

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <https://naukovedenie.ru/>

Том 9, №6 (2017) <https://naukovedenie.ru/vol9-6.php>

URL статьи: <https://naukovedenie.ru/PDF/155TVN617.pdf>

Статья опубликована 25.01.2018

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Дубров Д.Ю., Дубров Ю.С., Сыромятников Д.А. О возможности стабилизации температуры шпиндельного узла металлорежущего станка // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №6 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/155TVN617.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**УДК 621.9.06-533.6(075.8)**

**Дубров Дмитрий Юрьевич**

ООО «ДИАПАЗОН 1», Россия, Ростов-на-Дону  
Старший научный сотрудник  
Кандидат технических наук  
E-mail: dubrov.d@don-product.ru

**Дубров Юрий Семенович**

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Россия, Ростов-на-Дону  
Профессор  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: Dus137@mail.ru

**Сыромятников Дмитрий Алексеевич**

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Россия, Ростов-на-Дону  
Магистрант  
E-mail: dimamail2008@rambler.ru

## **О возможности стабилизации температуры шпиндельного узла металлорежущего станка**

**Аннотация.** В суммарной погрешности обработки на металлорежущих станках тепловой фактор играет весьма важную роль. Доля тепловых деформаций в общем балансе погрешностей обработки и точности станка тем выше, чем жестче и выше требования к точности обрабатываемых деталей. Особую роль играют тепловые деформации в станках с ЧПУ, так как они являются более энергоёмкими, а доля машинного времени достигает 70-90%. Нами предлагается использование тепловых труб для отвода тепла на контейнер с плавящимся веществом, что позволяет создать систему охлаждения.

Использование эндотермических эффектов, сопровождаемых поглощением тепловой энергии в процессе плавления, позволяет рассматривать предлагаемую систему охлаждения как экономичную и весьма надежную. При этом основной проблемой является поддержание обратимости процесса, т. е. необходимость содержать рабочее легкоплавящееся вещество в как можно более продолжительном по времени состоянии фазового перехода.

При этом обеспечивается постоянная температура в зоне охлаждения тепловой трубы за счет затраты тепла на плавление твердой фазы (фазовый переход 1 рода), что позволяет создать достаточно простую систему охлаждения шпиндельных узлов высокоточных многооперационных станков и тем самым повысить их точность и производительность.

Принципы действия разработанного способа могут быть использованы также при охлаждении тяжелонагруженных фрикционных устройств.

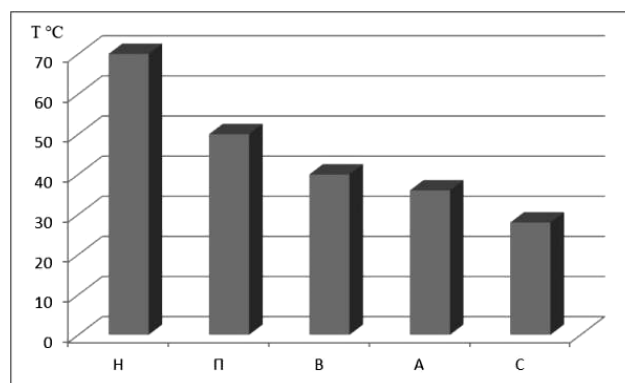
**Ключевые слова:** шпиндельный узел; тепловые деформации; подшипник; температура нагрева; тепловая труба; плавление; затвердевание; эндотермический эффект; легкоплавкое вещество

Исследованиями многих авторов установлено, что тепловое состояние технологической системы является нестационарным, что говорит о важной роли тепловых деформаций в общем балансе погрешностей обработки. Особую роль играют тепловые деформации в станках с ЧПУ, так как эти станки являются более энергоёмкими, а доля машинного времени достигает 70-90 %. В станках с ЧПУ до 50 % энергии, подводимой к ним, рассеивается в его узлах и деталях, тем самым увеличивая тепловую напряженность конструкции станка. Доля тепловых погрешностей в общем балансе точности станков с ЧПУ может достигать 30-70 %, причем характер и степень их влияния неодинаковы для различных параметров точности обрабатываемых деталей.

