
ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 1, 2021

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.1.06
УДК 621.95.01

М.И. Мышкин, И.С. Фархуллина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

СВЕРЛЕНИЕ ТРУБ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ЗАДАННЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ

Целью работы является повышение эффективности обработки глубоких отверстий в деталях типа труба путем применения разработанной и опробованной установки управляемого сверления. Преимущество данной установки в том, что ее можно использовать на любом металлорежущем производстве, в котором при производстве цилиндрических деталей вращения в технологическом процессе применяется операция сверления глубоких отверстий. Предлагаемая установка обеспечивает управление и контроль параметров режущего инструмента при глубоком сверлении труб различного назначения за счет контроллера и датчиков, которые монтируются на специальное оборудование, предназначенное для обработки глубоких отверстий. Установленные датчики контролируют такие параметры, как вращение инструмента, подача, вращение детали, биение по наружной поверхности детали, толщина стенки детали при обработке. Перемещения режущего инструмента сверлильной головки, в которой установлен датчик контроля разностности с применением смазочно-охлаждающей жидкости, подаваемой к головке, в качестве контактной среды, обеспечивают работу датчика контроля толщины стенки. Контроллер обрабатывает данные, полученные от всех датчиков, и направляет импульсный сигнал, тем самым вносит соответствующие корректировки в работу всей установки. Согласно поставленному эксперименту и проведенному анализу установлено, что установка позволяет производить корректировку отклонения оси отверстия от оси вращения детали на всей длине отверстия в пределах 0,5 мм, а также обеспечить равномерность не более 1 мм. Полученные результаты показывают целесообразность применения установки управляемого сверления для производства труб широкого назначения, в том числе и нефтегазовой промышленности.

Ключевые слова: обработка глубоких отверстий, увод оси отверстия, отклонение оси отверстия, коррекция оси, сверление, сверлильная головка, прямолинейность, управляемое сверление, равномерность, сверление труб.

M.I. Myshkin, I.S. Farkhullina

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

PIPES DRILLING FOR VARIOUS PURPOSES WITH A GIVEN DIRECTION

The aim of the work is to increase the efficiency of processing deep holes in parts of the "pipe" type by using a developed and tested installation of controlled drilling. The advantage of this installation is that it can be used in any metal-cutting industry, in which the operation of drilling such parts is used in the production of cylindrical parts of rotation in the technological process. The proposed installation provides control and monitoring of the parameters of the cutting tool during deep drilling of pipes for various purposes due to the controller and sensors, which are mounted on special equipment designed for processing deep holes. Installed sensors control such parameters as tool rotation, feed, part rotation, runout on the outer surface of the part, and the wall thickness of the part during processing. Movement of the cutting tool of the drilling head, in which a sensor for monitoring the thickness difference is installed using a lubricating-cooling liquid supplied to the head as a contact medium, which ensures the operation of the sensor for monitoring the wall thickness. The controller processes the data received from all sensors, and sends a pulse signal, thereby making appropriate adjustments to the operation of the entire installation. According to the experiment performed and the analysis performed, it was found that the installation makes it possible to correct the deviation of the axis of the hole from the axis of rotation of the part over the entire length of the hole within 0.5 mm, as well as to ensure the uniformity of no more than 1 mm. The results obtained show the feasibility of using a controlled drilling unit for the production of pipes for a wide range of applications, including the oil and gas industry.

Keywords: deep hole machining, hole axis drift, hole axis deviation, axis correction, drilling, drilling head, straightness, guided drilling, equilateralism, pipe drilling.

При соотношении диаметра отверстия и его длины десять и более раз отверстие называют глубоким. При обработке отверстий погрешности обработки образуются уже при показателе, равном четырем [1–4]. Характерные погрешности при такой обработке: разбивка отверстия, увод оси и пр. [5–10]. Главной задачей при обработке является

обеспечение по всей длине требуемой точности диаметра отверстия, его формы, равномерности, качества поверхности и прямолинейности [11–16].

Чтобы обеспечить заданную прямолинейность, требуется максимально исключить увод оси отверстия от оси вращения детали [17–19]. Для чего применяют следующие решения:

- отвод стружки из зоны резания и самого отверстия и подача под давлением смазывающе-охлаждающих жидкостей (СОЖ);

- стабилизация инструмента/детали;
- снижение вибраций станка и детали;
- управление режущим инструментом.

