

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.91.(075.8)
DOI: 10.12737/24882

Д.Ю. Дубров, А.Н. Чукарин, Ю.С. Дубров, Г.И. Приходько

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СБОРНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Представлена математическая модель теплообмена в системе охлаждения сборных режущих инструментов при сухом резании. Поглощение тепла достигается при изменении агрегатного состояния легкоплавких веществ и основано на применении фазовых переходов первого рода. В результате решения задачи Стефана определено время про-

должительности термостабилизации процесса резания.

Ключевые слова: тепловая труба, сборные режущие инструменты, испарительное охлаждение, фазовый переход, теплообмен, плавящееся вещество.

D.Yu. Dubrov, A. N. Chukarin, Yu. S. Dubrov, G. I. Prikhodko

REASONS FOR THE CHOICE OF THE THERMAL PIPE FOR THE COMPLEX COOLING SYSTEM OF THE COMBINED CUTTING TOOLS

The mathematical model of heat exchange in a cooling system of the combined cutting tools in case of dry cutting is provided. Absorption of heat is reached in case of change of aggregate state of fusible substances and is based on application of phase transitions of the first sort. As a result of the solution of a task of

Stefan cutting process thermostabilization duration time is determined.

Key words: a thermal pipe, the combined cutting tools, vaporizing chilling, phase transition, heat exchange, the melting substance.

Обработка материалов резанием является одним из основных способов получения изделий требуемой формы. При использовании в качестве конструкционных низкотеплопроводных материалов (титановых сплавов, высокомарганцовистых сплавов, пластмасс) существенно возрастает нагрев инструмента, что приводит к повышению поверхностной и объемной температур в контактной зоне и способствует увеличению износа режущего клина. Для увеличения периода стойкости резца применяется ряд методов, одним из которых является теплоотвод из контактной зоны. Наряду с применением смазывающе-охлаждающих технологических средств (СОТС) существует и способ «сухого» резания. Одним из методов нетрадиционного охлаждения является поглощение тепла за счет изменения агрегатного состояния вещества (испарительное охлаждение открытого и закрытого типов, использование легкоплавких веществ), основанное на

применении фазовых переходов первого рода. Такой подход был реализован в комплексной системе охлаждения (КСО) режущего инструмента [1; 2].

Общая тепловая схема КСО режущего инструмента представлена на рис. 1.

Основной проблемой является поддержание обратимости процесса, т.е. необходимость содержать рабочее вещество в как можно более продолжительном по времени состоянии фазового перехода. Идеальный процесс, происходящий при плавлении и затвердевании, можно представить следующим образом. При обработке резанием выделяется энергия и происходит повышение температуры легкоплавкого рабочего вещества. При достижении точки плавления легкоплавкое вещество начинает плавиться, переходя в жидкую фазу. При этом поглощается количество теплоты, соответствующее теплоте плавления рабочего вещества. Температура на границе державка - рабочее

вещество не будет возрастать по сравнению с температурой плавления вещества до тех пор, пока существуют жидкая и твердая фазы. Таким образом, можно говорить о возможности продолжительной температурной стабилизации, что должно привести к повышению эффективности режущего инструмента.

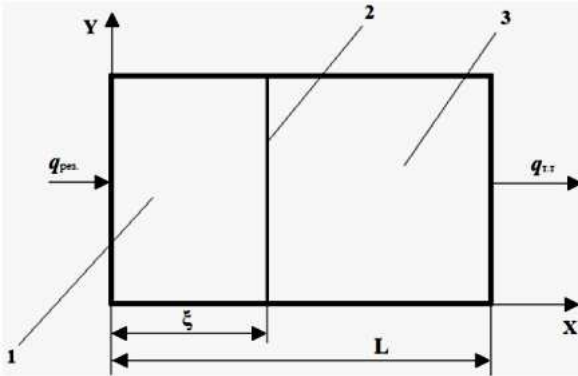


Рис. 1. Общая тепловая схема КСО: 1 - жидкая фаза; 2 - граница раздела фаз; 3 - твердая фаза рабочего вещества; $q_{рез.}$ - удельный тепловой поток, поступающий в резец; $q_{тт.}$ - количество теплоты, соответствующее холодопроизводительности тепловой трубы; ξ - координата границы раздела фаз; L - линейный размер полости с рабочим веществом

