

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ВИРОБНИЦТВА

УДК 621.923.01

Є. А. ВАСИЛЬЄВ, С. В. ПОПОВ, А. В. ВАСИЛЬЄВ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЛИБОКОГО СВЕРДЛІННЯ СПІРАЛЬНИМИ СВЕРДЛАМИ ПРИ ОБРОБЦІ ДЕТАЛЕЙ З МАТЕРІАЛУ СТАЛЬ 40

У статті представлені результати теоретичних й експериментальних досліджень процесу глибокого свердління спіральним свердлом. Отримана математична модель залежності осевого зусилля від глибини різання, діаметру свердла, подачі і швидкості різання. Наведені рекомендації для підвищення продуктивності процесу свердління.

Ключові слова: глибоке свердління, механізм подач, стійкість, жорсткість, ефективність, математичне моделювання.

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса глубокого сверления спиральным сверлом. Получена математическая модель зависимости осевого усилия от глубины резания, диаметра сверла, подачи и скорости резания. Приведены рекомендации для повышения производительности процесса сверления.

Ключевые слова: глубокое сверление, механизм подач, стойкость, жесткость, эффективность, математическое моделирование.

This paper deals with the obtainment of process mathematical model of deep-hole twist drilling. In this article we have aimed to describe the processes that occur during deep-hole drilling depending on the depth of cut, drill diameter, feed and cutting velocity. There have been provided recommendations to improve the performance of the drilling process. Deep-hole drilling process is a time-consuming working operation, especially in machining viscous materials, and in the system "machining station – device – tool – component part" in deep-hole drilling process the tool – the twistdrill – works under the worst and the heaviest conditions. Accordingly, the enhancement of tool life will lead to increase in productivity of the cutting process, to decrease of energy requirement and the number of the utilizable tools. The knowledge of the process mathematical model of deep-hole twist drilling gives an insight into better understanding of the influence quantity of some or another value on the overall effectiveness of the process and allows to elaborate recommendations for ranging.

Keywords: deep-hole drilling, feed gearing, withstandability, toughness, efficiency, mathematic simulation.

Вступ. В даний час спостерігається тенденція, коли багато операцій, які здійснюються на розточувальних верстатах, переводять на більш дешеві і простіші вертикально-свердлильні верстати.

Свердлення глибоких отворів є трудомісткою технологічною операцією, особливо при обробці в'язких матеріалів [1]. В системі верстат – пристрій – інструмент – деталь (ВПД) при глибокому свердлінні [3] в найбільш важких умовах працює інструмент – спіральне свердло. Замкнений об'єм обробки, різноманітні функції, виконання яких повинні забезпечувати конструкція інструменту, форсовані режими різання змушують працювати корпус свердла, його ріжучі і напрямні елементи із значними напруженнями. Ці обставини роблять незаперечними переваги переведення механічної обробки отворів на вертикально-свердлильні верстати в умовах машинобудівного виробництва при обробці складнопрофільних поверхонь.

Аналіз останніх досліджень і виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Технологія глибокого свердління спіральними свердлами докорінно відрізняється від свердління кільцевими та гарматними свердлами. Основними відмінностями є кінематичні й динамічні особливості токарних, свердлильних верстатів і модулів, можливість керування вихідними параметрами процесу за рахунок використання в складі технологічної системи опорних елементів з різними характеристиками і т. ін. Таким чином, використання відомих теорій свердління гарматними свердлами, щодо процесу глибокого свердління спіральними свердлами, практично не можливе. Намагання розглянути це питання щодо сталевих заготовок робилися в [4].

Формулювання цілей статті. У зв'язку з вищевикладеним метою роботи є підвищення економічної ефективності свердління глибоких отворів за рахунок збільшення продуктивності процесу різання, підвищення стійкості інструменту, надійності процесу свердління, зменшення енерговитрат та кількості використовуваного інструменту. При вирішенні поставленого завдання необхідно провести теоретичні й експериментальні дослідження, оцінити точність і достовірність одержуваних результатів. **Об'єктом дослідження** є обладнання для виконання глибокого свердління. **Предметом дослідження** є фізика явищ, які виникають при взаємодії свердла з заготовкою, а також вплив параметрів і режимів роботи обладнання на показник шорсткості оброблюваної поверхні.

