

# ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ДИНАМІКИ, МІЦНОСТІ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОМИСЛОВОГО УСТАТКУВАННЯ

УДК 621.9.4

<sup>1</sup>Р. Т. Карпик, <sup>2</sup>Н. О. Костюк

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
<sup>2</sup>Хмельницький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ОТВОРІВ МАЛОГО ДІАМЕТРА ПІД ЧАС ГЛИБОКОГО СВЕРДЛІННЯ

© Карпик Р. Т., Костюк Н. О., 2019

Розглянуто особливості процесу свердління, проаналізовано вплив технологічних методів та способів і оснащення на точність та якість глибоких отворів малого діаметра. Досліджено впливи способу подачі мастильної охолоджуючої рідини на стійкість та продуктивність обробки. Проаналізовано обробку на металорізальному обладнанні з конструктивним розробленням пристрою, а також напружено-деформований стан процесу свердління методом скінченних елементів.

**Ключові слова:** процес різання, глибоке свердління, обробка глибоких отворів, стійкість, метод скінченних елементів, моделювання процесу різання.

In the article the features of the drilling process are considered, an analysis of the influence of technological methods and methods and equipment on the accuracy and quality of deep openings of small diameter is carried out. The influence of the method of supplying the lubricating coolant on the stability and processing efficiency was investigated. The analysis of processing on metal cutting equipment with the constructive development of the device is carried out, as well as the stress-strain state of the drilling process by the finite element method has been carried out.

**Keywords:** cutting process, deep drilling, deep openings processing, stability, finite element method, modeling of cutting process.

**Постановка проблеми.** Сьогодні у всіх галузях машинобудування поширені деталі, які мають глибокі отвори. Масовими споживачами таких деталей є загальне та спеціальне машинобудування, суднобудування, авіабудування, нафтове та хімічне машинобудування, приладобудування та ін. Деталі з глибокими отворами зустрічаються різноманітної форми, виготовляються різними методами, з різною точністю і чистотою обробки, в широкому діапазоні діаметрів і довжин. Свердління отворів малого діаметра є однією із важкоздійснюваних операцій в автоматизованому виробництві. З високою технологічною надійністю обробка спіральними свердлами характеризується такими важливими особливостями: недостатньою міцністю інструмента на згин, значним наростанням сил і крутильного моменту внаслідок накопичення стружки в канавках свердла. Під час тривалого свердління глибоких отворів малого діаметра на незмінних режимах різання крутий момент досягає критичного значення, що призводить до руйнування інструмента і непоправного пошкодження виробу. У зв'язку з цим виникає необхідність керування траєкторіями виконавчих елементів верстата з періодичними виведенням інструмента з зони різання, тобто керування параметрами процесу свердління без руйнування інструмента із забезпеченням необхідної кількості

виведення свердла з зони обробки. Також недоліком процесу глибокого свердління є те, що невелика осьова стійкість спіральних сверدل і велика сила тертя в зоні різання за більшого заглиблення інструмента в заготовку сприяють зростанню адгезійних сил тертя, а також температур у зоні різання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Попередній аналіз і вивчення літературних джерел в напрямку розвитку автоматизації, вдосконалення методів та способів обробки отворів малого діаметра під час глибокого свердління, а також оригінальних конструкцій обладнання показали, що устаткування для автоматизації процесу свердління є надзвичайно складним, громіздким і не достатньо надійним. Проте існуючі конструкції верстатів далеко не вичерпали резервів продуктивності та якості за високої собівартості. З цих причин таке устаткування не отримало масового застосування, тоді як гнучкі виробничі системи за їх високої собівартості мають деякі переваги над жорсткими за циклом обробки агрегатними верстатами та автоматичними лініями. Як відомо, сучасна електроніка має високу швидкодію і надійність. Саме тому з'явилася можливість впровадження складних математичних алгоритмів управління нестационарними процесами. Сучасна обчислювальна техніка має високий потенціал для вирішення завдань математичного моделювання складних динамічних процесів, тобто застосування сучасної електроніки в конструкціях агрегатних верстатів та автоматичних ліній робить їх більш гнучкими та пристосованими для обробки глибоких отворів. За цим підходом можна розв'язувати задачі, що не мають аналітичного розв'язку.

