

## СТРУКТУРА ТЕПЛОВОГО КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДЕТАЛЕЙ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА

*Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю.*

*Самарский государственный технический университет, г. Самара*

**Ключевые слова:** шпиндельный узел, термическое сопротивление, номинальная площадь контакта, контурная площадь контакта, фактическая площадь контакта

**Аннотация.** На основе использования электротепловой аналогии, теории поэтапного стягивания тепловых потоков при прохождении соединений деталей и учета макро- и микрогеометрии контактирующих поверхностей получены зависимости, позволяющие определить термические сопротивления контактов шпиндельной опоры. Оценивая сопротивление среды в межконтактных зазорах и сопротивления стягивания в первом и втором материалах, зависящие от условий обработки и сборки деталей шпиндельного узла, можно построить его тепловую модель и спрогнозировать влияние конструкторско-технологических факторов на температурный критерий.

## STRUCTURE OF THERMAL CONTACT INTERACTION OF PARTS SPINDLE ASSEMBLY OF A METAL-CUTTING MACHINE

*Denisenko A.F., Podkruglyak L.Yu.*

*Samara state Technical University, Samara*

**Keywords:** spindle Assembly, thermal resistance, nominal contact area, contour contact area, actual contact area

**Abstract.** Based on the use of electrothermal analogy, the theory of phased contraction of heat flows during the passage of parts and taking into account macro- and microgeometry of the contacting surfaces, dependences are obtained that allow one to determine the thermal resistance of the contacts of the spindle bearing. Estimating the resistance of the medium in the intercontact gaps and the pulling resistance in the first and second materials, depending on the conditions of processing and assembly of the details of the spindle assembly, we can build its thermal model and predict the influence of design and technological factors on the temperature criterion.

Шпиндельный узел металлообрабатывающего оборудования является важнейшей частью металлорежущих станков, в первую очередь определяющей качество обрабатываемых деталей. Шпиндельный узел состоит из шпинделя, помещенного в корпус, установленного на опорах в виде подшипников качения. Необходимый крутящий момент и вращение шпинделю передаются через ременную или зубчатую передачи от электродвигателя. Кинематические звенья цепи привода главного движения также могут быть размещены в корпусе шпиндельного узла. Конструкция шпиндельного узла зависит от типа станка, его габаритов, класса точности и предельных параметров технологического процесса.

Повышающееся требование к точности обработки ставит тепловые процессы в ряд основных факторов, определяющих качество выпускаемой продукции. Анализ баланса погрешностей металлообработки показывает, что тепловая погрешность составляет 40-70% от общего числа погрешностей.

Тепловые потоки в шпиндельных узлах очень сложны из-за большого количества источников тепла (подшипники качения, зоны резания, зубчатые и ременные передачи), а также большого числа деталей, входящих в шпиндельный узел. Поэтому формирование тепловых потоков в шпиндельных узлах определяется не только распространением тепла от источников через сплошные детали, но, в значительной степени, через контакты деталей между собой [1].

Прохождение теплового потока через контактирующие поверхности деталей сильно отличается от его движения через сплошной материал и через идеальный стык, когда тепловой поток практически не встречает значительного сопротивления на своем пути. Причина в том, что в реальных стыках нет идеального контакта по всей поверхности. Это связано с тем, что поверхности деталей имеют неровности в виде макроотклонений, волнистости и шероховатости, которые зависят от структуры и характера технологической обработки.

Анализ прохождения теплового потока через контакт двух твердых тел показывает, что температуры на контактных поверхностях будут равны только в том случае, если контакт происходит во всех точках поверхности, то есть контакт идеален.

Рассмотрим контактные стыки на примере шпиндельного узла координатно-расточного станка, который показан на рис. 1. На переднем конце шпинделя установлены прецизионные радиально-упорные шарикоподшипники 7015 ACD/P4A(SKF) [2].

Из конструкции шпиндельного узла видно, что контакты имеют плоские кольцевые и цилиндрические поверхности соприкосновения (например кольца подшипника и шпиндель, торцовые соединения колец подшипников и т.п.). При соприкосновении двух поверхностей образуется фактическая площадь контакта, которая значительно меньше номинальной площади, состоящая из отдельных контактных пятен, сосредоточенных в определенных областях. Из-за несовершенства контакта на границе раздела твердых тел возникает контактное термическое сопротивление [3].

