

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Возрастающие требования к качеству машин, в частности многоцелевых станков с ЧПУ, определяют задачи, направленные на совершенствование конструкций их ответственных узлов. Целью работы является обеспечение точности, контактной жесткости и долговечности моментопередающих соединений шпиндельных узлов при многократных заменах вспомогательного инструмента на основе применения конических профильных соединений с равноосным контуром. В работе представлены результаты экспериментальных исследований данных соединений на моделях, которые изготавливают из оптически активных материалов, что позволяет наглядно изучить процессы контактного взаимодействия профильных деталей в условиях циклического нагружения. Метод статической фотоупругости при исследовании плоских профильных соединений с равноосным контуром позволил установить на основе анализа картин изохром, что изменение величин максимальных касательных напряжений за оборот профильного соединения подчиняется пульсационному циклу.

**Ключевые слова:** вспомогательный инструмент, профильные соединения с равноосным контуром, метод статической фотоупругости, поля напряжений, перемещение малых амплитуд.

**Введение.** Основные положения модульного принципа конструирования и изготовления многоцелевых станков с ЧПУ предложены и разработаны профессором Аверьяновым О. И. [1, 2]. Модульный принцип проектирования МС позволяет решить ряд научно-практических задач, а именно обеспечение высокой точности, контактной жесткости и долговечности отдельных модулей станка, например, модульной системы вспомогательного инструмента на основе внедрения инновационных конструкций моментопередающих соединений с профильной поверхностью деталей машин типа PSK (Carpo) и P3 (PK-3 профиль).

При выборе модульной системы вспомогательного инструмента наибольший интерес представляет подсистема вспомогательного инструмента для станков с ЧПУ фрезерно-сверлильных-расточных групп [1]. Возрастающие требования к качеству МС, в частности точности и производительности при значительном увеличении числа оборотов шпинделя до 45000 об/мин при высокоскоростной обработке, привели к новой концепции резания, из которой вытекают новые конструктивные решения при базировании и закреплении конических хвостовиков вспомогательного инструмента в шпинделе станка. Начиная с 1998 г. в шпиндели МС стали интегрировать соединения на базе оправок типа HSK и PSK с ручной и автоматической заменой, которые наиболее часто используются при скоростях вращения шпинделя от 10000 об/мин до 30000 об/мин и выше [3–7]. Однако, несмотря на значительные техноло-

гические и эксплуатационные преимущества, указанные соединения имеют и серьезные недостатки, к которым можно отнести статическую неопределенность базирования [7]. Неорганизованная смена баз в соединении в процессе изготовления изделий приводит к потере точности изготавливаемой детали в результате отжата базовых (торцевых) поверхностей оправки и шпинделя. Во многом это определяется точностью изготовления наружного и внутреннего конусов, а также выбором величины силы закрепления оправки при фиксации в осевом направлении путем совмещения конструктивных элементов соединения шпиндель – оправка.

Попытки повышения степени точности при изготовлении посадочных конусов поверхностей оправок не позволяют в полной мере обеспечить требуемую точность соединения и, как следствие, точность изготовления изделий. Некоторые производители станков, проверив на практике преимущества профильных соединений типа PSK, стали интегрировать их в базовый шпиндель станка, например, WFL, Mazak [7–9]. Однако статическая неопределенность базирования оправок при выбранном способе фиксации в осевом направлении при посадке с зазором позволяет применять их на черновых и получистовых операциях.

В работах [10–12] рассмотрены и решены задачи обеспечения контактной прочности и жесткости профильных разъемных и неразъемных соединений типа вал – втулка, выполненных по посадке с зазором и натягом при нагружении крутящим мо-

ментом. При этом остаются неизученные вопросы изменения упругих перемещений и напряжений в стыках профильных соединений при действии комплексной нагрузки, что важно для оценки их несущей способности в условиях циклического нагружения.

При механической обработке изделий вспомогательный инструмент МС находится в условиях действия знакопеременных сил. Совместное действие контактного давления и циклических касательных перемещений малых амплитуд, которые являются следствием упругих деформаций конического хвостовика вспомогательного инструмента и отверстия шпинделя, может являться причиной возникновения фреттинг-износа стыков конического соединения.

