

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-19-28>



Исследование процесса глубокого сверления нержавеющей стали

Е.И. Яцун ¹ ✉, О.С. Зубкова ¹, С.Н. Могилев ¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: el.yatsun@gmail.com

Резюме

Цель исследования. Экспериментальное определение влияния режимов глубокого сверления высоко-легированной стали на составляющие сил резания. Получение отверстий в сплошном материале при глубине отверстия, равной или большей десяти диаметрам отверстия, относится к операциям глубокого сверления. Для сверления применяется специальный инструмент – сверла для глубокого сверления – эжекторные, пушечные, ружейные. Применяется универсальное или специальное оборудование, оснастка – подвижные или неподвижные люнеты, направляющие втулки. Для достижения поставленной цели необходимо выбрать оборудование; тип инструмента для глубокого сверления; вид наладки; создать модель сил, действующих на режущую часть инструмента в процессе глубокого сверления; оценить степень влияния режимов обработки на силы резания.

Методы. Исследования основаны на положениях теории резания, технологии машиностроения, планирования эксперимента и регрессионного анализа.

Результаты. На основании положений технологии машиностроения разработана наладка на глубокое сверление при вращающейся заготовке и не вращающемся сверле, которому сообщается только осевая подача. Определен режущий инструмент для выполнения операции глубокого сверления – ружейное сверло. Для такой схемы обработки создана модель и рассчитаны экспериментальные силы резания. По результатам расчетов определено, что наибольшее влияние на составляющие силы резания в заданном диапазоне режимов резания оказывает скорость осевой подачи инструмента.

Заключение. Силы резания, возникающие при глубоком сверлении, достигают значительных величин. Полиномиальные уравнения, полученные в результате исследования, позволяют оценить степень влияния режимов обработки на силы резания, рассчитать силы резания для дальнейшего расчета стрелы прогиба стебля ружейного сверла.

Ключевые слова: ружейное сверло; глубокое сверление; силы резания; подача; скорость резания.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Яцун Е.И., Зубкова О.С., Могилев С.Н. Исследование процесса глубокого сверления нержавеющей стали // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): 19-28. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-19-28>.

Поступила в редакцию 27.09.2021

Подписана в печать 14.10.2021

Опубликована 20.12.2021

Investigation of the Process of Deep Drilling of Stainless Steel

Elena I. Yatsun ¹ ✉, Oksana S. Zubkova ¹, Sergey N. Mogilev ¹

¹ Southwest State University

50 Let Oktyabrya str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: el.yatsun@gmail.com

Abstract

Purpose of research. Experimental assessment of the effect of deep drilling modes for high-alloy steel on the components of cutting forces. Making holes in a solid material with a hole depth equal to or greater than ten hole diameters refers to deep drilling operations. For drilling, special tools are used – drills for deep drilling - ejector, cannon, gun drills. Universal or special equipment is applied, the tooling includes travelling or fixed rests, guide bushes.

To achieve this goal, it is necessary to choose equipment: type of tool for deep drilling, type of setting; create a model of the forces acting on the cutting part of the tool during deep drilling; evaluate the degree of influence of processing modes on cutting forces.

Methods. The research is based on the cutting theory provisions, mechanical engineering technology, experiment planning and regression analysis.

Results. Based on the provisions of mechanical engineering technology, the setting up for deep drilling with a rotating workpiece and a non-rotating drill, which is imparted only by the axial feed, was developed. A cutting tool for performing a deep drilling operation is defined – a gun drill. A pattern was created for such a processing scheme and experimental cutting forces were calculated. According to the results of the calculations, it is determined that the greatest influence on the components of the cutting force in a given range of cutting modes is exerted by the axial feed rate of the tool.

Conclusion. The cutting forces that occur during deep drilling reach significant values. The polynomial equations obtained as a result of the study allow us to assess the degree of influence of processing modes on cutting forces, calculate cutting forces for further calculation for the sag of the stem of a gun drill.

Keywords: gun drill; deep drilling; cutting forces; feed; cutting speed.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Yatsun E. I., Zubkova O.S., Mogilev S.N. Investigation of the Process of Deep Drilling of Stainless Steel. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2021; 25(4): 19-28 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-19-28>.

