

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАЗМЕРНЫЕ ЦЕПИ ДИАМЕТРОВ КАНАВКИ, НАРЕЗАННЫХ НА БОКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ВРАЩЕНИЯ ВИХРЕВЫМ МЕТОДОМ

У.М. Надиров, Н.М. Расулов

Азербайджанский технический университет  
г. Баку, Азербайджан

*Описаны особенности разработанной высокоэффективной технологии нарезания канавки на поверхностях вращения вихревым методом. С использованием теории размерных цепей составлены технологические размерные цепи для диаметров окружностей канавки. Проведен анализ сформированных размерных цепей, механизма их образования, путей достижения заданной точности обработки. Представлены математические модели точности внешнего и внутреннего диаметров канавок, нарезанных на боковых поверхностях вращения, которые рекомендованы для использования при прогнозировании ожидаемой точности в аналогичных процессах обработки.*

**Ключевые слова:** вихревой метод, канавка, нарезание, окружность, диаметр, размерная цепь, точность

## TECHNOLOGICAL DIMENSIONAL CIRCUITS OF KANAVKI DIAMETERS CUTTING ON SIDE SURFACES OF ROTATION BY VORTEX METHOD

U.M. Nadirov, N.M. Rasulov

Azerbaijan Technical University  
Baku, Azerbaijan

*Features of the developed high-efficiency technology cutting grooves on the surfaces of rotation with a vortex method are presented. With the use of the theory of dimensional chains, technological dimensional chains for the diameters of the circumferences of the groove were compiled. An analysis is made of the dimensional chains thus formed, their mechanism of formation and also the questions of achieving the accuracy of processing. Mathematical models of the accuracy of diameters of the outer and inner circumferences of grooves cut on the lateral surfaces of rotation are given and they are recommended for use in predicting the expected accuracy in similar processing processes.*

**Keywords:** vortex method, groove, cutting, circumference, diameter, dimensional chain, accuracy

## Введение

Актуальными являются исследования, связанные с совершенствованием технических средств, предназначенных для производства, транспортировки и обработки нефти и нефтяных продуктов и технологии их производства.

В нефтяной промышленности широко применяются цилиндрические и конические краны, разработанные ОАО «Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт нефтяного машиностроения» (АЗИНМАШ). Отличительной особенностью уплотнительных узлов подобных кранов является то, что на конических поверхностях деталей «вкладыш» предусмотрены кольцевые канавки для уплотнительных колец сложного профиля с осью симметрии, перпендикулярной к конической поверхности [1,2]. Согласно традиционным методам, обработка канавки на поверхности вращения осуществлялась с помощью концевых фасонных фрез. Недостатком этой технологии является невысокая производительность и необходимость использования инструмента сложной формы [3–7].

Разработан новый высокопроизводительный вихревой метод обработки профильных уплотнительных кольцевых канавок, предусмотренных на конических и цилиндрических боковых поверхностях [2, 8–11]. Ограниченное количество исследований было проведено в области нарезания вихревым методом канавок, предусмотренных на боковых поверхностях вращения [1,2, 7–11]. Изучен ряд теоретических и практических вопросов нового способа обработки, исследованы конструктивно-технологические параметры процесса. Учитывая конструктивные особенности канавок, разработан способ обработки, схема резания, методология реализации процесса, определены основные конструктивные параметры элементов технологической оснастки, обеспечивающие функциональную связь между круговой и продольной подачами, спроектирован и изготовлен инструмент. Проведена апробация процесса, определены режимы обработки. В выполненных исследованиях вопросы обеспечения точности канавок были решены в общем виде (с точки зрения функциональных и конструктивных требований к оснастке) [1, 2, 8–11].

Выявление технологических размерных связей и функциональных зависимостей между входными и выходными параметрами технологической системы, включая конструктивные элементы обрабатываемых поверхностей, является перспективной базой для анализа и управления технологическими процессами [3, 4, 12–17]. Результаты исследования, основанные на анализе технологической размерной цепи, сформированной при обработке канавки, позволят должным образом прогнозировать точность выходных параметров обработки и определять направление повышения эффективности метода.

