УДК 621.9 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.18

В. В. КРУПА
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин
Тернопільський національний технічних університет імені Івана Пулюя
ORCID: 0000-0001-5634-0053

Ю. О. АПОСТОЛ
старший викладач кафедри приладів і контрольно-вимірювальних систем
Тернопільський національний технічних університет імені Івана Пулюя
ORCID: 0000-0003-2115-3949

Ю. І. ЩЕРБАНЬ
магістрант
Тернопільський національний технічних університет імені Івана Пулюя
ORCID: 0009-0007-8710-9728

О. С. ТАРАПАТА
магістрант
Тернопільський національний технічних університет імені Івана Пулюя
ORCID: 0009-0009-6633-2458

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ТА ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ СВЕРДЛІННІ ГАРТОВАНОЇ ЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ ГАРМАТНИМ СВЕРДЛОМ

Проаналізовано праці з свердління глибоких отворів та дослідження їх якісних показників. Встановлено значну кількість праць, які стосуються глибокого свердління та розділено їх на категорії. Виявлено, що параметри як самого процесу так і якісні параметри отворів в заготовках з різних матеріалів може значно відрізнятись при одних і тих же режимах різання та інструменті. Проведено процес свердління глибокого отвору діаметром 40 мм в заготовці з гартованої сталі (28-32 HRC) 38ХН3МФА-Ш з охолодженням спеціальною оливою для глибокого свердління (застосовували свердло фірми Botec тип 110) на різних подачах. Дослідження проводили при схемі обробки, при якій заготовка обертається з частотою 100 об/хв, а свердло має частоту обертання (в протилежну сторону відносно заготовки) з частотою 260 об/хв, забезпечуючи швидкість різання, рекомендовану виробником. Свердлу надавали поздовжню подачу. Встановлено величини подач, на яких можливо застосовувати дане свердло на вищезазначеній марці сталі (використовували від 0,02 до 0,05 мм/об). На кожній із подач перевіряли значення параметрів процесу обробки, а також оцінювали стружку, яка утворювалась. Зважаючи, що шорсткість поверхні утворювалась не однакова, на одній і тій самій заготовці встановлювали середнє значення параметру Ra, дисперсії її розсіювання та середнє квадратичне відхилення. Побудовано графіки залежностей середнього значення параметра Ra від подачі, а також дисперсії розсіювання D(Ra) від величини подачі. Виявлено, що збільшення подачі до 0,04 мм/об позитивно впливає як на стружку, що сходить, так і на середні значення і дисперсії розсіювання параметра Ra. При збільшенні подачі до 0,05 мм/об процес різання відбувався нестабільно. За критеріями Стьюдента і Фішера відповідно оцінювали суттєвість відмінностей значень шорсткості за середніми значеннями та дисперсіями, а також встановлювали стабільність процесу обробки. За результатами встановили, що за даних умов найдоцільніше встановлювати подачу s=0,04 мм/об., при якій спостерігається найменша дисперсія розсіювання параметра Ra і виходить стабільна стружка.

Ключові слова: *глибоке свердління, параметри стружки, середнє значення шорсткості, стабільність процесу.*

© Крупа В. В., Апостол Ю. О., Щербань Ю. І., Тарапата О. С., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

V. V. KRUPA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Machine Tool, Tool and Machine Design
Ternopil Ivan Puliuj National Technical University
ORCID: 0000-0001-5634-0053

YU. O. APOSTOL
Senior Lecturer at the Department of Instruments
and Control-Measurement Systems
Ternopil Ivan Puliuj National Technical University
ORCID: 0000-0003-2115-3949

YU. I. SHCHERBAN
Master's Student
Ternopil Ivan Puliuj National Technical University
ORCID: 0009-0007-8710-9728

O. S. TARAPATA
Master's Student
Ternopil Ivan Puliuj National Technical University
ORCID: 0009-0009-6633-2458

STUDY OF PROCESS PARAMETERS AND SURFACE ROUGHNESS WHEN DRILLING HARDENED ALLOY STEEL WITH A GUN DRILL

The works on drilling deep holes and the study of their quality indicators were analyzed. A significant number of works related to deep drilling were identified and divided into categories. It was found that the parameters of both the process itself and the quality parameters of holes in workpieces made of different materials can differ significantly with the same cutting modes and tool. The process of drilling a deep hole with a diameter of 40 mm in a workpiece made of hardened steel (28-32 HRC) 38CrNi3MoVA was carried out with cooling with special oil for deep drilling (Botec type 110 drill was used) at different feeds. The research was carried out with a processing scheme in which the workpiece rotates at a frequency of 100 rpm, and the drill has a rotation frequency (in the opposite direction relative to the workpiece) of 260 rpm, providing the cutting speed recommended by the manufacturer. The drill was provided with a longitudinal feed. The feed rates at which it is possible to use this drill on the above-mentioned steel grade were established (from 0.02 to 0.05 mm/rev were used). On each of the passes, the values of the parameters of the processing process were checked, as well as the chips that were formed were evaluated. Taking into account that the surface roughness was not the same, the average value of the Ra parameter, the variance of its dispersion, and the mean square deviation were determined on the same workpiece. Graphs of the dependences of the average value of the Ra parameter on the feed rate, as well as the dispersion D(Ra) on the feed rate were constructed. It was found that increasing the feed rate to 0.04 mm/rev has a positive effect on both the outgoing chips and the average values and dispersion of the Ra parameter. When the feed rate was increased to 0.05 mm/rev, the cutting process was unstable. According to the Student and Fisher criteria, the significance of the differences in roughness values was assessed by the average values and variances, and the stability of the machining process was established. According to the results, it was found that under these conditions it is most appropriate to set the feed rate s=0.04 mm/rev., at which the smallest dispersion of the Ra parameter is observed and stable chips are obtained.