Received 27.09.2021

Accepted 14.10.2021

Published 20.12.2021

Введение

В настоящее время для сверления глубоких отверстий глубиной до $250d$, где d – диаметр сверла, широкое применение находят ружейные сверла [1-5]. При использовании этих инструментов на направляющие станины станка устанавливают дополнительные опоры –

люнеты, чтобы стембель инструмента, как наименее жесткий элемент технологической системы, под действием сил резания не деформировался. Прогиб корпуса инструмента - стембля может вызвать его касание поверхности обработанного отверстия и, как следствие, поломку сверла [6, 7]. Сверление жаропрочных сталей сопровождается обра-

зованием сильно деформированной лентообразной стружки, которая затрудняет подвод охлаждающей жидкости и снижает стойкость сверла [8]. Сверление жаропрочных сталей осуществляют при обильном охлаждении 5%-ной эмульсией или водным раствором хлористого бария с добавкой 1% нитрата натрия [9, 10].

Направление сверла в начале обработки обеспечивается специальной кондукторной втулкой или предварительным сверлением отверстия меньшего диаметра на небольшую глубину [11-14].

При сверлении глубоких отверстий ружейными сверлами создаются сложные условия для отвода стружки из зо-

ны обработки, что может привести к уводу оси сверла и даже поломке инструмента [15]. Для дробления стружки применяются специальные формы твердосплавных пластин со стружколомающими канавками и обильная подача смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) под высоким давлением для вывода стружки из зоны резания.

Материалы и методы

Деталь «Пробка» (рис. 1) представляет собой вал со сквозным отверстием. Деталь применяется в атомной промышленности.

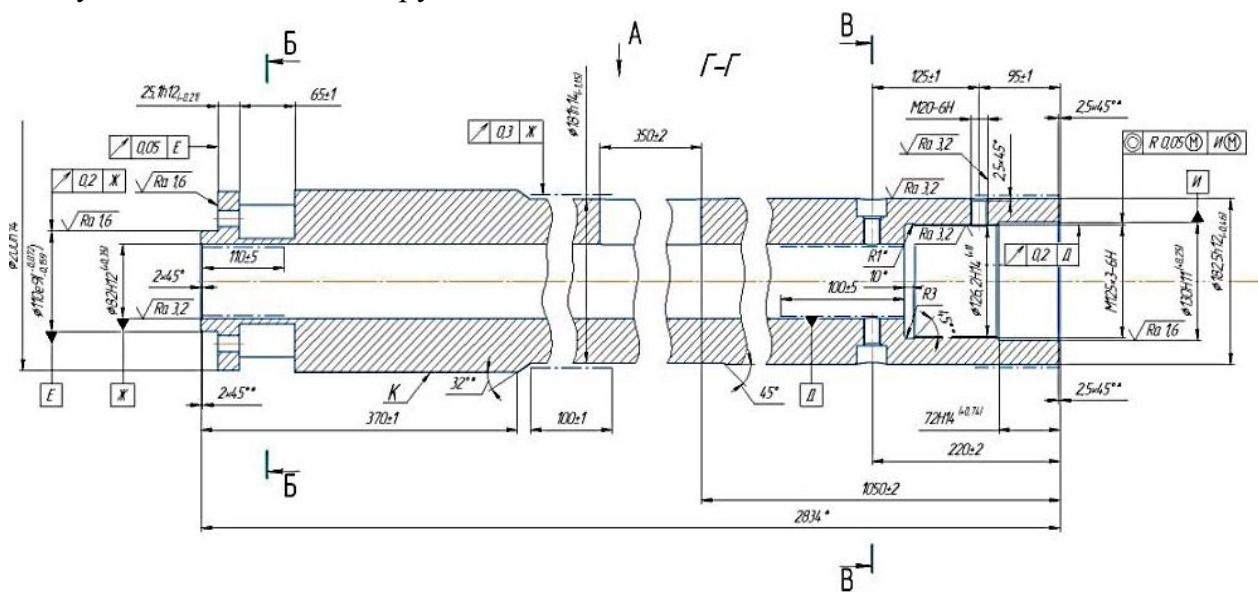


Рис. 1. Конструкция детали «Пробка»

Fig. 1. Design the "Plug" part

Материал детали – сталь 12X18H10T ГОСТ 5949-75 является высокоуглеродистой стойкой к коррозии, немагнитной, титаносодержащей сталью. Группа аустенитов. Относится к сложнелегированным сплавам [1]. На сегодняшний день она представляет собой самую используемую

и распространенную сталь из всех марок нержавеющей сталей [2, 3]. Твердость материала HB 10 -1 = 179 МПа.

