

## Влияние конструктивно-технологических факторов на параметры контактного взаимодействия конических профильных соединений шпиндельных узлов многоцелевых станков с ЧПУ

В. А. Ильиных✉

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Российская Федерация

✉ ilinykh.viktor5@mail.ru

### Резюме

Одним из наиболее ответственных соединений металлорежущих станков с ЧПУ является шпиндельный узел. Необходимо отметить, что в настоящее время получают широкое применение станки с высокоскоростной обработкой изделий (high speed cutting (HSC)), для которых характерны: высокая частота вращения главного привода, повышение скорости резания, применение новых инструментальных материалов, а также ужесточение требований к качеству производимых изделий. В связи с этим, решение задач, связанных с повышением эффективности металлорежущих станков, в частности многоцелевых станков с ЧПУ (МС), за счет совершенствования конструкций шпиндельных узлов путем внедрения инновационных решений, повышающих их надежность, приобретает весомую значимость. В статье приведен анализ контактного взаимодействия профильных соединений с равноосным контуром с числом граней равным трем применительно к соединению шпиндель-оправка многоцелевого станка. Решение пространственной контактной задачи сведено к решению плоской контактной задачи теории упругости с использованием метода поверхности отклика, который основан на методе планирования экспериментов и наименьших квадратов. Определен характер распределения контактных давлений по зонам сопряжения при передаче внешней нагрузки, установлены зависимости величин контактных давлений и углов от внешней нагрузки в зависимости от конструктивных параметров (зазоров) соединения. Установлено, что при изменении зазора посадки в профильном соединении от 18 до 228 мкм величина предельных контактных давлений возрастает до 41 %, в то время как величина контактной жесткости профильного соединения уменьшается до 22 %.

### Ключевые слова

конические профильные соединения, вспомогательный режущий инструмент, шпиндельные узлы, контактные напряжения, имитационные модели контактного взаимодействия, многоцелевые станки с ЧПУ

### Для цитирования

Ильиных В.А. Влияние конструктивно-технологических факторов на параметры контактного взаимодействия конических профильных соединений шпиндельных узлов многоцелевых станков с ЧПУ / В. А. Ильиных // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 10–17. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).10-17

### Информация о статье

поступила в редакцию: 16.01.2021, поступила после рецензирования: 10.02.2021, принята к публикации: 19.02.2021

## Influence of structural and technological factors on parameters of contact interaction of conical profile connections of spindle units of multi-purpose CNC machines

V. A. Il'nykh✉

The Zabaikal'sk Institute of Rail Transport, Chita, the Russian Federation

✉ ilinykh.viktor5@mail.ru

### Abstract

One of the most critical connections of CNC machine tools is the spindle unit. It should be noted that machines with high-speed processing of products (high-speed cutting (HSC)) are widely used at present. These machines are characterized by: high speed of rotation of the main drive, increased cutting speed, the use of new tool materials, as well as stricter requirements for the quality of manufactured products. In this regard, the solution of problems related to improving the efficiency of metal-cutting machines, in particular multi-purpose CNC machines (MS), by improving the design of spindle units through the introduction of innovative solutions that increase their reliability, becomes significant. The article analyzes the contact interaction of profile connections with an equiaxed contour with a number of edges equal to three in relation to the "spindle-mandrel" connection of a multi-purpose machine. The solution of the spatial contact problem is reduced to the solution of the plane contact problem of elasticity theory using the response surface method, which is based on the method of planning experiments and least squares. The nature of the distribution of contact pressures over the interface zones during external load transmission is determined, and the dependences of contact pressures and angles on the external load are determined depending on the design parameters (gaps) of the connec-

tion. It was found that when the fit gap in the profile connection changes from 18 to 228 microns, the maximum contact pressure increases to 41%, while the contact stiffness of the profile connection decreases to 22%.

### Keywords

conical profile connections, auxiliary cutting tools, spindle units, contact stresses, contact interaction simulation models, multi-purpose CNC machines

### For citation

Il'inykh V. A. Vliyanie konstruktivno-tekhnologicheskikh faktorov na parametry kontaktного vzaimodeistviya konicheskikh profil'nykh soedinenii shpindel'nykh uzlov mnogotselevykh stankov s ChPU [Influence of structural and technological factors on parameters of contact interaction of conical profile connections of spindle units of multi-purpose CNC machines]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2021, No. 1 (69), pp. 10–17. – DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).10-17

### Article Info

Received: 16.01.2021, Revised: 10.02.2021, Accepted: 19.02.2021

### Введение

В настоящее время в шпиндельных узлах многоцелевых станков с ЧПУ (МС) используются различные моментопередающие соединения типа: SK, BT (DBT), HSK, PSK КМ-конус (Kennametal), а также P-3. Большинство из перечисленных соединений достаточно хорошо изучены, однако ряд новых конических профильных неподвижных разъемных соединений типа P-3, которые находятся в стадии разработки и внедрения в производство определили ряд важных нерешенных научно-практических задач. Некоторые производители металлорежущих станков, проверив на практике преимущество конических профильных соединений типа PSK (Capto), стали интегрировать их в базовый шпиндель станка, например, WFL и Mazak [1, 2, 3, 4, 5]. Однако, проблема обеспечения технологической и эксплуатационной надежности моментопередающих соединений МС на основе конических профильных соединений разных типов, в частности PSK и P-3, определили решение таких задач как: разработка имитационных моделей деталей соединения, разработка имитационных моделей сопряжения деталей соединения, разработка имитационных моделей контактного взаимодействия [6, 7, 8, 9, 10, 11].