При контактировании различают номинальную  $A_a$ , контурную  $A_c$  и фактическую  $A_r$  площади контакта (рис. 2). Тогда контактное термическое сопротивление можно рассматривать как процесс последовательного прохождения тепловых потоков через номинальную площадь  $A_a$ , контурную площадь  $A_c$  и фактическую площадь  $A_r$ . Как показывают эксперименты, для металлов контурная площадь обычно равна 5...10% от номинальной, а фактическая 0,01...0,1% от номинальной.

Номинальную площадь находим из выражений:

– для кольцевого контакта  $A_a = 0,25\pi(D_i^2 - d_i^2)$ , где  $D_i$  и  $d_i$  - наибольшие и наименьшие диаметры кольцевого контакта;

– для цилиндрического контакта  $A_a = \pi D_i b$ , где  $b$  - высота цилиндрического контакта.

Результаты расчетов, с использованием схемы номинальных площадей контакта подшипника (рис. 3) представлены в табл. 1.

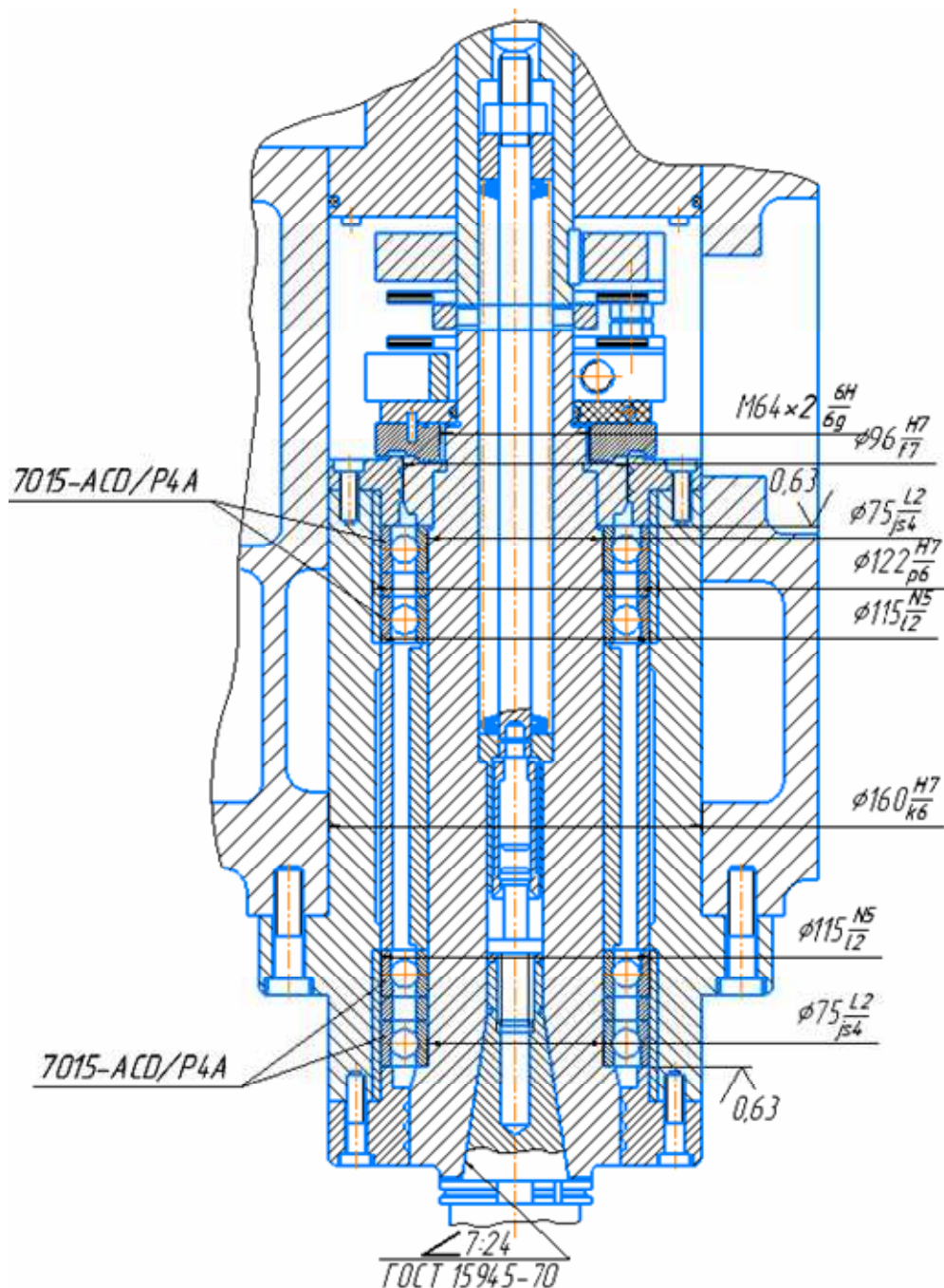


Рис. 1. Шпиндельный узел координатно-расточного станка мод. 24К40СФ4

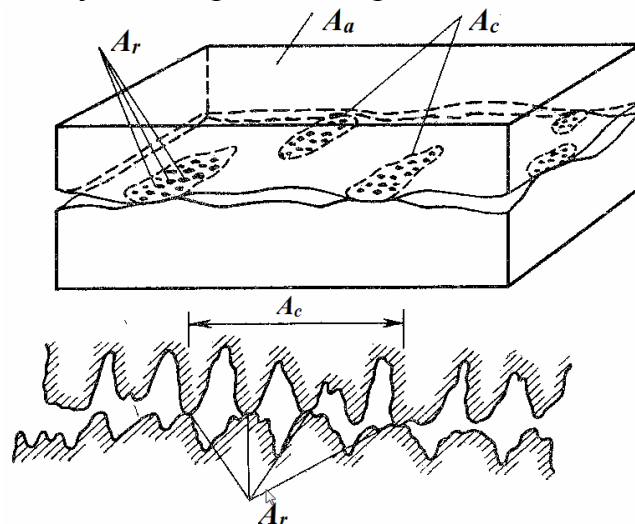


Рис. 2. Номинальная  $A_a$ , контурная  $A_c$  и фактическая  $A_r$  площади контакта