Key words: *deep drilling, chip parameters, average roughness value, process stability.*

Постановка проблеми

Проблеми свердління глибоких отворів є особливо актуальною в наш час. Необхідність виготовлення відповідних деталей машин із нових матеріалів, або з матеріалів із покращеними фізико-механічними властивостями разом із наявними на ринку спеціальними різальним інструментами вимагають нових досліджень щодо меж їх застосування. Для груп матеріалів у довідниках висвітлюють діапазон швидкості різання та подачі. Проте інформація, як впливають ці параметри на якісні показники оброблюваних отворів, в більшості випадків відсутня. Дуже часто доводиться оброблювати гартовані матеріали з підвищеними фізико-механічними характеристиками (наприклад високолеговані сталі), для яких важко вибрати однозначно групу свердління і часто виявляється, що рекомендовані режими обробки неможливо відтворити. Тому дослідження впливу подачі на шорсткість поверхні при глибокому свердлінні гартованої високоякісної сталі є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням глибокого свердління займалась велика кількість вчених, роботи яких можна умовно поділити на кілька напрямів [1]. Одним із напрямів є аналіз технологій отримання глибоких отворів [1, 2], зокрема і технологій отримання глибоких отворів нетрадиційними методами [1, 3, 4]. При глибокому свердлінні найчастіше

використовуються гарматні свердла або свердла ВТА різних фірм виробників, які надають рекомендовані режими обробки, а також циліндричні спіральні свердла [5, 6]. Найбільше праць в області дослідження саме процесу оброблення глибоких отворів, зокрема вібрацій [7]. В роботі [8] здійснено дослідження оптимальної кількості стійких упорів, що використовуються в свердлильному верстаті, шляхом встановлення емпіричного зв'язку між максимальною амплітудою на резонансній частоті та довжиною та діаметром свердління. Проблема вібрації під час процесу глибокого свердління суттєво впливає на ефективність процесу та якість поверхні отвору, тому даний напрям широко висвітлений в роботах дослідників [9–13], зокрема вирішується важливе питання зменшення вібрації в процесі обробки різними методами, в тому числі і дослідженням жорсткості верстатів [14, 15]. Також існують праці, в яких досліджують вплив накладених вимушених вібрацій для покращення параметрів процесу свердління глибоких отворів [16–18], що є досить перспективним, але вимагає додаткового обладнання.

Окремо слід виділити роботи [19–24], присвячені конструкціям як окремих інструментів для оброблення глибоких отворів так і окремим компонентам системи ТОС. Дослідники [19, 20] та ін зосередили увагу на розробленні додаткових пристроїв які б полегшували процес свердління глибоких отворів. У працях іншого типу в цьому напрямі удосконалюється конструкція самого свердла. В [21–23] розроблено конструкції інструментів та проаналізовано вплив геометричних параметрів на якісні показники процесу оброблення. В роботі [24] розроблено модель та визначено критичні елементи геометрії свердла, які призводять до поганого відведення стружки. На основі цього дослідження запропоновано нову конструкцію, що дозволяє краще відводити стружку і прокачувати змащувально-охолоджувальну рідину.

Деякі дослідники вивчають питання ефективності процесу та його підвищення [25–27], що полягає в розробленні математичних моделей та дослідженні процесу різання з метою максимізації величини подачі при необхідних якісних параметрах отвору [28, 29].

В праці [30] досліджено взаємозв'язок між тиском охолоджувальної рідини та деформацією скручування стружки на різних стадіях росту стружки на основі для аналізу морфології стружки. Вивчено механізму руйнування стружки під час глибокого свердління нержавіючої сталі 304 за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) та виявлено зв'язок між утворенням стружки та параметрами процесу обробки. В [31] досліджено вплив тиску охолоджувальної рідини та геометрію стружколома на параметри процесу та встановлено їх оптимальні значення. В [32] дослідники стверджують, що збільшення тиску охолоджувальної рідини забезпечує ефективніше охолодження, стабілізацію коливань температури в зоні різання та покращене видалення стружки, що безпосередньо призводить до зменшення викришування та більш рівномірного зносу інструменту.

Найбільша кількість праць присвячена саме дослідженні впливу елементів режимів різання саме на якісні показники отворів та шляхи їх покращення. Так в [33] досліджено шорсткості поверхні для процесу глибокого свердління отворів з використанням алгоритму оптимізації moth-flame. Автори зазначають, що параметром обробки, який має найбільший вплив на шорсткості поверхні, є швидкість шпинделя з 65,54 %, тоді як найменший – глибина отвору з 0,8 %. У [34] стверджується що швидкість різання та швидкість подачі мають великий вплив на якість обробки, а тиск змащувально-охолоджувальної рідини головним чином впливає на шорсткість поверхні.

Проте кожен матеріал має свої особливості як використання так і механічного оброблення. В даній статті здійснена спроба проаналізувати вплив подачі на шорсткість обробки при глибокому свердлінні гартованої легованої високоякісної сталі 38ХН3МФА-Ш, що має певні особливості як з точки зору застосування так і обробки.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження впливу подачі на шорсткість поверхні та параметри процесу свердління глибоких отворів в гартованій легованій високоякісній сталі 38ХН3МФА-Ш гарматним свердлом.

Основні завдання:

1. Провести глибоке свердління гарматним свердлом експериментальному зразку з сталі 38ХН3МФА-Ш та встановити параметри процесу при різних величинах подачі.
2. Провести вимірювання шорсткості поверхні (Ra) та встановити характеристики її розсіювання.
3. Оцінити вплив подачі на параметри процесу та шорсткість поверхні при свердлінні сталі 38ХН3МФА-Ш гарматним свердлом.

Викладення основного матеріалу дослідження

Методи дослідження. Для глибокого свердління $L/D > 25$ найчастіше використовуються гарматні свердла або свердла ВТА різних фірм виробників, які надають рекомендовані режими обробки. Наприклад, згідно [35] для свердління отворів діаметром 40 мм гарматним свердлом фірми Botec тип 110 при обробленні легованих нержавіючих сталей свердлами з припаяною твердосплавною головкою рекомендована швидкість різання 40–80 м/хв, подача 0,063–0,247 мм/об, а для оброблення гартованих сталей швидкість різання 25–60 м/хв, подача – 0,086–0,1 мм/об. Практика використання таких свердел на промисловому підприємстві показує, що при встановленні навіть мінімальної рекомендованої подачі при оброблення гартованих легованих сталей, процес різання або не відбувається, або відбувається з значними вібраціями, на поверхні спостерігаються задири і якість просвердленого отвору не відповідає необхідним параметрам.

Для проведення досліджень було вибрано гартовану сталь (28-32 HRC) 38ХН3МФА-Ш, що застосовується для найбільш відповідальних важконавантажених деталей, які працюють при температурах до 400 °С з ударною в'язкістю 780кДж/м^2, з охолодженням спеціальним маслом для глибокого свердління. Для такої сталі відпрацьована швидкість різання становить 45 м/хв. Така швидкість різання забезпечує високу продуктивність оброблення і стійкість інструменту.

