

ПРИМЕНЕНИЕ КОНИЧЕСКИХ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ШПИНДЕЛЬ-ОПРАВКА В МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКАХ

В статье рассматривается решение проблемы повышения качества моментопередающих соединений шпиндельных узлов многоцелевых станков.

Целью работы является определение контактной жесткости соединений шпindelь-оправка различных типов, на основе проведенных имитационных экспериментов процесса сборки-разборки вспомогательного инструмента различных конструктивных форм в условиях многократных замен.

Выполнен сравнительный анализ математических ожиданий контактной жесткости традиционных и нетрадиционных конических профильных разъемных соединений на основе равноосного контура с числом граней, равным трем, в условиях внешнего нагружения. Полученные результаты позволяют прогнозировать показатели качества многоцелевых станков в рамках проектирования быстроразъемных соединений.

Ключевые слова: конические профильные разъемные соединения с равноосным контуром, многоцелевые станки, вспомогательный инструмент (оправки), шпиндельный узел, контактная жесткость, процесс сборки, многократные замены.

Введение. Многоцелевые станки с ЧПУ, предназначенные для изготовления изделий в условиях мелкосерийного и единичного производства, оснащаются различным вспомогательным инструментом, в состав которых входят базовые оправки типа SK, BT(DBT), HSK, PSK. Как известно, указанные конструкции оправок получили широкое применение в качестве вспомогательного инструмента, которым оснащаются многоцелевые станки, производимые известными фирмами: WFL, Mazak и др.

Постановка задачи. Совершенствование конструкций оправок вспомогательного инструмента направлено на повышение геометрической точности, жесткости, прочности и надежности шпиндельного узла станка в условиях многократной автоматической смены инструмента при изготовлении изделий. Анализ проведенных работ [1–5] показал, что при совершенствовании конструкций инструментальных оправок остаются нерешенными проблемы, важными из которых являются статическая неопределенность при базировании и закреплении оправок в шпинделе, обеспечение контактной жесткости, а также быстрый разъем соединения шпindelь-оправка в условиях многократных смен инструмента.

В отечественном и зарубежном машиностроении известны отдельные случаи применения разъемных профильных соединений деталей машин. Фирма Heinelein и Fette применяют профильные соединения типа P-3 в инструментальных системах.

Для конических соединений, согласно ГОСТ 25548-82, принято четыре способа фиксации осевого положения сопрягаемых конусов, в частности, посадка с фиксацией по величине силы закреплена

(сборки), приложенной в начальном положении сопрягаемых конусов. Данный способ применяется для оправок типа SK (ГОСТ ИСО 7388-3-2014, ISO 7388) и BT (JISB 6339), широко используемых на многоцелевых станках с ЧПУ.

Для оправок типа DBT (JMTBA MAS-403) применяется посадка с фиксацией по заданному осевому расстоянию между базовыми плоскостями сопрягаемых конусов шпинделя и оправки. Для оправок типа HSK (ISO 12164, DIN 69893, ГОСТ Р ИСО 12164) и PSK (конус Capto ISO 26623) применяется посадка с фиксацией путем совмещения конструктивных элементов сопрягаемых конусов («конус-торец»).

Результаты экспериментов. Научные и практические исследования, проведенные авторами работ [6–9], определили ряд нерешенных научно-практических задач, одной из которых является обеспечение гарантированной повторяемости точности сборки и разборки, контактной жесткости и прочности приведенных выше конструктивных типов оправок соединений шпиндельных узлов многоцелевых станков в условиях многократных замен. В настоящее время разработаны теоретические положения и предложены инновационные решения конструкций вспомогательных оправок режущего инструмента, отвечающие требованиям конкурентоспособности металлорежущих станков. В частности, предлагаются к внедрению на многоцелевых станках с ручной и автоматической заменой инструмента вспомогательные оправки типа P-3. Это конические профильные разъемные соединения с равноосным контуром с числом граней, равным трем. Геометрическая форма данного типа соединений представлена на рис. 1.

