

DOI: 10.18721/JEST.24415
УДК 62-25

В.А. Ильиных

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, г. Чита, Россия

ВЛИЯНИЕ КОНИЧЕСКИХ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ТОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКТОВ МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ

Представлены результаты исследования технологических комплектов (ТК) на базе конических профильных соединений с равноосным контуром (РК-3) в узле «шпиндель – инструментальная оправка» на точность и жесткость, для чего на основе разработанных математических моделей профильных поверхностей оправки и отверстия шпинделя РК-3 выполнены машинные эксперименты по воспроизведению сопряжения деталей конического соединения. Проведен анализ точности установки по шести координатам инструментальной оправки с основными элементами (сверла, фрезы, расточные резцы) в отверстие шпинделя. Коническое соединение нагружалось внешней силой (резания); получены величины упругих отжатий (изменение положения оправки в отверстии шпинделя) также по шести координатам. В каждом расчетном случае проведено сравнение точности взаимного положения деталей РК-3 профильного и круглого соединений как при сборке соединения, так и при его эксплуатации (работе) под действием внешней нагрузки. Установлено, что точность положения сопрягаемых деталей конического РК-3 профильного соединения составляет не более 2 мкм на торце соединения и до 5 мкм при вылете инструмента не более 150 мм.

Ключевые слова: РК-3-профильное соединение, натяг, многоцелевые станки, технологический комплект.

Ссылка при цитировании:

В.А. Ильиных. Влияние конических профильных соединений на точность и жесткость технологических комплектов многоцелевых станков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 150–159. DOI: 10.18721/JEST.24415.

V.A. Ilyinykh

Zabaikalsky railway transport institute, Chita, Russia

INFLUENCE OF CONICAL PROFILE CONNECTIONS ON ACCURACY AND RIGIDITY OF TECHNOLOGICAL SETS OF MULTI-PURPOSE MACHINES

The article presents the study of technological sets of multi-purpose machines based on conical P-3 profile connections for accuracy and rigidity. Based on previously constructed mathematical models of P-3 profile surfaces of the shaft and the sleeve hole, we have performed multiple simulations on coupling of conical connection details. We have analyzed the accuracy with which the shaft with the main elements (drills, cutters, boring tools) was installed in the sleeve hole for six coordinates (3 displacements and 3 rotations). Subsequently, the assembled connection was loaded by an external force, allowing to obtain the value of elastic deformation (a change in the position of the shaft in the sleeve hole) also for six coordinates. In each case, we have compared the accuracy of mutual positions of the parts of P-3 profile and round connections both in the assembly of the connection as well during its operation by an external force. The main conclusions have been also formulated.

Keywords: P-3 profile, interference, tooling systems, multi-purpose machines.

Citation:

V.A. Ilyinykh, Influence of conical profile connections on accuracy and rigidity of technological sets of multi-purpose machines, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(04)(2018) 150–159, DOI: 10.18721/JEST.24415.



Введение

Известны отдельные случаи применения в Германии и России в инструментальных системах профильных соединений, а также профильных конических соединений с равноосным контуром. Как показал литературный и патентный обзор, сведения по исследованию данного вида соединений с конусностью 1:10 на точность и жесткость в технологических комплектах многоцелевых станков отсутствует [1–8]. Анализ применения традиционных конических соединений с круглым профилем поперечного сечения со специальной конусностью 7:24 в технологических комплектах многоцелевых станков (МС) при автоматическом формировании соединения «шпиндель – инструментальная оправка» выявил существенные конструктивные недоработки последнего, которые влияют на технологическую и эксплуатационную надежность (точность) станков [11, 12, 14, 15]. В частности, при многократной замене инструмента происходит смена технологических баз в результате проворота инструмента это влияет на точность изготовления деталей. Технологический комплект состоит из инструментальной оправки с коническим хвостовиком и основного режущего инструмента. Применение названных профильных конических соединений вместо традиционно используемых в технологических комплектах позволит обеспечить технологическую и эксплуатационную точность многоцелевых станков и их конкурентоспособность.

В работе представлены возможные варианты совершенствования конструкций технологических комплектов на основе разработанных математических моделей формы профильных поверхностей, а также анализ результатов машинных экспериментов по реализации процесса сборки технологических комплектов на базе конического профильного соединения с равноосным контуром при его эксплуатации [11, 12].

Цель исследования – обеспечение неподвижности, а также повышение точности и жесткости

соединений в технологических комплектах многоцелевых станков при предельных нагрузках путем применения моментопередающего профильного конического соединения «шпиндель – инструментальная оправка» в условиях его многократного базирования и закрепления.

Методы исследования

Исследование процесса формирования конического профильного соединения в технологических комплектах МС основано на машинном эксперименте по моделированию процесса сборки при числе реализаций не менее пятидесяти с различным набором исходных данных (табл. 1) и последующем анализе полученных результатов с использованием математической статистики [5–7, 11, 12]. Применялись методы математической статистики, прикладной и вычислительной математики, а также решение контактных задач теории упругости методом поверхности отклика, основанном на методе наименьших квадратов и методе теории планирования экспериментов.