Для оброблення використовувався верстат для глибокого свердління. В якості оправки використовували фасону трубу з V-подібною канавкою для відведення стружки. Схема свердління показана на рис. 1. Інструмент для обробки - гарматне свердло одностороннього різання тип 110 фірми Botec стандартного заточування з двома отворами для підведення змащувально-охолоджувальної рідини, що показана на рис. 2. Свердло оснащене двома напрямними поверхнями, що забезпечують компенсацію сил різання, і забезпечують пригладжувальний ефект. Згідно досліджень [36] саме напрямні забезпечують значне зниження шорсткості оброблюваної поверхні.

Проведено дослідження впливу подачі на шорсткість обробленої поверхні. При мінімальній заявленій подачі 0,063 мм/об – стабільного процесу різання досягти не вдавалось на існуючому обладнання. Дослідження проводили на подачах 0,02, 0,025, 0,03, 0,035, 0,04, 0,045 та 0,5 мм/об. Для цього програмно задавали подачу, збільшуючи її через кожні 150 мм. А наступних заготовках подачу змінювали в зворотньому порядку (крім подачі 0,05 мм/об). Свердління проводили з застосуванням спеціальної масляної емульсії для глибокого свердління. Подача емульсії – через осьові отвори в свердлі під тиском 20 бар.

Результати досліджень. Характеристики процесу різання та фото стружок, описані згідно рекомендацій [37] при кожній із подач подано в таблиці 1.

Для вимірювання шорсткості використовували профілометр мод. 296. Для процесу вимірювань заготовку розрізали на циліндри (на кожному циліндрі інша подача. Коло кожного циліндра умовно розділили на 8 частин і на кожній поділці робили 4 траси вимірювань (в межах базової довжини) (рис. 4). Базову довжину встановлювали відповідно до рекомендацій діючого стандарту.

Фото вимірювань показано на рис. 5.

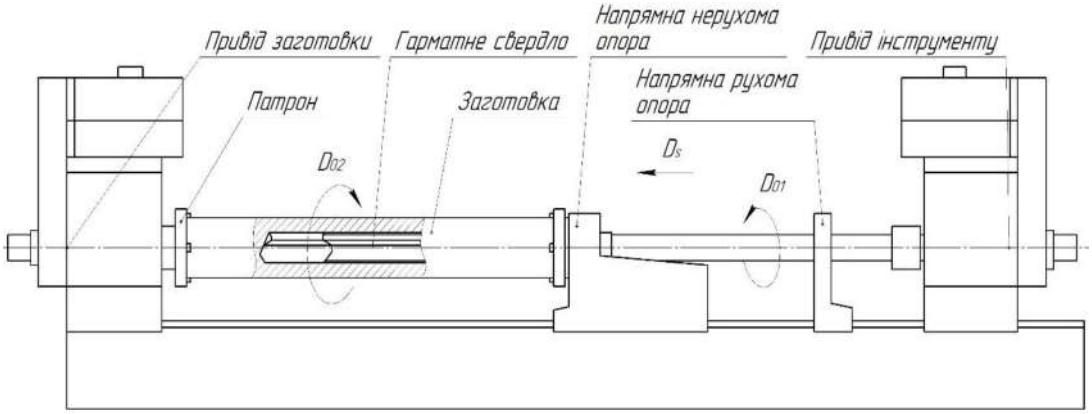

Рис. 1. Схема обробки

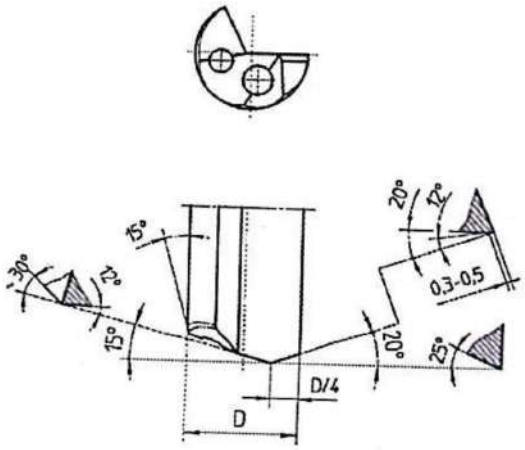

Рис. 2. Геометричні параметри свердла (фірми Botec)

Таблиця 1

Характеристики процесу різання та фото стружок

№ заг.	Подача, мм/об	Характеристики процесу	Фото стружки
1	0,02	Машина працює в стабільному режимі без лишніх шумів та вібрацій, стружка пряма, суцільна дуже зім'ята та покручена в ріні сторони та з характерним слідом хвилястості на вершині	Рис. 3, *а*
2	0,025	Машина працює в стабільному режимі без лишніх шумів та вібрацій. Стружка залишається дуже зім'ятою, особливо по краях проте зі слідами тертя. Стала спіралеподібною з нестабільним кроком.	Рис. 3, *б*
3	0,03	Машина працює в стабільному режимі без лишніх шумів та вібрацій. Стружка залишається місцями зім'ятою, особливо по краях. Спіралеподібність стала стабільною з кроком 120–130мм	Рис. 3, *в*
4	0,035	Машина працює в стабільному режимі без лишніх шумів та вібрацій. Стружка стабільна, залишилась деяка зім'ятість, особливо по краях. Крок спіралі 130–140 мм	Рис. 3, *г*
5	0,04	Машина працює в стабільному режимі без лишніх шумів та вібрацій. Стружка стабільна, спіралеподібна, гладка, блискуча, без ознак перегріву. Крок спіралі 150–170 мм	Рис. 3, *д*
6	0,045	Процес різання став важким, з'явився негучний звук і невеликі вібрації. На стружці з'явились хвильки по краях, що є свідченням появи коливань. Спостерігається стрибкоподібна зміна сил різання	Рис. 3, *е*
7	0,05	**До кінця експеремент не доведено**, через великі вібрації, викликані, слабкою здатністю сверла різати на такій подачі. Великі перевантаження на верстат. Різання відбувається не періодично. На стружці спостерігаєтья хвилястість і задири. При зменшенні швидкості різання в 1,5 рази (і результат незмінний, при збільшенні – стружка темніє, що свідчить про перегрів, вібрації збільшуються. Зменшення подачі на оберт призводить до поновлення процесу різання	Рис. 3, *є*