На схеме показана секция (полость в державке резца), внутри которой размещено легкоплавкое вещество, находящееся в состоянии фазового перехода первого рода, с границей раздела фаз. Подвод тепла к полости с легкоплавким веществом осуществляется за счет совершаемой работы резания. Отток тепла происходит при помощи ТТ. Величина удельного теплового потока $q_{тт.}$ соответствует холодопроизводительности тепловой трубы. Проблема сопряжения температурных полей в контактирующих фазах с граничными условиями по перемещающейся поверхности раздела является задачей Стефана. Очевидно, что для поддержания рабочего вещества в состоянии как можно более длительного фазового перехода (по крайней мере, в тече-

ние основного времени операции) необходимо, чтобы положение границы раздела фаз и скорость ее перемещения удовлетворяли условиям:

$$\begin{cases} \xi \neq 0 \\ \xi \neq L \end{cases}; \quad (1)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} \rightarrow 0. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) являются условиями работоспособности предлагаемой КСО.

Таким образом, КСО может выглядеть как система, являющаяся частью сборного резца и совмещающая в себе следующие блоки: полуо державку, выполняющую роль контейнера с легкоплавким рабочим веществом, и ТТ, зона испарения которой погружена в легкоплавкую среду. Мощность ТТ может быть оценена исходя из основного времени операции. Для получения зависимостей, используемых на практике, допускаем следующие ограничения для одномерной модели:

- температуры расплава $T_{жс}$ и твердого вещества T_m зависят от одной координаты;
- в модели не учитывается теплообмен боковых стенок с рабочим веществом;
- температурный диапазон фазового перехода считаем малой величиной по сравнению с температурами плавления и кристаллизации, принимаемыми постоянными;
- значение температуры на границе раздела фаз соответствует устойчивому сосуществованию твердой и жидкой фаз.

Интерес представляет оценка мощности тепловой трубы исходя из среднестатистического основного (технологического) времени операции. Рассмотрим состояние рабочего вещества после начала процесса резания, когда уже существуют две фазы.

Для расплавленной части рабочего вещества справедливо

$$\frac{\partial T_{ж.}(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{ж.}}{c_{ж.} \rho_{ж.}} \frac{\partial^2 T_{ж.}(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad 0 < x < \xi; \tau > 0,$$

для нерасплавленной части -

$$\frac{\partial T_{\tau}(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\tau}}{c_{\tau} \rho_{\tau}} \frac{\partial^2 T_{\tau}(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \xi < x < L ; \tau > 0.$$

Начальные условия при $\tau = 0$: $T_{\text{ж}}(x, 0) = T_{\text{фп}}$ (температура фазового перехода);
 $T_{\text{т}}(x, 0) = T_0$ (температура среды).

Граничные условия :

$$\begin{aligned} T_{\text{ж}}(0, \tau) &= T_{\text{держ}} ; \\ T_{\text{ж}}(\xi, \tau) &= T_{\text{фп}} ; \\ \frac{\partial T_{\text{т}}(L, \tau)}{\partial x} &= q ; \\ T_{\text{т}}(\xi, \tau) &= T_{\text{фп}} , \end{aligned}$$

где q – постоянная величина, обусловленная теплоотводящими характеристиками тепловой трубы $q_{\text{тт}}$.

