cooling Systems for Machine Tools. Leveraging Technology for a Sustainable World. Proceedings of the 19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Berkeley, 2012, pp. 239-244. doi: 10.1007/978-3-642-29069-5_41. 2. Stepanov M., Ivanova M. et al. Study of Thermal Modes of Working Fluids in Grinding Machines. In: Tonkonogyi V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes.

InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, 2020, pp. 299-308. doi:10.1007/978-3-030-40724-7_31. **3.** Polyakov A.N., Marusic K.V. Upravlenie termodeformatsionny'm sostoyaniem stanka na osnove avtomatizatsii prognozirovaniya temperatury'kh peremeshhenij ispolnitel'ny'kh organov: uchebnoe posobie [Control of the thermodeformation state of the machine based on the automation of forecasting the temperature movements of executive bodies: a training manual]. Orenburg, Orenburg state university, Publ. OSU, 2012. 220 p. **4.** Mayr J., Gebhardt M. et al. Cutting fluid influence on thermal behavior of 5-axis machine tools. Proceedings of the 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting. Zurich, 2014. pp. 395 – 400. doi: 10.1016/j.procir.2014.03.085. **5.** J. Weber, Jü. Weber et al. Energy, power and heat flow of the cooling and fluid systems in a cutting machine tool. Proceedings of the 17th CIRP Conference on High Performance Cutting, 46, 2016 pp. 99 – 102. doi: 10.1016/j.procir.2016.03.177. **6.** Patil P. S., Mudholkar R. R. Cooling Techniques for a Spindle of Machine Tool. International Journal Of Engineering And Computer Science, 2016, Vol. 5, Issue 12, pp. 19653-19656. doi: 10.18535/ijecs/v5i12.70. **7.** Abankin Yu. I. Opredelenie optimal'ny'kh razmerov sopla sistemy` podachi SOZH. [Determining the optimum nozzle size for the coolant supply system]. Smazochno-okhlazhdayushhie tekhnologicheskie sredstva v processakh abrazivnoj obrabotki. Sb. nauchn. Trudov [Lubricating and cooling technology in abrasive processes. The collection of scientific works]. Ulyanovsk, 1988, pp. 56-61. **8.** Sizy'j Yu.A., Stepanov M.S. Teplovoj balans processa shlifovaniya [The heat balance of the grinding process]. Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh [Cutting & Tools in Technological System]. Kharkiv, Publ. NTU «KhPI», 2000, pp. 177–190. **9.** E.Iyanov V.D., Kulikov V.N. Prizhogi pri shlifovanii [Burning when grinding]. Moscow, Publ. NIMASH, 1974, 63 p. **10.** Chugaev, R. R. *Gidravlika* : (Tekhnicheskaya mekhanika zhidkosti) : Uchebnik dlya vuzov [Hydraulics: (Technical fluid mechanics): Handbook for high schools], 2 edition, Leningrad, Publ. Energoizdat, 1982, 672 p. **11.** Stepanov M. S., Litovchenko P. I., Ivanova L. P. Matematichna model` teploobminu u rezervuari MOR shlifoval'nogo verstatu [Mathematical model of heat exchange in the coolant tank of grinding machine]. Visnik Zhitomir's'kogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. Seriya : Tekhnichni nauki [Bulletin of the Zhytomyr State Technological University. Series: Technical Sciences], 2017, Vol. 2(1), pp. 90-96.

Михайло Степанов, Петро Літовченко,
Марина Іванова, Лариса Іванова, Харків, Україна

ТЕПЛОБМІН В СИСТЕМІ ЗАСТОСУВАННЯ ЗОР ШЛІФВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

Анотація. Теплові процеси, що проходять в шліфувальних верстатах, дуже впливають на якість і точність оброблюваної поверхні. При цьому, важливу роль у формуванні теплових потоків відіграє система застосування змащувально-охолоджувальної рідини (ЗОР), кожен елемент якої певним чином впливає на температуру ЗОР і шліфувального верстата в цілому. У даній статті розглянуто структурну схему системи застосування ЗОР, що складається з фільтра сітчастого, трубопроводів, зворотного клапана, насоса, дроселя, гідроциклону, шламового бака гідроциклону, запобіжного клапана, клапана управління, пристрою подачі ЗОР, зони різання, станини, зливного лотка, магнітного сепаратора і резервуара ЗОР. Відзначено, що частина енергії потоку при проходженні через елемент системи перетворюється в теплову енергію і викликає нагрівання ЗОР, елемента і системи в цілому. Запропоновано методіку визначення теплового балансу в системі застосування ЗОР, що враховує її структурні, конструктивні, режимні параметри, а також інші чинники процесу шліфування. Запропоновано математичні залежності для визначення кількості теплоти, яка виділяється при проходженні ЗОР через кожен елемент системи,

які враховують її гідравлічні параметри. Визначено ті елементи системи застосування ЗОР, які мають найбільший вплив на температуру ЗОР. Проведено порівняльний аналіз теплових потоків, які переходять в ЗОР, при проходженні нею насоса, для різних процесів шліфування та відповідних типів шліфувальних верстатів. Встановлено, що в умовах обробки, які вимагають застосування великих витрат і тисків ЗОР, слід враховувати тепло, що виділяється в очисниках та інших елементах системи, робота яких супроводжується значними перепадами тиску. Розглянуто можливість контролю і управління температурою ЗОР, на підставі того факту, що тепло, яке виникає при проходженні ЗОР через пристрій, що працює під тиском, визначається також перепадом тиску на цьому пристрої.

Ключові слова: шліфувальний верстат; теплообмін; тепловий потік; температура; система застосування ЗОР; тиск; витрата.

Mykhaylo Stepanov, Petro Litovchenko, Maryna Ivanova,
Larysa Ivanova, Kharkiv, Ukraine

HEAT EXCHANGE IN THE LIQUID COOLANT APPLICATION SYSTEM OF GRINDING MACHINES

Abstract. *Thermal processes taking place in grinding machines have a great influence on the quality and accuracy of the surface being machined. A liquid coolant application system plays an important role in the formation of heat flows. Each element of that system has a certain effect on the temperature of the coolant and the grinding machine as a whole. This article discusses the structural diagram of heat transfer in the elements of the liquid coolant application system, which consists of a strainer, pipelines, check valve, pump, throttle, hydrocyclone, grinding dust tank of a hydrocyclone, safety valve, control valve, coolant supply device, cutting zone, bed, drain tray, magnetic separator, and coolant reservoir. It is noted that part of the flow energy when passing through an element of the system is converted into thermal energy and causes heating of the coolant, element, and the system as a whole. A technique for defining the heat balance in a coolant application system, taking into account its organizational, structural parameters, cutting conditions, as well as other factors of the grinding process is proposed. Mathematical dependencies for determining the quantity of heat released when liquid coolant passes through each element of the system, taking into account its hydraulic parameters are proposed. The elements of the liquid coolant application system that have the greatest influence on the coolant temperature are identified. A comparative analysis of the heat fluxes passing into the coolant during the passage of the pump was carried out for various grinding processes and the types of grinding machines that implement them. It has been found out that under processing conditions requiring the use of high flow rates and coolant pressures, the heat released in cleaners and other system elements should be taken into account, the operation of which is accompanied by significant pressure differentials. The possibility of monitoring and controlling the temperature of the coolant, based on the fact that the heat generated by the passage of coolant through a device operating under pressure, is also determined by the pressure differential across this device.*

Keywords: grinding machine; heat exchange; heat flow; temperature; liquid coolant application system; pressure; flow rate.