

УДК 621.914

DOI: 10.30987/article_5cda64ccacc191.62932806

В.М. Давыдов, В.А. Стельмаков, А.В. Сарыгин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТВЕРСТИЙ ПРИ СТРАТЕГИИ ЧИСТОВОЙ ФРЕЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ С КРУГОВОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИЕЙ

Рассмотрены основные факторы, влияющие на точность формы отверстий, полученных методом фрезерования с круговой интерполяцией. Разработаны математические модели расчета величины погрешности формы, связанной с процессом врезания инструмента в материал заготовки, и

упругих деформаций инструмента в процессе чистовой обработки.

Ключевые слова: обрабатывающий центр с ЧПУ, отклонение формы отверстия, концевая фреза, упругие деформации инструмента, стратегии обработки, круговая интерполяция.

V.M. Davydov, V.A. Stelmakov, A.V. Sarygin

INVESTIGATION OF HOLE CYLINDRICAL SURFACE FORMATION PROCESS AT STRATEGY OF FINISH MILLING BY END-MILLING CUTTERS WITH CIRCULAR INTERPOLATION

The purpose of this work was an analysis of factors affecting the form accuracy of holes obtained in the course of finish milling with a circular interpolation. To achieve the purpose in the work there is offered an application of theoretical methods (analysis, synthesis, comparison, abstracting, generalization, induction, deduction, modeling and others) and also empirical methods (observation, measurement, experiment, forecasting). On the basis of experimental investigation results it was defined that an index of deviation from a circle is influenced considerably by such geometrical and technological parameters of an end-milling cutter as a penetration radius, an angle of the initial point of a penetration radius and a feed set at tool penetration into blank material. For the parameters

mentioned above and with the purpose of the optimum range definition in the choice of their values and for the increase of machining accuracy there is carried out a multi-factor regressive analysis the result of which became a regressive model and a diagram of its surface characterizing it. It should be essential to mention that in the course of the analysis of the value of the deviation from a cylinder form there was developed and tested a simulator of cutter elastic deformation during the strategy of milling with a circular interpolation a maximum discrepancy of experimental and theoretical values made 15%.

Key words: NC machining center, deviation of hole form, end-milling cutter, tool elastic deformations, processing strategies, circular interpolation.

Введение

Тенденцией развития современного машиностроительного производства является его автоматизация и механизация на основе широкого применения обрабатывающих центров с ЧПУ. Применение таких центров в условиях многономенклатурного производства позволяет выполнять комплекс функционально связанных технологических переходов (операций) по обработке подавляющего большинства поверхностей детали с одной установки с соблюдением принципа единства баз, позволяет достигать более высокой точности обработки. Это приводит к уменьшению состава необходимого станочного оборудования, сокращению производственной площади, пути, проходимого изделием в

процессе изготовления, а также к сокращению производственного цикла изготовления детали.

Одной из наиболее трудоемких операций в современном машиностроительном производстве является обработка отверстий, к которым предъявляются высокие технологические требования по точности размеров, формы и расположения.

Однако если в обрабатываемой детали достаточное количество отверстий различных диаметральных размеров, то для обеспечения заданной точности на каждое отверстие приходится иметь соответствующие по диаметральному размеру сверло, развертку и расточной резец, предвари-

тельно настроенный на соответствующий диаметр.

Указанные обстоятельства говорят о перегрузке инструментального магазина [1], а так как большинство элементов корпусных деталей, включая отверстия, необходимо обрабатывать на одной установке, то приходится производить своевременную замену режущего инструмента, что ведет к снижению производительности, повышению вспомогательного времени на данной операции и увеличению номенклатуры режущего инструмента.

При ограниченной емкости инструментальных магазинов технологическое требование расширения номенклатуры режущего инструмента обуславливает необходимость расширения функциональных возможностей применяемого режущего инструмента. Этому безусловному требованию наиболее полно отвечают технологические возможности концевых твердосплавных фрез [2].