## Постановка задачи

Согласно условиям функционирования уплотнительной канавки вкладыша конструктором заданы следующие показатели качества:

- точность диаметра поверхности расположения канавки,
- точность ширины канавки,
- точность соосности проходного отверстия и канавки,
- точность радиуса закругления дна канавки,
- точность внешней и внутренней окружностей канавки,
- точность перпендикулярностей осей симметрии локальных профилей канавок к конической поверхности вращения,

- точность круглости окружностей канавки,
- шереховатость поверхностей канавки.

Основой эффективной организации любой технологической операции является разработка рационального механизма обеспечения качества обработки и производительности [3–7]. Поэтому изучение механизма формирования точности при нарезании канавки вихревым методом является актуальной задачей.

Целью работы является выявление и анализ технологических размерных цепей диаметров канавки, сформированных при нарезании канавок вихревым методом, и определение путей повышения точности обработки.

### Точность диаметров канавки и их анализ

Анализ и моделирование выполнены на базе теоретических основ обеспечения точности при изготовлении деталей машин, теории размерных цепей и векторного анализа [3–7, 18–20].

Нарезание канавок на боковых поверхностях вращения реализуется установленным на инструментальной головке 1 и непрерывно вращающимся инструментом 2 за два прохода, сначала при вертикальном перемещении  $S_{\text{в}}$  заготовки 3 до достижения требуемой глубины канавки (рис. 1, а). Вращающиеся инструменты 2 снимают материал с заготовки с перерывами при каждом рабочем ходе. Когда инструмент доходит до требуемой глубины канавки, вертикальное движение останавливается. Сообщается линейная подача на заготовку, согласованная с ее круговой подачей  $S_{\text{к}}$  до достижения необходимой длины обработки, равной  $d$  [8–11].

Таким образом, когда реализуется поворот заготовки на угол  $2\alpha$  и, соответственно, линейное ее перемещение  $l_x$  равняется на  $d$  ( $l_x = d$ ), канавка образуется полностью. При этом

$$\sin \alpha = \frac{d}{D_0},$$

где  $d$  – диаметр внутренней окружности канавки;

$D_0$  – номинальный размер диаметра поверхности вращения, на которой расположена канавка (рис. 1).

Технологические размерные цепи, сформированные во время обработки канавок вихревым методом, имеют особые схемы и особенности векторных связей. Целесообразно использовать теории размерных цепей и теории векторов при исследовании вопросов точности канавок [3–6, 18–20].

При нарезании канавки вихревым методом размер  $d$  и его точность имеют особое значения, как из технологических, так и из эксплуатационных соображений. Поэтому для полного использования технологических возможностей метода вывод математической модели диаметра канавки и ее анализ имеют первостепенное значение. На рис. 1 показана схема формирования заданной точности внутреннего диаметра канавки. Анализ схемы обработки показывает, что диаметр внутренней окружности канавки является функцией трех равных и взаимоперекрывающихся размеров (размер положения инструмента в головке  $d_{\sigma}$ ; размер линейного перемещения заготовки  $l_x$ ; длина хорды  $B$ , сформированной окружностью поверхности вращения при повороте заготовки на угол  $2\alpha$ ;  $B = AC$ ), а также диаметра базовой поверхности заготовки, на которой расположена канавка

$$d = f(d_{\sigma}, \alpha, l_x, D_0). \quad (1)$$

В (1) принято: из-за погрешности установки режущего инструмента в инструментальной головке  $d_{\sigma \min} \leq d_{\sigma} \leq d_{\sigma \max}$ ; из-за суммарной погрешности привода станка,