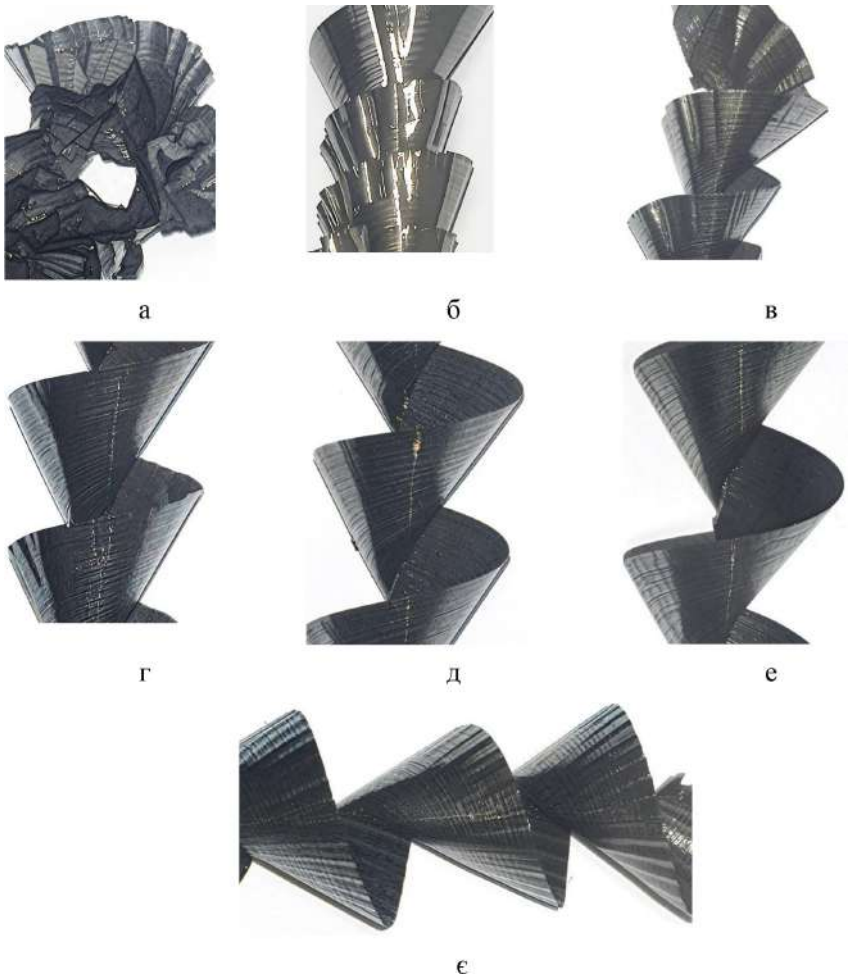

Рис. 3. Фрагменти фотографій стужок при подачах s, мм/об:
а) 0,02; б) 0,025; в) 0,03; г) 0,035; д) 0,04; е) 0,045; є) 0,05

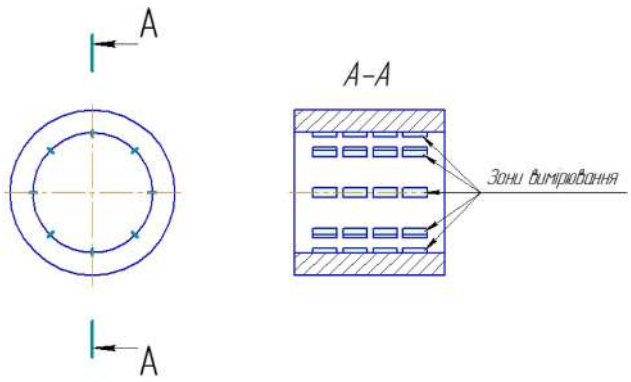

Рис. 4. Схема вимірів на заготовці

Рис. 5. Фото досліджень: 1 – заготовка; 2 – штатив профілометра; 3 – табло профілометра

Обробка результатів дослідження. Таким чином отримували по n = 32 значення параметра шорсткості Ra_i на кожній із заготовок. Визначали середні значення $\overline{Ra}$, дисперсії розсіювань $D(Ra)$ та середні квадратичні відхилення $\sigma(Ra)$, використовуючи залежності [38, 39]

$$\overline{Ra} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Ra_i}{n}; \tag{1}$$

$$D(Ra) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Ra_i - \overline{Ra}\right)^2; \tag{2}$$

$$\sigma(Ra) = \sqrt{D(Ra)}. \tag{3}$$

Для відкидання можливих грубих помилок використовували критерій Гребса, визначаючи значення t_k за формулою [38, 39]:

$$t_k = \frac{\left|Ra_i' - \overline{Ra}\right|}{\sigma(Ra)}. \tag{4}$$

де Ra_i' – значення яке різко виділяється.

У випадку коли за (4) отримували $t_k > t_k'$, де $t_k' = 2{,}792$ (критичне значення критерію Гребса при α = 5 %) перераховували середні значення Ra, $D(Ra)$, $\sigma(Ra)$ за залежностями (1), (2), (3). Результати зведені у таблицю 2.

Таблиця 2

Результати вимірювання параметра шорсткості *Ra*

№ заг.	Частота обертання, об/хв	Подача, мм/хв.	Подача, мм/об.	Параметри шорсткості		
				Середнє значення *Ra*, мкм	Дисперсія розсіюван. *D*(*Ra*)	σ(*Ra*)
1	360	7,2	0,02	0,8387	0,0085	0,0922
2		9	0,025	0,8372	0,0107	0,1036
3		10,8	0,03	0,8249	0,0121	0,1098
4		12,6	0,035	0,7977	0,0088	0,0937
5		14,4	0,04	0,751	0,0047	0,0687
6		16,2	0,045	0,7976	0,0119	0,109

Щоб візуально оцінити взаємозв'язок подачі і шорсткості представимо це графічно. Графік залежності середнього значення Ra від подачі на оберт подано на рис. 6.