Аппаратурное оформление экспериментальных исследований

В качестве материалов для изготовления гладких цилиндрических отверстий использовались углеродистые стали с со-

<i>Fe</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>
99,2	0,2	0,3	0,45	0,18	0,04

В качестве материала инструмента использовался твердый сплав *H10F* (по маркировке фирмы-производителя *Sandvik Coromant*), ближайший российский аналог - *BK10*, применяемый для обработки серых чугунов, цветных металлов и сплавов. Для обработки углеродистых сталей использовался твердый сплав *GC1620*, ближайший российский аналог - *T15K6*.

Отклонения от круглости и цилиндричности исследовались на установке *Roundcom-41C*. По результатам измерений строились круглограммы обработанных отверстий, позволяющие судить о технологии обработки и особенностях применяемого инструмента. Методика измерения заключается в следующем. Образцы устанавливаются на прецизионный поворотный шпиндель, находящийся под деталью. При вращении стола каждая точка его поверх-

Обрабатывающие центры с ЧПУ предлагают возможность использования различных стратегий фрезерования для получения высокоточных отверстий. Такими стратегиями являются стратегия с круговой интерполяцией и стратегия с винтовой интерполяцией. Однако ввиду активного развития и обновления систем управления металлорежущим оборудованием и динамических характеристик обрабатывающих центров (приводов, цифровых систем и т.п.) на данный момент отсутствуют либо устарели практические рекомендации по выбору стратегии фрезерования, технологических параметров и режимов обработки, необходимых для обеспечения заданной точности [3; 4].

Целью работы является исследование факторов, влияющих на точность формы отверстий, полученных при чистовой фрезерной обработке с круговой интерполяцией.

держанием углерода 0,25...0,35 %, алюминиевый сплав марки *АМг6*. Химический состав используемой стали, %:

<i>Cu</i>	<i>Mo</i>	<i>Al</i>	<i>Co</i>	<i>Ti</i>
0,04	0,01	0,002	0,012	0,002

ности образует эталонную окружность. Отклонение от круглости измеряемой детали, расположенной на шпинделе, оценивают по перемещению шупа, в результате чего получают круглограммы поверхностей.

Эксперименты, связанные с обработкой материалов, проводились на трехкоординатном многоцелевом обрабатывающем центре с ЧПУ *DMC 635V ecoline* и пятикоординатном обрабатывающем центре с ЧПУ *DMU 50 ecoline*. Обрабатывающие центры оснащены системой ЧПУ *Heidenhain TNC 620*, мощным шпинделем (до 8000 мин⁻¹, 13 кВт). Точность позиционирования по осям *X*, *Y* и *Z* составляет 0,008 мм.

Радиальное биение инструмента измерялось в нескольких сечениях при помощи прецизионной цифровой индикатор-

ной головки *ZuDiY-Bry Z-096*, цена деления которой составляет 1 мкм, скорость срабатывания - 1,5 м/с, диапазон измерения - 0...25,4 мм.

Контроль и измерение режущего инструмента по его длине и радиусу производились при помощи контактного датчика *TT140* фирмы *Heidenhain*. Принцип работы данной измерительной системы основан на оптическом сенсоре. Световой пучок, генерируемый светодиодом, фокусируется системой линз в точку на дифференциальном фотоэлементе. При отклонении контактного элемента дифференциальный фотоэлемент генерирует коммутационный сигнал. Контактный элемент датчика жестко соединен с переключателем, который базируется в корпусе на трехточечной опоре. Данный прибор обеспечивает высокую повторяемость результатов измерений. Основные технические характеристики: точность измерений - меньше 15 мкм, повторяемость результатов измерений $2\sigma < 1$ мкм, скорость измерений - менее 5 м/мин.

Основные факторы, способствующие формированию отклонений от круглости, определялись при помощи гармонического анализа. При использовании такого подхода сигнал, отражающий профиль детали, представляется в виде ряда Фурье, а факторы, влияющие на отклонение от круглости, являются коэффициентами разложения (рис. 1).

$$P(n) = \sum r(\theta) \exp \frac{jn\theta}{T},$$

где n - количество неровностей на профиле сечения детали. Случай $n = 0$ соответствует номинальному радиусу детали (щуп касается поверхности), $n = 1$ отражает эксцентриситет, с которым деталь установлена в кругломере, $n = 2$ - овальность, $n = 3...5$ - отклонение формы, обусловленное закреплением детали при обработке, $n = 6...20$ - вибрацию, вызванную недостаточной жесткостью технологической системы, $n = 20...100$ - особенности механической обработки (образование наростов), а $n = 100...1000$ - дефекты структуры материала.