Введем

$$a_i^2 = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i}, \quad i = \begin{cases} \text{ж} \\ \text{т} \end{cases}.$$

Соотношение температур:

$$T_0 < T_{\text{фп}} < T_{\text{держ}} .$$

Решение может быть найдено с использованием функции ошибок (интеграла Лапласа, или интеграла вероятности):

$$\begin{aligned} T_{\text{ж}}(x, \tau) &= A_1 + B_1 \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{a_{\text{ж}} \tau}} \right) ; \\ T_{\text{т}}(x, \tau) &= A_2 + B_2 \left((L - x) \operatorname{erfc} \left(\frac{L - x}{2\sqrt{a_{\text{т}} \tau}} \right) - \sqrt{\frac{a_{\text{т}} \tau}{\pi}} \exp \left(-\frac{(L - x)^2}{4a_{\text{т}} \tau} \right) \right) . \end{aligned}$$

Используя граничные условия, получим

$$T_{\text{ж}}(0, \tau) = T_{\text{держ}} = A_1 + B_1 \operatorname{erf}(0) = A_1 ;$$

$$\frac{\partial T_{\text{т}}(L, \tau)}{\partial x} = q = B_2(0 - 1) = -B_2 .$$

Таким образом,

$$A_1 = T_{\text{держ}} ; B_2 = -q .$$

Тогда, с учетом определенных констант на границе раздела фаз,

$$\begin{aligned} T_{\text{ж}} &= T_{\text{держ}} + B_1 \operatorname{erf} \left(\frac{\xi}{2\sqrt{a_{\text{ж}} \tau}} \right) = T_{\text{фп}} ; \\ B_1 &= \frac{T_{\text{фп}} - T_{\text{держ}}}{\operatorname{erf} \left(\frac{\xi}{2\sqrt{a_{\text{ж}} \tau}} \right)} ; \\ T_{\text{т}} &= A_2 - q \left[(L - \xi) \operatorname{erfc} \left(\frac{L - \xi}{2\sqrt{a_{\text{т}} \tau}} \right) - \sqrt{\frac{a_{\text{т}} \tau}{\pi}} \exp \left(-\frac{(L - \xi)^2}{4a_{\text{т}} \tau} \right) \right] = T_{\text{фп}} . \end{aligned}$$

Учитывая, что

$$(e^{\varphi(x)})' = \varphi'(x) e^{\varphi(x)},$$

а также, что

$$\left(\operatorname{erfc} \left(\frac{L - x}{2\sqrt{a_{\text{т}} \tau}} \right) \right)' = \frac{1}{\sqrt{\pi a_{\text{т}} \tau}} \exp \left(-\frac{(L - x)^2}{4a_{\text{т}} \tau} \right),$$

получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{\tau}}{\partial x} &= B_2 \left(-\operatorname{erfc}\left(\frac{L-x}{2\sqrt{a_{\tau}\tau}}\right) + \frac{L-x}{\sqrt{\pi a_{\tau}\tau}} \exp\left(-\frac{(L-x)^2}{4a_{\tau}\tau}\right) - \frac{L-x}{2\sqrt{\pi a_{\tau}\tau}} \exp\left(-\frac{(L-x)^2}{4a_{\tau}\tau}\right) \right) = \\ &= B_2 \left(\frac{L-x}{2\sqrt{\pi a_{\tau}\tau}} \exp\left(-\frac{(L-x)^2}{4a_{\tau}\tau}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{L-x}{2\sqrt{a_{\tau}\tau}}\right) \right); \\ A_2 &= T_{\text{фп}} + q \left[(L - \xi) \operatorname{erfc}\left(\frac{L-\xi}{2\sqrt{a_{\tau}\tau}}\right) - \sqrt{\frac{a_{\tau}\tau}{\pi}} \exp\left(-\frac{(L-\xi)^2}{4a_{\tau}\tau}\right) \right]. \end{aligned}$$

Для определения ξ используем условие Стефана:

$$\lambda_{\text{ж}} \frac{\partial T_{\text{ж}}(x,\tau)}{\partial x} \Big|_{\xi-0} - \lambda_{\tau} \frac{\partial T_{\tau}(x,\tau)}{\partial x} \Big|_{\xi+0} = \rho_{\tau} r \frac{\partial \xi}{\partial \tau}. \quad (3)$$

