Estimation of contact quality of the cone joint using electric parameters

04, April 2013

DOI: 10.7463/0413.0548368

Potapov K.G.

УДК 621.7.08

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

konst_g_p@mail.ru

1. Введение.

На сегодняшний день проверка пятна контакта в конической паре «шпиндель – хвостовик патрона» на металлорежущих станках осуществляется визуальными методами с помощью краски или быстроиспаряющихся летучих жидкостей (тяжёлый керосин). Данные методы начали применяться полвека назад и в XXI веке морально устарели. На станках с ЧПУ с автоматической сменой инструмента применение такого рода контроля невозможно. Необходимо отметить, что конструкции шпинделей станков с автоматической сменой инструмента с конусами 7:24 в России не имеет необходимого метрологического обеспечения. Поэтому создание системы метрологического обеспечения подобных станков актуально.

Качество посадки характеризуется площадью контакта и взаимным положением конуса относительно втулки. Оценку взаимного положения конуса и втулки можно производить с помощью автоколлиматора оптическими методами. Однако, оценить площадь контакта, не проникая в соединение сложно.

Предлагается использовать электрические параметры для решения данной задачи. Таковыми параметрам является переходное электрическое сопротивление R_{Π} , переходная ёмкость контакта C_{Π} .

Электрорезистивные и электроёмкостные методы стали применяется ещё в 60-е годы. Одним из разработчиков данных методов является Кайнер Григорий Борисович из «НИИИзмерения», город Москва. Он исследовал прилегание поверхностей плоскопараллельных концевых мер длины через

электрические параметры. В 1985 году им был выпущен патент № 01173182 «Способ контроля прилегания поверхностей деталей». Также основателем школы электрорезистивных методов в России был Сергей Фердинандович Корндорф из Государственного технического университета города Орла. Его бывший аспирант, Подмастерьев Константин Валентинович, занимается диагностикой опор качения данным методом и в настоящее время. Однако, сведений о применении подобных методов применительно к коническим соединениям не имеется. Поэтому было решено использовать их для конусных соединений, применяемых в станкостроении.

Наличие микро- и макропогрешностей определяет качество соединения. Микропогрешности, а именно шероховатость присоединительных поверхностей, оказывает влияние на контактную податливость и демпфирование в соединении. Макропогрешности в виде отклонений формы присоединительной поверхности от идеальной как в поперечном, так и продольном сечении, вызывает уменьшение фактической площади контакта поверхностей и ухудшает их прилегание [1].

Основные погрешности сопрягаемых конических поверхностей:

- 1) Отклонение от идеальной окружности в поперечных сечениях;
- 2) Отклонение образующей от прямолинейности;
- 3) Отклонение угла конуса от номинального значения.

В конических соединениях, из-за разности углов раствора $2\Delta\alpha$ наружного конуса инструмента $2\alpha_b$ и внутреннего – $2\alpha_a$ (рис. 1), контакт осуществляется не по всей длине соединения L , а на ограниченном отрезке L_k , определяемом деформациями стыка из-за возникающего давления.

Рисунок 1 – Длина контакта L_k в затянутом коническом стыке

2. Переходное сопротивление $R_{\text{п}}$.

Как известно, при протекании электрического тока между двумя металлическими телами на границе раздела линии тока стягиваются к площадкам контакта [4]. Так возникает сопротивление стягивания, которое в отсутствии оксидных плёнок определяет переходное сопротивление контакта. При исследовании принималось во внимание отсутствие оксидных плёнок.

В качестве исходных данных, необходимых для вывода зависимостей переходного сопротивления и переходной ёмкости от площади контакта, были приняты следующие размеры хвостовика с конусом 7:24 по ГОСТ 25827 – 93 [2]:

$$L=48,4 \text{ мм} \quad D=31,75 \text{ мм} \quad d=17,4 \text{ мм} \quad D_H=63,5 \text{ мм}$$

Принимается радиальный натяг в соединении $\delta_k=20$ мкм, а разность углов $\Delta\alpha = 1,5$ угл. сек.

За основу была взята погрешность угла конуса, поскольку сильнее всего площадь контакта зависит именно от этой погрешности.

Длина контакта L_k может быть выражена с использованием данных рис.1 следующим образом [1]:

$$L_k = \frac{\delta_k \cdot \cos \alpha_B \cdot \cos \alpha_a}{\sin \Delta\alpha}, \quad (1)$$

где δ_k – радиальный натяг в соединении; $\Delta\alpha$ – разность углов раствора α_B и α_a .