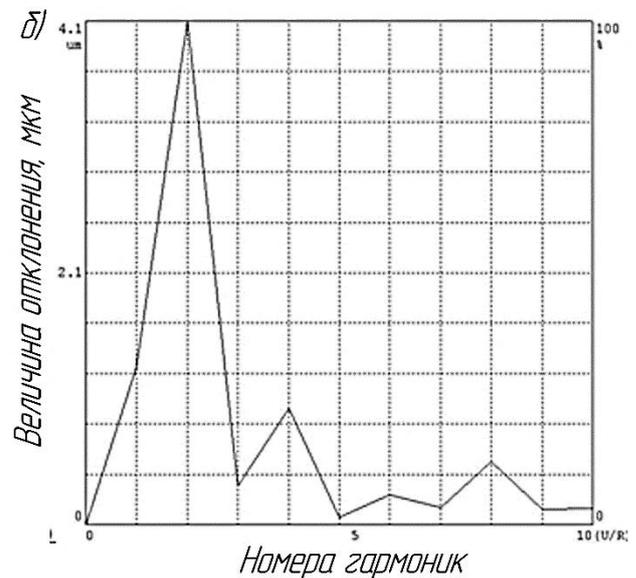
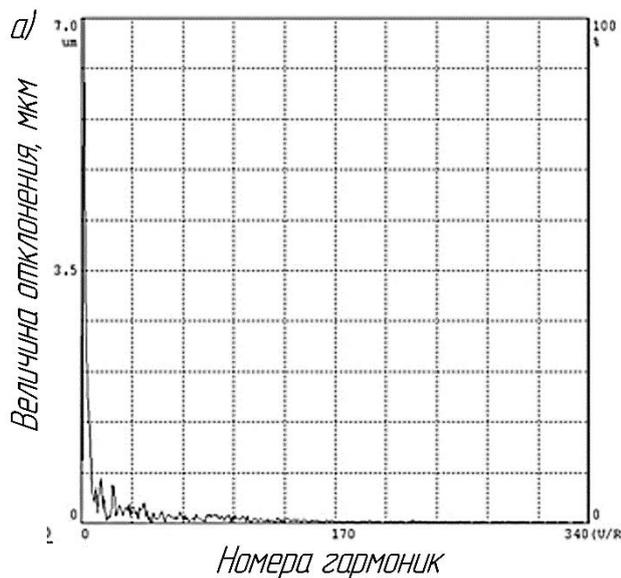


Рис. 1. Спектрограммы разложения ряда Фурье: а - реальный масштаб спектрограммы; б - спектрограмма, обрезанная до 10 гармоник

Экспериментальные исследования

На величину отклонения от круглости и цилиндричности при стратегии чистового фрезерования с круговой интерполяцией большое влияние оказывают процесс врезания фрезы в материал заготовки, упругие отжатия фрезы и её профиль. На

численное значение каждой составляющей влияют различные факторы, для определения которых необходимо проанализировать каждый компонент погрешности в отдельности.

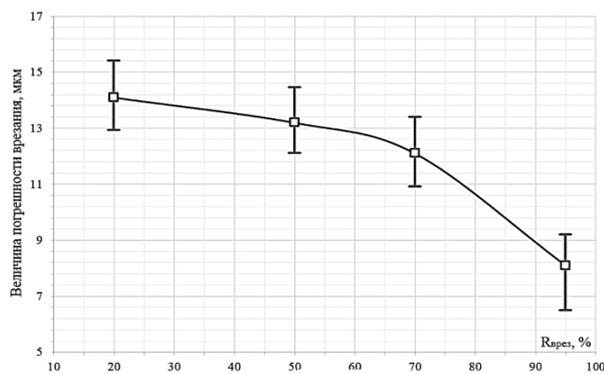
Из анализа кинематики стратегии с круговой интерполяцией можно заключить, что на величину погрешности, связанной с врезанием инструмента, оказывают влияние следующие факторы: $R_{\text{врез}}$ - радиус врезания, α - угол начальной точки радиуса врезания, $F_{\text{врез}}$ - подача врезания (рис. 2).