Масса и моменты инерции для инструментальных оправок рассчитаны для соответствующих способов обработки резанием. В работе [6] было показано, что конечное положение поверхностей друг относительно друга незначительно зависит от массы оправок (влияние массы – в пределах 2 %; рис. 1, 2).

В математических моделях влияние при сборке соединения горизонтальной либо вертикальной компоновки МС учтено направлением приложения вектора силы тяжести оправки: при вертикальной компоновке станка вектор силы тяжести совпадает с продольной осью деталей, при горизонтальной, соответственно, перпендикулярен ей. При горизонтальной компоновке станка дополнительно исследовано влияние силы тяжести по радиус-вектору РК-3 профильной кривой, так как в отличие от круглого сечения в профильных соединениях радиус-вектор не всегда перпендикулярен касательной к профильной кривой.

Таблица 1

Параметры РК-3 профильной посадочной поверхности оправки при различной технологической шероховатости

Table 1

Profile connection P-3 parameters

Шифр оправки	Размеры оправки, мм				Конусность К	Площадь поверхности, мм ²	Параметр σ , мкм	Шероховатость Ra, мкм
	D	d	L	e				
50	50	35,4	50	1,8	7:24	6781,76	0,4	0,32
51								0,8
52								1,6
53								4,0
60	50	45,0	50	1,8	1:10	7470,60	0,4	0,32
61								0,8
62								1,6
63								4,0
70	50	47,5	50	1,8	1:20	7660,02	0,4	0,32
71								0,8
72								1,6
73								4,0

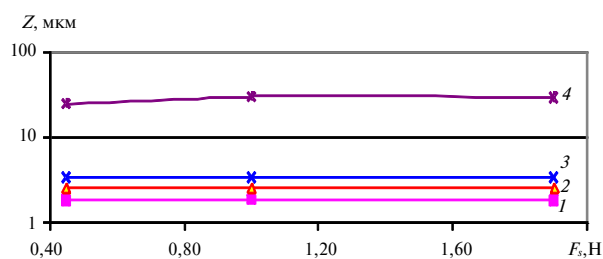


Рис. 1. Графическая зависимость смещения оправки (при конусности 7:24) от величины сборочной силы F_s (1 – 500, 2 – 700, 3 – 900, 4 – 9000 Н)

Fig. 1. Conic connection assembly (F_s : 1 – 500, 2 – 700, 3 – 900, 4 – 9000 N)

Продольная скорость сборки соединения «шпиндель – оправка» принята условно постоянной для всего комплекса расчетов, ее величина составляет 33 мм/с.

Сборка соединения (этап 1: F_s) выполняется под действием сборочной силы F_s при ее значениях 500, 700, 900 Н.

При расчетах на жесткость собранному РК-3 профильному соединению сообщается угловая скорость равная $\omega_0 = 1000$ рад/с, т. е. учитывает-

ся центробежная сила (этап 2: $F_s + F_{цтрб}$), а затем соединение нагружается постоянной во времени внешней нагрузкой F_0 (этап 3: $F_s + F_{цтрб} + F_0$). Внешняя нагрузка задавалась условно и была принята постоянной в пространстве (табл. 2).

Исследовано влияние компоновки станков при сборке РК-3 профильного соединения «шпиндель – оправка».

С целью установить влияние горизонтальной компоновки МС при сборке соединения были выполнены расчеты с угловым шагом приложения вектора силы тяжести G относительно положения профильной кривой вала. Угловой шаг принят 30° , т. е. исследовано 12 расчетных положений. Расчеты предполагают однократную сборку соединения с заранее заданным угловым положением вектора силы тяжести G относительно координатных осей вала.

Исследования выполнены как для идеальных ($\sigma = 0$ мкм), так и «реальных» ($\sigma = 0,4$ мкм) поверхностей применительно к круглым и РК-3 профильным кривым.

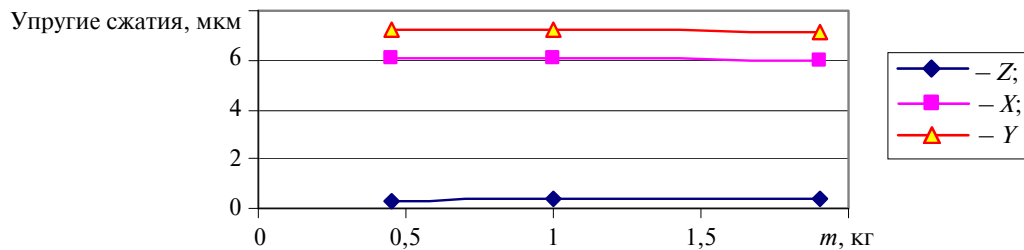


Рис. 2. Упругие отжатия собранного традиционного конического соединения при действии внешней силы $F_0 = 1732$ Н