Саме визначення алгоритмів, основаних на вивченні механіки процесу свердління, а також управління динамікою процесу на основі зниження дестабілізуючих чинників, дають змогу сформулювати та вирішити завдання синтезу системи оптимізації продуктивності обробки отворів.

Тому з'явилася нова тенденція точного виконання каналів отворів та їх розташування відносно контуру деталі спіральними свердлами, що забезпечують утворенням елементів на різальній частині інструмента та додаткових рухів, що накладаються на нього для дроблення стружки в зоні різання, що суттєво покращує умови роботи спіральними свердлами [2].

Як показує практика експлуатації осьових інструментів, зокрема для обробки глибоких отворів, роботоздатність інструмента багато в чому визначається інструментальним матеріалом, геометричними параметрами різального клина, режимами різання, а також способом базування та кріплення інструмента [3, 4].

Аналізуючи характер і причини зношування та руйнування свердел, їх можна поділити на такі групи залежно від характеру руйнування:

- а) пластична деформація та зношування по задній поверхні (відбувається за дуже високої швидкості різання);
- б) кратерне зношування – найпоширеніший вид зносу (виникає на передній поверхні інструмента внаслідок критично високої температури в зоні різання);
- в) наростоутворення (виникає при обробці низьковуглецевих або нержавійних сталей);
- г) викришування головної різальної кромки (може виникнути через неспіввісність осі свердла та осі обертання інструмента; відведення свердла, викликаного надмірним вильотом, подачею або глибиною свердління; недостатньою жорсткістю свердла в результаті неправильного кріплення, а також поганого стану шпинделя або неточного регулювання).

Існуючі методи, спрямовані на досягнення оптимальних параметрів початкового стану інструмента з метою підвищення його експлуатаційних показників [4] (міцність, працездатність, продуктивність тощо), умовно можна поділити на стадії:

- вибору, коли розробляють та вдосконалюють існуючі інструментальні матеріали, застосовують методи поверхневого зміцнення різальної частини інструмента, що забезпечують підвищення міцності і працездатності;
- проектування, коли вдосконалюють конструкції та оптимізують геометричні параметри різальної частини інструмента;
- експлуатації, коли оптимізують режими різання.

При зрізанні та деформації шару матеріалу в зоні різання виникають такі фізичні явища: формування контактних поверхонь, деформація, теплоутворення, стружкоутворення, знос різального інструмента, утворення поверхні тощо. Ці явища призводять до появи безперервного потоку стружки, розігріву зони різання та передавання певної кількості теплоти до зони обробки.

Досліджували питання виникнення джерел тепла та розподілу потоків і стоків теплоти під час різання матеріалів такі вчені, як Я. Г. Усачов, Н. І. Резніков, А. М. Данієлян та ін.

В останніх виданнях, присвячених теплофізиці процесу обробки металів різанням, відбулося розділення питання дослідження. Зокрема, робота Резнікова А. Н., Резнікова Л. А. [5] присвячена загальній теплофізиці процесів різання, а в роботі Юдковського П. А. та ін. [6] насамперед досліджується процес теплоутворення під час неглибокого свердління.

Отже, за результатами останніх досліджень процесу різання під час обробки глибоких отворів малого діаметра можна стверджувати, що це є доволі складний процес, який потребує значної уваги, оскільки в системі верстат – пристосування – інструмент – деталь (ВПД) під час глибокого свердління малого діаметра інструмент працює у найважчих умовах. Недостатнє охолодження інструмента, замкнутий об'єм обробки в рази зменшує стійкість свердла. Низька точність обробки, а саме відведення свердла від осі та діаметральна похибка призводять до непередбаченого зламу свердла.