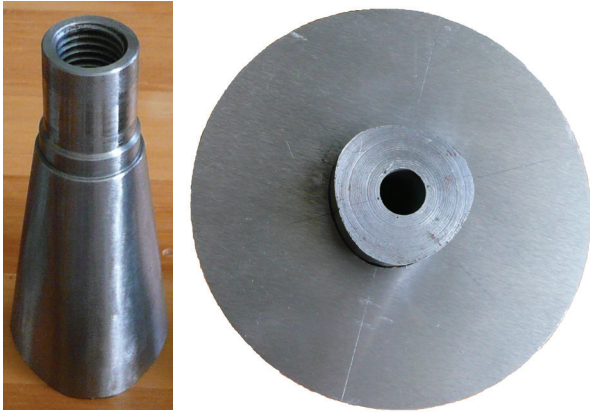


Рис. 1. Детали конического профильного соединения шпindel-оправка

Исследования данного типа оправок, изготовленных с конусностью 7:24, 1:10, 1:20, 1:30, показали, что существует реальная возможность решения задачи исключения неорганизованной смены баз при обеспечении гарантированной геометрической точности, контактной жесткости и прочности соединения шпindel-оправка в условиях многообразных замен на многоцелевых станках вертикальной и горизонтальной компоновки [10–12].

Приведенные конусы оправок отличаются конусностью, которая характеризуется величиной угла конуса (углом уклона), диаметральными размерами и посадочной длиной оправки, а также точностью геометрической формы изготовления профильных деталей соединения с равноосным контуром, которая регламентируется согласно DIN 32711-79 и DIN 32712-79. В конических профильных разъемных соединениях, предназначенных для передачи крутящего момента, радиальных и осевых сил важную роль при разъединении деталей играет угол уклона и шероховатость сопрягаемых конических контактных поверхностей. Последняя связана функционально с триботехническими параметрами сопряжения, в частности, величиной коэффициента трения сцепления и скольжения поверхностей. Как известно большинство разъемных конических соединений как традиционных, так и конических профильных, предназначенных для передачи крутящего момента, работает в условиях сухого трения. В этом случае для расчета сил трения сцепления или скольжения используются известные зависимости. При моделировании процесса сопряжения деталей конических профильных соединений шпindel-оправка (рис. 2) учитывается погрешность геометрической формы посадочной поверхности хвостовика оправки (имитируется шероховатость поверхности). В этом случае когезионная составляющая силы трения будет доминирующей

