

DOI: 10.18721/JEST.26211
УДК 621.9.02

В.А. Ильиных

Забайкальский институт железнодорожного транспорта, Чита, Россия

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ КОНИЧЕСКИХ ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ

В статье проведен анализ точности установки инструментальных конических профильных оправок с конусностью 7:24, 1:10, 1:20 в отверстие шпинделя станка по шести координатам. Шпинделю после сборки соединения, сообщалось вращательное движение с числом оборотов, которое характерно при высокоскоростной обработке изделий. В дальнейшем инструментальная оправка нагружалась условной внешней нагрузкой (от сил резания). Расчетным путем получены математические ожидания упругих перемещений (изменение положения оправки в отверстии шпинделя) по шести координатам в условиях многоразовой сборки. В каждом расчетном случае проведено сравнение точности взаимного положения деталей РК-3 профильного соединения для разных чисел оборотов при его эксплуатации (работе) под действием условной внешней нагрузки. Величины поперечных перемещений деталей соединения при технологической погрешности геометрической формы посадочной поверхности профильной конической оправки типа РК-3 при числе оборотов от 10000 до 48000 в минуту составляют не более 3,5 мкм при конусности 1:10 и не более 5 мкм при конусности 7:24. Соответственно при числе оборотов от 50000 до 95500 в минуту составляет не более 4,5 мкм при конусности 1:10 и не более 8 мкм при конусности 7:24 на торце соединения.

Ключевые слова: коническое профильное соединение, многоцелевые станки, шпиндель, инструментальные оправки, конусность.

Ссылка при цитировании:

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

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

V.A. Ilyinykh

Zabaikalsky railway transport institute, Chita, Russia

ESTIMATION OF ACCURACY OF CONICAL PROFILE JOINTS OF AUXILIARY TOOLS OF A MULTI-PURPOSE MACHINE FOR HIGH-SPEED PROCESSING

The article analyzes the accuracy of installation of tool conical profile mandrels with taper 7:24, 1:10, 1:20 into the hole of the machine spindle at six coordinates. After assembly of the connection the spindle received rotary motion with a speed rate typical for high-speed processing. Thereafter, the tool mandrel was loaded with a conditional external load (from cutting forces). We calculated mathematical expectations of elastic displacements (change in the position of the mandrel in the spindle hole) for six coordinates in the conditions of reusable assembly. In each calculation case, we compare the accuracy of the relative position of the RC-3 profile connection parts for different speed numbers during its operation under

the influence of a conditional external load. Cross travel values of connection parts with a technological error in the geometric shape of the landing surface of a profile conical mandrel of the P-3 type at a speed rate of 10000 to 48000 rpm are no more than 3.5 microns at a taper of 1:10 and no more than 5 microns at a taper of 7:24. Accordingly, with a speed rate 50000 to 95500 rpm the values are no more than 4.5 microns with a taper of 1:10 and no more than 8 microns with a taper of 7:24 at the end of the connection.

Keywords: conical profile connection, multi-purpose machines, spindles, tool mandrels, taper.

Citation:

V.A. Pyinykh, Estimation of accuracy of conical profile joints of auxiliary tools of a multi-purpose machine for high-speed processing, *Materials Science. Power Engineering*, 26 (02) (2020) 140–147, DOI: 10.18721/JEST.26211

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение. В статье представлено исследование конических профильных соединений с равноосным контуром типа РК-3 в узле шпиндель – инструментальная оправка многоцелевого станка. Определена точность соединения шпиндель – инструментальная оправка при базировании и закреплении в условиях многоразовой сборки, а также при сообщении шпинделю станка вращательного движения при действии внешней нагрузки. С этой целью на основе разработанных математических моделей конических профильных посадочных поверхностей оправки и отверстия шпинделя выполнены машинные эксперименты в условиях многоразовых сборок при замене инструментальных оправок.

Рациональный выбор многоцелевого станка с ЧПУ зависит от его технологических возможностей и технических характеристик. В настоящее время при выборе станка учитывают три критерия, которые определяют его потребительские свойства, а именно: надежность, точность и интеллект [1].