Виклад основного матеріалу процесу дослідження глибокого свердління спіральними свердлами. Для практичної реалізації глибокого свердління спіральним свердлом нам необхідно здійснити технологічне забезпечення, а саме: отримати залежності і дані для розрахунків і вибору типу пристрою для вимірювання осевого зусилля у випадку, коли $P_{\text{омтх}} \leq [P_{\text{м.л.}}]$, де

$P_{\text{омтх}}$ – максимальне осеве зусилля при свердлінні, Н; $[P_{\text{м.л.}}]$ – допустиме, регламентоване паспортом верстата зусилля механізму подач, Н.

Конструктивних параметрів пружного елемента пристрою, наприклад, пружини, із забезпеченням умови: $P_{\text{пр}} \geq P_o$, $P_{\text{пр}}$ – зусилля, що створюється пружиною при її деформації (стиску) в процесі різання, Н.

© Є. А. Васильєв, С. В. Попов, А. В. Васильєв. 2016

Аналіз значень осьових зусиль P_o , визначених за різними діючими нормативами та довідниками [5, 6, 7, 9, 10] при постійних значеннях глибини різання – t , діаметру свердла $D=30$ мм, подачі – $s=0,06$ мм/об., швидкості різання – $V=16$ м/с наведені на рис. 1.

Аналіз наведених даних свідчить про суттєву різницю визначення осьового зусилля при глибокому свердлінні спіральними свердлами, для нашого випадку в межах від 250 до 340 кН, і, відповідно, різні режими різання при свердлінні. З метою отримання достовірних значень P_o при свердлінні глибоких отворів нами запропонована методика, яка базується на використанні елементів теорії ймовірностей.

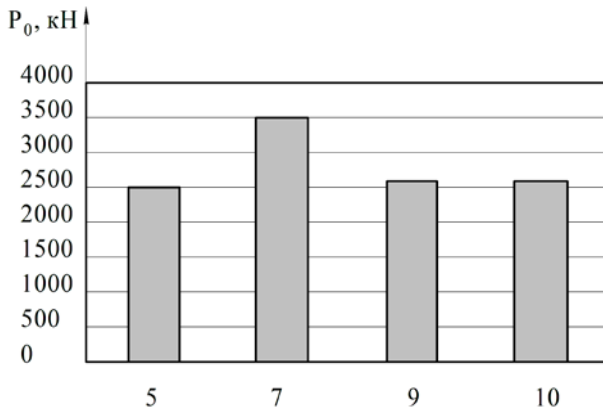


Рис. 1 – Гістограма значень осьового зусилля P_o (кН) при свердлінні отвору в матеріалі сталь 40 при $d=\text{const}$, $s=\text{const}$, $V=\text{const}$ за різними [5, 7, 9, 10] літературними джерелами

Дослідження процесу глибокого свердління зразків з сталі 40 планується проводити на вертикально-свердильному верстаті мод. 2Н135. Схема установки показана на рис. 2. Свердильний верстат складається зі шпинделя, в якому кріпиться свердло. Заготовка 1, що свердлиться, закріплюється на столі верстата.

Як цільова функція оцінки можливостей елементів технологічної системи доцільно прийняти продуктивність процесу глибокого свердління Q [9]:

$$Q = \frac{V \cdot S \cdot d \cdot T}{2 \cdot (T + t_{3M})}, \quad (1)$$

де V , S , d – величини швидкості, подачі і діаметру свердлення, відповідно, м/с; мм/об; мм; T – стійкість, хв; t_{3M} – час зміни, хв.

Для досягнення найвищої продуктивності процесу свердлення необхідно вести обробку з максимально допустимою величиною подачі S . У той же час максимальна допустима подача свердлення обмежується міцністю і подовжньою стійкістю свердла [8] і контролюється вимірюванням осьового зусилля.

Подача, припустима міцністю робочої частини свердла, може бути визначена за формулою:

$$S = \sqrt[3]{\frac{0,02 \cdot d^{3-x_M} \cdot \sigma_s}{1,73 \cdot C_M \cdot HB}}, \quad (2)$$

де d – діаметр інструменту, мм; σ_s – допустима напруга для матеріалу інструменту, МПа; C_M , y_M , x_M – постійні коефіцієнти, які залежать від механічних властивостей матеріалу, який оброблюють, і матеріалу ріжучої частини свердла; HB – твердість матеріалу, що оброблюють, за Брінелем.