**Материалы и методы.** В статье представлены результаты экспериментальных исследований моделей моментопередающих соединений деталей на основе профильных соединений с равноосным контуром методом статической фотоупругости. Исследование данных соединений на объемных моделях не представлялось возможным, поэтому было получено приближенное решение, которое сведено к рассмотрению деформаций плоских моделей.

При исследовании контактных задач достаточно часто применяются методы фотомеханики. Последние отличаются наглядностью и позволяют исследовать не только напряженное состояние взаимодействующих тел по всему объему и определить составляющие тензора напряжений, но и визуально проследить, как изменяется напряженно-деформированное состояние стыков соединений различных геометрических форм и размеров, а также разного положения взаимодействующих деталей соединения относительно друг друга при реализации схем нагружения.

Теории подобия и размерностей, представленные в работах М. М. Фрохта, Н. И. Пригоровско-

го, О. К. Славина, Н. Д. Тарабасова, Б. Н. Ушакова, В. Ф. Трумбачева [13–15], позволяют решать широкий класс контактных задач и с достаточной степенью точности оценивать напряженное состояние в натуре и модели.

**Исследование напряженно-деформированного состояния соединений.** Для проведения исследований НДС профильных соединений были применены оптически чувствительные высокомодульные материалы, из которых были изготовлены модели вала и втулки с равноосным контуром. В качестве материала моделей применялся оптически активный компаунд на основе эпоксидной смолы, отвержденной малеиновым ангидридом (ЭД-16МА). Толщина пластин материала моделей равна  $b = 6$  мм. Точность определения величин углов контакта и разности главных напряжений обеспечивалась как технологией изготовления моделей, так и техникой проведения эксперимента. Каждая модель соединения представляла собой втулку и вал с равноосным контуром (рис. 1–2).

Исследование профильного соединения плоских моделей из оптически чувствительного материала методом статической фотоупругости сделало возможным оценить влияние геометрической формы, величины радиального зазора, условий эксплуатации (схем нагружения) и величин углов, характеризующих положение деталей соединения при косвенном учете погрешности формы на изменение величин контактного угла и максимальных касательных напряжений в зоне сопряжения.

В ходе эксперимента для каждого случая нагружения исследовались положения профильного соединения по отношению к направлению линии действия радиальной силы. Предполагалось, что распределение нагрузки на контактирующих поверхностях при той или иной схеме нагружения за-

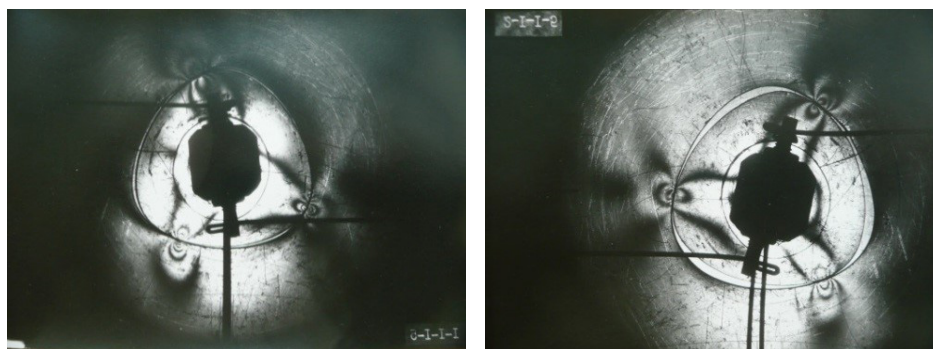


Рис. 1. Напряженное состояние моделей № 1 и № 2 при схеме нагружения крутящим моментом

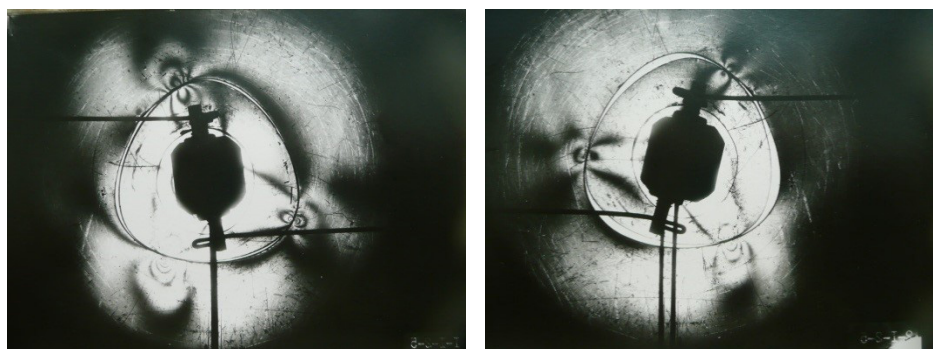


Рис. 2. Напряженное состояние моделей № 1 и № 2 при схеме нагружения крутящим моментом и радиальной силой