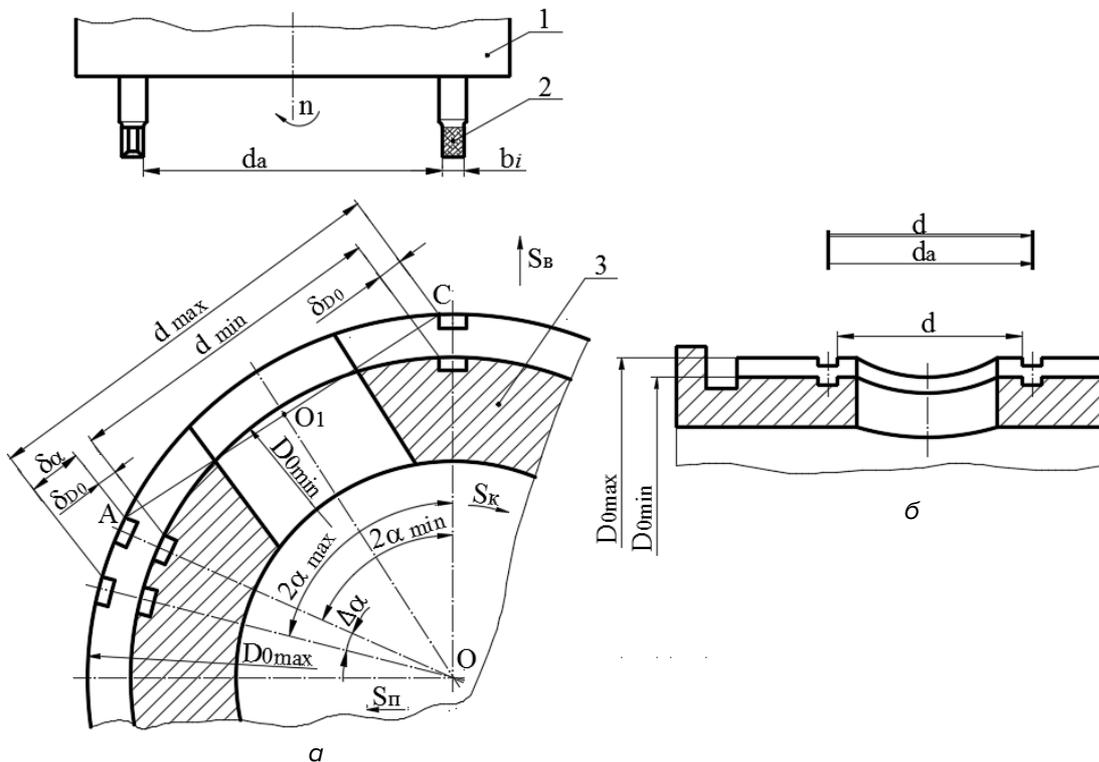


Рис. 1. Схема формирования точности внутреннего диаметра канавки

$l_{x \min} \leq l_x \leq l_{x \max}$  и  $(2\alpha)_{\min} \leq 2\alpha \leq (2\alpha)_{\max}$ ; из-за рассеяния диаметра поверхности вращения партии заготовок, согласно допуску на них  $D_{0 \min} \leq D \leq D_{0 \max}$ .

Анализ схемы нарезания канавки и формулы (1) показывают, что в формировании размера  $d$  размеры  $d_\sigma$ ,  $\alpha = f(S_k)$  и  $l_x$  участвуют и своими скалярными значениями, и направлениями. Поэтому размерная цепь, в которой замыкающим звеном является размер  $d$ , выражается в векторной форме

$$\vec{d} = \vec{d}_\sigma + \vec{B} + \vec{l}_x. \quad (2)$$

Это векторное уравнение позволяет определить диаметр внутренней окружности канавки по всему контуру и провести его анализ; сравнить размеры, полученные в двух характерных сечениях, – проходящей через ось вкладыша и проходного отверстия (продольное сечение) и проходящей через ось проходного отверстия перпендикулярно к оси вкладыша (поперечное сечение). В уравнении (2) номинальные значения векторов  $\vec{B}$  и  $\vec{l}_x$  равны, а их направления противоположны. На точность размера  $d$  влияют только их погрешности.

Анализ векторной размерной цепи показывает, что механизмы формирования размеров ( $d$  и  $D$ , где  $D$  – диаметр наружной окружности канавки) отличаются по продольным и поперечным сечениям канавки, но подчиняются общему закону. Однако на продольном сечении на точность размера не влияет ни круговая, ни линейная подача. Действительно, их направления на соответствующей плоскости перпендикулярны размеру, таким образом  $\vec{d} = \vec{d}_\sigma$ .

Формирование продольных размеров сечения достигается только статическими размерами инструмента и приспособления (рис. 1, б), а на точность размеров поперечного сечения влияют и кинематические размерные связи технологической системы, линейные и круговые подачи.

Когда поворот заготовки достигает  $90^\circ$  (что соответствует продольному сечению канавки) количество влияющих факторов становится минимальным, а условия формирования канавки наиболее благоприятными. При продолжении нарезания канавки размерные связи, которые влияют на формируемые размеры, изменяются в противоположном направлении, увеличивается их количество, постепенно усложняется механизм их влияния на точность и т.п. Достижение точности формирования канавки усложняется.