Надежность, как правило, является основным критерием при определении качества станка, точность станка также является важным критерием, от которого зависит конкурентно способность современных многоцелевых станков. Третий критерий интеллект, предполагает обеспечение вновь создаваемого станка различными интеллектуальными интерфейсами, которые расширяют эксплуатационно-технологические возможности станка, обеспечивая при этом высокое качество изготавливаемых изделий и обладающих способностью заблаговременно исключить ошибки в управлении [1].

В работах российских ученых [2, 3], были созданы основы для проектирования современных технологий, обеспечивающих основные параметры качества металлорежущих станков, а также разработаны концепции для моделирования точности при автоматизированном проектировании и эксплуатации металлорежущего оборудования с применением профильных соединений [4].

Современное развитие вычислительной техники, создание новых программных комплексов определили новые подходы в решении задач прогнозирования параметров качества технологического оборудования, в частности многоцелевых станков с ЧПУ, а также применение инновационных решений для высокоскоростной обработки изделий на станках.

Целью исследования является прогнозирование точности узла многоцелевого станка шпиндель – инструментальная оправка на основе конического профильного соединения типа РК-3 для разных чисел оборотов шпинделя.

Методы исследования

При исследовании процесса сопряжения конической профильной оправки в отверстии шпинделя станка при ее базировании и закреплении в условиях многоразовой сборки, применялся метод численного расчета, а также технологические имитационные модели хвостовиков инструментальных оправок и оригинальное программное обеспечение, приведенные в работах [5, 6].

Обработка результатов исследования проведена с использованием методов математической статистики, прикладной и вычислительной математики.

Высокоскоростная обработка – High speed cutting (HSC) изделий является одним из перспективных направлений в машиностроении. Как известно, основным принципом высокоскоростной обработки (ВСО) является малое сечение среза материала изделия при высокой скорости резания, высокой минутной подаче и высокой частоте вращения шпинделя станка. Известно, что при этом снижается величина крутящего момента, до 75% тепла отводится со стружкой, 20% отводится через инструмент и 5% через обрабатываемую деталь. Таким образом, при ВСО обеспечиваются высокие параметры качества обработки, увеличивается производительность, наиболее эффективно используются станки с ЧПУ, а также обеспечивается обработка материалов, склонных к перегреву и материалов высокой твердости. Наиболее эффективно применение ВСО при изготовлении тонкостенных алюминиевых деталей большой протяженности при числе оборотов шпинделя от 15000 до 50000 об/мин и скорости резания от 1500 до 3000 м/мин, а также при обработке штампов и пресс-форм, которые характеризуются жесткими допусками на размеры и высоким классом шероховатости поверхности. ВСО применяется также при изготовлении деталей малых размеров и продукции нано технологии.

При применении ВСО современные станки должны обладать высокой геометрической точностью, высокой статической и динамической жесткостью, температурной стабильностью, а также обеспечивать свободный сход стружки. С этой целью в металлорежущих станках применяются высокоскоростные шпиндели, которые оснащаются различными датчиками, определяющими фактическое положение шпиндельного вала, температуру и вибрацию. Так называемые «умные» шпиндели обеспечивают надежность станков по показателю долговечность и реализуют безлюдную технологию. Особые требования при ВСО предъявляются к режущему инструменту в частности использование инструмента небольшого диаметра от 15 до 20 мм, а также фрез оснащенных пластинами с кубическим нитридом бора (КНБ) и поликристаллическим алмазом (ПКА) [7].

Вспомогательный инструмент, предназначенный для крепления основного режущего инструмента, изготавливается по типу HSK или BT (SK). При этом коническое соединение должно обладать высокой статической и динамической жесткостью, точностью, а также свойством самоцентрирования при высоких скоростях вращения. Это позволяет уменьшить биение инструмента до нескольких микрометров и увеличить срок службы режущих пластин в несколько раз, т.е. повысить его стойкость.

В настоящее время проведены исследования вспомогательного режущего инструмента на основе профильных конических соединений с равноосным контуром типа РК-3 (P3). Результаты экспериментальных и теоретических исследований, приведенные в работах [8, 9, 10, 11, 12], доказывают эффективность и целесообразность использования данных соединений вместо традиционных при совершенствовании конструкций шпиндельных узлов многоцелевых станков с ЧПУ.