Перечисленные методы способны снизить увод оси отверстия в определенном сечении детали, но при увеличении длины сверления избежать увода оси не удастся [20–23].

На сегодняшний день наиболее эффективным и современным способом борьбы с уводом является применение режущего инструмента, способного производить корректировку увода от оси вращения детали, на основе которого построена рассматриваемая установка управляемого сверления глубоких отверстий (установка УГС).

Данную установку УГС предполагается применять на операциях обработки отверстий в стальных цилиндрических заготовках для изготовления труб различного назначения.

Установка УГС при осевой обработке заготовки позволит обеспечить следующие параметры:

- в режиме обеспечения равенности («равностенность») при кривизне заготовки до 1,5 мм на 1 м длины разностенность детали составит не более 1 мм;
- в режиме обеспечения прямолинейности («прямолинейность») увод оси отверстия от оси вращения заготовки составит не более 0,5 мм;
- возможность обрабатывать отверстия в деталях длиной до 16 м при односторонней обработке либо 24 м с переворотом детали;
- обеспечить на 1 м длины обрабатываемой детали отклонение от оси отверстия не более 1,5 мм.

Система управления установкой УГС позволяет производить обработку по заданным режи-

мам, а также в ручном режиме, т.е. с возможностью для оператора непосредственно вмешиваться в процесс обработки.

Установка УГС может быть смонтирована на любое оборудование, предназначенное для обработки глубоких отверстий [24, 25]. При этом она не меняет алгоритмы работы станка. Установка УГС позволяет обрабатывать отверстия в различных вариациях вращения инструмента и детали.

Глубина обработки отверстия зависит лишь от габаритных размеров применяемого оборудования и борштанги.

Описание применяемой конструкции

При разработке установки УГС был применен станок вертлюжного типа, схема сверления со встречным вращением инструмента и заготовки (рис. 1). Вращение заготовки обеспечивается шпинделем, инструмент (режущая головка и стембель) – за счет стемблевой «бабки», и за счет нее же осуществляется осевая подача инструмента.

Для выполнения центрирования и направления через кондукторную втулку режущей головки маслоприемник перемещается к торцу детали, также через него подается СОЖ между обрабатываемым отверстием и стемблем. При сверлении под давлением СОЖ стружка отводится через полый стембель.

Соответственно, стембель должен обеспечивать следующее:

- 1) внешняя поверхность стембля должна проходить через люнеты, при этом должна быть обеспечена герметичность уплотнений;
- 2) внутренний диаметр стембля должен быть максимально возможного размера (отвода стружки), но с обязательным соблюдением требований по жесткости и прочности.