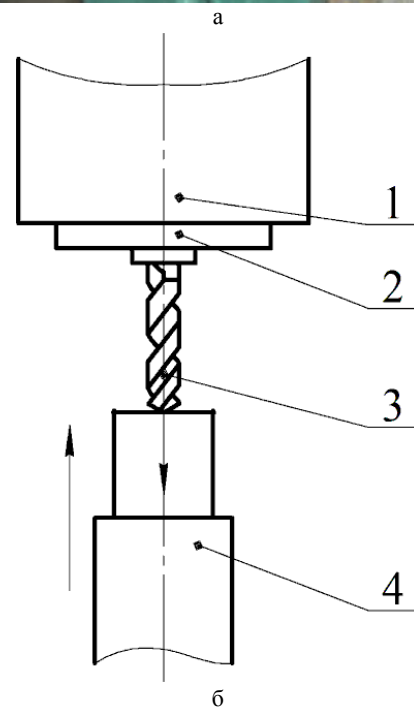


Рис. 2 – Дослідна установка: а – загальний вид; б – конструктивна схема; 1 – верстат; 2 – шпиндель; 3 – свердло; 4 – заготовка

Із збільшенням глибини свердління спіральним свердлом подача S , крім цього, також обмежується повздовжньою стійкістю стебла інструменту. Оскільки осьова сила різання при свердлінні P не повинна перевищувати критичну силу $P_{кр}$, що визначається за формулою [7]:

$$P_{кр} = \frac{E \cdot \pi^3 \cdot I}{(\mu \cdot l)^2}, \quad (3)$$

де $P_{кр}$ – критична сила, Н; E – модуль пружності, Па; l – довжина стебла свердла, мм; I – момент інерції поперечного перетину інструменту, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; μ – коефіцієнт приведення довжини.

Для збереження подовжньої стійкості стебла інструмента у міру збільшення глибини обробки необхідно зменшувати осьову складову сили різання шляхом зниження подачі. Проте, зменшення подачі приводить до збільшення питомої сили різання, що, у свою чергу, якісно впливає на процес різання. Обробка глибоких отворів на малих подачах є малопродуктивною, а на граничних подачах – веде до зниження якості обробки отворів. Наявність наведених обмежень по міцності, стійкості інструменту і мінімальному значенню допустимої подачі свердлення визначає область можливого вибору допустимих параметрів технологічної системи. Існуюча теорія і практика глибокого свердлення дає деякі рекомендації економічної доцільності тих або інших способів глибокого свердлення, які показані на рис. 3. Зрозуміло, що ці рекомендації певною мірою є умовними, а їх межі розпливчаті і у кожному конкретному випадку обробки глибоких отворів можуть бути переглянутими [10].

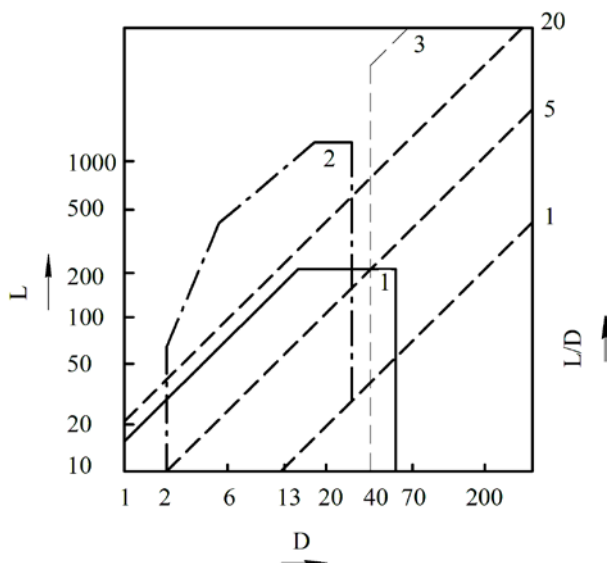


Рис. 3 – Номограма для визначення економічної ефективності способів глибокого свердлення залежно від глибини свердлення L та діаметра свердлення D : 1 – область можливої обробки спіральними свердлами; 2 – розсвердлювання 3 – область обробки гарматними свердлами

Теоретичні дослідження при обробці сталі 40 дозволяють використати наведені дані для вибору рекомендованих параметрів інструменту для глибокого свердління. З наведених на рисунку 3 графіків можна зробити висновок, що економічно доцільно виконувати операції глибокого свердління спіральними свердлами у відносно широких межах – до $200D$.