Результаты расчетов при моделировании точности установки (базирование и закрепление) профильных конических инструментальных оправок типа РК-3 при их многократной замене в шпинделе многоцелевого станка с учетом действия внешней нагрузки для разных чисел оборотов главного привода приведены на рис. 1–2.

Анализ расчетов точности профильного конического соединения шпиндель-оправка типа РК-3 (P3) с конусностью 7:24, 1:10, 1:20 в условиях многократной сборки и сравнение с результатами расчетов соединений типа SK и HSK, приведенными в работах [13, 14, 15, 16, 17], показывают, что первый тип соединения имеет более высокую точность.

В результате проведенных расчетов установлено, что величина математических ожиданий поперечных перемещений профильной оправки типа РК-3 в условиях внешнего нагружения при конусности 1:10 составляет не более 3,5 мкм при числе оборотов шпинделя равном 48000 в ми-

нугу, а величина математических ожиданий продольных смещений составляет не более 16,5 мкм. Как следует из анализа работы [13] для оправок типа HSK и SK конусностью 1:10 и 7:24, радиальные и осевые смещения оправок лежат в интервале значений от 4 до 14 мкм и от 10 до 16 мкм соответственно, при числе оборотов шпинделя 30000 минуту для меньших величин внешних нагрузок.

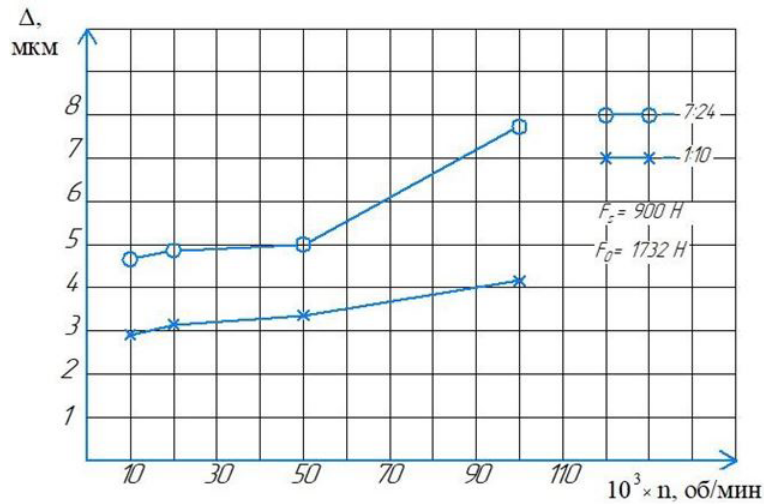


Рис. 1. Зависимость математических ожиданий поперечных перемещений оправки от числа оборотов шпинделя

Fig. 1. Dependence of mathematical expectations transverse movements of the mandrel from the number of revolutions of the spindle

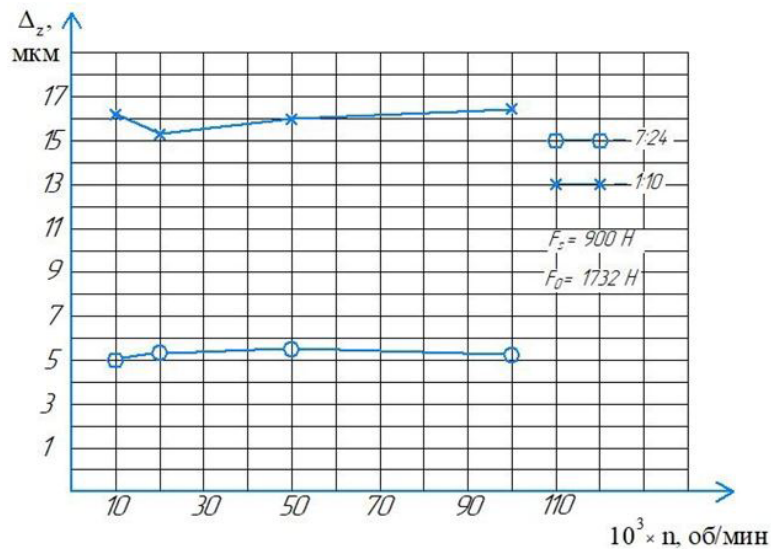


Рис. 2. Зависимость математических ожиданий осевых перемещений оправки от числа оборотов шпинделя