### Общие положения. Особенности постановки контактной задачи

Разработка имитационной модели контактного взаимодействия деталей конического профильного соединения типа, P-3 в пространственной постановке с учетом погрешности геометрической формы деталей соединения в общем виде представляет определенные математически трудности, поэтому для различных схем пространственного контактного взаимодействия разрабатываются приближенные методы их расчетов. Одним из путей приближенного решения трехмерных контактных задач является сведение их к рассмотрению плоских задач. Это достигается сечением исходной схемы рядом поверхностей и последующим решением задач для тел, форма которых получена в результате таких сече-

ний. Связь между решениями устанавливается из условия равенства перемещений для отдельных областей контакта. Зависимости между перемещениями и нагрузками в каждой плоской задаче находятся при использовании метода поверхности отклика [12]. При этом снижение класса расчетной модели эквивалентно «смягчению» граничных условий, т. е. упрощению условий взаимодействия тел [13].

Рассмотрим случай несимметричного контакта деталей профильного соединения, когда они первоначально соприкасаются в точке при общепринятых допущениях (рисунок 1). Контактные давления, можно определить, если составить систему уравнений, в которую входит уравнение совместности перемещений, уравнение равновесия тел и граничные условия. Воспользуемся известным интегральным уравнением совместности перемещений, которое Коваленко Г.Д. определил при решении контактной задачи для соединения типа вал-втулка цилиндрической формы в условиях действия нормальных и тангенциальных нагрузок в плоской постановке. С этой целью определим функцию сближения взаимодействующих «поверхностей» деталей профильного соединения, а также законы распределения зазоров в стыках трехгранного профильного соединения, передающего крутящий момент для разных условий сопряжения согласно [14].

Для одной реализации кривой с равноосным контуром представим закон распределения зазоров в стыке для рассматриваемой грани соединения системой уравнений вида:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = (r_{21} - r_{11}) \cdot (1 - \cos \varphi); -\varphi_1 \leq \varphi \leq 0, \quad (1)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_2 = (r_{22} - r_{21}) \cdot (1 - \cos \varphi); 0 \leq \varphi \leq \varphi_2. \quad (2)$$

Тогда с учетом выражений (1) и (2) представим интегральное уравнение совместности перемещений деталей профильного соединения (3) в виде:

$$-(v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \left[ \int_{-\varphi_1}^0 P(\varphi') \cdot \cos(\varphi - \varphi') \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \right]$$

$$\begin{aligned} & \cdot d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot \cos(\varphi - \varphi') \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \cdot d\varphi' + (\chi_1 \cdot \\ & \cdot r_1 - \chi_2 \cdot r_2) \cdot \left[ \int_{-\varphi_1}^0 P(\varphi') \cdot \sin|\varphi - \varphi'| \cdot d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot \right. \\ & \cdot \sin|\varphi - \varphi'| \cdot d\varphi' \left. - 2 \cdot v_1 \cdot r_1 \cdot \left[ P(\varphi') \cdot d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot \right. \right. \\ & \cdot d\varphi' \left. - 2 \cdot r_1 \cdot f_{np} \left[ \frac{1}{G_1} \cdot \left( \int_{-\varphi_1}^0 \sin \varphi' \cdot P(\varphi') \cdot d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} \sin \varphi' \cdot \right. \right. \right. \\ & \cdot P(\varphi') \cdot d\varphi' \right) - \frac{1}{G_2} \cdot \left( \int_{-\varphi_1}^0 \cos \varphi' \cdot P(\varphi') \cdot d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} \cos \varphi' \cdot \right. \\ & \cdot P(\varphi') \cdot d\varphi' \left. \right) \left. \right] = f_i - (r_{2j} - r_{1j}) \cdot (1 - \cos \varphi), \end{aligned}$$

где  $v_{1,2}$ ;  $\chi_{1,2}$  – параметры упругости внутренней и наружной поверхности сопрягаемых тел;  $r_{1,2}$  – радиусы наружной и внутренней поверхности;  $P(\varphi)$  – нормальное давление, действующее на площадке контакта;  $\varphi'$  – угловая координата точки, в которой действует давление;  $\varphi$  – координата точки, в которой определяется перемещение;  $f_{np}$  – коэффициент пропорциональности;  $G_{1,2}$  – модуль сдвига контактирующих тел;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – границы угла контакта;  $f_i$  – функция сближения взаимодействующих поверхностей тел;  $E_{1,2}$ ;  $\mu_{1,2}$  – модули упругости наружной и внутренней поверхностей тел.