Одним из источников образования тепла в станке является шпиндельная бабка. Температура в различных точках корпуса бабки изменяется в пределах 10...50 °С. Наиболее высокая температура наблюдается в местах расположения подшипников шпинделя. Температура валов и шпинделей на 30...40 % выше средней температуры корпусных деталей, в которых они смонтированы. Относительно сильный нагрев шпиндельных бабок влечет за собой изменение положения их осей. Например, шпиндель передней бабки токарного станка может сместиться по вертикальной и в горизонтальной плоскостях на несколько сотых долей миллиметра [6].

Источником теплообразования в работающем подшипнике является трение между его деталями. Момент трения зависит от конструкции подшипника, а также точности его изготовления и монтажа в узле.

Таким образом, точность и производительность металлорежущего станка во многом определяется шпиндельным узлом (ШУ) и в первую очередь зависят от температурных полей и вызванных ими тепловых деформаций ШУ. Тепловыделения регламентируются допустимым нагревом подшипников (рис. 1) [7].



*Рисунок 1. Допустимые температуры нагрева для станков разного класса точности (составлено авторами по данным [7])*

Для станков класса Н норма нагревания наружного кольца подшипника составляет 70 °С, при этом увеличение температуры на каждые 15 °С вдвое снижает ресурс работы подшипника.

На практике в настоящее время уменьшение вредного влияния температурных деформаций в высокоавтоматизированных станках может быть достигнуто путем интенсивного отвода теплоты при помощи жидкостной системы охлаждения. Её конструкция

представляет собой специальную «рубашку» (полости внутри корпуса шпинделя для прохождения жидкости), куда под давлением подаётся теплоноситель. Базовой охлаждающей жидкостью является вода, однако для предотвращения коррозии может использоваться тосол или иные смеси.

При решении этой задачи используется полезная модель [4], использование которой повышает ресурс работы узла в целом за счет обеспечения более эффективного охлаждения передних подшипниковых опор посредством включения в конструкцию шпиндельного узла дополнительной охлаждающей полости в зоне их расположения.

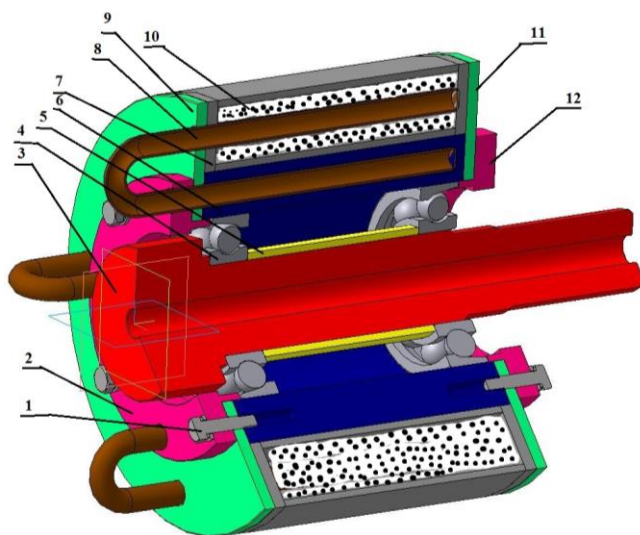
Такие способы охлаждения ШУ являются достаточно сложными и дорогими, в связи с чем, ведется поиск оптимальных способов их охлаждения.

Одним из путей стабилизации температуры шпиндельных узлов является применение тепловых труб (ТТ) [8, 9].

Этим вопросам посвящена работа Фролова А. В. [6]. Автор рассматривает *способы* достижения компенсации тепловой деформации ШУ также за счет применения тепловых труб.

В этих работах предполагается использование теплопередачи с помощью классических тепловых труб, позволяющих зону конденсации выносить за пределы ШУ.