Fig. 2. Dependence of mathematical expectations axial movements of the mandrel from the number of revolutions of the spindle

Исследования показали, что при выборе рациональной конусности посадочной профильной поверхности хвостовика инструментальных оправок, следует учитывать как продольные, так и поперечные смещения последних. При проведении сравнительного анализа математических ожиданий упругих перемещений торца базовой оправки, в продольном и поперечном

направлении при числе оборотов шпинделя равном 95500 об/мин установлено, что при конусности 1:4 достигается паритет между перемещениями, величина которых не превышает 6,5 мкм (рис. 3).

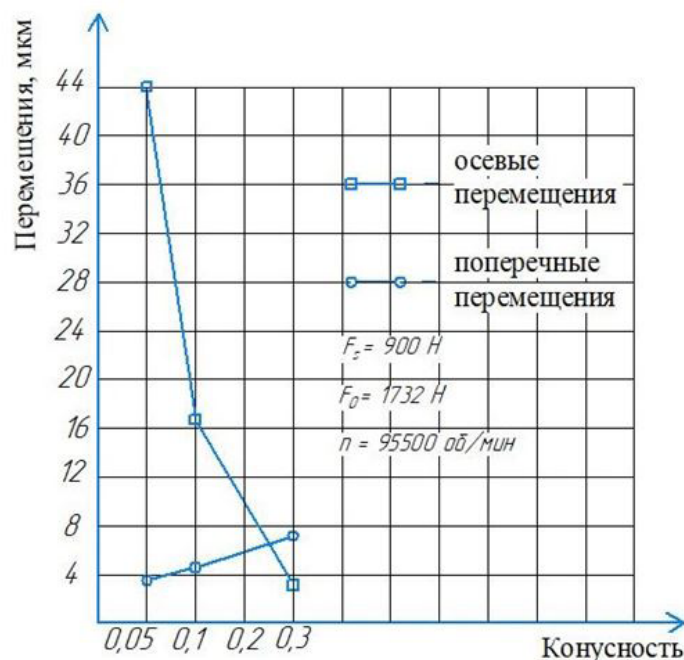


Рис. 3. Зависимость математических ожиданий перемещений оправки от конусности
 Fig. 3. Dependence of mathematical expectations movement of the mandrel from the taper

Не маловажной задачей при ВСО является также выбор способа крепления основного режущего инструмента, а именно: использование термопластов и гидропластовых патронов, а также балансируемых патронов, которые могут работать при числе оборотов до 100000 об/мин.

Согласно техническим требованиям, предъявляемым к современным металлорежущим станкам, полное радиальное биение (TIR) должно не превышать 10 мкм на вылете инструмента до 250 мм.