При этом известно, что:

$$v_{1,2} = \frac{1 - \mu_{1,2}^2}{\pi \cdot E_{1,2}}; \quad \chi_{1,2} = \frac{(1 - \mu_{1,2}) \cdot (1 - 2 \cdot \mu_{1,2})}{2 \cdot E_{1,2}};$$

$$G_{1,2} = \frac{E_{1,2}}{2 \cdot (1 + \mu_{1,2})}.$$

При взаимодействии некруглых (профильных) поверхностей тел типа вал-втулка при решении задачи при несимметричном контакте может иметь место два случая, а именно:  $-\varphi_1 \leq \varphi \leq 0$  и  $0 \leq \varphi \leq \varphi_2$ .

В силу того, что кривая с равноосным контуром имеет в каждой точке определенный радиус – вектор  $\rho(\varphi)$  и эксцентриситет  $e$ , то линия действия равнодействующей от действия нормальных нагрузок не принадлежит началу координат  $O_1$  и поэтому необходимо пересчитать радиусы взаимодействующих поверхностей тел (оправки и шпинделя) отно-

сительно центра  $O_2$ , принадлежащего линии действия силы  $P_{ni}$  (рис. 1).

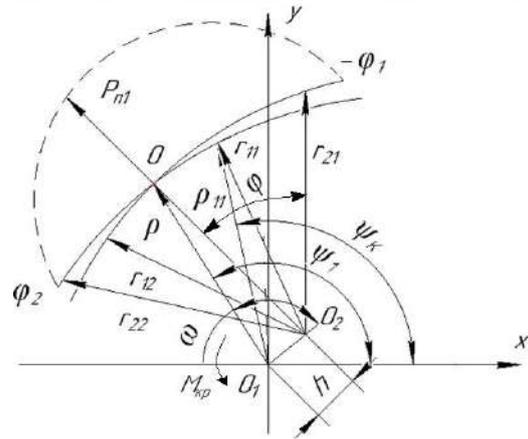


Рис. 1. Расчетная схема к определению радиусов взаимодействующих профильных поверхностей

Fig. 1. Design scheme for determining the radii of interacting profile surfaces

В дальнейшем решение контактной задачи можно вести, используя метод конечных разностей апробированный в частности в работе [15].

Приведем левую часть интегрального уравнения (3) к конечно – разностной сумме вида:

$$\begin{aligned} & -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \int_{-\varphi_1}^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot \cos(\varphi - \varphi') \cdot \\ & \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \cdot d\varphi' = -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \\ & \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \cos(\varphi - \varphi') \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \cdot d\varphi'. \\ & (x_1 \cdot r_1 - x_2 \cdot r_2) \cdot \int_{-\varphi_1}^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot \sin|\varphi - \varphi'| \cdot d\varphi' = (x_1 \cdot r_1 - \\ & - x_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \sin|\varphi - \varphi'| \cdot d\varphi'. \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -2 \cdot v_1 \cdot r_1 \cdot \int_{-\varphi_1}^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot d\varphi' = -2 \cdot v_1 \cdot r_1 \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} d\varphi' \\ & -2 \cdot r_1 \cdot f_{np} \cdot \frac{1}{G_1} \cdot \int_{-\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi' \cdot P(\varphi') \cdot d\varphi' = -\frac{2 \cdot r_1 \cdot f_{np}}{G_1} \cdot \\ & \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \sin \varphi' \cdot d\varphi'. \quad (7) \\ & 2 \cdot r_1 \cdot f_{np} \cdot \frac{1}{G_2} \cdot \int_{-\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi' \cdot P(\varphi') \cdot d\varphi' = \frac{2 \cdot r_1 \cdot f_{np}}{G_2} \cdot \end{aligned}$$

$$\sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \cos \varphi' \cdot d\varphi' \quad (8)$$

В обоих случаях, когда  $[-\varphi_1; 0]$  и  $[0; \varphi_2]$  может иметь место два случая: если  $\varphi > \varphi'$ , тогда выражение (4) и (5) имеют вид:

$$\begin{aligned} & -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \cos(\varphi - \varphi') \cdot \\ & \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \cdot d\varphi' = -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \\ & \cdot \left[ -\sin(\varphi - \varphi') \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \right]_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \cdot (x_1 \cdot r_1 - \\ & - x_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \sin|\varphi - \varphi'| \cdot d\varphi' = (x_1 \cdot r_1 - \\ & - x_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \left[ -\cos(\varphi - \varphi') \right]_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}}. \quad (9) \end{aligned}$$

Когда  $\varphi < \varphi'$  выражения (4) и (5) имеют вид:

$$\begin{aligned} & -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \cos(\varphi - \varphi') \cdot \\ & \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} \cdot d\varphi' = -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \\ & \cdot \left[ \sin(\varphi' - \varphi) \cdot \ln \operatorname{tg} \frac{|\varphi' - \varphi|}{2} \right]_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}}. \quad (10) \end{aligned}$$