Fig. 2. Elastic squeezing connection assembly

Таблица 2

Характеристика вектора внешней нагрузки на собранное соединение

Table 2

External load vector

Номер внешней нагрузки	Условная внешняя нагрузка, Н	Внешняя сила, Н	Внешний момент, Н·м
12	1732	$F_z = 1000$ $F_x = 1000$ $F_y = 1000$	$M_z = 10,0$ $M_x = 100,0$ $M_y = 100,0$
13	1299	$F_z = 750$ $F_x = 750$ $F_y = 750$	$M_z = 7,5$ $M_x = 75,0$ $M_y = 75,0$
14	866	$F_z = 500$ $F_x = 500$ $F_y = 500$	$M_z = 5,0$ $M_x = 50,0$ $M_y = 50,0$

Собранное соединение характеризуется:

взаимным положением оправки и шпинделя по шести координатам (3 линейных отклонения центра тяжести оправки – Z, X, Y , мкм, 3 угловых отклонения положения осей оправки от осей отверстия шпинделя – P_z, P_x, P_y , мкрад);

номинальной S_n , мм², фактической S_f , мм², и относительной S_f/S_n , %, площадью контакта;

средним зазором Z_{cp} , мкм, и средним натягом N_{cp} , мкм, (для идеальных поверхностей средний зазор равен нулю);

средним P_{cp} и максимальным P_{max} контактным давлением, МПа.

Расчётами установлено, что начальное угловое положение собираемого соединения не влияет на величину среднего контактного давления P_{cp} , но при этом для РК-3 профильного соединения в идеальном случае незначительное влияние профиля на величину P_{cp} просматривается (рис. 5).

В результате имитационных экспериментов определены зависимости линейного и углового положения оправки относительно отверстия шпинделя (рис. 3, 4) при разных начальных угловых положениях силы тяжести, которое оказывает незначительное влияние на характеристики собранного соединения.

На рис. 3, 4 показано поле рассеяния точности установки оправки для 12 схем приложения силы тяжести G с шагом в 30°.

Следует отметить, что линейные и угловые отклонения по координатам X и Y для идеальных поверхностей по абсолютным величинам не превышают 0,01 мкм и 0,2 мкрад для обоих типов профиля. Это позволяет утверждать, что направление силы тяжести незначительно влияет на точность положения оправки в отверстии шпинделя, но на кривые влияет точность выполнения расчетов.

Графики линейных Z и угловых P_z положений (см. рис. 3, 4) характеризуют точность сборки соединения в продольном направлении. В частности абсолютное отклонение угла P_z для РК-3 профильного соединения находится в пределах $\pm 0,1$ мкрад (см. рис. 4), что свидетельствует о высокой точности сборки соединения относительно оси Z , в отличие от соединения с круглым профилем (см. рис. 3), осевая контактная жесткость которого зависит от величины натяга и сил трения. В процессе сборки круглого соединения натяги имеют место в момент удара поверхностей, причем каждый раз в разных местах, что и вызывает случайным образом осевой поворот P_z , который, в конечном счете, будет иметь широкий разброс значений (см. рис. 3).