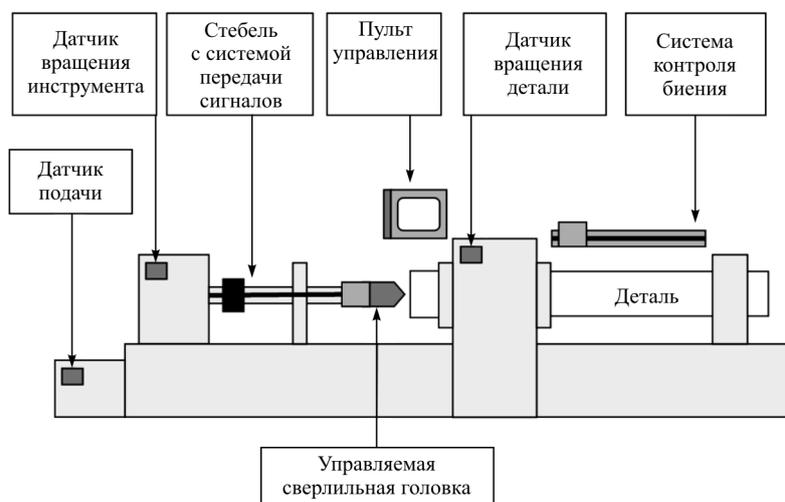


Рис. 1. Схема станка с применением установки УГС

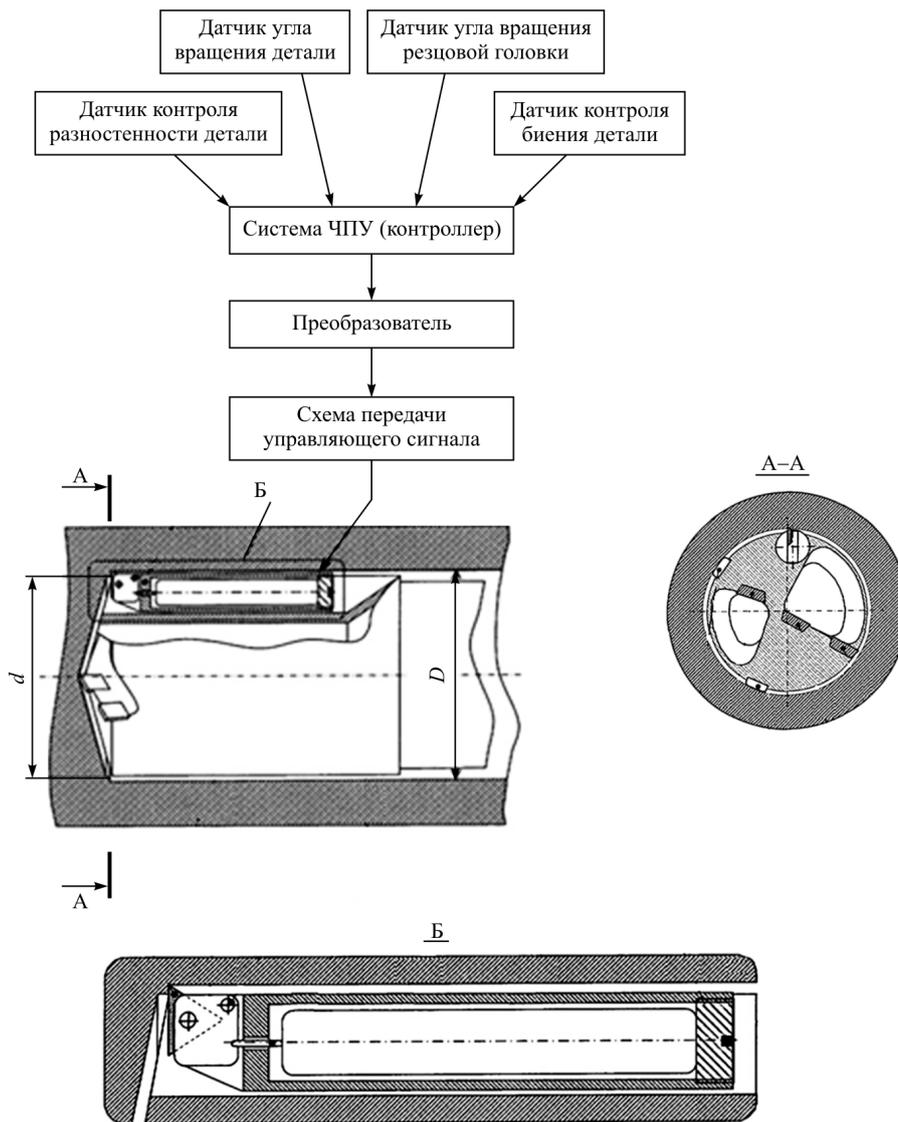


Рис. 2. Сверлильная головка

Для построения системы рассматриваемой установки УГС была применена сверлильная головка (СГ), позволяющая выставлять резец от оси вращения, т.е. управляемый режущий инструмент (рис. 2). Данный режущий инструмент для сверления или растачивания отверстий состоит из резцовой головки с направляющими со встроенным устройством (привод), обеспечивающим перемещение резца в радиальном направлении от привода. Привод, в свою очередь, по схеме передачи управляющего сигнала и преобразователь подключены к системе числового программного управления станка (ЧПУ). Датчики контроля биения детали, контроля разностенности детали, угла вращения резцовой головки и угла вращения детали также подключены к системе ЧПУ. Привод выполнен в виде линейного и установлен на резцовой головке. Вся описанная система позволяет обеспечить

возможность коррекции обрабатываемых отверстий в процессе сверления или растачивания, а также повысить точность их обработки.