Выражения (6-8) приводятся к виду:

$$\begin{aligned} & (x_1 \cdot r_1 - x_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \sin|\varphi - \varphi'| \cdot d\varphi' = (x_1 \cdot r_1 - \\ & - x_2 \cdot r_2) \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \left[ \cos(\varphi' - \varphi) \right]_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}}. \quad (11) \\ & -\frac{2 \cdot r_1 \cdot f_{np}}{G_1} \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \sin \varphi' \cdot d\varphi' = \frac{2 \cdot r_1 \cdot f_{np}}{G_1} \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \\ & \cdot \left[ \cos \varphi' \right]_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}}. \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{2 \cdot r_1 \cdot f_{np}}{G_2} \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \int_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}} \cos \varphi' \cdot d\varphi' = \frac{2 \cdot r_1 \cdot f_{np}}{G_2} \cdot \sum_{K=1}^n P_K \cdot \\ & \cdot \left[ \sin \varphi' \right]_{(K-1)\eta_{1,2}}^{K\eta_{1,2}}, \quad (13) \end{aligned}$$

где

$$\eta_1 = \frac{0 - (-\varphi_{01})}{n} = \frac{\varphi_{01}}{n}; \text{ при } -\varphi_1 \leq \varphi \leq 0, \quad (15)$$

$$\eta_2 = \frac{\varphi_{02} - 0}{n} = \frac{\varphi_{02}}{n}; \text{ при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_2, \quad (16)$$

$$r_1 = \sum_{K=1}^n \frac{r_{11}}{n}, \quad r_2 = \sum_{K=1}^n \frac{r_{21}}{n}; \text{ при } -\varphi_1 \leq \varphi \leq 0, \quad (17)$$

$$r_1 = \sum_{K=1}^n \frac{r_{12}}{n}, \quad r_2 = \sum_{K=1}^n \frac{r_{22}}{n} \text{ при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_2. \quad (18)$$

Полученные выражения позволяют составить и решить с помощью стандартной программной процедуры систему линейных алгебраических уравнений, определить характер и величины распределения контактных давлений при известных пределах интегрирования.

В первом приближении интервал интегрирования может быть определен с помощью аналитических зависимостей, приведенных в работе профессора Цейтлина Н.И. при расчете удельных давлений при тесном контакте цилиндра с цилиндрическим вырезом.

Величину половины контактного угла определяют из выражения вида:

$$\varphi_0 = 0,912 \cdot \sqrt[3]{\frac{P}{E \cdot \varepsilon}}. \quad (19)$$

В нашем случае с учетом особенностей равноосного контура интервалы интегрирования могут быть определены из системы уравнений вида:

$$\varphi_{01} = 0,912 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{ni}}{E \cdot \varepsilon_1}}, \text{ при } -\varphi_1 \leq \varphi \leq 0, \quad (20)$$

$$\varphi_{02} = 0,912 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{ni}}{E \cdot \varepsilon_2}}, \text{ при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_2, \quad (21)$$

где  $\varepsilon_{1,2}$  – величина зазора посадки.

Необходимо отметить, что для каждой поверхности (зоны) контакта, профильного трехгранного соединения величины контактных углов будут разные в силу того, что на поверхностях контакта действуют разные равнодействующие нормальных нагрузок  $P_n$ . В тоже время эпюры распределения контактных давлений несимметричны в силу несимметричного характера распределения зазоров в стыках. В связи с этим определение пределов интегрирования ведем методом поверхности отклика (МПО).

В силу того, что пределы интегрирования найдены по зависимостям для симметричных областей контакта, необходимо уточнить решение задачи, а именно: определить пределы интегрирования для несимметричных областей.

Рассмотрим пример расчета профильного трехгранного соединения типа Р-3, которое передает крутящий момент  $M_{кр} = 7$  Н·м. При этом теорети-

ческий зазор посадки в соединении равен  $\Delta_T = 0,228$  мм; материал втулки (шпинделя) сталь 40Х, материал вала (оправки) сталь 40Х, средний диаметр 50 мм, эксцентриситет профиля равен 1,8 мм в плоской постановке.

Требуется определить величины углов контакта и контактных давлений.

Установим связь между параметрами  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и параметрами  $P_{Ki}$ ,  $\Delta_{ni}$  процесса. Определим  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  как угловые координаты границ контактных зон.

С этой целью воспользуемся методом поверхности отклика, разработанным в работе [15]. Расчет ведем по алгоритму, предложенному в работе [15].

1. Составляется исходная система уравнений, описывающая исследуемый процесс.

Обозначим линейные члены уравнения (3) как  $Z_{Ki}$ :

$$P_{Ki} = Z_{Ki},$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$  ( $n = 8$ ).

Тогда выражение (3) запишется в матричном виде [14]:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_{K_1} \\ \vdots \\ Z_{K_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \vdots \\ \Delta_n \end{pmatrix}, \quad (22)$$

где  $a_{lk}$  – коэффициенты при неизвестных  $Z_{Ki}$ ;  $\Delta_l$  – свободные члены,  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $l = 1, 2, \dots, n$ .

2. Постулируются зависимости между нелинейными членами  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и параметрами  $P_{Ki}$ ,  $\Delta_l$ .

Опираясь на результаты работы [14, 15] можно принять модель вида:

$$\Delta_l = C_k \cdot \varphi_1^{\alpha_1} \cdot \varphi_2^{\alpha_2}. \quad (23)$$

3. Выбирается матрица планирования нелинейных членов.