Радиус врезания инструмента в материал заготовки имеет важное значение, поскольку он определяет плавность процесса врезания, уменьшая при этом возможность возникновения удара, вибраций и мгновенной нагрузки на приводы обрабатываемого центра. Описанный параметр на практике при составлении управляющей программы выбирается технологом исходя из его личного опыта, что приводит к сни-

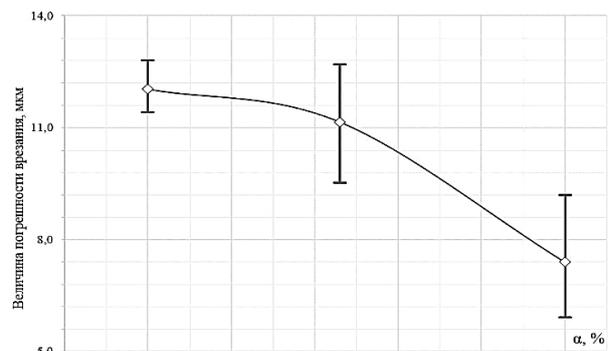
жению точности и качества обрабатываемого отверстия (рис. 2а).

Следующим параметром для исследования являлся угол начальной точки радиуса врезания (рис. 2б). Данный параметр имеет следующий геометрический смысл: на окружности врезания определяется точка на заданном угле от точки старта, до которой инструмент от точки предпозиционирования следует с линейной интерполяцией, а по её достижении начинает врезание по радиусу.

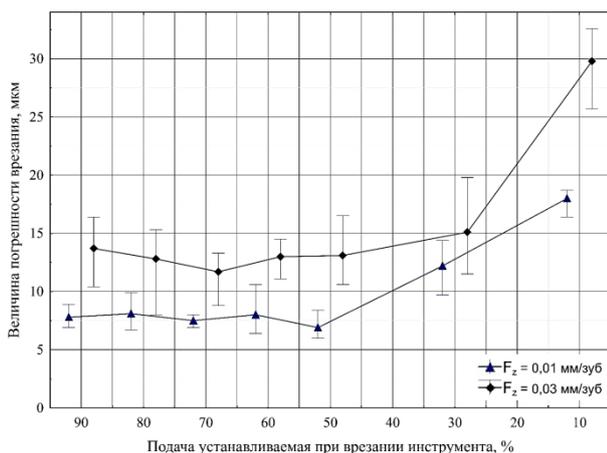
Для обеспечения плавности процесса врезания и уменьшения вероятности возникновения вибраций в процессе чистовой обработки из-за резкого снижения силы резания рекомендуется выбирать значение угла начальной точки радиуса врезания максимально возможным.



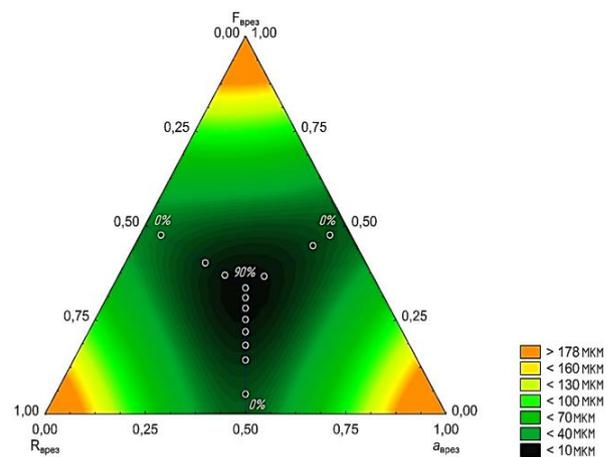
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Графики зависимости основных факторов, влияющих на величину погрешности врезания: а - от величины радиуса врезания; б - от величины угла начальной точки радиуса врезания; в - от величины подачи при врезании; г - график поверхности

Следующим параметром для анализа являлась подача, устанавливаемая при врезании инструмента в материал заготовки

(рис. 2в). Данный технологический параметр устанавливается на всем пути при врезании инструмента в материал заготов-

ки. При достижении точки старта чистовой обработки приводы обрабатывающего центра разгоняются до значения рабочей подачи. Это влечет за собой возрастание силы резания при осуществлении данного перехода, что может негативно сказаться на точности формы получаемого отверстия.