Збільшення жорсткості системи ВПД та вдосконалення процесів свердління глибоких отворів малого діаметра завдяки конструктивному розробленню пристрою та використанню запропонованого методу поливання свердла мастильно-охолоджувальною рідиною є одним із актуальних завдань механічної обробки деталей усіх галузей машинобудування, вирішення якого дасть можливість підвищити точність обробки, стійкість свердла та, як наслідок, продуктивність технологічного процесу обробки глибоких отворів малого діаметра.

**Мета дослідження** – отримати високу точність виконання і якість отворів малого діаметра під час глибокого свердління, проаналізувавши вплив технологічних методів і способів, а саме вплив способу подачі мастильної охолоджувальної рідини на стійкість та продуктивність обробки; проаналізувати процес обробки на металорізальному обладнанні із конструктивним розробленням пристрою, а також вивчити напружено-деформований стан процесу свердління за методом скінченних елементів.

**Виклад основного матеріалу.** Обробка отворів малого діаметра під час глибокого свердління є багатопараметричним процесом, на який впливають багато змінних і постійних чинників (в'язкість, твердість, теплопровідність, адгезійна активність, інші властивості різального інструмента та заготовки). Також не менш важливими є параметри режимів різання, які, своєю чергою, мають вагомий вплив на процес різання. Тому для більшої жорсткості обробки дослідження виконувалось на горизонтально-фрезерному верстаті моделі 6М82, із розробленою конструкцією пристрою для скерування інструмента та подачі охолодження (рис. 1, 2). Пристрій складається з: корпусу 1, втулки 2, кронштейну 3, опори 4, гвинтів 5,6,7 і розташований на столі верстата за допомогою шпонкового з'єднання, яке входить у паз стола та фіксується болтом 7. У втулці 2 є отвір  $D^{Td}$ , який слугує для скерування інструмента (свердла) і виконує роль кондукторної втулки. На торцевій поверхні просвердлено чотири отвори  $\varnothing 3,5$  мм під різними кутами ( $\alpha = 30^\circ, \alpha = 60^\circ, \alpha = 90^\circ$ ), а також просвердлено отвори на верхній циліндричній поверхні корпусу 1, які слугують для закріплення штуцера і є каналами для подачі мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) в зону обробки.

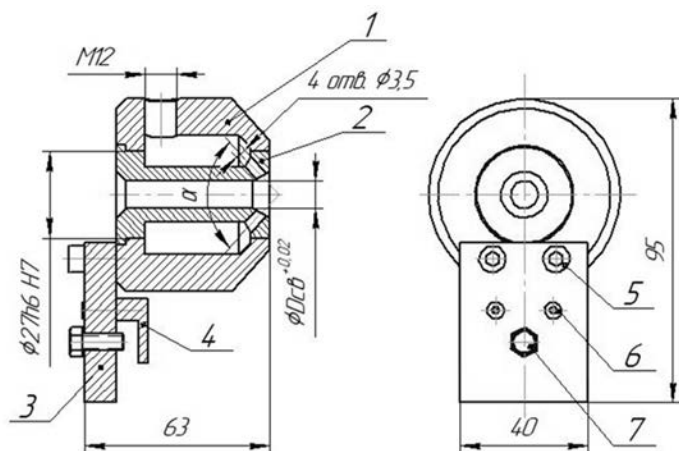


Рис. 1. Ескіз пристрою для подачі МОР

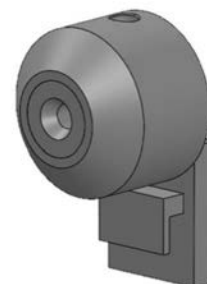


Рис. 2. Просторова 3D-модель пристрою

Для обробки використано заготовку з інструментальної легованої сталі марки ХВГ із конструктивними розмірами 350x500x50 мм та різальний інструмент (спіральне свердло)  $\varnothing 8,7$  мм із швидкорізальної сталі Р18.

Дослідження проведено при таких режимах різання:

- робоча подача  $S$ : 0,10, 0,15 0,20, 0,30 мм/об.,
- частота обертання  $n$ : 600, 700, 800, 925 хв<sup>-1</sup>,
- швидкість різання  $V$ : 16, 18, 19, 21 м/хв,
- подача МОР поливом 14л/хв, під тиском: 0,5, 1, 5 МПа.