С учетом того, что

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{\text{ж}}}{\partial x} &= (T_{\text{держ}} + \frac{T_{\text{фп}} - T_{\text{держ}}}{\operatorname{erf}\left(\frac{\xi}{2\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}}\right)} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}}\right))'_{\text{ж}} = \frac{T_{\text{фп}} - T_{\text{держ}}}{\operatorname{erf}\left(\frac{\xi}{2\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}}\right)} \frac{1}{\sqrt{\pi a_{\text{ж}}\tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a_{\text{ж}}\tau}\right); \\ \frac{\partial T_{\tau}}{\partial x} &= (T_{\text{фп}} + q \left[(L - \xi) \operatorname{erfc}\left(\frac{L-\xi}{2\sqrt{a_{\tau}\tau}}\right) - \sqrt{\frac{a_{\tau}\tau}{\pi}} \exp\left(-\frac{(L-\xi)^2}{4a_{\tau}\tau}\right) \right] - q \left[(L - x) \operatorname{erfc}\left(\frac{L-x}{2\sqrt{a_{\tau}\tau}}\right) - \sqrt{\frac{a_{\tau}\tau}{\pi}} \exp\left(-\frac{(L-x)^2}{4a_{\tau}\tau}\right) \right])'_{\text{ж}} = -q \left[\frac{L-x}{2\sqrt{\pi a_{\tau}\tau}} \exp\left(-\frac{(L-x)^2}{4a_{\tau}\tau}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{L-x}{2\sqrt{a_{\tau}\tau}}\right) \right], \end{aligned}$$

условие Стефана (3) примет вид

$$\lambda_{\text{ж}} \frac{T_{\text{фп}} - T_{\text{держ}}}{\operatorname{erf}\left(\frac{\xi}{2\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}}\right)} \frac{1}{\sqrt{\pi a_{\text{ж}}\tau}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a_{\text{ж}}\tau}\right) + \lambda_{\tau} q \left(\frac{L-\xi}{2\sqrt{\pi a_{\tau}\tau}} \exp\left(-\frac{(L-\xi)^2}{4a_{\tau}\tau}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{L-\xi}{2\sqrt{a_{\tau}\tau}}\right) \right) = \rho_{\tau} r \frac{\partial \xi}{\partial \tau}.$$

При $\xi = L$ (т.е. все рабочее тело – жидкость, перестало выполняться одно из условий работоспособности КСО [см. выражения (1) и (2)])

$$\lambda_{\text{ж}} \frac{T_{\text{фп}} - T_{\text{держ}}}{\sqrt{\pi a_{\text{ж}}\tau}} \frac{\exp\left(-\frac{L^2}{4a_{\text{ж}}\tau}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{L}{2\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}}\right)} - \lambda_{\tau} q = \rho_{\tau} r \frac{\partial \xi}{\partial \tau}.$$

Оценим приближенное значение τ , используя разложение в ряд Тейлора

$$\frac{\exp\left(-\frac{L^2}{4a_{\text{ж}}\tau}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{L}{2\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}}\right)} \approx \frac{\sqrt{\pi a_{\text{ж}}\tau}}{L} - \frac{\sqrt{\pi}}{6\sqrt{a_{\text{ж}}\tau}} L + \dots$$

Таким образом,

$$\lambda_{\text{ж}} (T_{\text{фп}} - T_{\text{держ}}) \left[\frac{1}{L} - \frac{L}{6a_{\text{ж}}\tau} \right] = \rho_{\tau} r \frac{\partial \xi}{\partial \tau} + \lambda_{\tau} q.$$

Отсюда

$$\frac{\lambda_{\text{ж}} (T_{\text{фп}} - T_{\text{держ}})}{L} - \lambda_{\tau} q = \rho_{\tau} r \frac{\partial \xi}{\partial \tau} + \frac{L \lambda_{\text{ж}}}{6a_{\text{ж}}\tau} (T_{\text{фп}} - T_{\text{держ}}).$$