Размер заготовки – стандартный прокат:

Круг $\frac{220 - \text{В1 ГОСТ 2590-2006}}{12\text{X}2\text{X}18\text{H1} \text{ГОСТ 5949-75}}$.

Содержание операции: сверлить отверстие $\varnothing 82H12^{(+0,35)}$ мм на глубину 2840^{+3} мм (рис. 2).

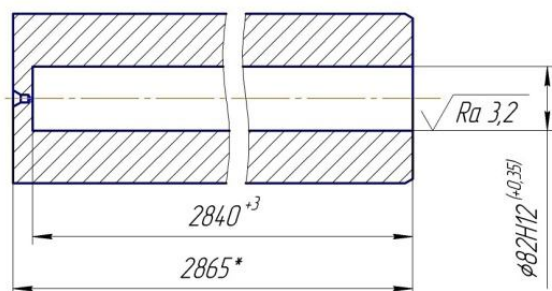


Рис. 2. Операционный эскиз

Fig. 2. Operational drawing

Сверление глубоких отверстий в металле обычно выполняют в такой последовательности [6, 7, 16]:

Производится сверление в детали подготовительного отверстия спиральным сверлом с меньшим диаметром и допуском H7. Сверление на длину, равную двум диаметрам инструмента (рис. 3).

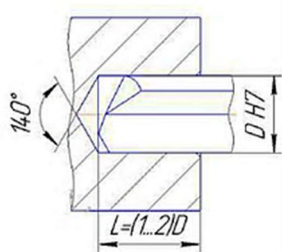


Рис. 3. Предварительное сверление

Fig. 3. Pre-drilling

Ружейное сверло на пониженных оборотах перемещают к торцу детали. Сверление на длину, равную одной трети длины отверстия. Используется неподвижный люнет.

Затем ружейное сверло (рис. 4) работает на расчетных по технологии оборотах с подводом СОЖ. Производится сверление детали на необходимую глубину без вывода инструмента из отверстия.

Режимы резания:

– диаметр сверления $\varnothing 70H7$. Предварительное сверление $t = 35$ мм; $L=70$ мм. $S=0,04$ мм/об.; $V=180$ м/мин.; $n=1000$ мин.⁻¹;

– диаметр сверления $\varnothing 82H12$. Основное сверление $t = 41$ мм; $L=700$ мм. $S=0,14$ мм/об.; $V=375$ м/мин.; $n=1450$ мин.⁻¹; $M_{кр}=360$ Н·м; $P_o=8,7$ кН.

Ружейное сверло состоит из режущей твердосплавной рабочей части и стального трубчатого стебля с V-образной канавкой и хвостовика (рис.4) [17, 18, 19 - 22]. СОЖ подаётся в зону резания через сквозное отверстие внутри сверла.

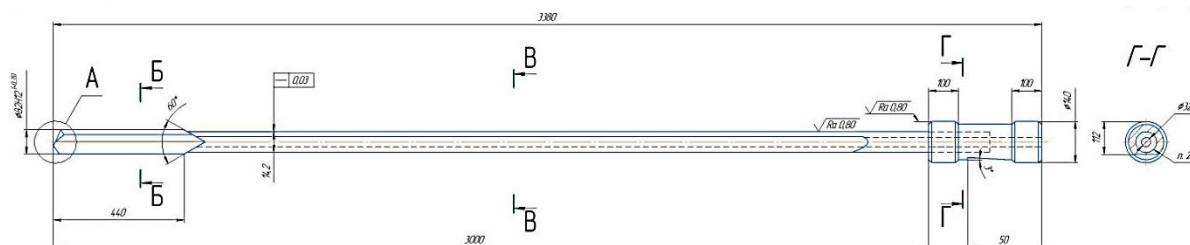


Рис. 4. Ружейное сверло

Fig. 4. Gun drill

Стружка отводится по V-образной канавке в стружкоприемник и далее в стружкосборник станка.

Результаты и их обсуждение

В процессе сверления на ружейное сверло действуют: крутящий момент $M_{кр}$, осевая сила P_o , и изгибающие моменты $M_{из}$ [2, 16] (рис. 5).