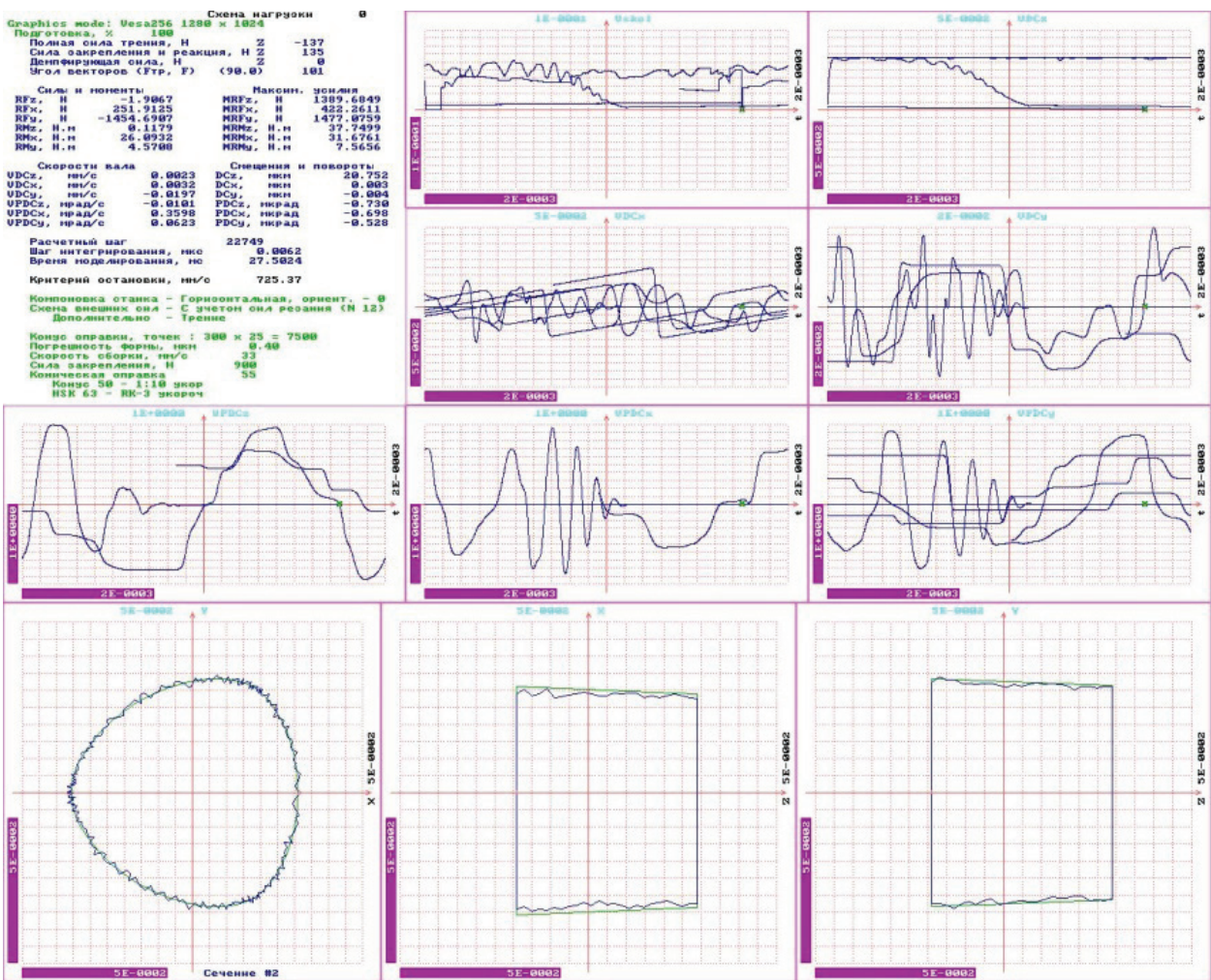


Рис. 2. Фрагмент моделирования процесса сопряжения оправки типа P-3 конусность 1:10

Расчетные величины математических ожиданий поперечной контактной жесткости вспомогательных оправок, Н/мкм

Параметры поперечной контактной жесткости				
Тип конуса	SK (BT)	HSK	PSK	P-3
7:24	389,03	Не производится	Не производится	616,89
1:10	1166,32	от 654,57 до 1000	Не производится	1165,07
1:20	2474,93	Не производится	Не производится	2472,28
Угол уклона 1°15' (1:22,9)	Не производится	Не производится	2832,57	Не производится

Таблица 2

Варианты разборки деталей конического профильного соединения типа P-3

$f_{тр}$		0,15	0,1	0,09	0,08	0,07	0,05	0,04
ρ , град.		8,5307	5,7105	5,1427	4,5739	4,0041	2,8624	2,2906
Угол конуса 2α , град.	7:24	16,2602	16,2602	16,2602	16,2602	16,2602	16,2602	16,2602
	1:10	5,71059	5,71059	5,71059	5,71059	5,71059	5,71059	5,71059
	1:4	14,0362	14,0362	14,0362	14,0362	14,0362	14,0362	14,0362
	1:20	2,86240	2,86240	2,86240	2,86240	2,86240	2,86240	2,86240
	Средн 1:22,91467	2,49881	2,49881	2,49881	2,49881	2,49881	2,49881	2,49881

и зависящей как от величины микронеровностей посадочных поверхностей конической профильной оправки и отверстия в шпинделе, так и от величины коэффициента трения скольжения, соответствующего величине эксплуатационной шероховатости поверхности. В настоящее время при назначении требований к точности изготовления конических профильных поверхностей, как было указано выше, опираются на немецкие стандарты DIN, разработанные для профильных соединений типа РК-3, РКс-3, Кс-4. В работе [13] была доказана возможность технологического обеспечения точности при изготовлении деталей конических профильных трехгранных соединений с равноосным контуром 6 и 7 качества точности, 7 и 8 класса шероховатости поверхности, т.е. Ra 1,6–0,8 мкм.