Дослідження проводили методами обробки з центруванням отвору та охолодженням і без центрування та без охолодження.

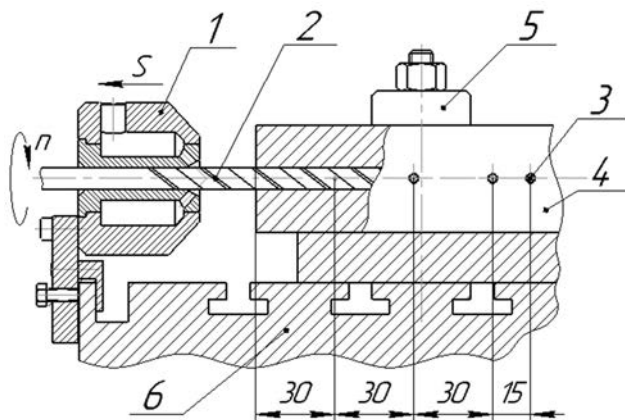


Рис. 3. Схема обробки з розміщенням термопари

Закріплено свердло 1 у цанговому патроні, а заготовка 4 – до столу верстата 6 за допомогою універсально-затискного механізму 5. Для заміру температурних показників розсвердлювали з певним інтервалом у заготовці отвори, в які встановлювали датчики термопари (рис. 3).

Підведення МОР через пристрій 1 у зону різання здійснюється поливом під тиском з боку задньої торцевої поверхні інструмента. Рациональне застосування МОР підвищує стійкість різального інструмента від 1,5 до 2 разів.

Після замірів температури в зонах обробки в заготовці зроблено розріз вздовж осі отвору для полегшення вимірювання діаметральних похибок і зміщення відносно осі.

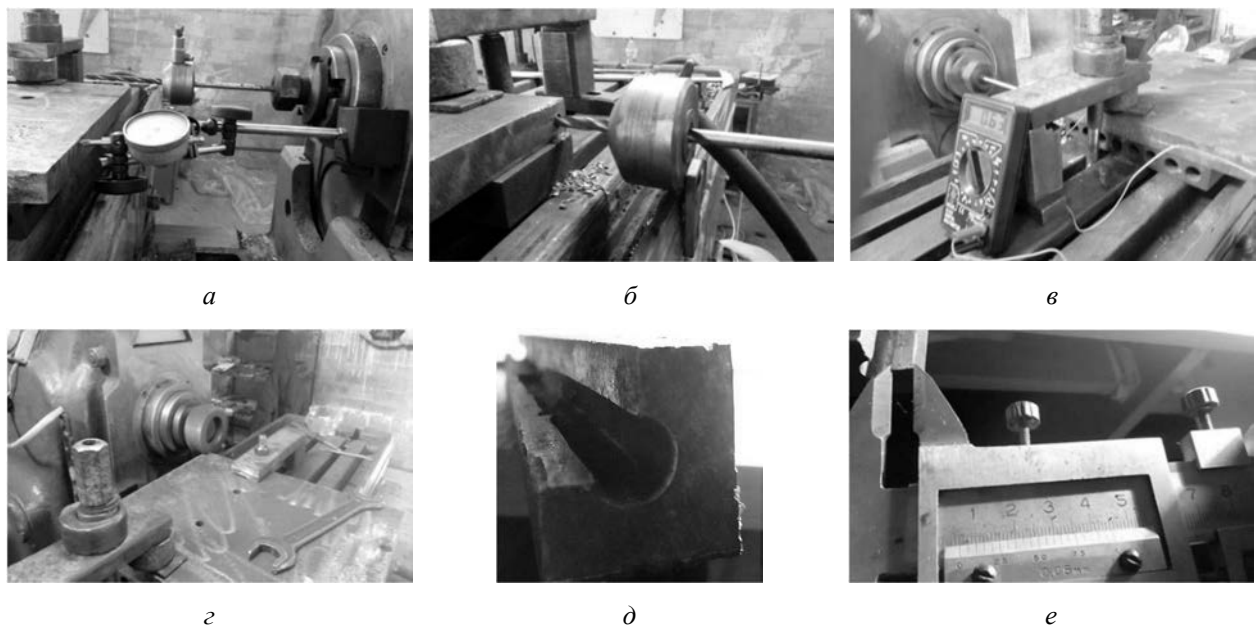


Рис. 4. Обробка отвору:

- a* – базування заготовки; *б* – початок обробки; *в* – вимірювання температури в процесі свердління; *г* – фрезерування заготовки вздовж осі отвору; *д* – розрізана заготовка вздовж осі отвору; *е* – заміри

## Результати замірів

	Без центрування				Із центруванням та охолодженням			
	30	60	90	105	30	60	90	105
Глибина свердління, мм	30	60	90	105	30	60	90	105
Температура, °C	63	90	101	106	23	67	74	82
Діаметр отвору D, мм	8,8	8,8	8,9	9	8,8	8,8	8,85	8,9
Зміщення відносно осі b, мм	0,1	0,2	0,4	0,65	0,05	0,1	0,15	0,2

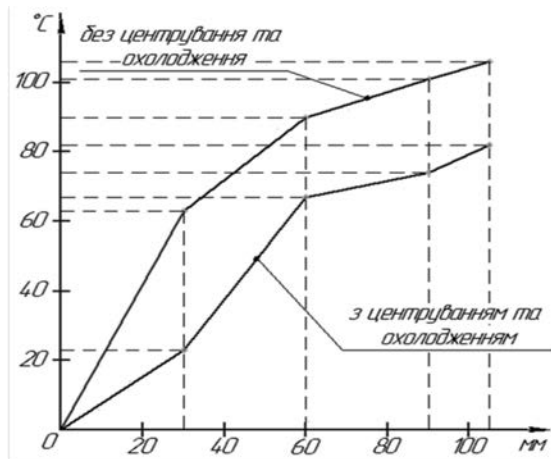


Рис. 5. Графік зміни температури відносно глибини свердління

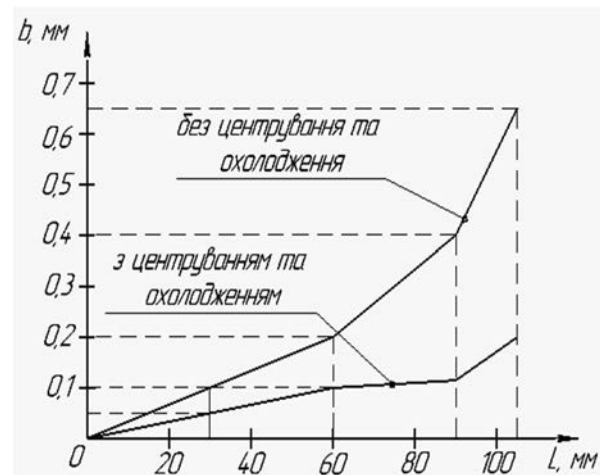


Рис. 6. Графік зміщення осі отвору до глибини свердління

Дослідження впливу МОР на стійкість різального інструмента при різних тисках і витратах рідини відносно часу на різних швидкостях обертання показано на рис. 7, де:

- 1 – полив при витраті 15 л/хв;
- 2 – подача МОР під тиском 0,5МПа, при витраті 10л/хв;
- 3 – подача МОР під тиском 1МПа, при витраті 12 л/хв;
- 4 – подача МОР під тиском 3МПа, при витраті 15 л/хв.

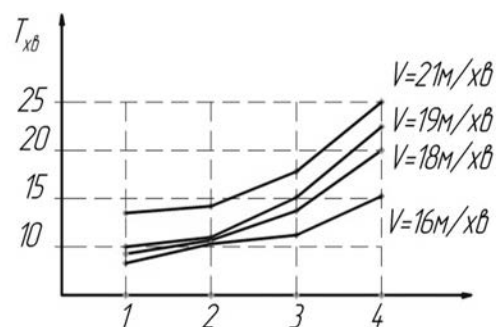


Рис. 7. Графік впливу МОР на стійкість свердла

Оскільки обробка різанням є складним процесом і проблемно передбачити вплив всіх фізичних явищ на глибині свердління (30, 60, 90, 105 мм), проводимо моделювання процесу різання методом скінченно-елементного аналізу в DEFORM.