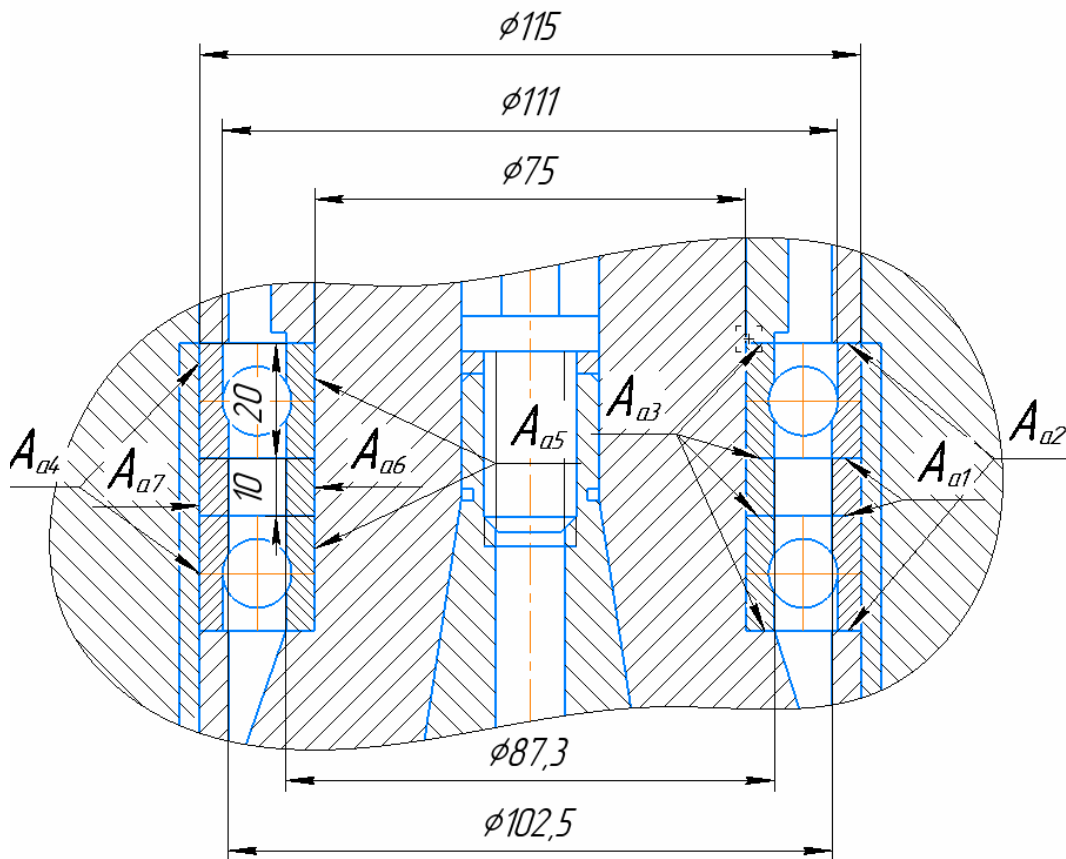


Рис. 3. Схема номинальных площадей контакта передней опоры шпиндельного узла

Табл. 1. Площади контактов передней опоры

№ контакта	Номинальная площадь контакта $A_a$ , мм <sup>2</sup>	Контурная площадь контакта $A_c$ , мм <sup>2</sup>	Фактическая площадь контакта $A_f$ , мм <sup>2</sup>
1	2103	105,15...210,3	0,21...2,1
2	710	35,5...71	0,07...0,7
3	1568	78,4...156,8	0,157...1,57
4	7226	361,3...722,6	0,72...7,2
5	4712	235,6...471	0,47...4,7
6	2356	117,8...235,6	0,24...2,36
7	3613	180,6...361,3	0,36...3,6

Линии теплового потока проходят поэтапное стягивание (рис. 4): сначала в пределах номинальных поперечных сечений линии теплового потока стягиваются к контактным макроязлам, вызванным волнистостью, а затем внутри каждого макроязла к микроязлам, вызванным шероховатостью [4].