Таким образом, статические размерные связи только на продольном сечении канавки (производная векторного уравнения (2)) имеют вид

$$d = d_o \text{ и } D = d_o + b_i + b_i \quad (3)$$

где  $b_i$  – ширина инструмента (рис. 1).

В продольном сечении заготовки размерные связи по диаметрам канавки формируются статическими связями – шириной инструментов и их расстоянием от оси вращения, которые называются размер инструмента и размер приспособления. Естественно, на точности замыкающего звена в выражениях (3) влияют и динамические связи – износ режущих инструментов, упругие и тепловые деформации заготовки и инструментов.

В поперечном сечении размерные связи по диаметрам канавки формируют следующие относительные перемещения и размеры инструмента и заготовки:

- вращение инструмента, его расстояние от оси вращения и ширина ( $d_o$  и  $b_i$ );
- перемещение заготовки в перпендикулярном собственной оси направлении ( $l_x$ );
- поворот заготовки вокруг собственной оси, угол поворота  $2\alpha$  (и размеры  $B, D_o$ ).

В этом сечении диаметр окружности канавки формируется и кинематическими размерными связями, присущими повороту заготовки при нарезании канавки. Следовательно, из векторного уравнения (2) получим производные размерные цепи диаметров окружностей канавки на поперечном сечении (рис. 1)

$$d = l_x - D_o \cdot \sin \alpha + d_o ; \quad (4)$$

$$D = l_x - D_o \cdot \sin \alpha + d_o + 2b_i . \quad (5)$$

Как показывает анализ последних выражений (4) и (5), каждая размерная цепь имеет три составляющие (линейное перемещение, хорда и размер приспособления), номинальные размеры которых равны. Поскольку два из них образуются за счет относительных движений элементов технологической системы, направления которых противоположны, они не влияют на номинальные размеры замыкающих звеньев. Однако их изменения и отклонения от номинала обуславливают изменения рассеяния размеров  $d$  и  $D$ . На рис. 1 не показаны их влияния на размеры  $d$  и  $D$ , чтобы избежать усложнения схемы. Возникающая из-за допуска диаметра  $D_o$  и погрешности угла поворота заготовки первичная погрешность определяется по формуле

$$\delta_{D_o} = d_{\max} - d_{\min} = \delta_\alpha + 2\delta_{D_o} = \frac{\pi D_o \cdot \Delta\alpha}{360} + T_{D_o} \cdot \sin \alpha_{\min} , \quad (6)$$

где  $\delta_{D_o}$  – первичная погрешность, возникающая из-за допуска диаметра  $D_o$  и погрешности угла поворота заготовки,

$d_{\max}$  и  $d_{\min}$  – соответственно наибольший и наименьший диаметры нарезаемой канавки,

$\delta_\alpha$  – первичная погрешность, возникающая в результате поворота заготовки,

$\Delta\alpha$  – допустимая погрешность поворота заготовки,

$\alpha_{\min}$  – половина минимального угла поворота заготовки,

$T_{D_o}$  – допуск на диаметр поверхности вращения.

Механизмы влияния технологических факторов  $l_x$  и  $S_k$  на размер  $d$  идентичны и зависят от углового положения канавки (рис. 2, угол  $\beta$ ). В соответствии с механизмом формирования канавки вихревым методом формирование диаметра канавки  $d$  в любом ее сечении реализуется с двумя положениями режущего инструмента относительно заготовки.