Схема работы установки УГС представлена на рис. 3. Установка УГС позволяет определять следующие параметры:

- позиционирование СГ – определение начала коррекции оси отверстия и ее окончания;
- позиционирование детали – определение радиального перемещения СГ;
- глубина обработки отверстия – для обеспечения перемещения датчиков биения детали и измерения толщины стенки.

На основании этих параметров контроллер при необходимости корректирует осевое положение СГ в зависимости от режима работы, направляя управляющий сигнал. Контроллер определяет форму сигнала и время начала и завершения цикла

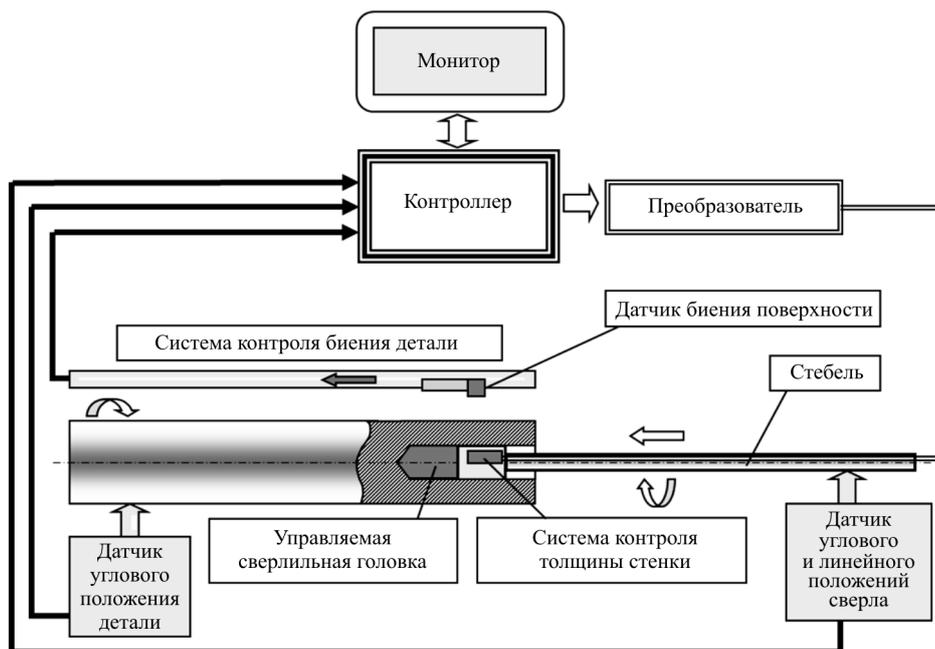


Рис. 3. Схема работы установки УГС

коррекции. Сигнал идет в преобразователь, а после силовой импульс по проводке в стебле поступает непосредственно в СГ. Выбор режимов работы установки УГС и контроль процесса сверления отображаются на сенсорном мониторе.

Система контроля перемещения режущего инструмента установки УГС осуществляет свою работу по следующей схеме:

1. Для выполнения требований по равенственности при обработке отверстия необходимо перемещать датчик (ультразвуковой толщиномер) измерения толщины стенки совместно со СГ.

Толщиномер размещен на линейной направляющей. С целью корректной работы толщиномера требуется предварительно подготовить поверхность детали для ультразвукового контакта.

2. Для выполнения требований по прямолинейности датчики биения поверхности и измерения толщины стенки тоже нужно перемещать совместно со СГ. Этот режим позволяет замерять значения соответствующих параметров в соотношении к положению детали при ее вращении.

Датчик биения поверхности располагается на каретке направляющей вдоль заготовки. Каретка за счет привода имеет возможность перемещать датчик по направляющей.

При работе установки УГС потребуются применение специальной СГ и стебля, который будет передавать электрические сигналы управления отклонением СГ.

Общая длина стебля в рассматриваемой установке УГС составляет 12 м (состоит из двух секций), так как длина стебля должна быть больше

глубины сверления на 4 м (необходимо учесть зону размещения стеблевых люнетов и маслоприемника) и максимальная длина одной секции стебля должна быть 6 м. Такая конструкция позволит сверлить отверстия длиной 8 м с одной стороны и 16 м с переворотом с двух сторон.