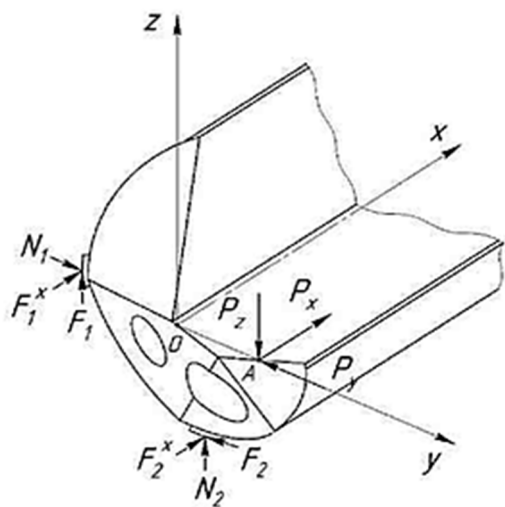


Рис. 5. Схема сил и моментов, действующих на режущую кромку ружейного сверла

Fig. 5. Diagram of forces and moments acting on the cutting edge of the gun drill

У ружейного сверла главная режущая кромка расположена эксцентрично относительно оси X инструмента, поэтому результирующая сила резания приложена в точке A и её можно разложить на составляющие P_z , P_x , P_y (см. рис. 5) [2].

Исходными данными для расчета по приведенным формулам являются: d – диаметр сверла; P_z , P_x , P_y – составляющие силы резания; μ – коэффициент трения на направляющих вокруг оси ox ; μ_x – коэффициент трения на направля-

ющих параллельно оси ox ; h – расстояние от оси ox до точки A; α – угол расположения опорной направляющей относительно оси oz (рис. 6) [2].

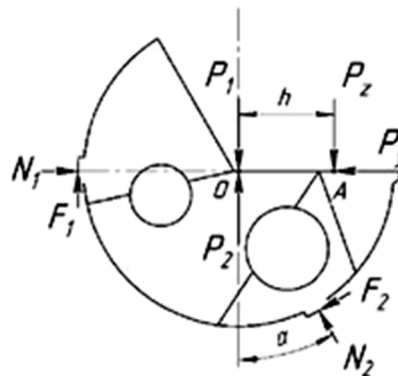


Рис. 6. Расчетная схема

Fig. 6. Design model

Из этих данных наибольшие трудности вызывает определение составляющих силы резания P_z , P_x , P_y , так как определить их экспериментально в процессе сверления из-за влияния трения на направляющих невозможно [2]. Поэтому на практике процесс сверления ружейными сверлами моделируют сверлением на токарно-винторезном станке заготовок, диаметр которых равен диаметру сверла, исключая контакт направляющих инструмента с поверхностью обработанного отверстия [2, 7, 11, 16]. Для этой цели использовали токарно-винторезный станок мод. 1М65-5. Составляющие силы резания измеряли трехкомпонентным динамометром мод. 9257ВА. Резание осуществляли с использованием смазочно-охлаждающей жидкости.

Результаты измерений представлены в виде графика (рис. 8) и полиномиальных уравнений [2, 3]:

$$P_x = 1530,5 \cdot d^{0,55} \cdot S^{0,71} = 1530,5 \cdot 82^{0,55} \times \\ \times 0,14^{0,71} = 4323 \text{ (Н)} = 4,3 \text{ кН.}$$

Для снижения сил резания уменьшаем подачу. Принимаем $S=0,04$ мм/об.

$$P_z = 1505 \cdot d^{0,65} \cdot S^{0,7878} = 1505 \cdot 82^{0,65} \times \\ \times 0,04^{0,78} = 2,1 \text{ (кН).}$$

$$P_y = 2985 \cdot d^{0,17} \cdot S^{0,89} = 2985 \cdot 82^{0,17} \times \\ \times 0,04^{0,89} = 0,3 \text{ (кН).}$$

$$P_x = 1530,5 \cdot d^{0,55} \cdot S^{0,71} = 1530,5 \cdot 82^{0,55} \times \\ \times 0,04^{0,71} = 1728,9 \text{ (Н)} = 1,7 \text{ кН.}$$

Расчет сверл на продольный изгиб производится по зависимости [5, 16]:

$$P_{кр} = \frac{2 \cdot E \cdot J_{\min} \cdot \pi^2}{l^2 \cdot \left(1 + \frac{J_{\min}}{J_{\max}}\right)},$$