Для определения оптимального диапазона значений для трех вышеописанных переменных, влияющих на отклонение от круглости при фрезеровании, воспользуемся тернарным графиком (рис. 2г). Такие

$$\Delta_{\text{врез}} = 21,04 - 3,32R_{\text{врез}} - 3,94\alpha_{\text{врез}} - 7,68F_{\text{врез}} - 0,07R_{\text{врез}}\alpha_{\text{врез}} + 0,17R_{\text{врез}}F_{\text{врез}} + 1,72\alpha_{\text{врез}}F_{\text{врез}} - 0,57R_{\text{врез}}\alpha_{\text{врез}}F_{\text{врез}}.$$

Следующим этапом исследований стало определение величины упругой деформации инструмента. На этапах плавного врезания и чистовой обработки отверстия с круговой интерполяцией появляются упругие отжатия инструмента ε от возникающей в процессе обработки силы резания (рис. 3), величина которой возрастает по достижении инструментом точки старта чистовой обработки, после которой

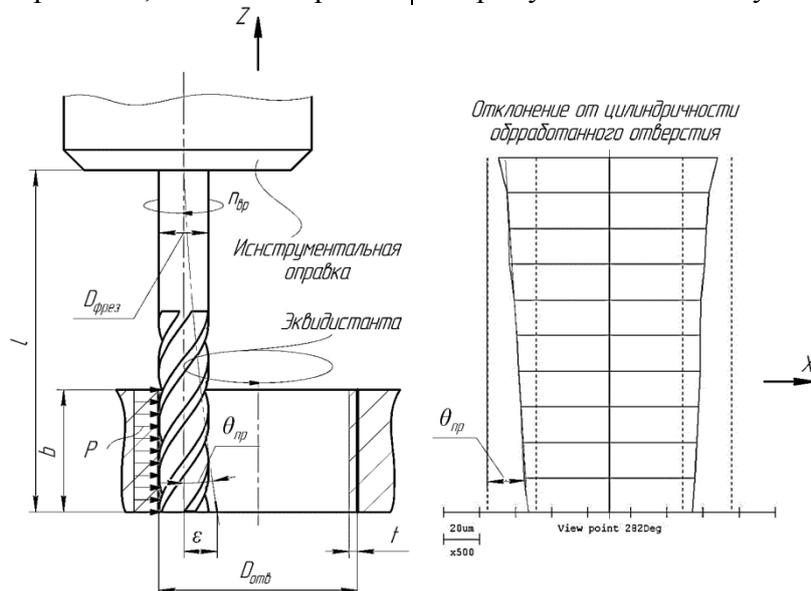


Рис. 3. Схема образования погрешности геометрической формы, связанной с упругими отжатиями инструмента

Данное уравнение позволяет вычислить величину прогиба в любом сечении

$$\varepsilon(z) = \frac{1}{EJ_z^0} \left(M_A \frac{z^2}{2} - R_A \frac{z^3}{6} + \frac{\left(k_2 \left(l - \frac{b}{2} - l_1 \right) - k_1 \left(l - \frac{b}{2} - l_1 \right) \right) P (z - l_1)^2}{2} - \frac{(k_2 - k_1) P (z - l_1)^3}{6} \right) + D.$$

графики используются для исследования связей между несколькими переменными, при экспериментальном исследовании зависимости отклика относительно трех факторных переменных.

На основании описанных исследований проведен многофакторный регрессионный анализ, результатом которого стала регрессионная модель, позволяющая определить значение погрешности врезания в зависимости от выбранных значений трех переменных:

значение силы резания становится постоянным.

Рост значения силы резания связан непосредственно с ростом величины слоя материала, срезаемого одним зубом фрезы. Увеличение толщины срезаемого слоя напрямую зависит от выбранных величин радиуса врезания, рабочей подачи и подачи на врезание, диаметра инструмента, припуска на чистовую обработку и т.д.