Минимальный диаметр контакта d_k может быть определён из рис. 1:

$$d_k = D - K \cdot L_k, \quad (2)$$

где D – максимальный диаметр конуса; L_k – длина контакта; K – конусность, равная 7:24; L_k – длина контакта.

Опуская последующие выкладки, приведём полученное функциональное соотношение между переходным электрическим сопротивлением в соединении и площадью контакта с использованием [4]:

$$R_{\text{п}}(S_k) = \rho \cdot C \cdot \frac{\sqrt{HB}}{\left(\frac{\sin \Delta\alpha}{a \cdot b \cdot \cos \alpha_B \cdot \cos \alpha_a} \right)^x \cdot S_k^{2x}} \quad (3)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, [Ом*мм];

C – коэффициент, зависящий от степени чистоты поверхности;

HB – твёрдость поверхности по Бринеллю, [кгс/мм²];

a – коэффициент, зависящий от формы контактирующих поверхностей [мм];

b – коэффициент, зависящий от физических свойств контактирующих поверхностей [$\text{мм}^3/\text{кгс}$];

x – показатель степени, зависящий от характера деформации

Рисунок 2 – Зависимость переходного сопротивления от площади контакта; $\rho = 0,14 \cdot 10^{-3}$; $C = 1$; $HV = 22,14$; $a = 77,205$; $b = 3,106 \cdot 10^{-3}$; $x = 0,33$

При заданных параметрах конусной пары, давлении и радиальном натяге в соединении, площадь контакта $S_k = 3674 \text{ мм}^2$. Реальная площадь контакта меньше из-за наличия шероховатости и отклонения формы. Однако для установления функциональной зависимости это не имеет значения. При такой площади контакта, переходное сопротивление $R_{\Pi}(S_k) = 23,6 \text{ мкОм}$.

3. Переходная ёмкость [4].

Так как контакт происходит не по всей поверхности, а в её отдельных участках (пятна контакта), то возникают зоны локальной электрической ёмкости. В общем виде переходная ёмкость складывается из трёх составляющих:

- 1) Ёмкость контактирующих выступов с разрушенной плёнкой;
- 2) Ёмкость не контактирующих выступов;
- 3) Ёмкость контактирующих выступов с не разрушенной плёнкой.

$$C_{\Pi} = \sum C_{pn} + \sum C_{нрп} + \sum C_{нкв} \quad (4)$$

Рисунок 3 – Схема контакта

В данном случае, вследствие того, что оксидная плёнка отсутствует, второго слагаемого не будет.

Считая, что выступы равномерно распределены по поверхности по всей длине, формула для расчёта ёмкости приобретает вид:

$$C_{II} = \frac{5,82\varepsilon_0 \sqrt{r_{np} F_k} (1-\mu)^2}{E_{np} \cdot a_m^{1,5}} \cdot \left(2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_1 \cdot \frac{(h_m - a_m)^2}{a_m^2} + 4\varepsilon_1 h_m \left(\frac{0,5}{\sqrt{h_m - a_m + a_n}} + \frac{1}{\sqrt{a_m - a_n}} \right) \right) \quad (5)$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная [Ф/м];

ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость;

r_{np} – приведённый радиус неровностей [мм], равный

$$r_{np} = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}$$

F_k – контактное усилие на сопрягаемых поверхностях [кгс],
равное

$$F_k = \frac{\sin \Delta \alpha}{a \cdot b \cdot \cos \alpha_B \cdot \cos \alpha_a} \cdot S_k^2 \quad (6)$$

μ – коэффициент Пуассона

E_{np} – приведённый модуль Юнга [кгс/мм²], равный

$$E_{np} = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}$$

h_m – максимальная высота выступов [мкм]

a_m – максимальное внедрение выступов [мкм]

a_n – минимальное внедрение выступов [мкм]

Подстановка (6) в (7), позволяет получить зависимость переходной ёмкости на участке соприкосновения поверхностей от площади контакта.

$$C_{II}(S_k) = \frac{5,82\varepsilon_0 \sqrt{r_{np} \frac{\sin \Delta \alpha}{a \cdot b \cdot \cos \alpha_B \cdot \cos \alpha_a} \cdot S_k^2 (1-\mu)^2}}{E_{np} \cdot a_m^{1,5}} \times \left(2\varepsilon_1 + 2\varepsilon_1 \cdot \frac{(h_m - a_m)^2}{a_m^2} + 4\varepsilon_1 h_m \left(\frac{0,5}{\sqrt{h_m - a_m + a_n}} + \frac{1}{\sqrt{a_m - a_n}} \right) \right) \quad (7)$$

*Рисунок 4 – Зависимость переходной ёмкости от площади контакт;
 $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$; $\epsilon_l = 1$; $r_{np} = 0,2$; $F_k = 2,4 \cdot 10^4$; $\mu = 0,3$; $E_{np} = 1,071 \cdot 10^4$; $h_m = 3,2$;
 $a_m = 0,87$; $a_n = 0$.*

Полученное значение ёмкости при номинальной площади $S_k = 3674 \text{ мм}^2$ равно $C_{\Pi} = 3,34 \text{ нФ}$.