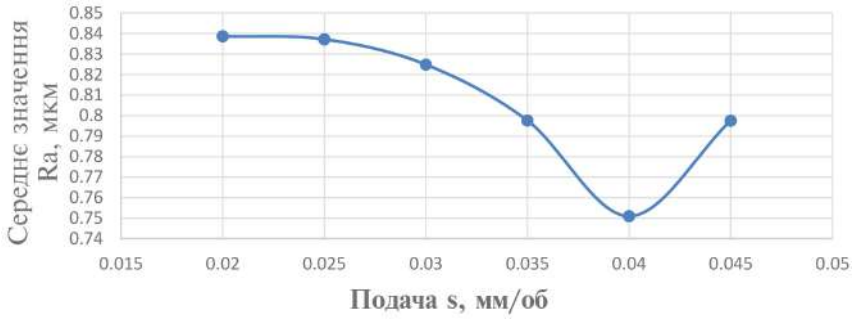

Рис. 6. Графік зміни середнього значення параметра шорсткості *Ra* від подачі на оберт *s*

На перший погляд із збільшенням подачі шорсткість в середньому знижується до величини подачі s = 0.04мм/об, а потім збільшується. Проте зважаючи, що це стохастичні величини і припустивши, базуючись на граничні теоремі Чебишева [38, 39], що величина параметра $\overline{Ra}$ підкоряється нормальному закону розподілу, доцільним буде перевірити суттєвість зміни величини параметра $\overline{Ra}$ від подачі s з застосуванням критерію Стьюдента, використавши залежність [38, 39]

$$t = \frac{\left|\overline{Ra}_i - \overline{Ra}_{i+1}\right|}{\sqrt{\frac{\sigma(Ra)_i}{n_i} - \frac{\sigma(Ra)_{i+1}}{n_{i+1}}}}. \tag{5}$$

Де $\overline{Ra}_i$ – середнє значення параметра Ra на i-тій та i + 1-шій заготовках відповідно; $\sigma(Ra)_i$, $\sigma(Ra)_{i+1}$ – середнє квадратичне відхилення значення параметра Ra на i-тій та i + 1-шій заготовках відповідно; n_i, n_{i+1} – кількість даних у вибірках; i = 1..6 – номер досліду.

Цікавим є показати графік середньоквадратичного відхилення параметра $D(Ra)$ від величини подачі (рис. 7), оскільки воно показує розсіювання, а отже і стабільність технологічного процесу.

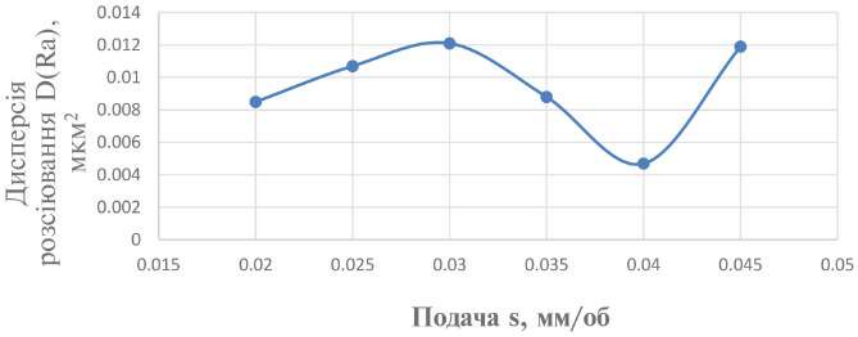

Рис. 7. Графік дисперсії розсіювання *D*(*Ra*) параметра шорсткості *Ra* від подачі на оберт *s*

Бачимо, що до подачі 0,03 дисперсія розсіювання зростає, далі знижується і знову зростає після подачі 0,04. Це пояснюється тим, що при низьких подачах процес різання хоч і візуально стабільний, проте зім'ята стружка свідчить про наявність коливань, що спричиняють мікрозміщення, які призводить до зміни параметра шорсткості на різних частинах поверхні. Малі подачі на оберт, які співмірні з радіусом радіусної частини головного різального леза свердла призводить до нестабільності геометрії різання, викликає велике зминання, змінює кут різання, що в свою чергу збільшує розсіювання величини мікронерівностей на різних частинах поверхні. Для детальнішого аналізу перевіримо суттєвість розсіювань за критерієм Фішера, використавши залежність [38, 39]

$$F = \frac{D(Ra)_i}{D(Ra)_{i+1}}. \tag{6}$$

Результати обчислень критеріїв Стьюдента (5) та Фішера (6) подані в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати вимірювання параметра шорсткості *Ra*

№ заг.	Подача, мм/об	Параметри шорсткості			Критерій Стьюдента *t* (ймовірність за розподілом Стьюдента *P*(*t*)		Критерій Фішера *F*	
		Середнє значення *Ra*, мкм	Дисперсія розсіюван. *D*(*Ra*)	σ(*Ra*)				
1	0,02	0,8387	0,0085	0,0922	0,019 (0.9848)		1,259	
2	0,025	0,8372	0,0107	0,1036		0,151 (0,88)		1,131
3	0,03	0,8249	0,0121	0,1098	0,341 (0,7332)		1,375	
4	0,035	0,7977	0,0088	0,0937		0,656 (0,5120)		1,872
5	0,04	0,751	0,0047	0,0687	0,625 (0,5321)		2,532	
6	0,045	0,7976	0,0119	0,109				

Зважаючи, що критичне значення критерію Стьюдента для таких вибірок з при рівні значимості $\alpha = 0.05$ та кількості ступенів свободи $df = n_i + n_{i+1} - 2 = 62 t_{крит} = 2$ робимо висновок, що різниця не суттєва, тобто подача на цьому діапазоні суттєво не впливає на шорсткість поверхні. Найменша ймовірність $P(t) = 0{,}512$, що значно більша 0,05. Тому можна стверджувати, що відмінність несуттєва.

За таблицями знаходимо критичне значення критерію Фішера $Ft = 1.8221$ (для рівня значущості $\alpha = 0.05$). Бачимо, що критерієм Фішера, що при зміні подачі до 0,035 мм/об значення F не перевищують критичне, тобто дисперсії можна вважати такими, що змінюються несуттєво. При зміні подачі до $\sigma = 0.04$ значення критерію Фішера на рівні критичного, що свідчить про суттєвість значення, тобто спричиняє значне покращення стабільності процесу оброблення. При зміні подачі з 0,04 до 0,045 мм/об значення критерію $F = 2.532$ перевищує критичний поріг, тож у цій парі вибірок дисперсії суттєво відрізняються з імовірністю помилки <5 %. А відповідно зміна подачі з 0,04 до 0,045 мм/об значно погіршує стабільність процесу.