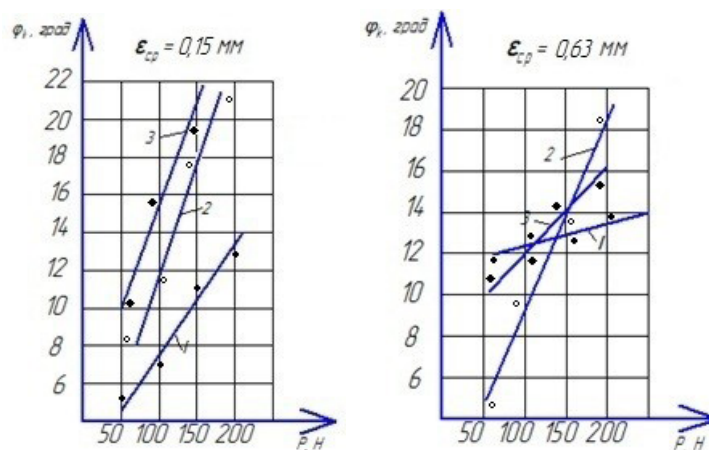


Рис. 3. Зависимость величины контактных углов от внешней нагрузки

висит от принятого положения, характеризуемого углом положения  $\psi$ .

Установлено, что характер изменения величины контактного угла и касательных напряжений для каждой из трех зон контакта разный как при передаче соединением крутящего момента, так и при учете дополнительно действия радиальной силы.

В первом случае это объясняется исключительно погрешностью геометрической формы сопрягаемых моделей соединения.

Во втором случае это объясняется как погрешностью геометрической формы сопрягаемых моделей, так и перераспределением контактных напряжений в зонах от действия дополнительно радиальной нагрузки (рис. 1 и 2).

При анализе графических зависимостей величины контактного угла от действия внешней нагрузки при передаче соединением крутящего момента и радиальной силы для соответствующих моделей № 1, № 2 установлено изменение величины контактного угла от принятого положения соединения.

По результатам оценки величин контактных углов можно сделать следующие выводы, а именно: величина контактных углов при передаче с соединением крутящего момента возрастает с увеличением нагрузки. Характер возрастания близок к линейному закону. Величина контактного угла при передаче соединением крутящего момента и радиальной силы изменяется для каждой контактной зоны соединения и зависит от величины угла относительного положения  $\psi$  соединения (рис. 3).

Величину максимальных касательных напряжений рассчитывают по известной зависимости Тимошенко С. П.:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sigma_0 \cdot l, \quad (1)$$

где  $\tau_{\max}$  — максимальное касательное напряжение;  $l$  — порядок полосы;  $\sigma_0$  — цена полосы модели.

Порядок полосы определяют подсчетом количества полос для каждой контактной зоны в сопряжении из общей картины напряженного состояния, которая фиксируется на фотографии или на экране БПУ — ИМАШ-КБ2.

Цену полосы модели определяют по формуле Фрохта М. М [14]:

$$\sigma_0 = \frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot t} = \frac{\sigma_0^{1,0}}{t}, \quad (2)$$

где  $\sigma_0^{1,0}$  — цена полосы материала, равная  $\frac{\lambda}{2 \cdot c}$ , полученная при толщине модели в 1,0 мм.

Цена полосы материала установлена экспериментально на координатно-синхронном поляриметре КСП-7 компенсационным методом.

По найденным значениям величин максимальных касательных напряжений, построены соответствующие зависимости для рассматриваемых моделей соединения, схем внешних нагрузок и положений соединения (рис. 4).