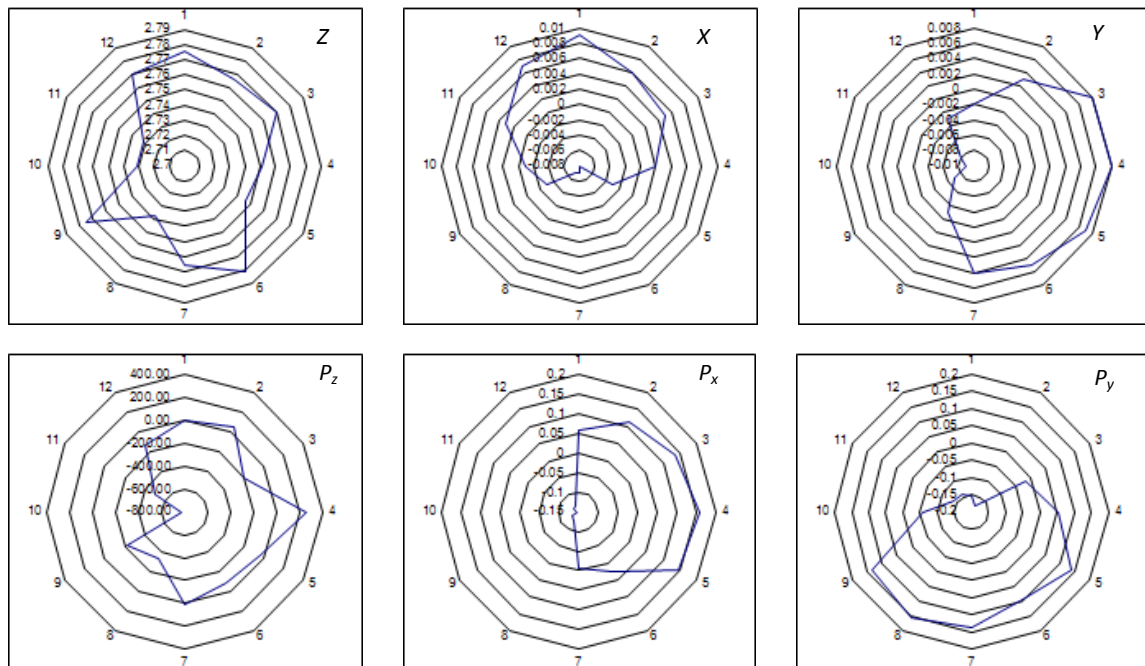


Рис. 3. Линейные, мкм, и угловые, мкрад, отклонения положения оси оправки в отверстии шпинделя для круглого профиля при $\sigma = 0$ мкм, $F_s = 900$ Н

Fig. 3. Linear and angular position deviations of the axis of amendment round profile ($\sigma = 0$ mkm, $F_s = 900$ N)

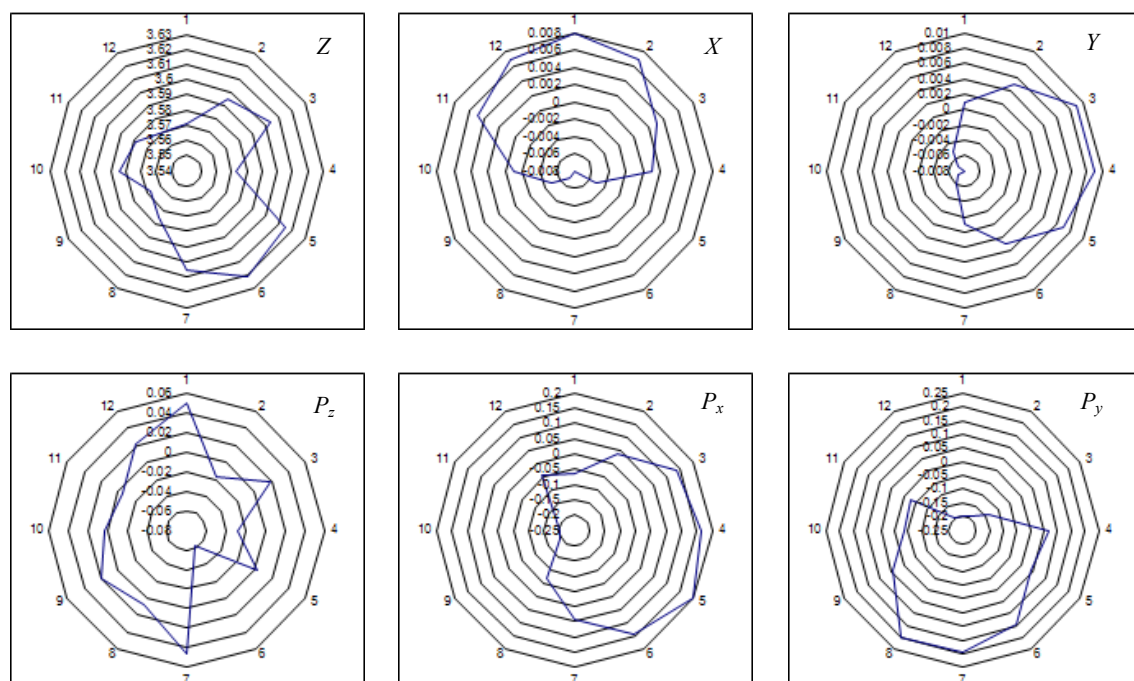


Рис. 4. Линейные, мкм, и угловые, мкрад, отклонения положения оси оправки в отверстии шпинделя для РК-3 профиля при $\sigma = 0$ мкм, $F_s = 900$ Н

Fig. 4. Linear and angular position deviations of the axis of amendment PK-3 profile ($\sigma = 0$ mkm, $F_s = 900$ N)