Учитывая, что скорость перемещения фазовой границы незначительна, получим

$$\tau = \frac{\lambda_{\text{ж}} L (T_{\text{фп}} - T_{\text{держ}})}{6a_{\text{ж}}} / \left(\frac{\lambda_{\text{ж}} (T_{\text{фп}} - T_{\text{держ}})}{L} - \lambda_{\tau} q \right).$$

После преобразований найдем выражение для определения времени полного расплавления рабочего вещества:

$$\tau = \frac{L^2}{6a_{\text{ж}} \left[1 - \frac{\lambda_{\tau} q L}{\lambda_{\text{ж}} (T_{\text{фп}} - T_{\text{держ}})} \right]}.$$

Именно в течение этого времени ТТ будет обеспечивать теплоотвод. Варьируя параметры, входящие в определение данного временного интервала, можно обеспечить основное (технологическое) время, которое необходимо для выполнения операции. Таким образом, вышеизложенное позволило нам сконструировать сборные инструменты с термостабилизацией теплового режима работы.

На рис. 2 представлен резец с комплексной системой охлаждения в собранном виде. Внутренняя полость державки заполнена сплавом Розе.

Особенностью данной конструкции является наличие внутреннего канала (полости) для размещения в нём легкоплавкого вещества и тепловых труб (ТТ). КСО

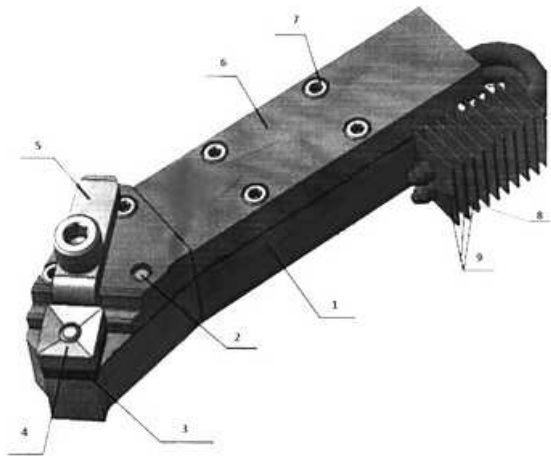


Рис. 2. Резец с КСО в собранном виде: 1 - державка; 2 - опорный палец; 3 - опорная пластина; 4 - режущая пластина; 5 - прижим; 6 - крышка; 7 - соединительные винты; 8 - тепловые трубы; 9 - пластины радиатора

основана на теплоотводе за счет поглощения скрытой теплоты плавления рабочих веществ, расположенных внутри державки, и стабилизации требуемого теплового режима с помощью ТТ.

Для оценки возможности применения серийных тепловых труб было проведено компьютерное моделирование в среде *Solid Works* с учетом допущений, приведенных в работах [3; 4]. Результаты моделирования показывают, что значения температуры при чистовом точении стали 110Г13Л резцами ВК6 ($t = 0,5$ мм, $s = 0,1$ мм/об, $v = 60$ м/мин) под опорной плоскостью режущей пластины достигают величин порядка 200°C для стандартного резца. При длительности основного (технологического) времени порядка 10-15 мин мощность тепловой трубы составляет оценочно 200-300 Вт, что соответствует характеристикам стандартных серийно выпускаемых устройств.