Тепловое и электрическое сопротивления контакта имеют одинаковые составляющие: сопротивление стягивания к пятнам фактического контакта, сопротивление пятен фактического контакта, сопротивление оксидных пленок, сопротивление среды в межконтактных зазорах. Анализ формирования контактной тепловой и электрической проводимости позволяет говорить о электротепловой аналогии и воспользоваться при изучении распространения тепловых потоков основными законами прохождения электрического тока по цепям.

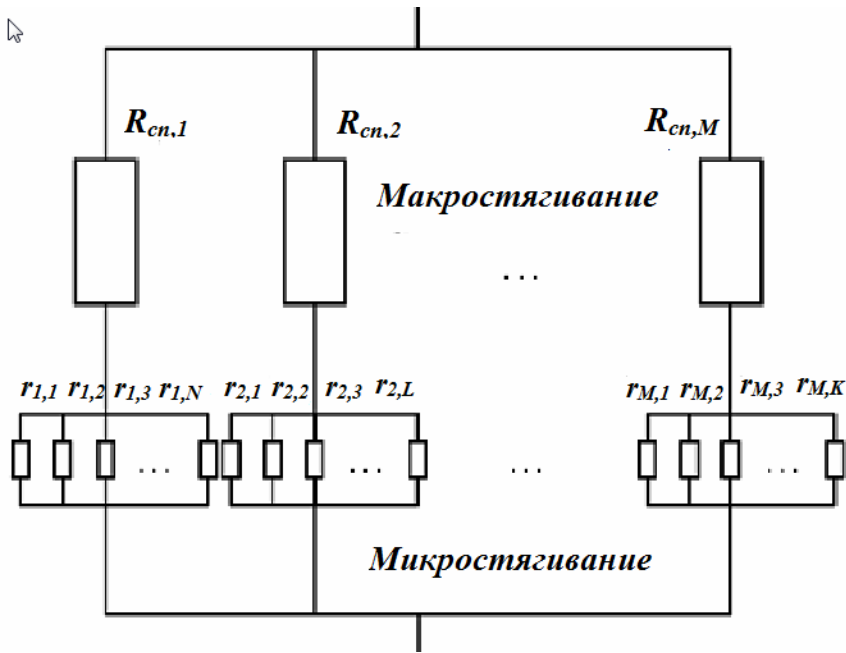


Рис. 4. Структура сопротивления растягивания

Таким образом (рис. 5), структуру термического сопротивления контакта можно представить состоящей из:

$R_{rad}$  - сопротивление при лучистом теплообмене в контакте,

$R_m$  - сопротивление среды в межконтактных зазорах,

$R_{cn,1}$  и  $R_{cn,2}$  - сопротивления растягивания в первом и втором материалах,

$R_{f,1}$  и  $R_{f,2}$  - сопротивления пленок, на взаимодействующих поверхностях 1 и 2 материалов [5].