На участке, где отсутствует контакт поверхностей, образуется обычный воздушный конденсатор с переменным по длине зазором. Если усреднить величину зазора и произвести расчёт для обычного цилиндрического конденсатора, то получается значение на три порядка меньше.

4. Способы измерения ёмкости.

Так как ёмкость шунтирована очень малым сопротивлением, то многие существующие способы измерения ёмкости не подойдут. При приложении напряжения произойдёт короткое замыкание, и конус может привариться к втулке.

Для решения существующей проблемы предлагается способ, показанный на рисунке 5.

Чтобы избежать короткого замыкания предлагается использовать источник постоянного тока. Так как напряжение в цепи будет исчисляться микровольтами, то необходимо использовать гальванометры или микровольтметры.

Рисунок 5 – Эквивалентная электрическая схема. C_k – эталонный конденсатор; G – гальванометр C, R – искомые ёмкость и сопротивление

Суть способа заключается в следующем: в цепь включается эталонный калиброванный конденсатор, через цепь пропускается ток, определяется время зарядки калиброванной ёмкости, искомая ёмкость вычисляется из известного соотношения q/U . Так как конденсаторы включены параллельно, то соотношение зарядов конденсаторов имеет вид:

$$q_{C_k} = q_C + q_R \quad (8)$$

Пусть источник тока выдаёт $I_{ист}$. Определим ток, текущий через резистор. Напряжение на нём U_R определим с помощью гальванометра.

$$I_R = \frac{U_R}{R} \quad (9)$$

Ток, текущий через резистор будет расти, пока заряжается ёмкость. В это же время ток, текущий через ёмкость будет уменьшаться. Ток источника постоянен, поэтому зависимость токов друг от друга имеет вид:

$$I_C(t) = I_{ист} - I_R(t) = I_{ист} - k \cdot t \quad (10)$$

Время зарядки конденсаторов измерить невозможно, так как эта величина крайне мала, но возможно вычислить:

$$\Delta t = \frac{C_k U_k}{I_{ист}} \quad (11),$$

где U_k – напряжение, после окончания зарядки эталонной ёмкости.

Напряжение на обкладках конденсаторов и резисторе в начальный момент времени равно 0.

Коэффициент k можно вычислить по формуле:

$$k = \frac{U_R - U_{R0}}{\Delta t} = \frac{U_R}{\Delta t} = \frac{U_R \cdot I_{ucm}}{C_k U_k} \quad (12)$$

Калиброванная ёмкость должна быть меньше или равна измеряемой ёмкости, тогда время зарядки обоих конденсаторов будет одинаковым. Проинтегрируем токи по времени:

$$q_C = \int_0^{\Delta t} I_{ucm} dt - \int_0^{\Delta t} k \cdot t dt = I_{ucm} \cdot \Delta t - \frac{1}{2} k \cdot \Delta t^2 = I_{ucm} \cdot \Delta t \left(1 - \frac{U_R}{2C_k U_k} \Delta t \right) \quad (13)$$

Падение напряжения на резисторе равно напряжению на обкладках конденсатора. Искомая ёмкость может быть найдена как:

$$C = \frac{q_C}{U_C} \quad (14)$$

5. Стабильность переходных электрических величин.

Важным вопросом является оценка диапазона вариаций предложенных величин для одной и той же конусной пары при многократной сборке и разборке. Чем меньше такой диапазон, тем стабильнее величина и предпочтительнее для использования с метрологической точки зрения.

а) Электрическое переходное сопротивление

Очевидно, что при каждой сборке конусной пары на станке относительное положение деталей меняется за счёт непостоянства контактного давления и, как следствие, радиального натяга в соединении. Также меняется положение выступов и неровностей поверхностей относительно друг друга. При длительной эксплуатации станка, конусная втулка шпинделя изнашивается, что в итоге приводит к некоторому увеличению угла раствора конуса.

Допуская колебания натяга в области 5 мкм и увеличение угла конуса на 1'' расчётная нестабильность переходного сопротивления составит **18 %**.