Для определения влияния радиальной силы на напряженное состояние стыков проведена сравнительная оценка рассматриваемых моделей соединения № 1 и № 2 для наиболее нагруженных зон контакта при передаче крутящего момента, крутящего момента и дополнительно радиальной силы. Величина средних зазоров в модели соединения № 1 составила 0,15 мм, в модели соединения № 2 — 0,63 мм.

Сравнительная оценка параметров контакта при разных схемах нагружения и зазорах показала существенное влияние радиальной силы  $F_r$  комплексной нагрузки ( $M_{кр}$ ,  $F_r$ ). Под действием радиальной силы величина максимальных касательных напряжений увеличилась на 37,5 %, при увеличении контактного угла на 36,9 % для модели соединения № 1 и для модели соединения № 2 — на 20 % и на 24,5 % соответственно.

Существенное влияние вращающаяся радиальная сила оказывает на усталостное разрушение контактных поверхностей стыков круглых и профильных деталей соединений.

По полученным экспериментально значениям величин углов контакта, расчетным значениям величин максимальных касательных напряжений, картинам полос интерференции (изохром) можно оценить влияние геометрической формы, размеров, конструктивных параметров (зазоров) и условий эксплуатации (схем нагружения, положений) на распределение полей напряжений стыков и смещений моделей профильного соединения.

Можно считать, что влияние радиальной силы ощутимо, так как она приводит к значительному изменению величин максимальных касательных напряжений в зонах контактного взаимодействия.

На практике доказано, что после определенного времени эксплуатации при действии переменных касательных напряжений контактная поверхность

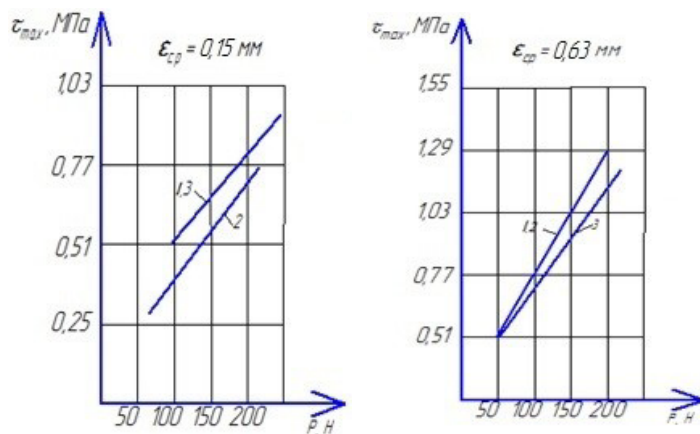


Рис. 4. Зависимость величины максимальных касательных напряжений от внешней нагрузки

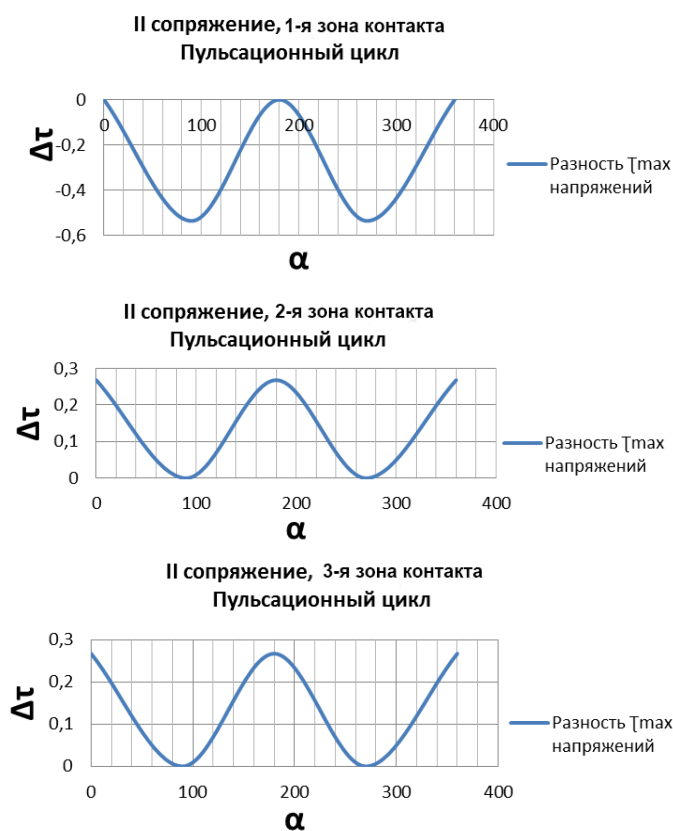


Рис. 5. Графические зависимости изменения касательных напряжений, МПа

данного соединения изнашивается при напряжениях ниже тех, которым надежно сопротивляется при действии статической нагрузки.