Проте можливості підвищення жорсткості інструменту за рахунок зміни форми перерізу стеблини свердла на даний час досить повно вивчені і практично вичерпані. Тому, вказуючи на складність істотного підвищення жорсткості свердла за рахунок оптимізації його поперечного перерізу основна увага спрямована на раціональну експлуатацію свердел.

Експериментальні дослідження визначення номінальних значень осьових зусиль при свердлінні сталі 40 здійснювали шляхом забезпечення міцності стебла свердла за умови збереження інструментом повздовжньої стійкості різними розмірами свердла при фіксованому значенні подачі. Одержані значення осьового зусилля P_o нанесені на графік рис. 4. З'єднання точок здійснено шляхом апроксимації.

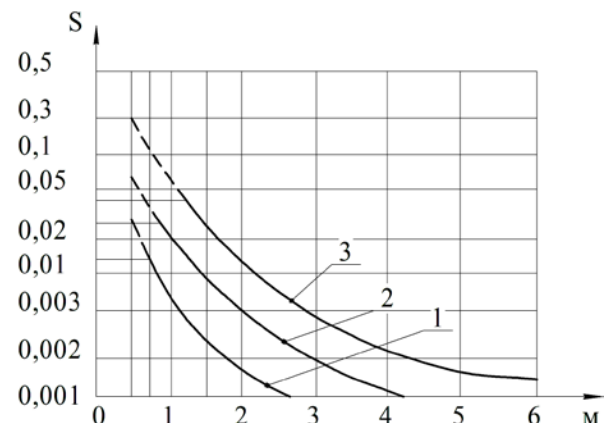


Рис. 4 – Допустимі подачі S при обробці сталі 40 за умови міцності стебла свердла і збереження інструментом подовжньої стійкості при одержаному зусиллі; діаметр свердла: 1 – 5 мм; 2 – 7,5 мм; 3 – 10 мм

Аналіз наведених на рис. 4 графічних залежностей свідчить, що робоча область в системі координат «подача – осьове зусилля» визначається двома показниками: мінімальною для даного діаметру свердла величиною подачі, що визначається стійким характером стружкоутворення і мінімальною продуктивністю; і максимально допустимою величиною подачі відповідно з міцністю поперечного перерізу інструменту і подовжньої стійкості стебла свердла.

Нами доведена можливість використання рекомендацій [9], які впевнено забезпечують використання рекомендованих режимів різання при досягненні економічної доцільності. Узагальнення результатів експериментальних досліджень створили основу для аналізу ефективності процесу свердління зі змінним вильотом інструмента.

Відомо [10], що величина стійкості інструмента зі збільшенням глибини свердління нелінійно залежить від довжини вильоту:

$$\left(\frac{T}{T_0}\right)^m = \left(\frac{l_0}{l}\right)^n, \quad (4)$$

де l – робоча довжина вильоту, мм; l_0 – вихідна розрахункова довжина вильоту, мм; n , m – показники, які враховують вплив вильоту на стійкість інструменту.

Залежно від способу виготовлення свердла, а також матеріалу, який оброблюють, показники степенів n і m за результатами досліджень [2, 9] приймають в межах від 0,2 до 0,3.

Проаналізувавши процес глибокого свердлення отворів свердлом із змінним вильотом, необхідно відзначити, що величина вильоту буде однаковою тільки на граничній глибині обробки. Протягом усього процесу обробки при роботі зі змінним вильотом інструмента ця величина завжди буде меншою. Таким чином, за всіма рівними умовами відношення стійкості інструмента при обробці зі змінним вильотом може бути визначене за формулою:

$$\frac{T}{T_0} = \frac{k - k^{\frac{n}{m}}}{k - 1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{n}{m}}, \quad (5)$$

де k – відношення вильоту наприкінці обробки до вихідного вильоту.

Відповідно до залежностей будуємо графіки стійкості інструмента при свердлінні зі змінним вильотом від відношення вильотів наприкінці і початку обробки (рис. 5). Показник степені m , що враховує вплив вильоту на стійкість, при цьому прийнятий рівним 0,25.