Висновки

1. На основі розробленої методики проведено процес глибокого свердління гарматним свердлом експериментальному зразку з сталі 38ХН3МФА-Ш (гартованої до 28–32 HRC) та проаналізовано параметри процесу і типи стружок. Виявлено, що при подачі $s = 0.05$ мм/об процес свердління не стабільний. Наведено фотографії зразків стружок при різних подачах та подано їх аналіз.

2. Проведено вимірювання шорсткості поверхні (*Ra*) та встановлено його середнє значення і різних рівномірно розміщених участках заготовок, а також проведено розрахунок дисперсії розсіювання та середньоквадратичного відхилення. Виявлено, що із збільшенням подачі від 0,02 до 0,04 мм/об величина *Ra* незначно зменшується, а також зменшується і його дисперсія розсіювання. При збільшенні подачі Ra і дисперсія її розсіювання збільшуються характеристики її розсіювання.

3. На основі критерію Стьюдента встановлено, що подача у діапазоні 0,02–0,045 незначно впливає на середнє значення Ra. На основі критерію Фішера доведено, що із збільшенням подач ідо 0,04 мм/об розсіювання величини шорсткості незначне, а при збільшенні s до 0,45 мм/об спостерігається суттєве збільшення дисперсії розсіювання шорсткості, а відповідно і погіршується параметри стабільності процесу.

Список використаної літератури

1. Jayaprakash B. C., Nagarajan L., Kumar M. Recent research progress in deep hole drilling process: a review. Surface Review and Letters. 2021. Vol. 28. DOI: 10.1142/S0218625X21300033

2. Karpovych I., Savinkin D. Analysis of technologies for obtaining and processing deep holes in thick-walled parts. Journal of Rocket-Space Technology. 2024. Vol. 33, No. 4–28. P. 63–67. DOI: 10.15421/452426

3. Скрипченко М. О. Технологічне забезпечення глибокого свердління: дис. … канд. техн. наук. Суми: Сумський державний університет, 2015.

4. Васильєв А. В., Попов С. В., Тимошенко І. В. Підвищення ефективності глибокого свердління сталевих заготовок. Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. 2014. № 2. С. 206–212.

5. Маршуба В. П., Чернякова О. В. Основні напрямки підвищення точності та продуктивності глибокого свердлення спіральними свердлами. Машинобудування. 2010. № 6. С. 72–84.

6. Кобельник В. Р. Підвищення ефективності процесу свердління наскрізних отворів регулюванням подачі: дис. … канд. техн. наук, спец. 05.03.01. Тернопіль, 2013. 168 с.

7. Jingmin M., Wenli Y. Stability analysis of free vibration of gun drill rod materials. Materials. 2025. Vol. 18, No. 6. P. 1241. DOI: 10.3390/ma18061241

8. Lingfei K., Shuai C., Jih-Hua C., Yue S., Falin M., Yan L. Vibration suppression of drilling tool system during deep-hole drilling process using independence mode space control. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2020. Vol. 151. 103525. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2020.103525

9. Biermann D., Schmidt R., Strodick S. Numerical modelling of the BTA deep hole drilling process. Procedia CIRP. 2024. Vol. 123. P. 470–475.

10. Licheng L., Can N., Liu G. Analysis and development of the CFRP boring bar for stability improvement. Fibers and Polymers. 2023. Vol. 24. P. 4413–4427.

11. Orgiyan A., Ivanov V., Tonkonogyi V. The efficiency of dynamic vibration dampers for fine finishing boring. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Manufacturing Engineering. Cham: Springer, 2023.

12. Li L., Sun B., Hua H. Analysis of the vibration characteristics of a boring bar with a variable stiffness dynamic vibration absorber. Shock and Vibration. 2019. Article ID 5284194.

13. Bonda A., Srinivas J., Nanda B. K. Investigation of stability in internal turning using a boring bar with a passive constrained layer damping. FME Transactions. 2021. Vol. 49. P. 384–394.

14. Кобельник В. Р., Кривий П. Д. Жорсткість вертикально-свердлильних верстатів. Вісник ЖДТУ. Технічні науки. 2007. № 1 (40). С. 34–40.

15. Кобельник В. Р., Кривий П. Д. Методика дослідження кінематичної точності механізму подач вертикально-свердлильних верстатів на прикладі верстата моделі 2Н118. Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. праць. 2010. Вип. 8. С. 99–108.

16. Guba N., Schumski L., Paulsen T., Karpuschewski B. Vibration-assisted deep hole drilling of the aluminum material AlMgSi0.5. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2022. Vol. 36. P. 57–66. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.11.002

17. Lingfei K., Jih-Hua C., Yan L., Yanjun L., Pengyang L. Targeted suppression of vibration in deep hole drilling using magneto-rheological fluid damper. Journal of Materials Processing Technology. 2014. Vol. 214, No. 11. P. 2617–2626. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.05.029

18. Shao Z. et al. Deep hole drilling of large-diameter titanium alloy with a novel rotary low-frequency vibration device. IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 154872–154881. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2944433

19. Пестунов В. М., Свяцький В. В., Придворова С. В. Механізми розвантаження інструменту при свердленні глибоких отворів. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. 2012. Вип. 25(1). С. 219–223.

20. Пестунов В. М., Свяцький В. В., Свяцька Л. П. Розробка привода для глибокого свердлення методом перехоплення стебла інструмента по його довжині. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. 2008. Вип. 20. С. 169–172.

21. Кривий П. Д., Крупа В. В., Продан В. І. Конструкторсько-технологічні передумови підвищення якості оброблення глибоких отворів тонкостінних циліндрів. Вісник ТДТУ. 2010. Т. 15. № 1. С. 147–156.

22. Кривий П. Д., Крупа В. В. Інструментальне забезпечення процесу комбінованого розточування глибоких отворів тонкостінних циліндрів. Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. 2012. № 2. С. 23–34.

23. Кривий П. Д., Кобельник В. Р., Крупа В. В., Яковлєв В. Г. Розточувальні інструменти з попарно-асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких циліндричних отворів. Технічні науки та технології. 2016. № 2(4). С. 28–35.

24. Woon K. S. et al. Improving coolant effectiveness through drill design optimization in gundrilling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 370. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/370/1/012025

25. Васильєв А. В., Попов С. В., Тимошенко І. В. Підвищення ефективності глибокого свердління сталевих заготовок. Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. 2014. № 2. С. 206–212.