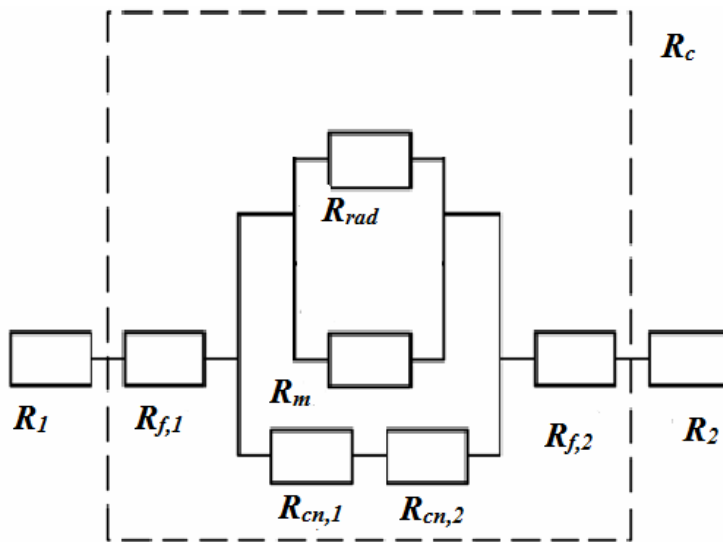


Рис. 5. Структура термического сопротивления контакта

Поскольку термическое сопротивление при лучистом теплообмене в контакте и сопротивление пленок на взаимодействующих поверхностях близки к нулю, то термическое сопротивление реального контакта может быть выражено через термические сопротивления растягивания  $R_{cn,1}$  и  $R_{cn,2}$  в первом и втором материале и термическое сопротивление среды в межконтактных зазорах  $R_m$ , где полное сопротивление растягивания  $R_{cn}$  равно сумме сопротивлений растягивания в первом и втором материалах.

$$R_{c,a} = \frac{1}{(A_a + A_r) / R_m + A_r / (R_{cn,1} + R_{cn,2})}. \quad (1)$$

Результаты расчетов термических сопротивлений передней опоры представлены в таблице 2 для  $Ar = 0,1 Aa$

Табл. 2. Термические сопротивления передней опоры

№ контакта	Термическое сопротивление $R_{c,ai}$
1	$R_{c,a1} = \frac{1}{2105,1 / R_m + 2,1 / (R_{cn,1} + R_{cn,2})}$
2	$R_{c,a2} = \frac{1}{710,7 / R_m + 0,7 / (R_{cn,1} + R_{cn,2})}$
3	$R_{c,a3} = \frac{1}{1569,57 / R_m + 1,57 / (R_{cn,1} + R_{cn,2})}$
4	$R_{c,a4} = \frac{1}{7233,2 / R_m + 7,2 / (R_{cn,1} + R_{cn,2})}$
5	$R_{c,a5} = \frac{1}{4716,7 / R_m + 4,7 / (R_{cn,1} + R_{cn,2})}$
6	$R_{c,a6} = \frac{1}{2358,36 / R_m + 2,36 / (R_{cn,1} + R_{cn,2})}$
7	$R_{c,a7} = \frac{1}{3616,6 / R_m + 3,6 / (R_{cn,1} + R_{cn,2})}$

Таким образом, на основе использования электротепловой аналогии, теории поэтапного стягивания тепловых потоков при прохождении соединений деталей и учета макро- и микрогеометрии контактирующих поверхностей получены зависимости, позволяющие определить термические сопротивления реальных контактов шпиндельной опоры на примере станка мод. 24K40СФ4 и через параметры  $R_m$  и  $R_{cn,1}$ ,  $R_{cn,2}$  оценить влияние условий обработки и сборки шпиндельного узла на формирование температурного поля.

#### Список литературы

1. Денисенко А.Ф., Назаров Н.С. Разработка тепловой модели шпиндельного узла металлорежущего станка // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. "Технические науки". 2014. №3(43). С. 93-104.
2. SKF. Подшипники качения. Каталог. 2017. [http:// www.skf.com](http://www.skf.com)

3. Денисенко А.Ф., Назаров Н.С. Формирование регрессионной модели контактного термического сопротивления плоских соединений шпиндельных узлов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. №7. С. 325-329.
4. Degiovanni A, Remy B, Andre S / Heat Transfer J. Thermal. Sei. 11, 359 (2002).
5. Меснянкин С.Ю., Викулов А.Г., Викулов Д.Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 9. С. 945-970. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0179.200909c.0945>

Сведения об авторах:

*Денисенко Александр Федорович* – д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты», СамГТУ, г. Самара;

*Подкругляк Любовь Юрьевна* – аспирант кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» СамГТУ, г. Самара.