б) Электрическая переходная ёмкость контакта

Ёмкость сильно зависит от расположения неровностей двух поверхностей относительно друг друга. Для оценки стабильности были использованы следующие параметры шероховатости: $R_a = 0,8$ мкм с радиусом скругления r у вершины 0,4 мкм. Далее R_a и радиус скругления увеличили в 2 раза. Расчётная нестабильность переходной ёмкости – **97 %**.

6. Погрешность измерения.

Поскольку измерительный канал состоит из одного прибора, то погрешность измерения будет определяться его погрешностью. Допускаемая

погрешность измерения может быть принята 0,25 от допуска Т по ГОСТ 8051-73. Погрешность средства измерения принимается 0,7 от общей погрешности измерения. Оценив нестабильность величин, можно принять допуск на переходное сопротивление 20%, а на переходную ёмкость – 100 %. Тогда допускаемая погрешность измерения будет равна:

$$\Delta_{cuR} = 0,7 \cdot 0,25 \cdot 20 = 3,5\%$$

$$\Delta_{cuC} = 0,7 \cdot 0,25 \cdot 100 = 17,5\%$$

где Δ_{cuR} – допускаемая погрешность средства измерения сопротивления;
 Δ_{cuC} – допускаемая погрешность средства измерения ёмкости.

7. Выводы и рекомендации:

Значения переходного сопротивления и переходной ёмкости зависят от реальной площади контакта поверхностей, которые неизбежно изменяются при каждом новом соединении деталей. Наиболее сильно меняется ёмкость (рис. 4). Следовательно, говорить о точном измерении площади контакта данным способом не приходится. Способ возможно применить только в рамках контроля.

Площадь контакта изменяется от соединения к соединению в определенном диапазоне величин. Определив диапазон «нестабильности», можно говорить в каких пределах находится пятно контакта в конусной паре.

Так как величина переходного электрического сопротивления мала, то для измерения необходимо применять омметрические приборы с нижней границей диапазона измерений не менее 1 мкОм. Для измерения ёмкости необходим измеритель ёмкости с нижней границей 1 пФ. Лучше применять приборы типа мультиметров для измерения обоих параметров.

Список литературы

1. Григорьев С.Н., Кохомский М.В., Маслов А.Р. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
2. ГОСТ 25827-93. Хвостовики инструментов с конусом 7:24. Размеры. М.: Изд-во стандартов, 1994. 12 с.
3. Решетов Д.Н. Детали машин. М.: Машиностроение, 1989. 496 с.
4. Сафонов А., Сафонов Л. Радиочастотные электрические соединители. Вопросы теории и состояние развития // Технологии в электронной промышленности. 2010. № 5. Режим доступа: http://www.tech-e.ru/2010_05_38.php (дата обращения 01.02.2013).

Estimation of contact quality of a cone joint via electric parameters

04, April 2013

DOI: 10.7463/0413.0548368

Potapov K.G.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

konst_g_p@mail.ru

This article describes an estimation technique of the contact area in the “spindle-tool” cone joint used at NC machine tools. This method was developed as an alternative for quality control of the contact area in the cone joint and may be interesting for machine-tool builders during the stage of manufacturing the spindle’s cone sleeve. The proposed method contains calculations of transient electrical resistivity and coupling capacitance. The relations obtained during the investigation allowed to establish a connection between the contact area and specified electric parameters. The results can be useful for postgraduates and researchers.

Publications with keywords: [dimensions](#), [cone couple](#), [transitional electric resistance](#), [transitional electric capacity](#)

Publications with words: [dimensions](#), [cone couple](#), [transitional electric resistance](#), [transitional electric capacity](#)

References

1. Grigor'ev S.N., Kokhomskii M.V., Maslov A.R. *Instrumental'naia osnastka stankov s ChPU* [Tooling of CNC machines]. Moscow, Mashinostroenie, 2006. 544 p.
2. GOST 25827-93. *Khvostoviki instrumentov s konusom 7:24. Razmery* [State Standard 25827-93. Tool shanks with 7/24 taper. Dimensions]. Moscow, Standards Publishing House, 1994. 12 p.
3. Reshetov D.N. *Detali mashin* [Machine components]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 496 p.
4. Safonov A., Safonov L. Radiochastotnye elektricheskie soediniteli. Voprosy teorii i sostoianie razvitiia [Radio frequency electrical connectors. Theory and the state of development]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti*, 2010, no. 5. Available at: http://www.tech-e.ru/2010_05_38.php, accesses 01.02.2013.