26. Новіков Ф. В., Жовтобрюх В. О., Кленов О. С. Розробка й впровадження ефективних операцій механічної обробки деталей гідравлічних систем. Вісник СевНТУ. 2014. Вип. 151. С. 115–121.

27. Крупа В. В. Металорізальні інструменти з асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких отворів циліндрів: дис. … канд. техн. наук, спец. 05.03.01. Тернопіль, 2015. 185 с.

28. Kryvyi P. D., Dzyura V. O., Tymoshenko N. M., Krypa V. V. Technological heredity and accuracy of the cross-section shapes of the hydro-cylinder cylindrical surfaces. In: Proc. Int. Conf. Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference. Detroit, USA, 2014. Paper No. MSEC2014-3946.

29. Krupa V. et al. Improved method for determining the feed influence on the tangential cutting force during re-drilling, countersinking and boring based on the small sample theory. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 2024. DOI: 10.3311/ppme.29952 (дата звернення: 22.05.2025).

30. Lou J., Li L., Dong X. et al. Research on the influencing factors of chip forming in 304 stainless steel deep hole gun drilling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. Vol. 134. P. 1447–1461. DOI: 10.1007/s00170-024-14205-3

31. Kočiško M., Pollák M., Grozav S. D., Ceclan V. Influence of coolant properties and chip former geometry on tool life in deep drilling. Applied Sciences. 2023. Vol. 13(14). 8360. DOI: 10.3390/app13148360

32. Ivkovic M., Djurovic S. Influence of coolant pressure on the wear and tool life of gun drills in deep drilling of 24CrMoV5-5 steel. 2025. DOI: 10.24867/JPE-2025-01-019

33. Kamaruzaman A., Zain A., Alwee R., Yusof N., Najarian F. Optimization of surface roughness in deep hole drilling using moth-flame optimization. Elektrika – Journal of Electrical Engineering. 2019. Vol. 18. P. 62–68. DOI: 10.11113/elektrika.v18n3-2.195

34. Liang J., Jiao L., Yan P., Cheng M., Qiu T., Wang X. Research on deep-hole drilling quality of high-strength steel with slender gun drill. 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-312959/v1

35. Botek. Single flute gundrills, twin fluted drills: catalog. URL: https://www.botek.de/downloads/en/Catalog_ELB_ZLB_E.pdf (дата звернення: 15.09.2025).

36. Li B., Huang C., Chen Z. et al. Change of the machined hole wall surface roughness, microstructure and microhardness of low alloy steel caused by drill-guide-pads during BTA deep hole drilling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2025. Vol. 139. P. 1595–1605. DOI: 10.1007/s00170-025-15989-8

37. Stephenson D. A., Agapiou J. S. Metal cutting theory and practice. 3rd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. 956 p.

38. Mei C. C. Mathematical analysis in engineering: how to use the basic tools. Cambridge University Press, 1997. 480 p. ISBN 0521587980.

39. Літнарович Р. М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу: навч. посіб. Рівне : МЕГУ, 2011. 140 с.

References

1. Jayaprakash, B. C., Nagarajan, L., & Kumar, M. (2021). Recent research progress in deep hole drilling process: A review. *Surface Review and Letters, 28*. https://doi.org/10.1142/S0218625X21300033

2. Karpovych, I., & Savinkin, D. (2024). Analysis of technologies for obtaining and processing deep holes in thick-walled parts. *Journal of Rocket-Space Technology, 33*(4–28), 63–67. https://doi.org/10.15421/452426

3. Skrypchenko, M. O. (2015). *Tekhnolohichne zabezpechennia hlybokoho sverdlinia* [Technological support of deep drilling] (Doctoral dissertation, Sumy State University).

4. Vasylyev, A. V., Popov, S. V., & Tymoshenko, I. V. (2014). Improving the efficiency of deep drilling of steel billets. *Collection of Scientific Papers of Poltava National Technical University named after Yu. Kondratyuk. Series: Mechanical Engineering, Construction*, (2), 206–212.

5. Marshuba, V. P., & Chernyakova, O. V. (2010). Main directions for improving the accuracy and productivity of deep drilling with twist drills. *Mechanical Engineering, (6)*, 72–84.

6. Kobelnyk, V. R. (2013). Pidvyshchennia efektyvnosti protsesu sverdlinnia naskriznykh otvoriv rehuliuvanniam podachi [Improving the efficiency of through-hole drilling process by feed regulation] (Candidate's thesis). Ternopil.

7. Jingmin, M., & Wenli, Y. (2025). Stability analysis of free vibration of gun drill rod materials. Materials, 18(6), 1241. https://doi.org/10.3390/ma18061241

8. Lingfei, K., Shuai, C., Jih-Hua, C., Yue, S., Falin, M., & Yan, L. (2020). Vibration suppression of drilling tool system during deep-hole drilling process using independence mode space control. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 151, 103525. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103525

9. Biermann, D., Schmidt, R., & Strodick, S. (2024). Numerical modelling of the BTA deep hole drilling process. Procedia CIRP, 123, 470–475.

10. Licheng, L., Can, N., & Liu, G. (2023). Analysis and development of the CFRP boring bar for stability improvement. Fibers and Polymers, 24, 4413–4427.

11. Orgiyan, A., Ivanov, V., & Tonkonogyi, V. (2023). The efficiency of dynamic vibration dampers for fine finishing boring. In Proceedings of the International Conference on Advanced Manufacturing Engineering. Cham: Springer.

12. Li, L., Sun, B., & Hua, H. (2019). Analysis of the vibration characteristics of a boring bar with a variable stiffness dynamic vibration absorber. Shock and Vibration, 2019, 5284194. https://doi.org/10.1155/2019/5284194

13. Bonda, A., Srinivas, J., & Nanda, B. K. (2021). Investigation of stability in internal turning using a boring bar with a passive constrained layer damping. FME Transactions, 49, 384–394.

14. Kobelnyk, V. R., & Kryvyi, P. D. (2007). Zhorstkist vertykalno-sverdlylnykh verstativ [Rigidity of vertical drilling machines]. Visnyk ZhDTU. Tekhnichni Nauky, 1(40), 34–40.