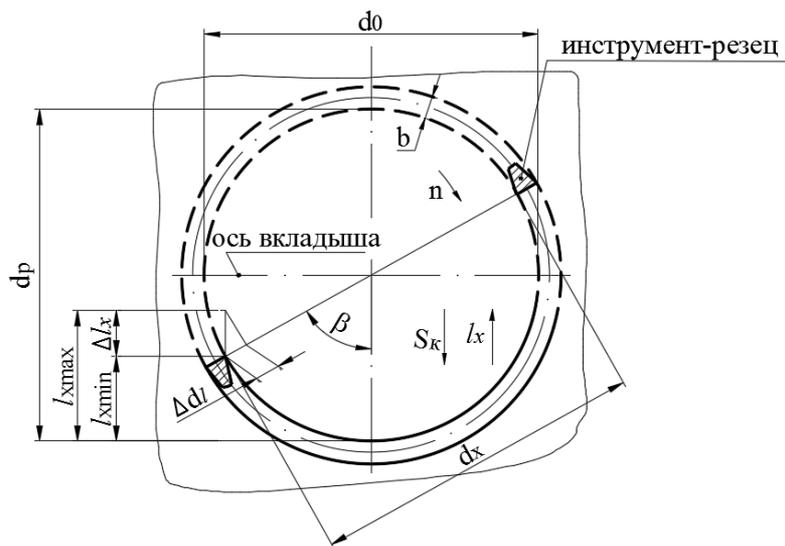


Рис. 2. Схема формирования канавок с двумя инструментами

Поэтому в математической модели точности размера  $d$  должны быть учтены двукратные значения погрешностей параметров  $l_x$  и  $S_k$  (рис. 2)

$$\delta_l = 2\Delta l_x \cdot \sin\beta \quad \text{и} \quad \delta_s = 2\Delta S_k \cdot \sin\beta, \quad (7)$$

где  $\delta_l$  – первичная погрешность диаметра внутренней окружности канавки в сечении с угловым положением, выражающимся углом  $\beta$ , связанная с погрешностью только линейной подачи,

$\delta_s$  – первичная погрешность диаметра внутренней окружности канавки в сечении с угловым положением, выражающейся углом  $\beta$ , связанная с погрешностью только круговой подачи,

$\Delta l_x$  – допустимая погрешность привода линейной подачи,

$\Delta S_k$  – допустимая погрешность привода круговой подачи,

$\beta$  – угловое положение размера канавки.

Таким образом, учитывая, что факторы, влияющие на точность диаметра, являются случайными, суммарная погрешность диаметра  $d$  определяется вероятностным методом [4]

$$\delta_d = t \sqrt{\lambda_1 \cdot \delta_{D0}^2 + \lambda_2 \cdot \delta_l^2 + \lambda_3 \cdot \delta_s^2 + \lambda_4 \cdot \delta_{da}^2 + \lambda_5 \cdot \delta_u^2 + \lambda_6 \cdot \delta_{de}^2 + \lambda_7 \cdot \delta_{dH}^2}, \quad (8)$$

где  $t$  – коэффициент, определяющий процент риска получения брака при нарезании канавки (при проценте риска 0,27 %;  $t = 3$ ) [4],

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_7$  – коэффициенты, учитывающие формы распределения соответствующих первичных погрешностей,

$\delta_u$  – погрешность, связанная с точностью изготовления и износом инструмента,

$\delta_{da}$  – погрешность, связанная с позицией инструмента в головке,

$\delta_{dH}$  – погрешность, связанная с настройкой технологической системы,

$\delta_{de}$  – погрешность, связанная с установкой заготовки.

Анализ происхождения всех первичных погрешностей показывает, что они подчиняются в основном (кроме износа инструмента,  $\lambda_4 = 1/3$ ) закону Гаусса ( $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = \lambda_7 = 1/9$ ). Учитывая значения коэффициентов в выражении (8), получим

$$\delta_d = \sqrt{\delta_{D_0}^2 + \delta_l^2 + \delta_s^2 + \delta_{da}^2 + \delta_{dc}^2 + \delta_{dH}^2 + 3\delta_u^2}.$$

Если учесть зависимости (6) и (7) в последнем, то получим математическую модель погрешности внутреннего диаметра  $d$  при обработке канавки на станках с ЧПУ

$$\delta_d = \sqrt{\left(\frac{\pi D_0 \cdot \Delta\alpha}{360} + T_{D_0} \cdot \sin\alpha\right)^2 + 2\left((\Delta l_x \sin\beta)^2 + (\Delta S \sin\beta)^2\right) + T_{da}^2 + T_{dc}^2 + T_{dH}^2 + 3T_u^2}, \quad (9)$$