Для определения влияния минутной подачи на величину упругих отжатий инструмента проведены эксперименты, в ходе которых измерялись значения отклонения от цилиндричности при обработке с

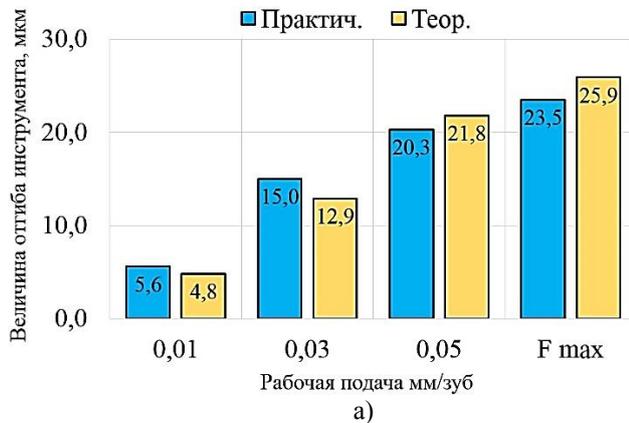


Рис. 4. Зависимость упругих отжатий от рабочей подачи: а - сталь 20; б - АМгб

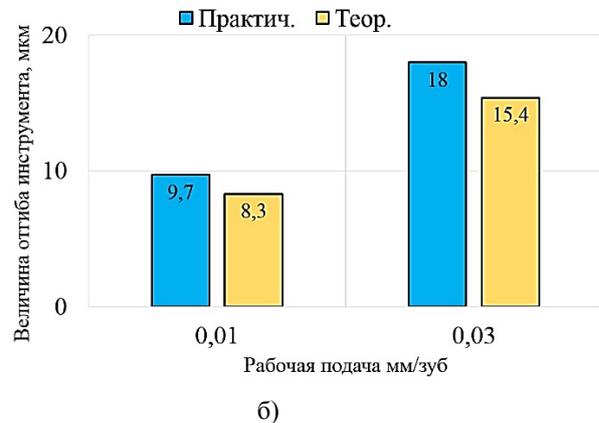
Проанализировав данные, представленные на рис. 4, можно заключить, что экспериментальные значения максимального отгиба инструмента отличаются от расчетных не более чем на 15 %. Данный

Заключение

По результатам экспериментальных исследований было установлено, что на показатель отклонения от круглости существенное влияние оказывают такие геометрические и технологические параметры концевой фрезы, как радиус врезания, угол начальной точки радиуса врезания и подача, устанавливаемая при врезании инструмента в материал заготовки.

Экспериментальным путем установлены зависимости величины погрешности врезания от технологических и геометрических параметров концевой фрезерного инструмента при стратегии чистовой обработки с круговой интерполяцией. Получено, что с увеличением радиуса врезания инструмента значение погрешности врезания снижается, поэтому для чистовой об-

различными значениями подачи на зуб для следующих материалов: стали (состав которой приведен выше) и алюминия марки АМгб.



работки необходимо выбирать максимальное значение радиуса. Показано, что уменьшение угла касательной к радиусу врезания фрезы приводит к повышению значения погрешности, в связи с чем для чистовой обработки целесообразно принимать значение угла в диапазоне до 180° (включительно), при этом границы диапазонов зависят от диаметра режущего инструмента.

Установлено, что модель процесса упругой деформации режущего инструмента при стратегии фрезерной обработки с круговой интерполяцией может быть использована при расчете отклонения формы отверстия при обработке концевым твердосплавным инструментом.

Установлено, что модель процесса упругой деформации режущего инструмента при стратегии фрезерной обработки с круговой интерполяцией может быть использована при расчете отклонения формы отверстия при обработке концевым твердосплавным инструментом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонов, С.Л. Моделирование процесса фрезерования отверстий на станках с ЧПУ / С.Л. Леонов, А.Б. Белов // Ползуновский вестник. – 2012. – №1/1. – С. 177-180.
2. Стельмаков, В.А. Моделирование процесса формообразования цилиндрических отверстий,

полученных методом фрезерования на станках с ЧПУ / В.А. Стельмаков // Ученые заметки ТОГУ: электрон. науч. изд. – 2017. – Т. 8. – № 2. – С. 321-327. – Режим доступа: http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU_8_159.pdf.