где E – модуль упругости при растяжении, мм⁴;

$J_{\min}$ и $J_{\max}$ – наибольший и наименьший моменты инерции сечения сверла.

$$P_{кр} = \frac{2 \cdot 60000 \cdot 155275 \cdot 3,14^2}{3100^2 \cdot \left(1 + \frac{155275,6}{1024851}\right)} = 16,6 \text{ (кН)}$$

Продольный изгиб наблюдается при нагружении сверла осевой силой P_o , критические напряжения равны [5]:

$$\sigma_{кр} = \frac{P_o}{F},$$

где F – площадь поперечного сечения стебля сверла, мм². $F=1432$ мм².

Расчетное значение осевой силы $P_o = 8,7$ кН. Крутящий момент $M_{кр} = 360$ Н·м.

$$\sigma_{кр} = \frac{870}{1432} = 0,6 \text{ (кг/мм}^2\text{)}.$$

$$\sigma_{и} = 144 \dots 165 \text{ кг/мм}^2 \text{ [5].}$$

Экспериментально полученные значения значительно меньше допустимых величин.

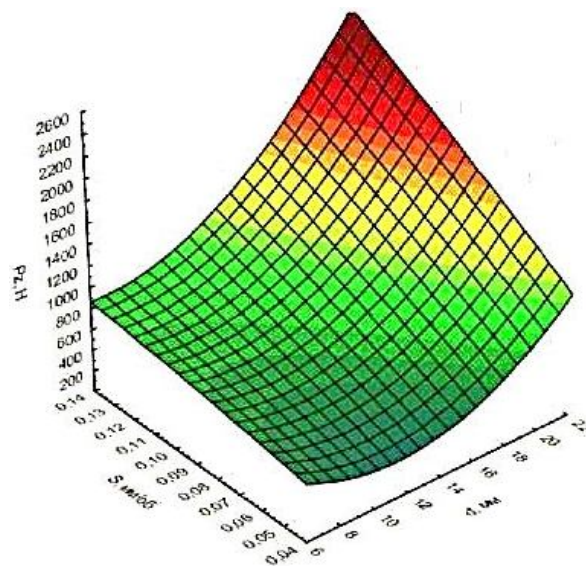


Рис. 8. Влияние подачи S и диаметра ружейного сверла d на составляющую силы резания P_z при сверлении стали 12Х18Н10Т

Fig. 8. The effect of the feed S and the diameter of the gun drill d on the component of the cutting force P_z when drilling 12Х18Н10Т steel

Используемая модель схемы сил и моментов, действующих на ружейное сверло, экспериментально полученные зависимости планируется использовать в дальнейших исследованиях при расчете стрелы прогиба ружейного сверла методом конечных элементов.

Выводы

Полученные зависимости показывают влияние составляющих системы резания на силы резания. Из полученных данных следует, что наибольшее влияние на силы резания оказывает скорость подачи инструмента. Значения расчетных сил резания и полученных экспериментально могут существенно отличаться. Это связано с состоянием конкретной технологической системы ста-

нок – приспособление – инструмент – деталь. Поэтому для дальнейших исследований стрелы прогиба стебля ружейного сверла будут использованы значения сил резания, полученные экспериментально.