где  $T_u$  – допуск, предусмотренный для износа инструмента,  $T_{dc}$  – часть допуска на погрешности установки заготовки,  $T_{da}$  – допуск на позиции инструментов в головке,  $T_{dH}$  – часть допуска на наладку системы на размер. Если в (9) принять  $\beta = 0$  (или  $180^\circ$ ), то получим формулы для определения погрешности диаметра  $D$  в поперечном сечении канавки, а при  $\beta = 90^\circ$  (или  $270^\circ$ ) в продольном сечении

$$\delta_{d0} = \sqrt{\left(\frac{\pi D_0 \cdot \Delta\alpha}{360} + T_{D_0} \cdot \sin\alpha\right)^2 + 3T_u^2 + T_{dc}^2 + T_{dH}^2 + T_{da}^2}.$$

Погрешность диаметра внешней окружности канавки определяется формулой

$$\delta_D = \sqrt{\delta_{D_0}^2 + \delta_l^2 + \delta_s^2 + \delta_{da}^2 + \delta_{dc}^2 + \delta_{dH}^2 + (2\delta_b)^2},$$

где  $\delta_b$  – погрешность ширины ( $\delta_b = T_b$ ;  $T_b$  – допуск ширины) инструмента. Если учесть значения первичных факторов-погрешностей, то получим

$$\delta_D = \sqrt{\left(\frac{\pi D_0 \cdot \Delta\alpha}{360} + T_{D_0} \cdot \sin\alpha\right)^2 + 2\left((\Delta l_x \sin\beta)^2 + (\Delta S \sin\beta)^2\right) + T_{da}^2 + T_{dc}^2 + T_{dH}^2 + 6T_u^2 + 2T_b^2}. \quad (10)$$

Формула (10) представляет собой математическую модель погрешности диаметра внешней окружности канавки при обработке канавки на станках с ЧПУ.

Когда нарезание канавки выполняется на расточном станке, для обеспечения функциональной связи между круговой и линейной подачами  $S_k = f(S_l)$  используется специальное приспособление [9–11]. Функциональная связь осуществляется с помощью зубчато-реечной передачи. Реечное колесо устанавливается в приспособление на оси заготовки. Зубчатая рейка крепится к корпусу-стойке станка неподвижно. Когда с помощью стола станка, на котором установлено приспособление, заготовке сообщается линейное перемещение, колесо поворачивается вокруг своей оси, благодаря зацеплению с рейкой поворачивается заготовка. При этом погрешности изготовления приспособления и его деталей являются одной из слагаемых суммарной погрешности поворота заготовки.

Аналогичным образом (с учетом погрешности установки заготовки) были выведены математические модели погрешностей внешней и внутренней окружностей канавки.

Анализ выражений (9) и (10) дает полную информацию об обеспечении точностей диаметров канавки.

Согласно теории машин и механизмов, допуск на точность замыкающего звена ( $\delta_d = 0,8 \text{ mm}$ ) должен распределяться между ее составляющими [4, 7, 11]. Исследования процесса нарезания канавки на деталях «вкладыш» в Научно-производственном объединении «Сабунчи» показали, что точность  $d$  обеспечивается только при обеспечении высокой точности наладки технологической системы.

Для повышения эффективности нарезания канавки были разработаны и предложены технологические мероприятия. Например, используя математические модели

(9) и (10), было определено и применено рациональное распределение допуска замыкающего звена между ее составляющими, облегчен процесс наладки технологической системы для выполнения операции.

### Выводы

С использованием теории размерных цепей составлены технологические векторно-размерные цепи для внешнего и внутреннего диаметров окружностей канавки, нарезанной вихревым методом. Выявлены факторы, влияющие на точность диаметров канавки, определен механизм их влияния на точность, установлена функциональная связь между ними.