Выражение (23) после логарифмирования приводится к виду:

$$\ln \Delta_l = \ln C_k + \alpha_1 \cdot \ln \varphi_1 + \alpha_2 \cdot \ln \varphi_2, \quad (24)$$

$$y_l = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2, \quad (25)$$

где  $x_1$ ,  $x_2$  – кодированные переменные.

На основании формулы (25) принимается ортогональный план первого порядка с результатами расчета (табл. 1).

**Таблица 1.** Ортогональный план первого порядка  
**Table 1.** Orthogonal plan of the first order

u	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	P <sub>1</sub> , МПа	P <sub>2</sub> , МПа	P <sub>3</sub> , МПа	P <sub>4</sub> , МПа	P <sub>5</sub> , МПа	P <sub>6</sub> , МПа	P <sub>7</sub> , МПа	Δ <sub>i</sub> , мм
1	+1	-1	-1	1,248	2,986	2,134	0,298	0,239	0,207	0,135	0,00257
2	+1	-1	+1	2,49	6,58	5,107	0,676	0,552	0,441	0,336	0,00160
3	+1	+1	-1	2,445	6,47	5,018	0,667	0,545	0,432	0,362	0,00153
4	+1	+1	+1	1,217	2,883	1,953	0,228	0,172	0,216	0,061	0,00104

4. Задаются границы варьирования контролируемых переменных. Принятый план требует задания контролируемых переменных на двух уровнях максимальном  $\varphi_{1\max}$ ,  $\varphi_{2\max}$  и минимальном  $\varphi_{1\min}$ ,  $\varphi_{2\min}$ .

Предварительный расчет ведем для случая внедрения одного тела (оправки) в другое тело (шпиндель).

На основании предварительных расчетов можно принять:

$$\varphi_{1\max} = 6, \varphi_{1\min} = 5, \varphi_{2\max} = 3, \varphi_{2\min} = 2.$$

5. Формируется массив коэффициентов  $a_{lk}$ ,  $\Delta_l$  для различных опытов  $u$ . Значения  $a_{lk}$ ,  $\Delta_l$  подсчитываются по формулам (1, 2, 9-14) заданным в таблице различным сочетаниям уровней  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

6. Решается система уравнений относительно неизвестных (табл. 1).

Решение линейной системы (22) ведем методом Гаусса.

7. Методом наименьших квадратов находятся значения коэффициентов уравнения (25) для кодированных переменных  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ , обозначенных через  $x_1$  и  $x_2$ .

$$b_{k,v} = \sum_{u=1}^a x_{u,v} \cdot \frac{y_{u,k}}{\sum_{u=1}^a x_{u,v}^2}, \quad (26)$$

где  $v$  – порядковый номер переменной  $x$  ( $v = 0, 1, 2$ ).

8. Осуществляется по формулам кодирования переход к фактическим параметрам  $\alpha_k$  уравнения (6). Для чего в уравнение (25) подставляются следующие формулы:

$$x_1 = \frac{2 \cdot (\ln \varphi_1 - \ln \varphi_{1\max})}{\ln \varphi_{1\max} - \ln \varphi_{1\min}} + 1,$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot (\ln \varphi_2 - \ln \varphi_{2\max})}{\ln \varphi_{2\max} - \ln \varphi_{2\min}} + 1. \quad (27)$$

Значения найденных таким образом коэффициентов приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Числовые значения коэффициентов для кодированных переменных по результатам опыта  
**Table 2.** Numerical values of the coefficients for the coded variables according to the results of the experiment

u	φ <sub>1</sub> , град	φ <sub>2</sub> , град	ln	Кодированные	
				b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>
1	5	2	P <sub>Ki</sub>	0,864	1,566
2	5	3			
3	6	2	Δ <sub>ni</sub>	-3,783	-6,890
4	6	3			

9. Искомые значения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , соответствующие заданным величинам  $P_{Ki}$  и  $\Delta_{ni}$ , находятся решением системы уравнений вида:

$$\ln P_{Ki} = 0,864 \cdot \ln \varphi_1 + 1,566 \cdot \ln \varphi_2,$$

$$\ln \Delta_{ni} = -3,783 \cdot \ln \varphi_1 - 6,890 \cdot \ln \varphi_2. \quad (28)$$

10. Проверяется точность расчета.

Для чего найденные по формулам значения  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  подставляются в исходную систему, и последняя решается относительно  $z_k$ . Определяются величины невязок  $\delta$ . Если точность неудовлетворительна, то область аппроксимации уменьшается делением первоначально выбранной области на части или принимается другая аппроксимирующая модель и весь цикл повторяется снова.