Выводы

1. Установлено, что на точность положения конической профильной оправки в шпинделе станка влияет количество оборотов. С ростом числа оборотов шпинделя упругие перемещения оправки в условиях внешнего нагружения в поперечном направлении носят нелинейный возрастающий характер.
2. Установлено, что при числе оборотов шпинделя от 10000 до 48000 в минуту величина математических ожиданий поперечных перемещений профильной оправки в условиях внешнего нагружения не более 3,5 мкм при конусности 1:10 и не более 5 мкм при конусности 7:24. При числе оборотов от 50000 до 95500 в минуту величина математических ожиданий поперечных перемещений профильной оправки не более 4,5 мкм и 8 мкм соответственно.
3. Установлено, что величина математических ожиданий продольных перемещений профильной оправки в условиях внешнего нагружения не более 16,5 мкм при конусности 1:10 и не более 3,5 мкм при конусности 7:24 при числах оборотов шпинделя станка от 48000 до 95500 в минуту.
4. Установлено, что величина экстремальных значений математических ожиданий продольных и поперечных перемещений профильной оправки в условиях внешнего нагружения при числе оборотов шпинделя 95500 в минуту при конусности 1:4 составит не более 6,5 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Аверьянов О.И., Аверьянова И.О.** Модульный принцип построения многоцелевых станков с ЧПУ: монография / О.И. Аверьянов, И.О. Аверьянова. – Старый Оскол: ТНТ, 2018. – 164 с.
- [2] **Балакшин Б.С.** Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакшин – М.: Машиностроение, 1969. – 358 с.
- [3] **Соломенцев Ю.М.** Моделирование точности при автоматизированном проектировании металлорежущего оборудования / Ю.М. Соломенцев, М.Г. Косов, В.Г. Митрофанов. – М.: НИИ-МАШ, 1985. – 68 с.
- [4] **Соломенцев Ю.М., Тимченко А.И.** Профильные бесшпоночные соединения, их конструктивные виды, технология изготовления и перспективы внедрения в машиностроительные отрасли СССР // К: Мосстанкин. – 1986. – 37 с.
- [5] **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
- [6] **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
- [7] **Молодцов В.В.** Методы проектирования высокоэффективных металлообрабатывающих станков как мехатронных систем: дис. докт. техн. наук: 05.02.07 / Молодцов Владимир Владимирович. – Москва, МГТУ, 2016. – 390 с.
- [8] **Линейцев В.Ю.** Имитационное моделирование деталей конического соединения на основе РК-3 профильных кривых / Линейцев В.Ю., Ильиных В.А. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Научный журнал № 2 (46) – Иркутск: ИрГУПС 2015. – С. 51–55. (журнал указан в перечне ВАК под № 1819).
- [9] **Линейцев В.Ю.** Исследование конических РК-3 профильных соединений на точность и жесткость / В.Ю. Линейцев, В.А. Ильиных, В.Е. Ярилов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. – № 1 (53). – 2017. – С. 36–39. (журнал указан в перечне ВАК под № 1819).
- [10] Шпиндель-инструментальная оправка // Ильиных В.А. – Патент на полезную модель: № 184076, Государственный реестр полезных моделей. Заявка на патент на полезную модель № 2018109190 от 14.03.2018 г. Срок действия патента до 14.03.2028 г.
- [11] Модифицированное профильное моментопередающее соединение вал-ступица с равноосным контуром с натягом // Ильиных В.А., Рожкова Е.А., Линейцев В.Ю. – Патент на полезную модель: № 155119, 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.
- [12] **Пшеничникова Н.А.** Применение метода кумулятивных сумм при оценке погрешности формы профильных валов / Н.А. Пшеничникова, Н.В. Пешков, В.А. Ильиных // Научно-технический вестник Поволжья. № 1 2019. – Казань ООО «Научно-технический вестник Поволжья», 2019. – С. 126–128.
- [13] **Акмаев О.К.** Оценка работоспособности инструментальных оправок при высокоскоростной обработке деталей на многоцелевых станках / О.К. Акмаев, Р.Г. Кудояров, Р.Р. Башаров // Уфа: Вестник УГАТУ. – Т. 13 – 2009. – № 1 (34). – С. 138–140.
- [14] **Акмаев О.К.** Моделирование жесткости оригинального станка с параллельной кинематикой / О.К. Акмаев, Б.А. Еникеев, А.И. Нигматуллин // М.: СТИН. – 2015. – № 11. – С. 8–12.
- [15] **Weck M.** Determination of the Load Capacity of HSK Interfaces / M. Weck, T. Reinartz // Production Engineering. – 2004. – 11 (1) – pp. 99–102.
- [16] **Aoyama T.** Performance of HSK Tool Interfaces under High Rotational Speed / T. Aoyama, I. Inasaki // CIRP Annals Manufacturing Technology. – 2001. – 50 (1) – pp. 281–284.

[17] **Hanna I.M.** Modeling the HSK Toolholder-Spindle Interface / I.M. Hanna, J.S. Agapiou, D.A. Stephenson // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2002. – 124 (3) – pp. 734–744.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ИЛЬИНЫХ Виктор Анатольевич – доцент, Забайкальский институт железнодорожного транспорта, канд. техн. наук.

E-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 15.05.2020

REFERENCES

[1] **O.I. Averyanov, I.O. Averyanova**, Modular principle of construction of multi-purpose CNC machines: monograph / O. I. Averyanov, I. O. Averyanova. – Stary Oskol: TNT, 2018. – 164 p.