Список литературы

1. Троицкий Н.Д. Глубокое сверление. Л.: Машиностроение, 1971. 176 с.
2. Кирсанов С.В. Современные конструкции инструментов для сверления и растачивания глубоких отверстий // Справочник. Инженерный журнал. 2005. №2(95). С. 46-53.
3. Инструменты для обработки точных отверстий / С.В. Кирсанов, В.А. Гречишников, А.Г. Схиртладзе, В.И. Кокарев. М.: Машиностроение, 2005. 336 с.
4. Черничкин С.А. Кольцевое сверление и обработка глубоких отверстий. М.: Машиностроение, 1975. 240 с.
5. Кононенко С.Г. Обработка глубоких отверстий. М.: Машиностроение, 1964. 41 с.
6. Минков М.А. Технология обработки глубоких точных отверстий. М.-Л.: Машиностроение, 1965. 176 с.
7. Туктанов А.Г. Технология производства стрелково-пушечного и артиллерийского оружия. М.: Машиностроение, 2007. 375 с.
8. Кожевников Д.В. Современная технология и инструмент для обработки глубоких отверстий: обзор. М.: НИИМАШ, 1981. 60 с.
9. Кирсанов С.В. Смазочно-охлаждающие технологические средства, применяемые при обработке глубоких отверстий // Справочник. Инженерный журнал. 2001. №6(51). С. 5-7.
10. Буяновский И.А. К оценке нижних температурных пределов действия химически активных присадок // Трение и износ. 1981. Т. 2, №4. С. 703-707.
11. Кирсанов С.В. Станки для обработки глубоких отверстий // Справочник. Инженерный журнал. 2001. №8(53). С. 46-49.
12. Гольдрах Г.М., Джугурян Т.Г., Капительман Л.В. Станки для глубокого сверления // Техника машиностроения. 1966. №3 (9). С. 39-41.
13. Губергриц Л.И., Дроздов Ф.М. Станки для сверления и растачивания глубоких отверстий // Станки и инструмент. 1989. №4. С. 2-4.
14. Липатов А.Н. Глубокое сверление на станках с ЧПУ // Станки и инструмент, 1991. №5. С. 29-31.
15. Соколов А.В., Вяткин М.Д., Шендеров И.Б. и др. Обеспечение прямолинейности каналов при производстве трубных заготовок // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2000. №12. С. 48-49.
16. Пентегов О.Л. Влияние величины нулевого стержня и углов в плане на усилие резания при сверлении однокромочными сверлами // Вопросы производительности

обработки металлов резанием. Труды Новочеркасского политехнического института. 1967. Т. 165. С. 93-95.

17. Литвинов Л.П. Вибросверление глубоких отверстий // Вестник машиностроения. 1990. №5. С. 22-24.

18. Кириллин Б.Н. Вибрационное сверление ружейными сверлами // Станки и инструмент. 1968. №5. С. 22-24.

19. Инструментальное обеспечение процесса механической обработки твердыми сплавами и композитами / Е.И. Яцун, В.В. Малыхин, О.С. Зубкова, С.Г. Новиков. Курск, 2016. 224 с.

20. Яцун Е.И. Инструментальные системы для обработки деталей гидроцилиндров. Курск, 2020. 117 с.

21. Яцун Е.И., Аникеева Н.П., Карнаухов И.С. Повышение эффективности обработки длинномерных валов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; №23(1): 43-53. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-43-53>.

22. Увеличение динамической жесткости расточных оправок / Е.И. Яцун, - О.С. Зубкова, А.В. Гордейков, Д.А. Зубков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 3 (341). С. 45-50.

References

1. Troitsky N.D. *Glubokoe sverlenie* [Deep drilling]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 176 p.

2. Kirsanov S.V. *Sovremennye konstruksii instrumentov dlya sverleniya i rastachivaniya glubokikh otverstii* [Modern designs of tools for drilling and boring deep holes]. *Guide. Inzhenernyi zhurnal = Engineering Journal*, 2005, no.2(95), pp.46-53.

3. Kirsanov S.V., Grechishnikov V.A., Skhirtladze A.G., Kokarev V.I. *Instrumenty dlya obrabotki tochnykh otverstii* [Tools for processing precise holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 336 p.

4. Chernichkin S.A. *Kol'tsevoe sverlenie i obrabotka glubokikh otverstii* [Ring drilling and processing of deep holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 240 p.

5. Kononenko S.G. *Obrabotka glubokikh otverstii* [Processing of deep holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964. 41 p.

6. Minkov M.A. *Tekhnologiya obrabotki glubokikh tochnykh otverstii* [Technology of processing deep precise holes]. Moscow-Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1965, 176 p.

7. Tuktanov A.G. *Tekhnologiya proizvodstva strelkovo-pushechnogo i artilleriiskogo oruzhiya* [Technology of production of small-gun and artillery weapons]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 375 p.

8. Kozhevnikov D.V. *Stanki dlya obrabotki glubokikh otverstii* [Modern technology and tools for processing deep holes]. Moscow, NIIMASH Publ., 1981. 60 p.

9. Kirsanov S.V. Smazочно-okhlazhdayushchie tekhnologicheskie sredstva, primenyaemye pri obrabotke glubokikh otverstii [Lubricating and cooling technological means used in the processing of deep holes]. *Guide. Inzhenernyi zhurnal = Engineering Journal*, 2001, no. 6(51), pp.5-7.