Нами предлагается направить, используя зону транспорта тепловой трубы теплоту, образующуюся от трения подшипников ШУ, в контейнер, заполненный легкоплавким веществом, температура плавления которого должна быть меньше допустимой температуры нагрева ШУ (рис. 2).



1 – крепёжные элементы; 2 – передняя крышка ШУ; 3 – вал; 4 – подшипники; 5 – нижняя втулка; 6 – корпус ШУ; 7 – контейнер с легкоплавким веществом; 8 – тепловая труба; 9 – крышка контейнера передняя; 10 – легкоплавкое вещество; 11 – крышка контейнера задняя; 12 – задняя крышка ШУ

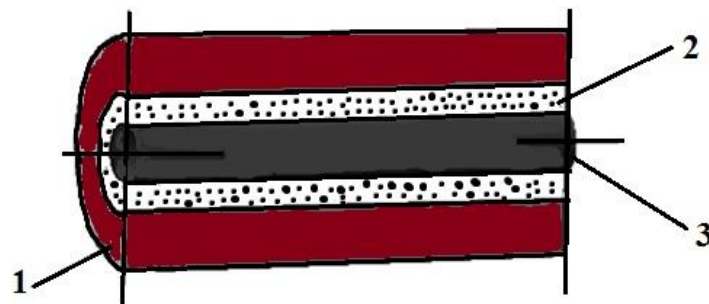
**Рисунок 2.** Комплексная система охлаждения шпиндельного узла (разработано авторами)

Использование процессов плавления, сопровождающихся эндотермическими эффектами (тепловая энергия поглощается на границе раздела твердой и жидкой фаз) позволяет рассматривать предлагаемую систему охлаждения как экономичную и весьма надежную. При этом основной проблемой является поддержание обратимости процесса, т. е. необходимость содержать рабочее вещество в как можно более продолжительном по времени состоянии фазового перехода.

Метод комплексной системы охлаждения (КСО) при помощи тепловой трубы и контейнера с плавящимся веществом прошел применительно к процессу резания успешную проверку и обеспечил повышение стойкости режущих инструментов более чем в 2 раза при обработке резанием титановых сплавов и других труднообрабатываемых конструкционных материалов. Проведено комплексное исследование охлаждения сборных резцов с использованием эффекта КСО при сухом резании [1...3].

Опыт охлаждения с помощью фазовых переходов первого рода в других технических областях позволяет нам сделать вывод о возможности применения этих подходов к охлаждению ШУ.

КСО основана на отводе тепла за счет поглощения скрытой теплоты плавления рабочего вещества (сплава Розе) с температурой плавления 96 °С, расположенного в контейнере внутри державки специально сконструированного и изготовленного резца.



1 – твердая фаза легкоплавкого вещества; 2 – жидкая фаза; 3 – тепловая труба

**Рисунок 3.** Схема плавления в контейнере с легкоплавким веществом

Процесс, происходящий при плавлении и затвердевании, можно представить следующим образом (рис. 3). При вращении шпинделя за счет трения выделяется теплота и с помощью тепловой трубы поступает в контейнер с легкоплавким рабочим веществом. При достижении точки плавления твердая фаза – 1 легкоплавкого вещества начинает плавиться, переходя в жидкую фазу – 2. При этом поглощается количество теплоты, равное теплоте плавления рабочего вещества.

Температура на границе “корпус подшипника – 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 работы металлорежущего станка.

Для современных быстроходных станков тепловой расчет подшипников имеет решающее значение. Расчет ведут на основе теплового баланса, т. е. приравнивание теплообразования в подшипнике к теплопередаче.

По данным Резникова А. Н., потери на трение в подшипнике качения ( $D_{нар} = 90$ ,  $D_{вн} = 55$ ) при некотором режиме его эксплуатации и непрерывной работе в течение  $\tau = 30$  мин. характеризуются мощностью  $W = 50$  Вт [5].

Определим объем камеры с плавящимся веществом для охлаждения подшипников ШУ.