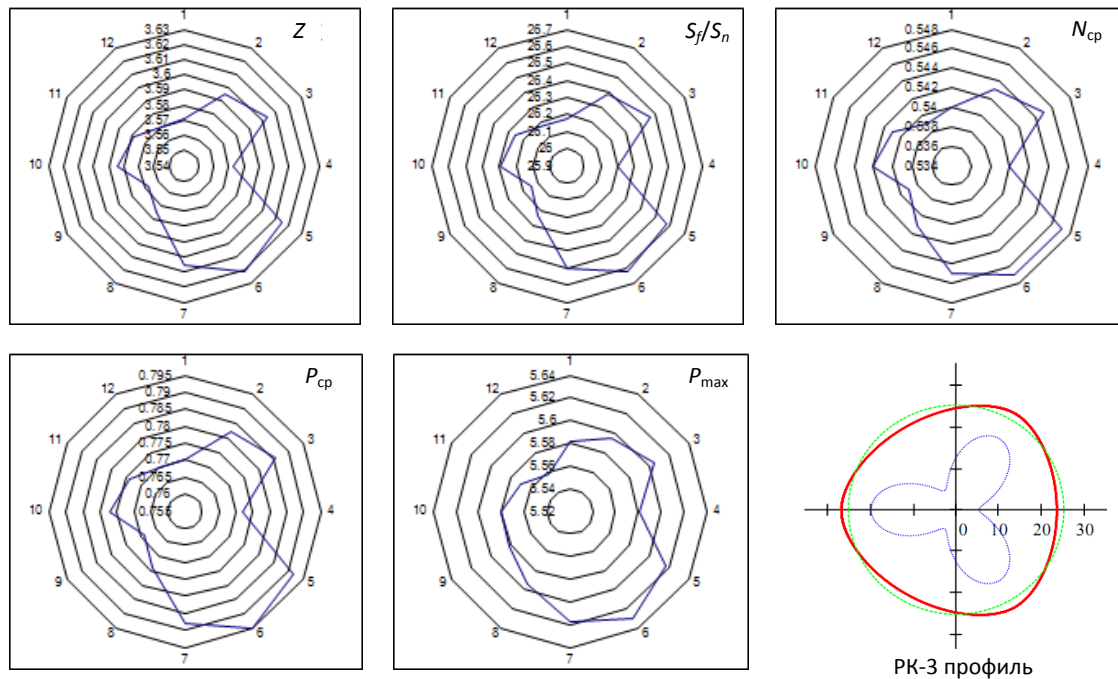
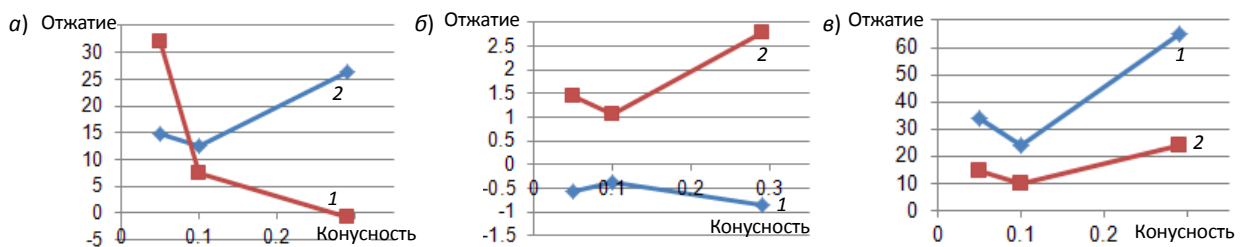
Рис. 5. Контактные параметры РК-3 профильного сопряжения ($\sigma = 0$ мкм, $F_s = 900$ Н)Fig. 5. Contact connection parameters P-3 profile ($\sigma = 0$ mkm, $F_s = 900$ N)Рис. 6. Математические ожидания упругих отжатий РК-3 профильного сопряжения при $F_s = 700$ Н и $F_0 = 1732$ Н: а – смещение (1), мкм, и поворот (2), мкрад, по оси Z; б – смещения по осям X (1), Y (2), мкм; в – повороты относительно осей X (1), Y (2), мкрад

Fig. 6. Mathematical expectation of elastic squeezing P-3 profile

Результаты исследования упругих отжатий при нагружении собранного соединения внешней нагрузкой и влияния компоновки станков при расчетах на жесткость РК-3 профильного соединения технологических комплектов приведены ниже.

Как известно, жесткость соединения характеризуется отношением приращения внешней силы к величине приращения упру-

гих перемещений в направлении ее действия. На рис. 6–8 представлены графические зависимости математических ожиданий упругих отжатий и поворотов оправки при нагружении собранного соединения ТК внешней нагрузкой при разных значениях конусности. В расчетах принята постоянная сборочная сила, равная 700 Н, при «идеально» гладких контактирующих поверхностях.