Наведені графічні залежності показують, що зі збільшенням відношення вильотів наприкінці і на початку обробки, стійкість інструмента зростає. З погіршенням оброблюваності матеріалу (збільшення показника n) ефект зростання стійкості збільшується. Ці висновки співпадають з експериментальними дослідженнями, проведеними в роботі на звичайних свердлах постійного перерізу по всій довжині інструмента, які показали, що крутильні ковчання, які знижують стійкість свердлів, є пропорційними кубу довжини вильоту свердла. При цьому шляхом зменшення довжини вильоту свердла можна збільшити величину подачі в три – сім разів при одночасному збільшенні стійкості інструмента від трьох до семи разів.

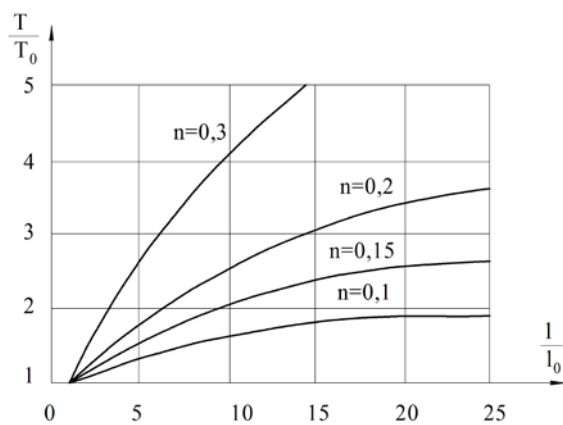


Рис. 5 – Стійкість інструмента при свердлінні зі змінним вильотом

Висновки

Аналіз отриманих теоретичних і експериментальних даних показує, що значення глибини сверд-

ління поверхні в основному залежить від глибини різання, діаметру свердла, подачі і швидкості різання, також уточнені параметри режимів різання при глибокому свердлінні спіральними свердлами сталі 40.

Для підвищення продуктивності процесу свердління необхідно вести обробку з максимально допустимою величиною подачі. У той же час максимальна допустима подача свердління обмежується міцністю і подовжньою стійкістю інструменту.

Список літератури:

1. Dreus, A. Investigation of heating of the drilling bits and definition of the energy efficient drilling modes [Text] / A. Dreus, A. Kozhevnikov, K. Lysenko, A. Sudakov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 3/7 (81). – P. 41–46. doi: [10.15587/1729-4061.2016.71995](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71995)
2. Ertunc, H. A decision fusion algorithm for tool wear condition monitoring in drilling [Text] / H. Ertunc, K. Loparo // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2001. – № 41 (9). – P. 1347 – 1362. doi: [10.1016/s0890-6955\(00\)00111-5](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(00)00111-5)
3. Li, H. Research on deep drilling [Text] / H. Li // Applied Mechanics and Materials. – 2012. – № 101–102. – P. 1101–1104.
4. Васильєв, А. В. Підвищення ефективності глибокого свердління сталевих заготовок [Текст] / А. В. Васильєв, С. В. Попов, І. В. Тимошенко // Галузеве машинобудування, будівництво. – 2014. – № 2 (41). – С. 206–212.
5. Пестунов, В. М. Решение проблем глибокого сверлення в металлообработке [Текст] / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, Л. П. Свяцкая // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – 2006. – № 49. – С. 173–178.
6. Пестунов, В. М. Оптимізація процесу обробки глибоких отворів [Текст] / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, С. В. Придворова // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2012. – № 25. – С. 200–209.
7. Косиловой, А. Г. Справочник технолога-машиностроителя [Текст] / А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 656 с.
8. Тимочко, Г. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищення економічної ефективності свердління наскрізних отворів [Електронний ресурс] / Г. Тимочко. – Режим доступу: <http://nadoest.com/konstruktorseko-tehnologichne-zabezpechennya-pidvishennya-ekon>.
9. Устройство для сверления отверстий малого диаметра. Патент СССР 975238, МКП В23 В47 [Текст] / Кузьмин Н. И., Кривый П. Д., Сопрончук В. Н. – № 3326065/25-08; заявл. 07.08.84; опубл. 23.11.82, бюл. №43.
10. Устройство для сверления сквозных отверстий. Патент СССР 1491624, МКП В23 В47 [Текст] / Нагорняк С. Г., Кузьмин Н. И., Кривый П. Д. – № 4279167/31-08; заявл. 07.07.87; опубл. 07.07.89, бюл. № 25.