[2] **B.S. Balakshin**, Fundamentals of mechanical engineering technology / B. S. Balakshin-M.: mechanical engineering, 1969. – 358 p.

[3] **Yu.M. Solomentsev**, Modeling accuracy in automated design of metal-cutting equipment / Yu.M. Solomentsev, M.G. Kosov, V.G. Mitrofanov. – M.: NIIMASH, 1985. – 68 p.

[4] **Yu.M. Solomentsev, A.I. Timchenko**, Profilnye besponochnye splices, their constructive types, manufacturing technology and prospects for implementation in the machine-building industries of the USSR // K: Mosstankin. – 1986. – 37 p.

[5] **V.A. Il'nykh**, The effect of conical profile joints on the accuracy and rigidity of technological sets of multi-purpose machines // Scientific and Technical Journal of SPbPU. Natural and engineering sciences. 2018. Vol. 24. No. 4. S.150-159. DOI: 10.18721/YEST.24415

[6] **V.A. Il'nykh**, Statistical analysis of the geometry of the profile parts of the spindle assembly of multi-purpose machines // Scientific and Technical Journal of SPbPU. Natural and engineering sciences. 2019. Vol. 25. No. 2. S. 132–140. DOI: 10.18721/JEST.25210

[7] **V.V. Molodtsov**, Methods of designing highly efficient Metalworking machines as mechatronic systems: Diss. Doct. Techn. science: 05.02.07 / Vladimir V. Molodtsov. – Moscow, MSTU, 2016. – 390 p.

[8] **V.Yu. Lineytssev**, Simulation modeling of details of conical connection on the basis of P-3-profile curves / Lineytssev V.Yu., Il'nykh V.A. // Modern technology. System analysis. Modeling. Scientific journal № 2 (46) – Irkutsk: IrGUPS 2015. – S. 51–55. (the journal is listed VAK under № 1819).

[9] **V.Yu. Lineytssev**, Study of conical P-3-profile compounds for accuracy and stiffness / V.Yu. Lineytssev, V.A. Il'nykh, V.Ye. Yarilov // Modern technology. System analysis. Modeling. – Irkutsk: IrGUPS. – № 1 (53). – 2017. – S.36-39 (the journal is listed VAK under № 1819).

[10] Spindle-tool mandrel // Il'nykh V.A. – Utility model patent: №184076, State register of utility models. Patent application for utility model № 2018109190 at 14.03.2018. The term of the patent to 14.03.2028.

[11] Modified profile torque-transmitting connection shaft-hub with equiaxed contour with tension // Il'nykh V.A., Rozhkova E.A., Lineytssev V.Yu. – utility model Patent: No. 155119, State register of utility models. Application for utility model patent no. 2015107771 (012545) dated 05.03.2015 The term of the patent to G. 05.03.2025.

[12] **N.A. Pshenichnikova**, Application of the method of cumulative sums in estimating the error of the shape of profile shafts / N.A. Pshenichnikova, N.V. Peshkov, V.A. Il'nykh // Scientific and technical Bulletin of the Volga region. No. 1 2019. – Kazan LLC "Scientific and technical Bulletin of the Volga region", 2019. – p. 126–128.

[13] **O.K. Akmaev**, Evaluation of the designer's work complete set at high speed of data processing on multi-purpose machines / O.K. Akmaev, R.G. Kudesanova, R.R. Sharamov // Ufa: UGATU Bulletin. 13 – 2009. – № 1 (34). – pp. 138–140.

[14] **O.K. Akmaev**, Modeling the hardness of the original machine with parallel kinematics / O.K. Akmaev, B.A. Ennikeev, A.I.O. Nigmatullin / М.: STIN. – 2015. – № 11. – pp. 8–12.

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

[16] **T. Aoyama**, Performance of HSK Tool Interfaces under High Rotational Speed / T. Aoyama, I. Inasaki // CIRP Annals Manufacturing Technology. – 2001. – 50 (1) – pp. 281–284.

[17] **I.M. Hanna**, Modeling the HSK Toolholder-Spindle Interface / I.M. Hanna, J.S. Agapiou, D.A. Stephenson // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2002. – 124 (3) – pp. 734–744.

THE AUTHORS

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

Received: 15.05.2020