В результате расчетов установлен несимметричный характер распределения контактных давлений в зонах контактного взаимодействия при действии внешней нагрузки (рис. 2). Определен характер изменения величин контактных углов от величины крутящего момента для разных зазоров в соединении (рис. 3). Определен нелинейный характер изменения величины контактных углов и давлений для разных зазоров в соединении (рис. 4). Установлено, что при схеме нагружения трехгранного профильного соединения крутящим моментом и радиальной силой, последнее вызывает перераспределение величин контактных давлений в зонах контакта. Изменение контактных давлений в условиях циклического нагружения профильного соединения шпиндель-оправка при обработке изделий может приводить к возникновению процесса фреттинг-износ посадочных поверхностей деталей соединения, понижая точность и контактную жесткость соединения и шпиндельного узла станка с ЧПУ [16-18].

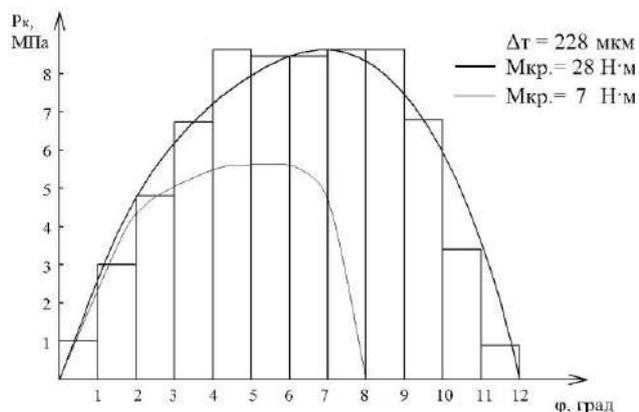


Рис. 2. Распределение контактных давлений в профильном соединении при передаче крутящего момента  
Fig. 2. Distribution of contact pressures in the profile connection during transmission of torque

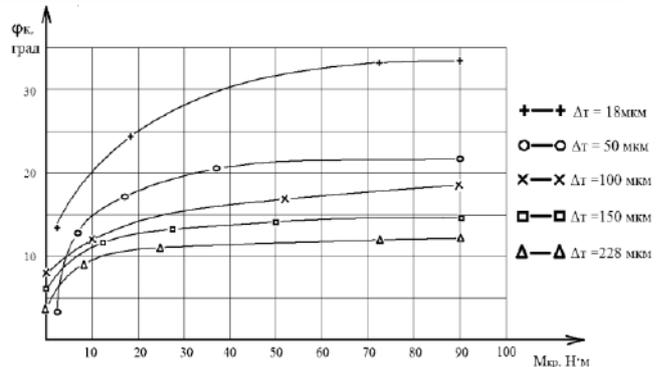


Рис. 3. Зависимость величин контактных углов в профильном соединении от внешней нагрузки (крутящего момента)

Fig. 3. Dependence of the values of the contact angles in the profile connection on the external load (torque)

В результате приближенного решения контактной задачи (в плоской постановке) установлены зависимости между параметрами контакта и внешней нагрузкой передаваемой профильным соединением (рис. 3-4).

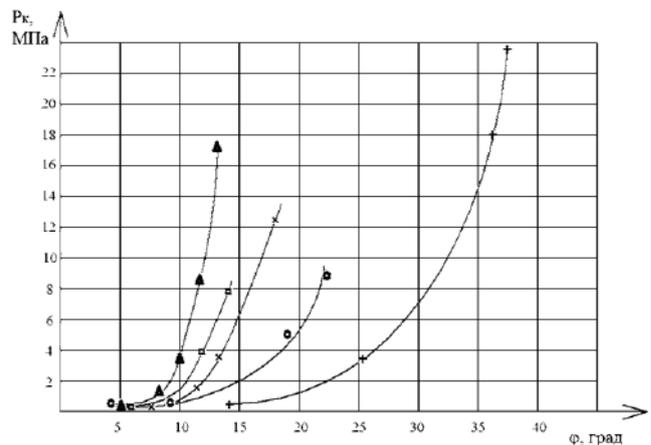


Рис. 4. Зависимость изменения величины контактных давлений в профильном соединении от величины угла контакта

Fig. 4. Dependence of the change in the magnitude of the contact pressure in the profile connection on the magnitude of the contact angle

### Заключение

1. Приближенно решена контактная задача теории упругости для трех-связанных контактных зон применительно к профильным соединениям с равноосным контуром для соединения типа Р-3 шпиндель – оправка при передаче крутящего момента в плоской постановке.

2. Установлены связи между параметрами контактного взаимодействия и условиями эксплуатации, а также конструктивно-технологическими параметрами профильных соединений типа Р-3. При изменении величин зазора посадки в соединении от

18 мкм до 228 мкм величина предельных значений контактных давлений возрастает до 41 %, величина контактной жесткости соединения шпиндель-оправка уменьшается до 22 %.

3. Определена возможность применения метода поверхности отклика при решении систем нелиней-

ных уравнений при разработке имитационной контактной задачи. Предложен порядок решения контактной задачи применительно к профильным соединениям с равноосным контуром в шпиндельном узле.