За время работы станка  $\tau$  в подшипнике ШУ выделится количество теплоты  $Q_1$ , равное

$$Q_1 = W\tau, \quad (1)$$

где:

$W$  – мощность, Вт;

$\tau$  – время работы станка, сек.

С другой стороны, в контейнере с легкоплавким веществом вследствие теплопередачи произойдет нагрев твердой фазы легкоплавкого вещества до температуры плавления. Вещество полностью расплавится до жидкого состояния и затем также произойдет его нагревание до допустимой температуры. В нашем случае для станков класса точности Н – это температура, равная 70 °С (рис. 1).

$$Q_2 = mC_m (T_{пл} - T_{cp}) + mr + mC_{ж} (T_{дон} - T_{пл}), \quad (2)$$

где:

$m$  – масса плавящегося вещества;

$C_m$  – удельная теплоемкость твердой фазы плавящегося вещества;

$C_{ж}$  – удельная теплоемкость жидкой фазы плавящегося вещества;

$T_{пл}$  – температура плавления;

$T_{cp}$  – температура окружающей среды;

$T_{дон}$  – допустимая температура нагрева ШУ;

$r$  – удельная теплота плавления.

Считаем, что  $Q_1 = Q_2$

$$W\tau = mC_m (T_{пл} - T_{cp}) + mr + mC_{ж} (T_{дон} - T_{пл}). \quad (3)$$

Тогда объем камеры, заполненной легкоплавким веществом, можно найти из выражения

$$V = W\tau / \gamma \{mC_m (T_{пл} - T_{cp}) + mr + mC_{ж} (T_{дон} - T_{пл})\}, \quad (4)$$

где:

$\gamma$  – плотность легкоплавкого вещества.

В таблице 1 приведены характеристики рабочих веществ, которые могут быть использованы в контейнере.

**Таблица 1**

**Характеристики рабочих веществ (по данным [10])**

Рабочее вещество	Теплоемкость, Дж/(кг К)		Плотность, кг/м <sup>3</sup>		Теплопроводимость, Вт/мК	Температура плавления, ТплС	Теплота плавления, Дж/кг	Коэффициент объёмного расширения, К-1
	Жидкой фазы	Твёрдой фазы	Жидкой фазы	Твёрдой фазы				
Воск								
Парафин	2680	2350	760	780	0.27	40-56	156	0.00106
Элаидиновая кисло	2180	1550	850	860	0.16	45	214	0.00097
Пальмитиновая кислота	2730	1880	845	855	0.17	63	214	0.00102
Кристаллический азотнокислый никель	2140	1800	1980	2050	0.56	56.7	155	0.0008
Гидрофосфат натрия	-	-	-	-	-	36	426	-
Гидрат окиси бария	1050	1220	2000	2180	0.244	78	308	0.00018
Кристаллический сернокислый натрий	1470	1000	1320	1450	0.605	32.6	334	0.0007
Кристаллический углекислый натрий	2350	2100	1350	1460	0.487	34	328	0.0009
Нитрат лития	-	-	-	-	-	30	300	-

Рабочее вещество	Теплоемкость, Дж/(кг К)		Плотность, кг/м <sup>3</sup>		Теплопроводимость, Вт/мК	Температура плавления, ТплС	Теплота плавления, Дж/кг	Коэффициент объёмного расширения, К-1
	Жидкой фазы	Твёрдой фазы	Жидкой фазы	Твёрдой фазы				
Нафталин	1300	1300	-	-	-	80	157	-
Дифенил	-	-	-	-	-	69.5	120	-
Сплав Вуда	170	170	-	-	-	65	35	-
Сплав Розе	172	172	-	972	-	94	-	-

**Примечание.** Наиболее часто применяются парафин, воск, сплав Вуда, нафталин, дифенил, обладающие лучшими эксплуатационными свойствами (в основном это устойчивая обратимость процесса превращения и коррозионная совместимость)

Использование метода КСО обеспечивает постоянную температуру в зоне охлаждения за счет затраты тепла на плавление твердой фазы (фазовый переход 1 рода), что позволяет создать достаточно простую систему охлаждения шпиндельных узлов высокоточных многооперационных станков и тем самым повысить их точность и производительность.