При расчетах профильных соединений с равноосным контуром были взяты исходные данные величин максимальных касательных напряжений для моделей соединения № 1 и № 2. Были исследованы напряженное состояние контактных зон моделей соединения для различных угловых положений соединения (при углах от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ ), а именно определена разность величин максимальных касательных напряжений при действии момента кручения и момента кручения и радиальной силы.

Установлены пределы, изменения интервалов значений разности величин максимальных касательных напряжений при действии внешней нагрузки за период работы соединения, по которым

установлены циклы переменных максимальных касательных напряжений для каждой контактной зоны соответствующей модели (рис. 5).

Анализ результатов исследований показал, что изменение переменных максимальных касательных напряжений в зоне контакта при передаче комплексной нагрузки соединением за оборот подчиняется периодическому закону, который близок синусоидальному. Поскольку величина амплитуды касательных напряжений также изменяется для зон контакта при работе соединения на соответствующей ступени нагружения, можно считать, что стыки профильного соединения работают в условиях нестационарного режима.

Работа реального профильного соединения в подсистеме вспомогательного инструмента в условиях переменных касательных напряжений при



циклически изменяющихся касательных перемещениях малых амплитуд может являться причиной процесса фреттинг-износа стыков в соединении, что понижает его эксплуатационную точность и контактную жесткость.

#### Выводы.

1. В результате исследования моделей профильных соединений с равноосным контуром, изготовленных из оптически чувствительных материалов, установлено, что под действием радиальной силы величина максимальных касательных напряжений увеличилась на 37,5 %, при увеличении контактного угла на 36,9 % для модели соединения № 1 и для модели соединения № 2 на 20 % и на 24,5 % соответственно.

2. Анализ картин изохром при проведении расчетов НДС показал, что изменение величин максимальных касательных напряжений за оборот профильного соединения подчиняется пульсационному циклу.

#### Библиографический список

1. Аверьянов О. И., Аверьянова И. О. Модульный принцип построения многоцелевых станков с ЧПУ: моногр. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 164 с.
2. Соломенцев Ю. М., Косов М. Г., Митрофанов В. Г. Моделирование точности при автоматизированном проектировании металлорежущего оборудования. Москва: НИИМАШ, 1985. 68 с.
3. P'inykh 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.
4. P'inykh 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.
5. Weck M., Reinartz T. Determination of the Load Capacity of HSK Interfaces // Production Engineering. 2004. Vol. 11 (1). P. 99–102.
6. 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.
7. Молодцов В. В. Методы проектирования высокоэффективных металлообрабатывающих станков как мехатронных систем: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2016. 390 с.
8. 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. С. 138–140.
9. Украженко К. А. Разработка и исследование методов повышения жесткости и быстротенности инструментальных систем многоцелевых станков: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2007. 435 с.
10. Ильиных В. А. 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 / YEST.24415.
11. Линеицев 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.
12. 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.
13. Пригоровский Н. И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений. Москва: Машиностроение, 1983. 105 с.
14. Фрохт М. М. Фотоупругость. В 2 т. / пер. с англ. М. Ф. Бокштейн, Ю. Ф. Красонтович, А. К. Прейс; под ред. Н. И. Пригоровского. Москва–Ленинград: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1948. Т. 1. С. 170.
15. Ильиных В. А., Косов М. Г. Оценка влияния конструктивных параметров на напряженное состояние стыков РК-профильных соединений поляризационно-оптическим методом (статья) // Вестник машиностроения 1990. № 11. С. 64–66.

**ИЛЬИНЫХ 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

Ильиных В. А. Экспериментальные исследования профильных соединений деталей машин в условиях циклического нагружения // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 24–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-24-28.

Статья поступила в редакцию 23.09.2021 г.

© В. А. Ильиных