Расчеты показали, что существующие временные ограничения в отношении использования резца при его нахождении в заданном температурном интервале в рабочем состоянии удастся корректировать за счет теплоотвода при «сухом» резании на базе применения тепловых труб. При этом математическое моделирование процесса позволяет показать, что требуемое время работы резца можно обеспечить за счет использования стандартных серийно выпускаемых ТТ. Последнее приводит к существенному удешевлению применения предложенной КСО и экономии сменных многогранных пластин сборных инструментов в промышленных масштабах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dubrov Dmitry Y. On the issue heat pipes application in metal-working technological systems / Yuri S. Dubrov, Dmitry Y Dubrov, Galina S. Nikolaeva// Proceedings of the VII Minsk International Semi-nar. NIS Scientific Association «Heat Pipes» National Academy of Sciences of Belarus Luikov Heat & Mass Transfer Institute Belarusian National Technical University. – Minsk, 2008.-p.284-288.
2. Дубров Д.Ю. Повышение периода стойкости сборных резцов испарительным охлаждением при сухом резании [Текст]: Автореферат дисс....канд.техн.наук: 05.02.07 /Дмитрий Юрьевич Дубров.- Брянск.- 2015.-19с.
3. Richard Y. Chiou Investigation of dry machining with embedded heat pipe cooling by finite element analysis and experiments/ Richard Y. Chiou, Jim S.J. Chen, Lin Lu//Int. J. Adv. Manuf. Technol.– 2007.–vol. 31.–№ 9-10.–P.905–914.
4. Jie Liu Cutting tool temperature analysis in heat-pipe assisted composite machining/ Jie Liu, Y. Kevin Chou// Transactions of the ASME. – 2007.– vol.129.–October.– P.902 – 910.

1. Dubrov Dmitry Y. On the issue heat pipes application in metal-working technological systems / Yuri S. Dubrov, Dmitry Y Dubrov, Galina S. Nikolaeva// Proceedings of the VII Minsk International Semi-nar. NIS Scientific Association «Heat Pipes» National Academy of Sciences of Belarus Luikov Heat & Mass Transfer Institute Belarusian National Technical University. – Minsk, 2008.-P.284-288.
2. Dubrov D. BB. Increase in the period of firmness of combined cutters vaporizing cooling at dry cutting [Text]: Abstract yew Cand.Tech.Sci.: 05.02.07 /

Dmitry Yuryevich Dubrov. - Bryansk. - 2015. - 19 pages.

3. Richard Y. Chiou Investigation of dry machining with embedded heat pipe cooling by finite element analysis and experiments/ Richard Y. Chiou, Jim S.J. Chen, Lin Lu//Int. J. Adv. Manuf. Technol.– 2007.–vol. 31.–№ 9-10.–P.905–914.
4. Jie Liu Cutting tool temperature analysis in heat-pipe assisted composite machining/ Jie Liu, Y. Kevin Chou// Transactions of the ASME. – 2007.– vol.129.–October.– P.902 – 910.

Статья поступила в редколлегию 19.10.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета Хандожко А.В.

Сведения об авторах:

Дубров Дмитрий Юрьевич, ст. науч. сотрудник кафедры «Основы проектирования машин», Ростовского-на-Дону государственного университета путей сообщения.

Чукарин Александр Николаевич, д.т.н., профессор кафедры «Основы проектирования машин», Ростовского-на-Дону государственного университета путей сообщения.

Dubrov Dmitry Yuryevich, Art. науч. the employee of Bases of Design of Cars department, Rostov - on - Don of the state transport university.

Chukarin Alexander Nikolaevich, the Dr.Sci.Tech., professor of Bases of Design of Cars department, Rostov - on - Don of the state transport university.

Дубров Юрий Семенович, к.т.н., доцент кафедры «Информационное обеспечение автоматизированных технологических комплексов» Донского государственного технического университета, e-mail: dus@fromru.com.

Приходько Геннадий Иванович, ст. преподаватель кафедры «Радиофизика» Южного федерального университета, e-mail: giprihodko@sfedu.ru.

Dubrov Yury Semenovich, PhD in Technological Sciences, the associate professor "Information support of the automated technological complexes" of the Don state technical university, e-mail: dus@fromru.com.

Prihodko Gennady Ivanovich, senior lecturer of Radiofizika department of Southern Federal University, e-mail: giprihodko@sfedu.ru.