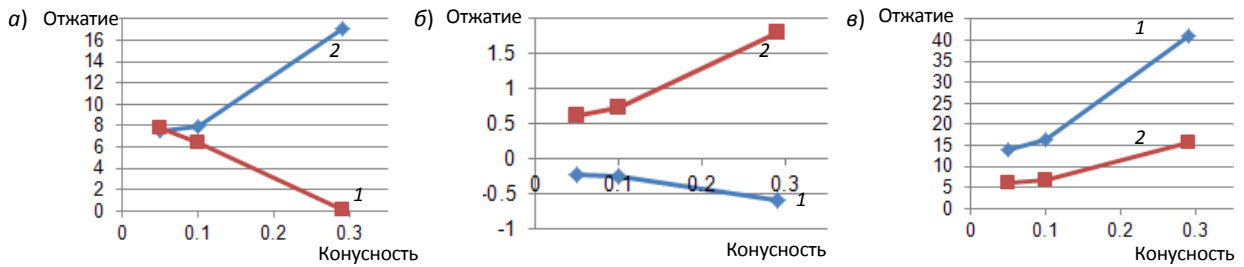


Рис. 7. Математические ожидания упругих отжатий РК-3 профильного сопряжения ($F_s = 700$ Н и $F_0 = 1299$ Н): *a* – смещение (1), мкм, и поворот (2), мкрад, по оси Z; *b* – смещения по осям X (1), Y (2), мкм; *v* – повороты относительно осей X (1), Y (2), мкрад

Fig. 7. Mathematical expectation of elastic squeezing P-3 profile

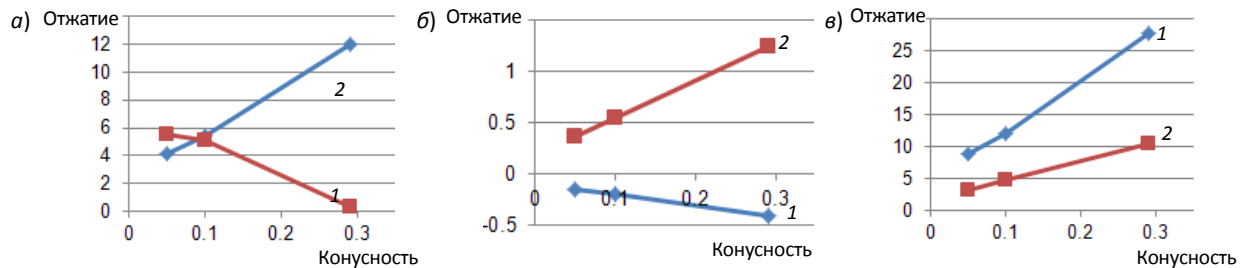


Рис. 8. Математические ожидания упругих отжатий РК-3 профильного сопряжения $F_s = 700$ Н и $F_0 = 866$ Н: *a* – смещение (1), мкм, и поворот (2), мкрад, по оси Z; *б* – смещения по осям X (1), Y (2), мкм; *в* – повороты относительно осей X (1), Y (2), мкрад

Fig. 8. Mathematical expectation of elastic squeezing P-3 profile

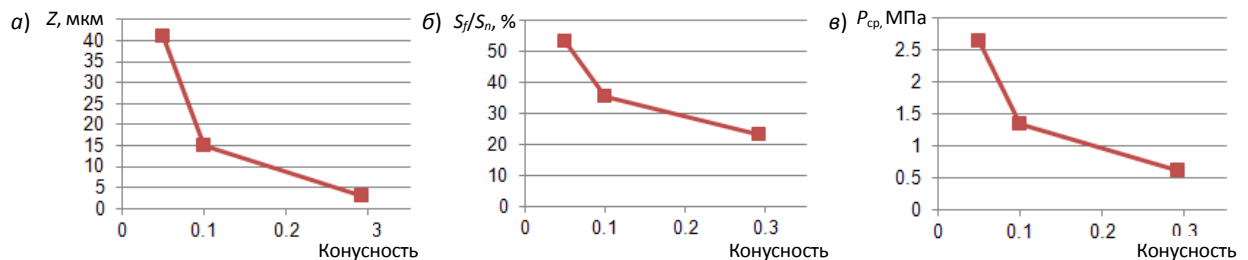


Рис. 9. Графические зависимости смещения (*a*), относительной контактной площади (*б*) и среднего контактного давления (*в*) от конусности (при $F_s = 900$ Н)

Fig. 9. Graphic dependence mathematical expectation displacement (*a*) of areas (*б*) and contact pressures (*в*)

По результатам расчетов выходит, что предпочтительнее выполнить соединение с конусностью 1:10, чем с конусностью 7:24, так как в первом случае соединение под действием внешней нагрузки имеет меньшие величины упругих отжатий, а следовательно, более высокую контактную жесткость при действии предельных нагрузок [13]. Использование конусности 1:20 в разъемном соединении «шпин-

дель – оправка» нежелательно, так как такое соединение обладает свойством самоторможения, что значительно усложняет его автоматическую разборку при смене инструмента в многоцелевом станке [12].

На рис. 9 показаны зависимости изменений величин параметров контактного взаимодействия от конусности для РК-3 профильного соединения. Расчетами установлено, что



среднее контактное давление при конусности 1:10 в 2,25 раза больше, чем при конусности 7:24, и составляет примерно 1,375 МПа для сборочной силы 900 Н.