Bibliography (transliterated):

1. Dreus, A., Kozhevnikov, A., Lysenko, K., Sudakov, A. (2016). Investigation of heating of the drilling bits and definition of the energy efficient drilling modes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(7(81)), 41–46. doi: [10.15587/1729-4061.2016.71995](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71995)
2. Ertunc, H., Loparo, K. (2001). A decision fusion algorithm for tool wear condition monitoring in drilling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41(9), 1347–1362. doi: [10.1016/s0890-6955\(00\)00111-5](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(00)00111-5)
3. Li, H. (2012). Research on deep drilling. Applied Mechanics and Materials, 101–102, 1101–1104.
4. Vasylyev, A. V., Popov, S. V., Tymoshenko, I. V. (2014). Pidvyshhennya efektyvnosti glybokogo sverdlinnya staleyx zagotovok. Galuzeve mashynobuduvannya, budivnyctvo, 2 (41), 206–212.
5. Pestunov, V. M., Svjackij, V. V., Svjackaja, L. P. (2006). Reshenie problem glybokogo sverlenija v metalloobrabotke. Vestnik NTUU «KPI». Mashinostroenie, 49, 173–178.
6. Pestunov, V. M., Svyaczkyj, V. V., Prydvorova, S. V. (2012). Optyimizaciya procesu obrobky glybokyx otvoriv. Tekhnika v silskogospodarskomu vyrobnyctvi, galuzeve mashynobuduvannya, avtomatyzaciya, 25, 200–209.

7. Kosilovoj, A. G., Meshherjakova, R. K. (1986). Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja. Moscow: Mashinostroenie, 656.
8. Тумочко, Г. Конструкторсько-технологічне забезпечення пидв'їшненя економічної ефект'вности свердлинна naskrizny`x otvoriv Available at: <http://nadoest.com/konstruktorseko-tehnologichne-zabezpechennya-pidvishennya-ekon.>
9. Kuz'min, N. I., Krivyj, P. D., Sopronchuk, V. N. (1982). Ustrojstvo dlja sverlenija otverstij malogo diametra. Patent SSSR 975238, MKP V23 V47. № 3326065/25-08; declared 07.08.84; published 23.11.82, №43.
10. Nagornjak, S. G., Kuz'min, N. I., Krivyj, P. D. (1989). Ustrojstvo dlja sverlenija skvoznih otverstij. Patent SSSR 1491624, MKP V23 V47. № 4279167/31-08; declared 07.07.87; published 07.07.89, № 25.

Надійшла (received) 07.11.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Підвищення ефективності глибокого свердління спіральними свердлами при обробці деталей з матеріалу сталь 40/ Є. А. Васильєв, С. В. Попов, А. В. Васильєв// Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.75–79. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Повышение эффективности глубокого сверления спиральным сверлом при обработке деталей из материала сталь 40/ Е. А. Васильев, С. В. Попов, А. В. Васильев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – No 49(1221). – С.75–79. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Efficiency upgrading of twist bit deep-hole drilling in machining of steel-40 parts/ E. Vasyliiev, S. Popov, A. Vasyliiev //Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No 49 (1221).– P.75–79. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Васильєв Є. А. – кандидат технічних наук, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, доцент кафедри будівельних машин і обладнання; пр-т. Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36011.

Попов С. В. – кандидат технічних наук, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, доцент кафедри технології машинобудування; пр-т. Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36011; e-mail: psv@pntu.edu.ua

Васильєв А. В. – кандидат технічних наук, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, доцент кафедри технології машинобудування; пр-т. Першотравневий, 24, м. Полтава, Україна, 36011.

Васильєв Е. А. – Кандидат технических наук, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка доцент кафедры строительных машин и оборудования; пр-т. Первомайский, 24, г. Полтава, Украина, 36011.

Попов С. В. – Кандидат технических наук, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка доцент кафедры технологии машиностроения; пр-т. Первомайский, 24, г. Полтава, Украина, 36011; e-mail: psv@pntu.edu.ua

Васильєв А. В. – Кандидат технических наук, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка доцент кафедры технологии машиностроения; пр-т. Первомайский, 24, г. Полтава, Украина, 36011.

Vasyliiev E. – PhD, Associate Professor, Department of Construction Machinery and Equipment, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Pershotravneviy ave., 24, Poltava, Ukraine, 36011.

Popov S. – PhD, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Pershotravneviy ave., 24, Poltava, Ukraine, 36011; e-mail: psv@pntu.edu.ua

Vasyliiev A. – PhD, Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Pershotravneviy ave., 24, Poltava, Ukraine, 36011.