3. Стельмаков, В.А. Исследование причин возникновения погрешностей формы при обработке отверстий фрезерованием / В.А. Стельмаков, М.Р. Гимадеев, А.В. Никитенко, В.М. Давыдов // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения: материалы междунар. науч.-техн. конф. – 2015. – С. 257-259.
4. Давыдов, В.М. Концептуальное проектирование мехатронных модулей механообработки / В.М. Давыдов, Ю.Г. Кабалдин. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 251 с.
5. Стельмаков, В.А. Метод оценки точности гладких цилиндрических отверстий по диаметраль-

1. Leonov, S.L. Simulation of hole milling process on NC machines / S.L. Leonov, A.B. Belov // *Polzunov Bulletin*. -2012. – No.1/1. – pp. 177-180.
2. Stelmakov, V.A. Simulation of cylindrical hole formation obtained by milling on NC machines / V.A. Stelmakov // *TSU Proceedings: electronic scientific edition*. – 2017. – Vol.8. – No.2. – pp. 321-327. – Access mode: http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU_8_159.pdf.
3. Stelmakov, V.A. Analysis of reasons in form error arising at hole milling / V.A. Stelmakov, M.P. Gimadeev, A.V. Nikitenko, V.M. Davydov // *Problems and Achievements in Innovation Materials and Engineering Techniques: Proceedings of the Inter. Scientif.-Tech. Conf.* – 2015. – pp. 257-259.

ному размеру и относительному положению их осей / В.А. Стельмаков, М.Р. Гимадеев, А.В. Никитенко, В.М. Давыдов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. - № I-1 (25). – С. 73-81.

6. Кабалдин, Ю.Г. Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием / Ю.Г. Кабалдин, А.И. Олейников, А.М. Шпилев, А.А. Бурков. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 195 с.
4. Davydov, V.M. *Conceptual Design of Machining Mechatronic Modules* / V.M. Davydov, Yu.G. Kabaldin. Vladivostok: Far East Science, 2003. – pp. 251.
5. Stelmakov, V.A. Method for smooth cylindrical holes accuracy assessment on diameter dimension relative position of their axles / V.A. Stelmakov, M.R. Gimadeev, A.V. Nikitenko, V.M. Davydov // *Proceedings of Komsomolsk-upon-Amur State Technical University. Sciences of Nature and Engineering*. – 2016. – No.1-1 (25). – pp. 73-81.
6. Kabaldin, Yu.G. *Mathematical Modeling of Self-Organized Processes in Technological Systems of Cutting* / Yu.G. Kabaldin, A.I. Oleinikov, A.M. Shpilev, A.A. Burkov. – Vladivostok: Far East Science, 2000. – pp. 195.

Статья поступила в редакцию 19.02.19

Рецензент: д.т.н., ведущий научный сотрудник
ФГБУН Институт материаловедения ХИЦ ДВО РАН
Николенко С.В.

Статья принята к публикации 23. 04. 19.

Сведения об авторах:

Давыдов Владимир Михайлович, д.т.н., профессор кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета, г. Хабаровск, e-mail: davellut@mail.ru.

Стельмаков Вадим Александрович, ст. преподаватель кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского госу-

Davydov Vladimir Mikhailovich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. “Technological Informatics and Information Systems”, Pacific State University, e-mail: davellut@mail.ru.

Stelmakov Vadim Alexandrovich, Senior lecturer of the Dep. “Technological Informatics and Information

дарственного университета, г. Хабаровск, e-mail: stelmakov_92@mail.ru.

Сарыгин Александр Викторович, аспирант кафедры «Технологическая информатика и информационные системы» Тихоокеанского государственного университета, Хабаровск, e-mail: Aleksandr.Sarygin@ipc-oil.ru.

Systems”, Pacific State University, e-mail: stelmakov_92@mail.ru.

Sarygin Alexander Victorovich, Post graduate student of the Dep. “Technological Informatics and Information Systems”, Pacific State University, e-mail: Aleksandr.Sarygin@ipc-oil.ru.