Проведенные исследования позволяют сузить круг будущих вычислений и определить оптимальную конусность как 1:10. Расчеты соединений с конусностью 1:20 дают неустойчивый конечный результат по упругим отжатым, а расчеты с традиционной конусностью 7:24 приводят к раскрытию стыка в соединении, предельным упругим отжатым и вибрации под нагрузкой.

Выводы

Установлено, что начальное положение ТК (инструментальная оправка) относительно шпинделя МС оказывает незначительное влияние на точность ее установки по координатным осям X и Y как для круглых, так и для профильных конических поверхностей, но в значительной степени влияет на точность продольного

смещения и поворота оправки относительно оси Z . Точность углового положения в РК-3 профильном соединении выше, чем в традиционном соединении с конусностью 7:24.

Установлено, что начальное положение ТК (инструментальная оправка) относительно шпинделя МС незначительно влияет на параметры контактного взаимодействия профильных поверхностей с равноосным контуром, например: предельные значения максимальных контактных давлений лежат в интервале от 5,55 до 5,63 МПа, в то время как относительная площадь контакта в соединении составляет 26,1–26,6 %.

Расчетами установлено, что использование РК-3 профильного соединения в ТК узла «шпиндель – оправка» с конусностью 1:10 предпочтительнее, чем с конусностью 7:24, так как обладает большей контактной жесткостью (не менее 550 Н/мкм) и имеет меньшие величины упругих отжатым (до 5 мкм на вылете инструмента не более 150 мм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Моргунов А.П.** Разработка и обеспечение прочности профильных неподвижных неразъемных соединений: Автореф. дис. ... докт. техн. наук / Омск, ОмГТУ, 1998. 38 с.
2. **Тимченко А.И.** РК-профильные соединения и их применение в различных отраслях промышленности // СТИН. 1993. № 2. С. 13–18.
3. **Индаков Н.С.** К исследованию крутильной жесткости и износостойкости профильных соединений // Сб.: Технология машиностроения. Тула, ТПИ. 1977. С. 132–133.
4. **Ильиных В.А., Косов М.Г.** Оценка влияния конструктивных параметров на напряженное состояние стыков РК – профильных соединений поляризационно-оптическим методом // Вестник машиностроения. № 11. М.: Машиностроение, 1990. С. 64–66.
5. **Свидетельство об отраслевой регистрации программы для ЭВМ № 5948.** Моделирование сопряжения деталей конического соединения / Линеицев В.Ю., Ильиных В.А., Лукьянов П.Ю. / 30.03.2006.
6. **Линеицев В.Ю.** Контактная прочность, жесткость и точность разъемных неподвижных конических соединений в инструментальных системах: Дис. ... канд. техн. наук / По специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры. Иркутск: ИрГУПС, 2006. 217 с.
7. **Ильиных В.А., Линеицев В.Ю., Рожкова Е.А.** Расчет напряженно-деформированного состояния ступицы с РК-профильным отверстием // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 3(27) С. 69–73. / Иркутск: ИрГУПС, 2010. (журнал указан в перечне ВАК под № 1819).
8. **Ильиных В.А., Рожкова Е.А., Линеицев В.Ю.** Расчет на прочность РК-3-профильных соединений с натягом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2(34) / Иркутск: ИрГУПС, 2012. С. 17–20. (журнал указан в перечне ВАК под № 1819).
9. **Патент на полезную модель №142049.** Профильное соединение вал-ступица с равноосным контуром с натягом / Рожкова Е.А., Ильиных В.А. Линеицев В.Ю.

Государственный реестр полезных моделей. Заявка на патент на полезную модель №2013149425 от 06.11.2013 г. Срок действия патента до 06.11.2023 г.

10. **Патент на полезную модель №155119.** Модифицированное профильное моментопередающее соединение вал-ступица с равноосным контуром с натягом / Ильиных В.А., Рожкова Е.А., Линейцев В.Ю. Государственный реестр полезных моделей. Заявка на патент на полезную модель №2015107771 (012545) от 05.03.2015 г. Срок действия патента до 05.03.2025 г.

11. **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) / Иркутск: ИрГУПС, 2015. С. 51–55. (журнал указан в перечне ВАК под № 1819).

12. **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 / Иркутск: ИрГУПС, 2017. (журнал указан в перечне ВАК под № 1819).

13. **Патент на полезную модель №184076.** Шпindel-инструментальная оправка / Ильиных В.А. Государственный реестр полезных моделей. Заявка на патент на полезную модель №2018109190 от 14.03.2018 г. Срок действия патента до 14.03.2028 г.

14. **Chen Z.** Finite element methods and their applications. Berlin, Germany: Springer, 2005.