Исследования, проведенные в представленной работе, ориентированы на неподвижные разъемные моментопередающие соединения шпиндельных узлов станков многоцелевого назначения. Известно, что используемые в данном технологическом оборудовании вспомогательные конические оправки круглого поперечного сечения типа SK, BT(DBT) со специальной конусностью 7:24, а также оправки типа HSK с конусностью 1:10 предназначены для передачи крутящего момента и в процессе работы подвергаются многократным сборкам и разборкам. Данные процессы производят целевые механизмы, например: автооператор и захватное устройство станка в автоматическом режиме согласно программе ЧПУ. При эксплуатации данных типов оправок происходит неорганизованная смена баз,

что значительно влияет на точность и жесткость соединения при высоких оборотах шпинделя станка [2]. Для подтверждения исключения неорганизованной смены баз во время эксплуатации оправок, а также возможной замены традиционно используемых разъемных конических соединений с конусностью 7:24 типа SK и HSK с конусностью 1:10 на конические профильные типа P-3, были проведены имитационные численные эксперименты (рис. 2). При этом моделировались разные условия сборки указанных типов оправок и шпинделя: для различных величин сил закрепления, конусности с учетом погрешности геометрической формы сопрягаемых деталей, при действии условной внешней нагрузки. Было установлено, что при способе фиксации осевого положения конуса по силе закрепления 900 Н, при конусности 1:10 для оправок типа P-3 обеспечивается, с одной стороны, высокая точность, а с другой — контактная жесткость соединения при предельных внешних нагрузках (табл. 1) [6, 10, 12].

При этом решение задачи разъема соединения, а именно моделирование процесса разборки вызвало затруднение. По этой причине был рассмотрен процесс разъема соединения после снятия силы закрепления и условных внешних сил (крутящего момента и радиальной силы) как движение тела (оправки) по наклонной плоскости (развертка отверстия шпинделя) с учетом действия силы тяжести, приложенной в центре масс оправки.

Решение данной задачи известно из теории механизмов и машин [14], откуда следует, что от вели-

чины угла трения и наклона плоскости будет зависеть, является данная пара трения самотормозящей или нет. В нашем случае угол наклона плоскости примем равным углу уклона конуса, а величину угла трения определим из выражения вида [14]:

$$\rho = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + f_{mp}^2}}. \quad (1)$$

По результатам расчета составлена табл. 2, где приведены возможные варианты условий разъема (разборки) деталей конического профильного соединения с равноосным контуром типа Р-3 шпиндель-оправка.

Из анализа возможных вариантов следует, что конические разъемные профильные соединения типа Р-3 с конусностью 7:24 имеют угол уклона значительно большей величины при различных коэффициентах трения скольжения, приведенных в табл. 2, чем угол трения скольжения. Это означает достаточно легкую автоматическую разборку конического профильного соединения после снятия условной внешней нагрузки и силы закрепления при его замене. Анализ результатов имитационного моделирования показывает, что более высокую точность и контактную жесткость обеспечивает конусность 1:10, при передаче крутящего момента до 400 Н м при силе закрепления оправки 900 Н. В то время как коническое профильное соединение с конусностью 7:24 при данной нагрузке имеет недопустимые упругие осевые отжатия (линейные и угловые) оправки, при этом величина передаваемого предельного крутящего момента составляет не более 100 Н·м. В то же время для решения задачи гарантированной автоматической разборки конического профильного соединения типа Р-3 конусностью 1:10 требуется обеспечение контактного взаимодействия посадочных поверхностей оправки и отверстия в шпинделе при значениях коэффициентов трения скольжения в пределах от 0,04 до 0,05. Это можно обеспечить технологически, а именно соответствующим классом шероховатости поверхности трения, с одной стороны, или путем приложения усилия раскрепления до 4000 Н. Применение конических профильных соединений типа Р-3 с конусностью 1:20 возможно, но его автоматическая разборка затруднена в силу малой величины угла уклона. Данное соединение обладает свойством самоторможения, как следует из сравнения величин угла уклона и угла трения, и может быть использовано для соединения основного режущего инструмента и базовой оправки. Необходимо отметить, что применяемые оправки соединений типа «Coromant Capto» являются также самотормозящими и по этой причине для облегчения разъема используется их установка в отверстие шпинделя станка по схеме базирования «конус-торец» [5, 15, 16]. При указанной схеме возникает статическая неопределенность базирования, что влияет на точность изготовления изделий [2, 5, 11]. Поэтому, как правило, соединения оправок тип «Coromant Capto» применяют в черновых и получистовых технологических операциях при обработке изделий.