Размерная цепь, сформированная при нарезании канавки, названа авторами «линейно-круговая». Разработаны математические модели точности внешнего и внутреннего диаметров окружностей канавок, нарезанных на боковых поверхностях вращения. Модели рекомендованы для использования при прогнозировании ожидаемой точности в аналогичных процессах обработки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Надилов, У.М. Апробирование и внедрение процесса нарезания канавки на детали «Вкладыш» вихревым методом / У.М. Надилов // Известия ВУЗ-ов Машиностроения, 2017, №1, с. 79–87
2. Расулов, Н.М. Вихревой метод обработки уплотнительных кольцевых канавок, предусмотренных на боковых поверхностях вращения / Н.М. Расулов, У.М. Надилов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. Сб. науч. тр. Кн.2.: Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, Минск, ФТИ НАН Беларуси, 2015. – С. 288–295.
3. Технологические методы обеспечения надежности деталей машин / И.М. Жарский [и др.]. – Минск, Высшая школа, 2005. 299
4. Справочник технолога машиностроителя. Под ред. Дальского А.М., Косилова А.Г., и др., Москва, Машиностроение, 2003. – Т. 1, 912 с.; т. 2. –944 с.
5. New Approach for the Production of Blades by Hybrid Processes. Nontraditional Machining Processes Research Advances / A. Calleja [et al.]; J. Paulo Davim Editor. Springer-Verlag London 2013, p. 205–230
6. Hans, B. K. CNC-Handbuch 2009/2010. Carl Hanser Verlag / Hans B. Kief, Helmut A. Roschiwal.– Munchen. 2009. 551 p.
7. Paul DeGarmo E. Materials and Processes in Manufacturing / Paul DeGarmo E, Black J. T., Ronald A. Kohser. – 2011, –1130 p.
8. Nadirov, U.M. Firlanma yan səthlərində yerləşən novların burulğan üsulu ilə emal keyfiyyətinin əsasları. Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri / U.M. Nadirov, K.S. Məmmədov, N.M. Rəsulov. – 2014, cild 6, №3, s. 41–48.
9. Расулов, Н.М. Особенности обработки вихревым методом кольцевых профилей на боковых поверхностях вращения / Н.М. Расулов, У.М. Надилов // Известия ВУЗ-ов Машиностроения, 2015, №12, с. 88–94
10. Расулов, Н.М. Основы обеспечения качества канавки на боковых поверхностях вращения при их вихревой обработке / Н.М. Расулов, У.М. Надилов // Известия ВУЗ-ов Машиностроения, 2016, №3, с. 65–73
11. Надилов, У.М. О вихревом методе нарезания фасонных профилей, расположенных на боковых поверхностях вращения / У.М. Надилов, Н.М. Расулов // Современные методы и технологии создания и обработки материалов. – Сб. науч. тр. Кн. 3., Обработка металлов давлением. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2017. – С. 78–85. – ISBN 978-985-6441-35-9.
12. Расулов, Н.М. Технологические размерные связи при накатывании резьбы / Н.М. Расулов. – Машиностроитель, 2001, №8. – С. 12–16. – ISSN 0025-4568.
13. Quality in the machining: characteristics and techniques to obtain good results / C. H. Lauro [et al.] // Chapter 5 (51–75), in Davim, J.P (Ed.), Manufacturing Engineering: new research, Nova Publishers, New York, 2015, ISBN: 978-1-63463-378-9.
14. Backlash Error Measurement and Compensation on the Vertical Machining Center / Huanlao Liu, Xiaoning Xue, Guangyu Tan. // Engineering, Vol. 2 No. 6, 2010, pp. 403-407.
15. Majda, P. Relation between kinematic straightness errors and angular errors of machine tool / P. Majda // Advances in Manufacturing Science and Technology, vol. 36, no.1, 2012, pp. 47–53.
16. Okafor, A.C. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics / A.C. Okafor, Y.M. Ertekin // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40(2000) 1120–1221.

17. Geometric error measurement and compensation of machines—An update, CIRP Annals / H. Schwenke [et al.] – Manufacturing Technology, vol. 57, 2, 2008, pp. 660–675.
18. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров.– М.: Высшаяшкола, 2000. — 480 с.
19. Granino A. Korn, Thérésa M. Korn Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review (Dover Civil and Mechanical Engineering). NY. Dover Publications; 2 Revised Edition. 2000. 1151 p.
20. Donald A. Mc Quarrie. Mathematical Methods for Scientists and Engineers. University Science Books. 2003. 1179 p.