15. Kobelnyk, V. R., & Kryvyi, P. D. (2010). Metodyka doslidzhennia kinematychnoi tochnosti mekhanizmu podach vertykalno-sverdlylnykh verstativ na prykladi verstata modeli 2N118 [Method of studying the kinematic accuracy of the feed mechanism of vertical drilling machines on the example of model 2N118]. Protsesy mekhanichnoi obrobky v mashynobuduvanni, 8, 99–108.

16. Guba, N., Schumski, L., Paulsen, T., & Karpuschewski, B. (2022). Vibration-assisted deep hole drilling of the aluminum material AlMgSi0.5. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 36, 57–66. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.11.002

17. Lingfei, K., Jih-Hua, C., Yan, L., Yanjun, L., & Pengyang, L. (2014). Targeted suppression of vibration in deep hole drilling using magneto-rheological fluid damper. Journal of Materials Processing Technology, 214(11), 2617–2626. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.029

18. Shao, Z., et al. (2019). Deep hole drilling of large-diameter titanium alloy with a novel rotary low-frequency vibration device. IEEE Access, 7, 154872–154881. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2944433

19. Pestunov, V. M., Sviatskyi, V. V., & Prydvorova, S. V. (2012). Mekhanizmy rozvantazhennia instrumentu pry sverdlinni hlybokykh otvoriv [Tool unloading mechanisms in deep drilling]. Zbirnyk naukovykh prats KNUTU, 25(1), 219–223.

20. Pestunov, V. M., Sviatskyi, V. V., & Sviatska, L. P. (2008). Rozrobka pryvoda dlia hlybokoho sverdlinnia metodom perekhoplennia stebla instrumenta po yoho dovzhyni [Drive development for deep drilling by clamping the tool shank along its length]. Zbirnyk naukovykh prats KNUTU, 20, 169–172.

21. Kryvyi, P. D., Krupa, V. V., & Prodan, V. I. (2010). Design and technological prerequisites for improving the quality of deep hole processing of thin-walled cylinders. *Bulletin of TDTU, 15*(1), 147–156.

22. Kryvyi, P. D., & Krupa, V. V. (2012). Tool support for the process of combined boring of deep holes in thin-walled cylinders. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni Nauky, (2)*, 23–34.

23. Kryvyi, P. D., Kobelnyk, V. R., Krupa, V. V., & Yakovliev, V. G. (2016). Boring tools with paired asymmetric arrangement of cutting edges for machining deep cylindrical holes. *Technical Sciences and Technologies, 2(4)*, 28–35.

24. Woon, K. S., et al. (2018). Improving coolant effectiveness through drill design optimization in gundrilling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 370*, 012025. https://doi.org/10.1088/1757-899X/370/1/012025

25. Vasylyev, A. V., Popov, S. V., & Tymoshenko, I. V. (2014). Improving the efficiency of deep drilling of steel billets. *Collection of Scientific Papers of Poltava National Technical University named after Yu. Kondratyuk. Series: Mechanical Engineering, Construction, (2)*, 206–212.

26. Novikov, F. V., Zhovtobryukh, V. O., & Klenov, O. S. (2014). Development and implementation of efficient operations for machining hydraulic system parts. *Visnyk SevNTU. Ser.: Mashynopryladobuduvannya ta Transport, (151)*, 115–121.

27. Krupa, V. V. (2015). *Metalorizalni instrumenty z asymetrychnym rozmishchenniam lez dlia obroblennia hlybokykh otvoriv tsylindriv* [Metal-cutting tools with asymmetric arrangement of blades for deep cylinder hole processing] (Candidate's thesis). Ternopil.

28. Kryvyi, P. D., Dzyura, V. O., Tymoshenko, N. M., & Krypa, V. V. (2014). Technological heredity and accuracy of the cross-section shapes of the hydro-cylinder cylindrical surfaces. In *Proceedings of the International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference* (Paper No. MSEC2014-3946, p. 2). Detroit, MI, USA.

29. Krupa, V., et al. (2024). Improved method for determining the feed influence on the tangential cutting force during re-drilling, countersinking and boring based on the small sample theory. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. https://doi.org/10.3311/ppme.29952

30. Lou, J., Li, L., & Dong, X. (2024). Research on the influencing factors of chip forming in 304 stainless steel deep hole gun drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 134*, 1447–1461. https://doi.org/10.1007/s00170-024-14205-3

31. Kočiško, M., Pollák, M., Grozav, S. D., & Ceclan, V. (2023). Influence of coolant properties and chip former geometry on tool life in deep drilling. *Applied Sciences, 13*(14), 8360. https://doi.org/10.3390/app13148360

32. Ivkovic, M., & Djurovic, S. (2025). Influence of coolant pressure on the wear and tool life of gun drills in deep drilling of 24CrMoV5-5 steel. *Journal of Production Engineering*. https://doi.org/10.24867/JPE-2025-01-019

33. Kamaruzaman, A., Zain, A., Alwee, R., Yusof, N., & Najarian, F. (2019). Optimization of surface roughness in deep hole drilling using moth-flame optimization. *ELEKTRIKA – Journal of Electrical Engineering, 18*, 62–68. https://doi.org/10.11113/elektrika.v18n3-2.195

34. Liang, J., Jiao, L., Yan, P., Cheng, M., Qiu, T., & Wang, X. (2021). Research on deep-hole drilling quality of high-strength steel with slender gun drill. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-312959/v1

35. Botec. (2025). Single flute gundrills twin fluted drills [Catalog]. https://www.botek.de/downloads/en/Catalog_ELB_ZLB_E.pdf

36. Li, B., Huang, C., Chen, Z., et al. (2025). Change of the machined hole wall surface roughness, microstructure and microhardness of low alloy steel caused by drill-guide-pads during BTA deep hole drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 139*, 1595–1605. https://doi.org/10.1007/s00170-025-15989-8

37. Stephenson, D. A., & Agapiou, J. S. (2016). *Metal cutting theory and practice* (3rd ed.). CRC Press.

38. Mei, C. C. (1997). *Mathematical analysis in engineering: How to use the basic tools* (Rev. ed.). Cambridge University Press.

39. Litnarovych, R. M. (2011). *Pobudova i doslidzhennia matematychnoi modeli za dzherelamy eksperymentalnykh danykh metodamy rehresiinoho analizu* [Construction and study of a mathematical model based on experimental data using regression analysis methods]. Rivne: MEHU.

Дата першого надходження рукопису до видання: 30.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 27.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025