15. **Crisfield M.A.** Non-linear finite element analysis of solids and structures. Vol. 1, 2. Wiley, England: Essentials, 1996.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ИЛЬИНЫХ Виктор Анатольевич – кандидат технических наук доцент Забайкальского института железнодорожного транспорта
E-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 14.10.2018

REFERENCES

[1] **Morgunov A.P.** Razrabotka i obespechenie prochnosti profil'nyh nepodviznyh neraz#emnyh soedinenij: Avtoref. dis. ... dokt. tehn. nauk / Omsk, OmGTU, 1998. 38 s. (rus.)

[2] **Timchenko A.I.** RK-profil'nye soedinenija i ih primeneniye v razlichnyh otrasljah promyshlennosti. *STIN*. 1993. № 2. S. 13–18. (rus.)

[3] **Indakov N.S.** K issledovaniju krutyl'noj zhestkosti i iznosostojkosti profil'nyh soedinenij. *Sb.: Tehnologija mashinostroenija*. Tula, TPI. 1977. S. 132–133. (rus.)

[4] **Il'inyh V.A., Kosov M.G.** Ocenka vlijaniya konstruktivnyh parametrov na naprjazhennoe sostojanie stykov RK – profil'nyh soedinenij poljarizacionno-opticheskim metodom. *Vestnik mashinostroenija*. № 11. M.: Mashinostroenie, 1990. S. 64–66. (rus.)

[5] **Svidetel'stvo ob otraslevoj registracii programmy dlja JeVM № 5948.** Modelirovanie soprjazhenija detalej konicheskogo soedinenija / Linejcev V.Ju., Il'inyh V.A., Luk'janov P.Ju. / 30.03.2006. (rus.)

[6] **Linejcev V.Ju.** Kontaktnaja prochnost', zhestkost' i tochnost' raz#emnyh nepodviznyh konicheskikh soedinenij v instrumental'nyh sistemah: Dis. ... kand. tehn. nauk / Po special'nosti 01.02.06 – Dinamika,

prochnost' mashin, priborov i apparatury. Irkutsk: IrGUPS, 2006. 217 s. (rus.)

[7] **Il'inyh V.A., Linejcev V.Ju., Rozhkova E.A.** Raschet naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija stupicy s RK-profil'nym otverstiem. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2010. № 3(27) S. 69–73. / Irkutsk: IrGUPS, 2010. (zhurnal ukazan v perechne VAK pod № 1819). (rus.)

[8] **Il'inyh V.A., Rozhkova E.A., Linejcev V.Ju.** Raschet na prochnost' RK-3-profil'nyh soedinenij s natjagom. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2012. № 2(34) / Irkutsk: IrGUPS, 2012. S. 17–20. (zhurnal ukazan v perechne VAK pod № 1819). (rus.)

[9] **Patent na poleznuju model' №142049.** Profil'noe soedinenie val-stupica s ravnoosnym konturom s natjagom / Rozhkova E.A., Il'inyh V.A. Linejcev V.Ju. Gosudarstvennyj reestr poleznyh modelej. Zajavka na patent na poleznuju model' №2013149425 от 06.11.2013 г. Срок dejstvija patenta do 06.11.2023 г. (rus.)

[10] **Patent na poleznuju model' №155119.** Modificirovanoe profil'noe momentoperedajushhee soedinenie val-stupica s ravnoosnym konturom s natjagom /



Il'inyh V.A., Rozhkova E.A., Linejcev V.Ju. Gosudarstvennyj reestr poleznych modelej. Zajavka na patent na poleznuju model' №2015107771 (012545) ot 05.03.2015 g. Srok dejstvija patenta do 05.03.2025 g. (rus.)

[11] **Linejcev V.Ju., Il'inyh V.A.** Imitacionnoe modelirovanie detalej konicheskogo soedinenija na osnove RK-3 profil'nyh krivyh. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie*. 2015. № 2 (46) / Irkutsk: IrGUPS, 2015. S. 51–55. (zhurnal ukazan v perechne VAK pod № 1819). (rus.)

[12] **Linejcev V.Ju., Il'inyh V.A., Jarilov V.E.** Issledovanie konicheskikh RK-3 profil'nyh soedinenij na tochnost' i zhestkost'. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj*

analiz. Modelirovanie. 2017. № 1(53). S. 36–39 / Irkutsk: IrGUPS, 2017. (zhurnal ukazan v perechne VAK pod № 1819). (rus.)

[13] **Patent na poleznuju model' №184076.** Shpin-del'-instrumental'naja opravka / Il'inyh V.A. Gosudarstvennyj reestr poleznych modelej. Zajavka na patent na poleznuju model' №2018109190 ot 14.03.2018 g. Srok dejstvija patenta do 14.03.2028 g. (rus.)

[14] **Chen Z.** Finite element methods and their applications. Berlin, Germany: Springer, 2005.

[15] **Crisfield M.A.** Non-linear finite element analysis of solids and structures. Vol. 1, 2. Wiley, England: Essentials, 1996.

THE AUTHOR

ILYINYKH Viktor A. – *Zabaikalsky railway transport institute*
E-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

Received: 14.10.2018