## REFERENCES

1. Nadirov U.M. Aprobirvaniye i vnedreniye protsessa narezaniya kanavki na detali «Vkladysh» vikhrevym metodom. Izvestiya VUZ-ov Mashinostroyeniya, 2017, №1, pp. 79–87
2. Rasulov N.M., Nadirov U.M. Vikhrevoy metod obrabotki uplotnitel'nykh kol'tsevykh kanavok, predusmotrennykh na bokovykh poverkhnostyakh vrashcheniya. Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Sb. nauch. tr. Kn.2.: Tekhnologiya i oborudovaniye mekhanicheskoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki, Minsk, FTI NAN Belarusi, 2015, pp. 288–295.
3. Zharskiy I.M., Barshay I.L., Svidunovich N.A., Spiridonov N.V. Tekhnologicheskiye metody obespecheniya nadezhnosti detaley mashin. Minsk, Vysheyshaya shkola, 2005. p. 299
4. Spravochnik tekhnologa mashinostroitelya. Edit Dal'skiy A.M., Kosilova A.G., i.dr., Moscow, Mashinostroyeniye, 2003. T. 1, 912 p.; t. 2, 944 p.
5. Calleja A., Fernández A., Rodriguez A, L. N. López de Lacalle and Lamikiz A.. A New Approach for the Production of Blades by Hybrid Processes. Nontraditional Machining Processes Research Advances. J. Paulo Davim Editor. Springer-Verlag London 2013, pp. 205–230
6. Hans B. Kief, Helmut A. Roschiwal. CNC-Handbuch 2009/2010. Carl Hanser Verlag, Munchen. 2009. 551 p.
7. Paul DeGarmo E., Black J. T., Ronald A. Kohser. Materials and Processes in Manufacturing. 2011, –1130 p.
8. Nadirov U.M., Mammadov K.S., Rasulov N.M. Firlanma yan sathlarinda yerlashan novlarin burulgan usulu ile emal keyfiyatninin asaslari. Azarbaycan Muhandislik Akademiyasinin Xabarlari, 2014, cild 6, №3, pp. 41–48.
9. Rasulov N.M., Nadirov U.M. Osobennosti obrabotki vikhrevym metodom kol'tsevykh profiley na bokovykh poverkhnostyakh vrashcheniya. Izvestiya VUZ-ov Mashinostroyeniya, 2015, №12, s. 88–94
10. Rasulov N.M., Nadirov U. M. Osnovy obespecheniya kachestva kanavki na bokovykh poverkhnostyakh vrashcheniya pri ikh vikhrevoy obrabotke. Izvestiya VUZ-ov Mashinostroyeniya, 2016, №3, pp. 65–73
11. Nadirov U.M., Rasulov N.M. O vikhrevom metode narezaniya fasonnykh profiley, raspolozhennykh na bokovykh poverkhnostyakh vrashcheniya «Sovremennyye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov» Sb. nauch. tr. Kn. 3., Obrabotka metallov davleniyem. Minsk: FTI NAN Belarusi, ISBN 978-985-6441-35-9, 2017, pp. 78–85;
12. Rasulov N.M. Tekhnologicheskiye razmernyye svyazi pri nakatyvanii rez'by. Mashinostroitel', ISSN 0025-4568, 2001, №8, pp. 12,16
13. Lauro C. H., Brandão L. C., Ribeiro Filho S. M. and J. Paulo Davim, Quality in the machining: characteristics and techniques to obtain good results, Chapter 5 (51–75), in Davim, J.P (Ed.), Manufacturing Engineering: new research, Nova Publishers, New York, 2015, ISBN: 978-1-63463-378-9.
14. Huanlao Liu, Xiaoning Xue, Guangyu Tan. Backlash Error Measurement and Compensation on the Vertical Machining Center. Engineering, Vol. 2 No. 6, 2010, pp. 403–407.
15. Majda P. Relation between kinematic straightness errors and angular errors of machine tool, Advances in Manufacturing Science and Technology, vol. 36, no.1, 2012, pp. 47–53.
16. Okafor A.C., Ertekin Y.M. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 40(2000) 1120–1221.
17. Schwenke H., Knapp W., Haitjema H., Weckenmann A., Schmitte R., Delbressine F. Geometric error measurement and compensation of machines—An update, CIRP Annals – Manufacturing Technology, vol. 57, 2, 2008, pp. 660–675.
18. Venttsel' Ye.S., Ovcharov L.A. Teoriya veroyatnostey i yeye inzhenernyye prilozheniya. M.: Vysshayashkola, 2000. 480 p.
19. Granino A. Korn, Thérésa M. Korn Mathematical Handbook for Scientists and Engineers: Definitions, Theorems, and Formulas for Reference and Review (Dover Civil and Mechanical Engineering). NY. Dover Publications; 2 Revised Edition. 2000. 1151 p.
20. Donald A. Mc Quarrie. Mathematical Methods for Scientists and Engineers. University Science Books. 2003. 1179 p.

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 28.05.18*