Предлагаемый способ охлаждения шпиндельного узла металлорежущего станка является автономным, экологически безопасным и не требующим расходных материалов.

Принципы действия разработанной КСО могут быть также использованы при охлаждении ряда фрикционных устройств, работающих в условиях высоких температур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дубров Д. Ю. Повышение эффективности обработки резанием: монография / С. И. Брусов, Г. И. Добровольский, Д. Ю. Дубров и др.; под ред. А. В. Киричека – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – С. 134-177.
2. Дубров Д. Ю. Экологически безопасная автономная система охлаждения сборных резцов на основе фазовых переходов первого рода / Д. Ю. Дубров, А. Н. Чукарин // Вестник РГУПС. – 2011. – №2(42) – С. 5-12.
3. 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. – 19 с.  
<http://poleznayamodel.ru/model/11/112656.html>.
4. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
5. Фролов А.В. Повышение точности шпиндельных узлов прецизионных станков методом термоупругого моделирования при заданной их теплоустойчивости [Текст]: Автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.31 / Александр Владимирович Фролов. – Москва. – 2007. – 16 с.
6. Шестернинов А. В. Конструирование шпиндельных узлов металлорежущих станков: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 96 с.
7. Юрин В. Н. Исследование возможности повышения технологической надежности металлорежущих станков путем управления их тепловыми деформациями [Текст]: Автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 05.03.31 / Владимир Николаевич Юрин. – Москва. – 1971. – 26 с.
8. Юрин В. Н. Шпиндельные узлы с тепловыми трубами // Станки и инструмент. 1981. – № 4. – С. 16-18.
9. Легкоплавкие сплавы, применяемые в современной мировой промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: [http://4108.ru/u/legkoplavkie\\_splavyi\\_vidyi\\_i\\_sostavyi\\_legkoplavkih\\_splavov](http://4108.ru/u/legkoplavkie_splavyi_vidyi_i_sostavyi_legkoplavkih_splavov), свободный. – Загл. с экрана. – 23.04.15.

**Dubrov Dmitry Yuryevich**

ООО «RANGE 1», Russia, Rostov-on-Don  
E-mail: dubrov.d@don-product.ru

**Dubrov Yury Semenovich**

Don state technical university, Russia, Rostov-on-Don  
E-mail: Dus137@mail.ru

**Syromyatnikov Dmitriy Alekseevich**

Don state technical university, Russia, Rostov-on-Don  
E-mail: dimamaill2008@rambler.ru

## **On the possibility of temperature stabilization spindle unit of the cutting machine**

**Abstract.** The total error of machining heat factor plays a very important role. The share of thermal deformation in the overall balance of errors of processing and accuracy of the machine is higher, the harder and higher requirements for precision machined parts. Special role is played by thermal deformation in machine tools with CNC, as they are more energy-intensive, and the proportion of machine time reaches 70-90 %. We propose the use of heat pipes for heat dissipation on the container with a consumable substance that allows you to create a cooling system.

The use of endothermic effects accompanied by the absorption of thermal energy in the melting process, allows us to consider pre-legeay cooling system as a cost effective and highly reliable. The main problem is to maintain the reversibility of the process, i. e. the need to contain working lageplaene substance in as long as possible time state of phase transition.

This ensures a constant temperature in the cooling zone the-plouay pipe due to the heat input for melting the solid phase (the phase transition 1 kind) that allows you to create a fairly simple cooling system of spindle assemblies for machine tools high-precision machining, and thereby improve their accuracy and performance.

The principles of operation of the developed method can also be used thelongrun cooling of the friction devices.

**Keywords:** spindle unit; thermal deformation; bearing; temperature; heat pipe; melting; solidification; indetermical effect; fusible substance