Экспериментальные исследования

Опытное опробование установки УГС производилось со следующими исходными данными:

- схема сверления: заготовка неподвижна, режущий инструмент вращается;
- скорость подачи СГ (S): 0,05 мм/об;
- скорость вращения СГ (n): 315 об/мин;
- инструмент: управляемая сверлильная головка диаметром 90 мм;
- оснастка: стебель с проведенными коммуникациями (проводка);
- заготовка: предварительно обработанный прокат, сталь 40ХГНМ, диаметр 166 мм, длина 3 м;
- выверка заготовки по биению отверстия: не более 0,1 мм;
- используемая аппаратура: блок микроконтроллера и преобразователь управления приводом СГ в соотношении к угловому положению инструмента.

Измерения, расчеты и опробование проводились по следующей методике:

1. Сверление детали проводилось поэтапно:
 - на 500 мм без коррекции оси отверстия;
 - с 500 до 1500 мм сверление проводилось при максимальной коррекции оси отверстия в направлении точки 2 (рис. 4);

Результаты указанных измерений и расчетов

Ось	Точка	Глубина сверления 500 мм			Глубина сверления 1500 мм			Глубина сверления 2000 мм			Глубина сверления 2500 мм			Глубина сверления 3000 мм		
		Бие-ние	Тол-щина	Откло-нение	Бие-ние	Тол-щина	Откло-нение	Бие-ние	Тол-щина	Откло-нение	Бие-ние	Тол-щина	Откло-нение	Бие-ние	Тол-щина	Откло-нение
X	2	0,19	37,7	-0,445	4,75	41,1	5,55	5,15	41,9	6,455	3,21	41,2	4,73	0,12	40,4	2,45
	4	0,38	38,4		0,05	34,7		0,04	34,1		0,05	34,9		0,02	35,6	
Y	1	0,54	38,4	0,845	2,65	38	0,535	2,2	37,7	-0,325	1,45	38	0,045	0,01	37,1	-1,005
	3	0,05	37,2		1,98	37,6		2,45	38,1		1,56	37,8		0,12	39	

– с 1500 до 3000 мм сверление проводилось при максимальной коррекции оси отверстия в направлении точки 4 (рис. 4).

2. После чего во всех точках (см. рис. 4) выполнен ряд замеров толщины стенок полученной детали и биеение по наружной поверхности трубы.

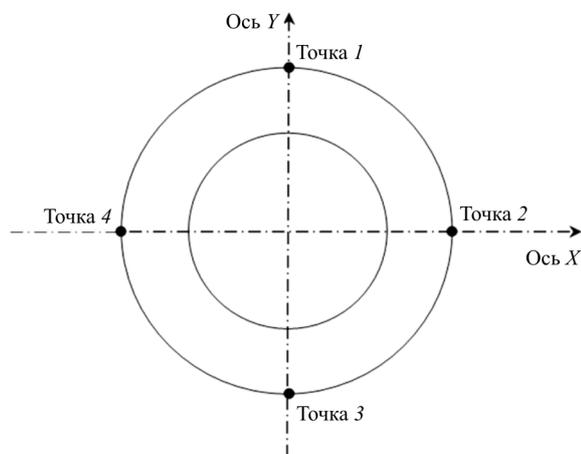


Рис. 4. Торце детали

Отклонения осей отверстия и вращения детали рассчитаны по следующим формулам:

$$\Delta X = \frac{(b_2 + t_2) - (b_4 + t_4)}{2};$$

$$\Delta Y = \frac{(b_1 + t_1) - (b_3 + t_3)}{2},$$

где $\Delta X, \Delta Y$ – отклонения; b_i – биеение; t_i – толщина стенки.

Результаты указанных измерений и расчетов приведены в таблице.

На основании данных таблицы построен график отклонения оси обработанного отверстия от оси вращения (рис. 5). График наглядно отражает, что применение коррекции СГ в направлении точки 2 при сверлении отверстия на длине от 500 до 2000 мм позволяет сместить ось отверстия на величину отклонения в пределах от -0,445 до +6,455 мм, а в направлении точки 4 величина отклонения изменяется до следующих пределов: от +6,455 до +2,45 мм.