### Список литературы

1. Аверьянов О.И., Аверьянова И.О. Модульный принцип построения многоцелевых станков с ЧПУ. Старый Оскол : ТНТ, 2018. 164 с.
2. Молодцов В.В. Методы проектирования высокоэффективных металлообрабатывающих станков как мехатронных систем : дис. ... докт. техн. наук : 05.02.07 / В.В. Молодцов ; МГТУ. Москва, 2016. 390 с.
3. Акмаев О.К., Кудояров Р.Г., Башаров Р.Р. Оценка работоспособности инструментальных оправок при высокоскоростной обработке деталей на многоцелевых станках // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 13. №1 (34). С. 138–140.
4. Григорьев С. Н., Кохомский М.В., Маслов А.Р. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ : справочник. М. : Машиностроение, 2006. 544 с.
5. Украженко К.А. Разработка и исследование методов повышения жесткости и быстротенности инструментальных систем многоцелевых станков : дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / К.А. Украженко ; МГТУ. Москва, 2007. 435 с.
6. Линейцев В.Ю., Ильиных В.А. Имитационное моделирование деталей конического соединения на основе РК-3 профильных кривых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 51–55.
7. Линейцев В.Ю., Ильиных В.А., Ярилов В.Е. Исследование конических РК-3 профильных соединений на точность и жесткость // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1 (53). С. 36–39.
8. Пат. 184076 Рос. Федерация. Шпиндель-инструментальная оправка / В.А. Ильиных. ; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщ. №2018109190 ; заявл. 14.03.2018 ; опубл. 15.10.2018, Бюл. № 29.
9. Ильиных В.А., Ярилов В.Е., Рожкова Е.А. Оценка точности и прочности модульной системы вспомогательного инструмента на основе профильных соединений // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2019. 23(3). С. 451–462. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-451-462.
10. Ильиных В.А. Оценка точности конических профильных соединений вспомогательного инструмента многоцелевого станка при высокоскоростной обработке // Материаловедение. Энергетика. 2020. Т. 26, № 2. С. 140–147. DOI: 10.18721/JEST.26211.
11. Ильиных В.А. Применение конических профильных соединений шпиндель-оправка в многоцелевых станках // Омский научный вестник. 2021. №1 (175). С. 12–16. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-12-16.
12. Соломенцев Ю.М., Косов М.Г., Митрофанов В.Г. Моделирование точности при автоматизированном проектировании металлорежущего оборудования. М. : НИИМАШ, 1985. 68 с.
13. Иосилевич Г.Б. Концентрация напряжений и деформаций в деталях машин. М. : Машиностроение, 1981. 116 с.
14. Ильиных В.А. Расчет и выбор конструктивных параметров профильных соединений с равноосным контуром : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / В. А. Ильиных. М. : МВТУ, 1987. 285 с.
15. Косов М.Г. Моделирование точности при автоматизированном проектировании и эксплуатации металлорежущего оборудования: автореф. ... докт. техн. наук / М.Г. Косов М. : Станкин, 1985. 48 с.
16. Ilinykh V. Experimental study of profile connections of auxiliary tool multi-purpose machines in cyclic loading // SibTrans – 2019 : materials Science and Engineering. 2020. Vol. 760. DOI:10.1088/1757-899X/760/1/012025.
17. Ilinykh V., Pichuev E. Evaluation of quality parameters of the torque transmission connections of the multi-purpose machine spindle joints // Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. doi:10.1088/1757-899X/896/1/012102.
18. Ilinykh V. Evaluation of quality parameters of conical profile com-pounds in nodes of multi-purpose machines // E3S Web of Conferences 2019. Vol. 140. DOI:https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914002003.

### References

1. Aver'yanov O.I., Aver'yanova I.O. Modul'nyi printsip postroeniya mnogotselevykh stankov s ChPU: monografiya [Modular principle of construction of multi-purpose CNC machines: a monograph]. Stary Oskol: TNT Publ., 2018. 164 p.
2. Molodtsov V.V. Metody proektirovaniya vysokoeffektivnykh metalloobrabatvyayushchikh stankov kak mekhatronnykh sistem: dis. dokt. tekhn. nauk: 05.02.07 [Methods of designing highly efficient metalworking machines as mechatronic systems: D. Sc. (Engineering) diss.: 05.02.07. Moscow, MSTU Publ., 2016. 390 p.
3. Akmaev O.K., Kudesanova R.G., Sharamov R.R. Otsenka rabotosposobnosti instrumental'nykh opravok pri vysokoskorostnoi obrabotke detalei na mnogotselevykh stankakh [Evaluation of the designer's work complete set at high speed of data processing on multi-purpose machines] // Vestnik UGATU, Vol. 13, 2009. No. 1 (34). Pp. 138–140.
4. Grigor'ev S.N., Kokhomskii M.V., Maslov A.R. Instrumental'naya osnastka stankov s ChPU: spravochnik [Instrumental equipment of CNC machines: a reference book]. In Maslov A. R. (ed.) Moscow: Mashinostroenie Publ., 2006. 544 p.
5. Ukrazhenko K. A. Razrabotka i issledovanie metodov povysheniya zhestkosti i bystrosmennosti instrumental'nykh sistem mnogotselevykh stankov: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.03.01 [Development and research of methods of increasing the rigidity and quick-changeability of tool systems of multi-purpose machines: D. Sc. (Engineering) diss.: 05.03.01]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2007. 435 p.