10. Buyanovskiy I.A. K otsenke nizhnikh temperaturnykh predelov deistviya khimicheskii aktivnykh prisadok [To the assessment of the lower temperature limits of the action of chemically active additives]. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 1981, vol. 2, no. 4, pp. 703-707.

11. Kirsanov S.V. Stanki dlya obrabotki glubokikh otverstii [Machines for processing deep holes. Guide.]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal = Engineering Magazine, Engineering Journal*, 2001, no.8(53), pp.46-49.

12. Goldrakh G.M., Dzhuguryan T.G., Kapitelman L.V. Stanki dlya glubokogo sverleniya [Machines for deep drilling]. *Mashinostroenie = Mechanical Engineering*, 1966, no. 3 (9), pp. 39-41.

13. Gubergits L.I., Drozdov F.M. Stanki dlya sverleniya i rastachivaniya glubokikh otverstii [Machines for drilling and boring deep holes]. *Stanki i instrument = Machines and Tools*, 1989, no. 4, pp. 2-4.

14. Lipatov A.N. Glubokoe sverlenie na stankakh s ChPU [Deep drilling on CNC machines]. *Stanki i instrument = Machines and Tools*, 1991, no. 5, pp. 29-31.

15. Sokolov A.V., Vyatkin M.D., Shenderov I.B., etc. Obespechenie pryamolineinosti kanalov pri proizvodstve trubnykh zagotovok [Ensuring the straightness of channels in the production of pipe blanks]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie = Chemical and Oil and Gas Engineering*, 2000, no. 12, pp. 48-49.

16. Pentegov O.L. Vliyanie velichiny nulevogo sterzhnya i uglov v plane na usilie rezaniya pri sverlenii odnokromochnymi sverlami [Influence of the zero rod size and angles in the plan on the cutting force when drilling with single-edged drills]. *Voprosy proizvoditel'nosti obrabotki metallov rezaniem. Trudy Novocherkasskogo politekhnicheskogo instituta = Productivity Issues of Metal Cutting. Proceedings of the Novocherkassk Polytechnic Institute*, 1967, vol. 165, pp. 93-95.

17. Litvinov L.P. Vibrosverlenie glubokikh otverstii [Vibration drilling of deep holes]. *Vestnik mashinostroeniya = Bulletin of Mechanical Engineering*, 1990, no.5, pp. 22-24.

18. Kirillin B.N. Vibratsionnoe sverlenie ruzheinymi sverlami [Vibration drilling with rifle drills]. *Stanki i instrument = Machines and Tools*, 1968, no. 5, pp. 22-24.

19. Yatsun E.I., Malykhin V.V., Zubkova O.S., Novikov S.G. *Instrumental'noe obespechenie protsessa mekhanicheskoi obrabotki tverdymi splavami i kompozitami* [Instrumental support of the machining process with hard alloys and composites]. Monograph. Kursk, 2016. 224 p.

20. Yatsun E.I. *Instrumental'nye sistemy dlya obrabotki detalei gidrotsilindrov* [Tool systems for processing hydraulic cylinder parts]. Kursk, 2020. 117 p.

21. Yatsun E. I., Anikeeva N. P., Karnaukhov I. S. Increase in Processing Efficiency of Long-Length Shafts. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019; 23(1): 43-53 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-1-43-53>.

22. Yatsun E.I., Zubkova O.S., Gordeykov A.V., Zubkov D.A. Uvelichenie dinamicheskoi zhestkosti rastochnykh opravok [Increasing the dynamic rigidity of boring mandrels]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2020, no. 3 (341), pp. 45-50.

Информация об авторах / Information about the Authors

Яцун Елена Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: el.yatsun@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7633-6489>

Elena I. Yatsun, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: el.yatsun@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7633-6489>

Зубкова Оксана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» (МТиО), Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zubkova-oksana@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5818-8785>

Oksana S. Zubkova, Cand. of Sci. (Engineering), Associate Professor, Machine-building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zubkova-oksana@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5818-8785>

Могилев Сергей Николаевич, студент кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование», Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: varior88@mail.ru

Sergey N. Mogilev, Student Machine-building Technologies and Equipment Department, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: varior88@mail.ru