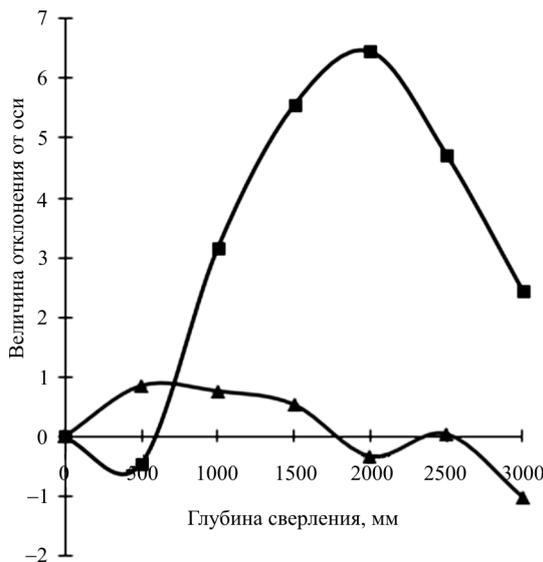


Рис. 5. График отклонения оси просверленного отверстия от оси вращения по плоскостям: —■— отклонение по оси X; —▲— отклонение по оси Y

Заключение

Проведя успешный эксперимент и доказав работоспособность рассматриваемых управляемой сверлильной головки и всей установки управляемого глубокого сверления, в целом можно сделать вывод о том, что данная система позволяет непосредственно в процессе сверления корректировать ось отверстия, а соответственно, позволит сократить описанные проблемы по уводу оси отверстия от оси вращения детали.

Список литературы

1. Обработка глубоких отверстий / Н.Ф. Уткин, Ю.И. Кижняев, С.К. Плужников [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1988. – 269 с.
2. Подураев В.Н., Суворов А.А., Барзов А.А. О влиянии скорости резания на уводы при глубоком сверлении // Известия вузов. – 1976. – № 1. – С. 182–184.
3. Потягайло М.В. Изготовление глубоких и точных цилиндрических отверстий. – М.; Л.: Машгиз, 1947 – 108 с.

4. Светлицкий В.А., Мещеряков Р.К., Ушаков А.И. Расчет погрешностей обработки глубоких отверстий // Известия вузов. – 1977. – № 5. – С. 167–171.

5. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

6. Троицкий Н.Д. Глубокое сверление. – Л.: Машиностроение, 1971. – 276 с.

7. Pfléghar F. Aspekte zur konstruktiven // Gestaltung von EinlippenTiefbohrwerkzeugen. – 1997. – Vol. 67, no. 4. – P. 211–218.

8. Sakuma K., Taguchi A., Katsuvi A. Study on deep hole boring by BTA system solid boring tool // Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering. – 1980. – № 3. – P. 143–148.

9. Stockert R., Weber U. Auslegung von einschneidigen Tiefbohrwerkzeugen mit zwei Einzelschneiden // VDI-Zeitschrift. – 1978. – Vol. 120, no. 22. – S. 1057–1061.

10. Stockert R. Beitrag zur konstruktiven Auslegung mehrschneidiger Tiefbohrwerkzeugen // Industrie-Anzeiger. – 1977. – Vol. 99, no. 22. – S. 390–391.

11. Горелова А.Ю., Плешаков А.А., Кристал М.Т. Методы повышения точности обработки глубоких отверстий // Известия Тул. гос. ун-та. Технологические науки. – 2013. – Вып. 7, ч. 2. – С. 363–370.

12. Подураев В.Н., Горелов В.А., Барзов А.А. Влияние геометрических параметров сверла на точность глубоких отверстий // Известия вузов. – 1976. – № 9. – С. 180–183.

13. Подураев В.Н., Суворов А.А., Барзов А.А. О влиянии разнообрабатываемости на точность обработки глубоких отверстий // Известие вузов. – 1975. – № 10. – С. 141–144.

14. Царенко М.А. Твердосплавное сверло для обработки глубоких отверстий. Станки и инструмент. – 1965. – № 3. – С. 28–33.

15. Царенко М.А. Исследование глубокого сверления трудно обрабатываемой стали сверлами с внутренним удалением стружки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 1967. – 16 с.