6. Lineitsev V.Yu., Il'nykh V.A. Imitatsionnoe modelirovanie detalei konicheskogo soedineniya na osnove RK-3 profil'nykh krivykh [Simulation modeling of details of conical connections on the basis of P-3-profile curves] // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technology. System analysis. Modeling]*, No. 2 (46). Irkutsk: IrGUPS Publ., 2015. Pp. 51–55. (The journal is listed in HAC under No. 1819).

7. Lineitsev V.Yu., Il'nykh V.A., Yarilov V.E. Issledovanie konicheskikh RK-3 profil'nykh soedinenii na tochnost' i zhestkost' [The accuracy and stiffness study of conical P-3-profile connections] // *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie [Modern technology. System analysis. Modeling]*. Irkutsk: IrGUPS Publ., No. 1 (53), 2017. Pp. 36–39 (The journal is listed in HAC under No. 1819).

8. Il'nykh V.A. *Shpindel'-instrumental'naya opravka [The spindle-tool mandrel]* // Utility model patent: No.184076, State register of utility models. Patent application for utility model No. 2018109190 dated March 14, 2018. The term of the patent is until March 14, 2028.

9. Il'nykh V. A., Yarilov V. E., Rozhkova E. A. Otsenka tochnosti i prochnosti modul'noi sistemy vspomogatel'nogo instrumenta na osnove profil'nykh soedinenii [Evaluation of the accuracy and strength of the modular system of auxiliary tools based on profile connections] // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of the Irkutsk State Technical University]*, 2019; 23(3):451–462. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-451-462.

10. Il'nykh V. A. Otsenka tochnosti konicheskikh profil'nykh soedinenii vspomogatel'nogo instrumenta mnogotselovogo stanka pri vysokoskorostnoi obrabotke [Evaluation of the accuracy of conical profile joints of auxiliary tools of a multi-purpose machine tool for high-speed processing]. *Materialovedenie. Energetika. [Materials science. Power engineering]*, 2020. Vol. 26, No. 2. Pp. 140–147. DOI: 10.18721/JEST. 26211

11. Il'nykh V.A. Primenenie konicheskikh profil'nykh soedinenii shpindel'-opravka v mnogotselovykh stankakh [The use of conical profile spindle-mandrel connections in multi-purpose machines] // *Omskii nauchnyi vestnik [Omsk Scientific Bulletin]*, 2021. No. 1 (175). Pp. 12–16. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-12-16.

12. Solomentsev Yu.M., Kosov M.G., Mitrofanov V.G. Modelirovanie tochnosti pri avtomatizirovannom proektirovanii metallovezhushchego oborudovaniya [Modeling accuracy in automated design of metal-cutting equipment]. Moscow: NIIMASH Publ., 1985. 68 p.

13. Iosilevich G. B. Kонтсentratsiya napryazhenii i deformatsii v detalyakh mashin [Concentration of stresses and deformations in machine parts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 116 p.

14. Il'nykh V.A. Raschet i vybor konstruktivnykh parametrov profil'nykh soedinenii s ravnoosnym konturom: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.02 [Calculation and selection of structural parameters of profile connections with an equiaxed contour: Ph.D. (Engineering) diss.: 05.02.02]. Moscow: MVTU Publ., 1987. 285 p.

15. Kosov M. G. Modelirovanie tochnosti pri avtomatizirovannom proektirovanii i ekspluatatsii metallovezhushchego oborudovaniya: avtoreferat ... dokt. tekhn. nauk [Modeling accuracy in automated design and operation of metal-cutting equipment: author's abstract of D. Sc. (Engineering) diss.]. Moscow: Stankin Publ., 1985. 48 p.

16. Il'nykh V. Experimental study of profile connections of auxiliary tool multi-purpose machines in cyclic loading. *Materials Science and Engineering* 760, 012025 (2020) SibTrans – 2020.

17. Il'nykh V., Pichuev E. Evaluation of quality parameters of the torque transmission connections of the multi-purpose machine spindle joints. *Materials Science and Engineering* 896 (2020) 012102 doi:10.1088/1757-899X/896/1/012102 MPCPE – 2020.

18. Il'nykh V. Evaluation of quality parameters of conical profile com-pounds in nodes of multi-purpose machines. *E3S Web of Conferences* 140, 02003 (2019) EECSE – 2019.

#### Информация об авторах

**Ильиных Виктор Анатольевич** – доцент, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, канд. техн. наук., г. Чита, e-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

#### Information about the authors

**Viktor A. Ilynykh** – The Zabaikalsk Institute of Rail Transport, Chita, e-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2021.1(69).17-23

УДК 621.398.001.2

## Интеграция этапов подготовки производства высокоточных малогабаритных деталей на станках с числовым программным управлением

**Ю. И. Карлина** ✉

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉ karlinigor@mail.ru

#### Резюме

Для проведения интеграции этапов технологической подготовки производства высокоточных малогабаритных деталей коаксиальных радиокомпонентов на станках с числовым программным управлением проведено исследование особенностей производства деталей и стандартных функциональных возможностей САМ-систем. В работе использовались теоретические методы – классификационный анализ и обобщение для дальнейшего моделирования методики создания и ве-