Выводы.

1. Установлено: при применении оправок типа Р-3 конусностью 1:10 математическое ожидание поперечной контактной жесткости соединения шпиндель-оправка составляет 1165,07 Н/мкм, что в 2,99 раза больше по сравнению с оправками типа SK, BT (DBT) конусностью 7:24 и в 1,88 раза больше

по сравнению с оправками типа Р-3 конусностью 7:24.

2. Установлено, что для автоматического разъема соединения в случае применения оправок типа Р-3 конусностью 1:10 требуется обеспечить шероховатость посадочных поверхностей оправки и отверстия в шпинделе станка для значений коэффициентов трения скольжения от 0,04 до 0,05 и величине силы раскрепления 4000 Н.

Библиографический список

1. Аверьянов О. И., Аверьянова И. О. Модульный принцип построения многоцелевых станков с ЧПУ: моногр. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 164 с.
2. Молодцов В. В. Методы проектирования высокоэффективных металлообрабатывающих станков как мехатронных систем: дис. ... д-ра техн. наук. Москва: Изд-во МГТУ, 2016. 390 с.
3. Пат. 184076 Российская Федерация, МПК F 16 D 1/08. Шпиндель-инструментальная оправка // Ильиных В. А. № 2018109190; заявл. 14.03.18; опубл. 15.10.18, Бюл. № 29.
4. 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.
5. Украженко К. А. Разработка и исследование методов повышения жесткости и быстротенности инструментальных систем многоцелевых станков: дис. ... д-ра техн. наук. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 435 с.
6. Ильиных В. А. Влияние конических профильных соединений на точность и жесткость технологических комплексов многоцелевых станков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24, № 4. С. 150 – 159. DOI: 10.18721/JEST.24415.
7. Ильиных В. А. Статистический анализ геометрии профильных деталей шпиндельного узла многоцелевых станков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 2. С. 132 – 140. DOI: 10.18721/JEST.25210.
8. 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.
9. 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.
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. Pinykh V., Pichuev E. Evaluation of quality parameters of the torque transmission connections of the multi-purpose machine spindle joints // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. 012102. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012102.
12. Pinykh V. Evaluation of quality parameters of conical profile com-pounds in nodes of multi-purpose machines // E3S Web of Conferences. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019). 2019. Vol. 140. 02003. DOI: 10.1051/e3sconf/201914002003.
13. Соломенцев Ю. М., Тимченко А. И. Профильные бесшпоночные соединения, их конструктивные виды, технология изготовления и перспективы внедрения в машиностроительные отрасли СССР. Москва: Мосстанкин, 1986. 37 с.
14. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин. Москва: Наука, 1975. 640 с.

15. Weck M., Reinartz T. Determination of the Load Capacity of HSK Interfaces // Production Engineering. 2004. Vol. 11 (1). P. 99–102.

16. Aoyama T., Inasaki I. Performance of HSK Tool Interfaces under High Rotational Speed // CIRP Annals Manufacturing Technology. 2001. Vol. 50 (1). P. 281–284. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62122-2.

ИЛЬНЫХ Виктор Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Прикладная механика и математика».
SPIN-код: 1446-6405

AuthorID (РИНЦ): 713503

AuthorID (SCOPUS): 57212555086

Адрес для переписки: ilinykh.viktor5@mail.ru

Для цитирования

Ильных 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.

Статья поступила в редакцию 04.12.2020 г.

© В. А. Ильных