16. Черничкин С.А. Кольцевое сверление и обработка глубоких отверстий. – М.: Машиностроение, 1964. – 239 с.

17. Носков В.В., Пациора А.П. Уникальные возможности механической обработки глубоких отверстий // Оборудование и инструмент: междунар. инф.-техн. журн. – 2008. – № 5. – С. 56–57.

18. Поповская Е.В., Черный А.П. Управление отводом стружки при глубоком сверлении // Станки и инструмент. – 1978. – № 6. – С. 32–34.

19. Троицкий Н.Д. О причинах уводов при глубоком сверлении. – Л.: Машиностроение, 1957. – 52 с.

20. Соловьев А.И. Исследование и разработка технологических способов повышения точности и производительности обработки глубоких отверстий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: СТАНКИН, 1985. – 20 с.

21. Ушаков А.И. Колебания борштанги глубокорасточного станка // Известия вузов. – 1973. – № 12. – С. 139–144.

22. Фридман Ю.М. Расчет направляющих сверла при скоростном сверлении глубоких отверстий // Произ-

водство и эксплуатация инструмента. Опыт уральских заводов. – М.; Свердловск: Mashgiz, 1955. – Вып. 7. – С. 116–129.

23. Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 184 с.

24. Немцев Б.А., Шаманин А.А., Кижняев Ю.И. Переоборудование и оснащение универсальных токарно-винторезных станков для обработки глубоких отверстий // Металлообработка. – 2006. – № 3 (33). – С. 5–7.

25. Рыжаков Ф.Л. Опыт сверления глубоких отверстий на тяжелых станках // Машиностроитель. – 1963. – № 3. – С. 31–38.

References

1. Utkin N.F., Kizhniaev Iu.I., Pluzhnikov S.K. Obrabotka glubokikh otverstii [Deep hole machining]. Leningrad: Mashinostroenie, 1988, 269 p.

2. Poduraev V.N., Suvorov A.A., Barzov A.A. O vliianii skorosti rezaniia na uvody pri glubokom sverlenii [On the effect of cutting speed on deep hole drilling drift]. *Izvestiia vuzov*, 1976, no. 1, pp. 182–184.

3. Potiagailo M.V. Izgotovlenie glubokikh i tochnykh tsilindricheskikh otverstii [Making deep and precise cylindrical holes]. Moscow; Leningrad: Mashgiz, 1947, 108 p.

4. Svetlitskii V.A., Meshcheriakov R.K., Ushakov A.I. Raschet pogreshnostei obrabotki glubokikh otverstii [Calculation of machining errors for deep holes]. *Izvestiia vuzov*, 1977, no. 5, pp. 167–171.

5. Suslov A.G., Dal'skii A.M. Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroeniia [Scientific foundations of mechanical engineering technology]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 684 p.

6. Troitskii N.D. Glubokoe sverlenie [Deep drilling]. Leningrad: Mashinostroenie, 1971, 276 p.

7. Pfléghar F. Aspekte zur konstruktiven. *Gestaltung von EinlippenTiefbohrwerkzeugen*, 1997, vol. 67, no. 4, pp. 211–218.

8. Sakuma K., Taguchi A., Katsuvi A. Study on deep hole boring by BTA system solid boring tool. *Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering*, 1980, no. 3, pp. 143–148.

9. Stockert R., Weber U. Auslegung von einschneidigen Tiefbohrwerkzeugen mit zwei Einzelschneiden. *VDI-Zeitschrift*, 1978, vol. 120, no. 22, pp. 1057–1061.

10. Stockert R. Beitrag zur konstruktiven Auslegung mehrschneidiger Tiefbohrwerkzeugen. *Industrie-Anzeiger*, 1977, vol. 99, no. 22, pp. 390–391.

11. Gorelova A.Iu., Pleshakov A.A., Kristal' M.T. Metody povysheniia tochnosti obrabotki glubokikh otverstii [Methods to improve the accuracy of machining deep holes]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnologicheskie nauki*, 2013, iss. 7, part 2, pp. 363–370.

12. Poduraev V.N., Gorelov V.A., Barzov A.A. Vliianie geometricheskikh parametrov sverla na tochnost' glubokikh otverstii [Influence of drill geometry on the accuracy of deep holes]. *Izvestiia vuzov*, 1976, no. 9, pp. 180–183.

13. Poduraev V.N., Suvorov A.A., Barzov A.A. O vliianii raznobraatyaemosti na tochnost' obrabotki

glubokikh otverstii [On the effect of diversity on the machining accuracy of deep holes]. *Izvestie vuzov*, 1975, no. 10, pp. 141–144.

14. Tsarenko M.A. Tverdospлавное сверло для обработки глубоких отверстий [Tungsten carbide drill bit for deep hole machining]. *Stanki i instrument*, 1965, no. 3, pp. 28–33.

15. Tsarenko M.A. Issledovanie glubokogo sverleniia trudno obrabatyvaemoi stali sverlami s vnutrennim udaleniem struzhki [A study of deep drilling of difficult-to-machine steel with drills with internal chip removal]. PhD theses. Saratov, 1967, 16 p.

16. Chernichkin S.A. Kol'tsevoe sverlenie i obrabotka glubokikh otverstii [Circular drilling and deep hole machining]. Moscow: Mashinostroenie, 1964, 239 p.

17. Noskov V.V., Patsiora A.P. Unikal'nye vozmozhnosti mekhanicheskoi obrabotki glubokikh otverstii [Unique possibilities for machining deep holes]. *Oborudovanie i instrument*, 2008, no. 5, pp. 56–57.

18. Popovskaia E.V., Chernyi A.P. Upravlenie otvodom struzhki pri glubokom sverlenii [Chip evacuation control for deep hole drilling]. *Stanki i instrument*, 1978, no. 6, pp. 32–34.

19. Troitskii N.D. O prichinakh uvodov pri glubokom sverlenii [About the causes of deep drilling drift]. Leningrad: Mashinostroenie, 1957, 52 p.

20. Solov'ev A.I. Issledovanie i razrabotka tekhnologicheskikh sposobov povysheniia tochnosti i proizvoditel'nosti obrabotki glubokikh otverstii [Research and development of technological methods to improve the accuracy and productivity of machining deep holes]. PhD theses. Moscow, 1985, STANKIN, 1985, 20 p.

21. Ushakov A.I. Kolebaniia borshtangi glubokorastozhnogo stanka [Boring bar oscillations of a deep boring machine]. *Izvestiia vuzov*, 1973, no. 12, pp. 139–144.

22. Fridman Iu.M. Raschet napravliaiushchikh sverla pri skorostnom sverlenii glubokikh otverstii [Calculation of drill guides for high-speed deep hole drilling]. *Proizvodstvo i*

ekspluatatsiia instrumenta. Opyt ural'skikh zavodov. Moscow; Sverdlovsk: Mashgiz, 1955, iss. 7, pp. 116–129.

23. Kholmogortsev Iu.P. Optimizatsiia protsessov obrabotki otverstii [Optimization of hole machining processes.]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 184 p.

24. Nemtsev B.A., Shamanin A.A., Kizhniaev Iu.I. Pereoborudovanie i osnashchenie universal'nykh tokarnovintoreznykh stankov dlia obrabotki glubokikh otverstii [Retrofitting and equipping of universal screw-cutting lathes for deep hole machining]. *Metalloobrabotka*, 2006, no. 3 (33), pp. 5–7.

25. Ryzhakov F.L. Opyt sverleniia glubokikh otverstii na tiazhelykh stankakh [Experience of drilling deep holes on heavy machines]. *Mashinostroitel'*, 1963, no. 3, pp. 31–38.

Получено 29.12.2020

Опубликовано 29.03.2021

Сведения об авторах

Мышкин Максим Иванович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры инновационных технологий машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: maxixam85@mail.ru.

Фархуллина Ирина Сергеевна (Пермь, Россия) – студентка базовой кафедры специального машиностроения Пермского национального исследовательского политехнического университета, e-mail: maxixam85@mail.ru.

About the authors

Maksim I. Myshkin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Innovative Technologies of Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: maxixam85@mail.ru.

Irina S. Farkhullina (Perm, Russian Federation) – Student, Basic Department of Special Mechanical Engineering, Perm National Research Polytechnic University, e-mail: maxixam85@mail.ru.