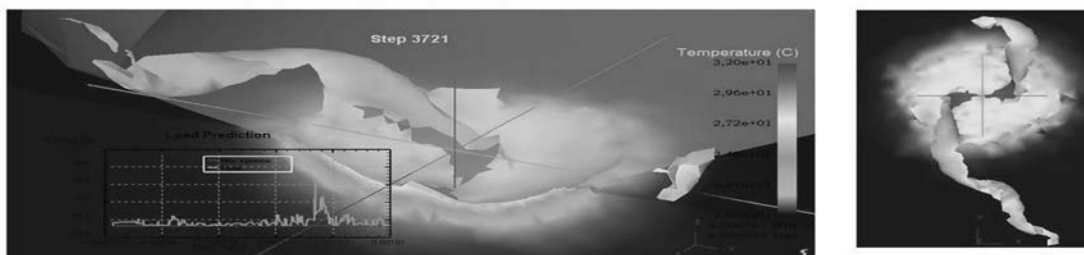


Рис. 8. Температурні деформації в зоні різання ( $\min=20^\circ$ ,  $\max=30^\circ$ ) без центрування та охолодження

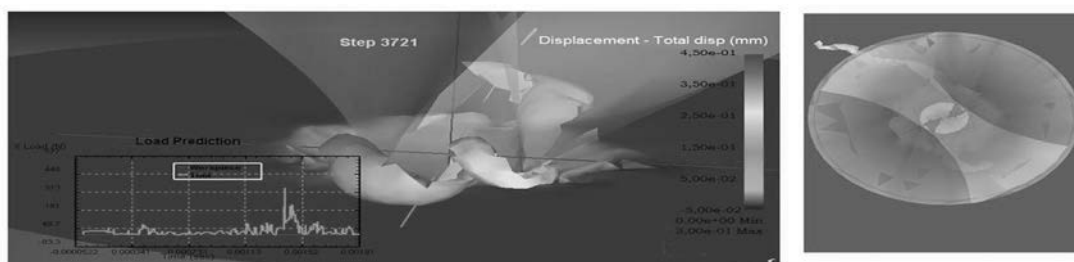


Рис. 9. Загальні переміщення в зоні різання ( $\min=0$  мм,  $\max=0,45$  мм) без центрування та охолодження



Рис. 10. Еквівалентні деформації в зоні різання ( $\min=0$  мм/мм,  $\max=1,2$  мм/мм) без центрування та охолодження



Рис. 11. Температурні деформації в зоні різання ( $\min=20^\circ$ ,  $\max=27^\circ$ ) із центруванням і подачею МОР

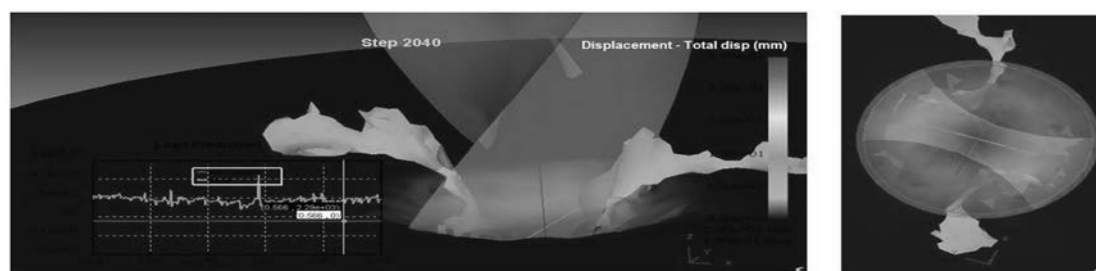


Рис. 12. Загальні переміщення в зоні різання ( $\min=0$  мм,  $\max=0,12$  мм) із центруванням і подачею МОР

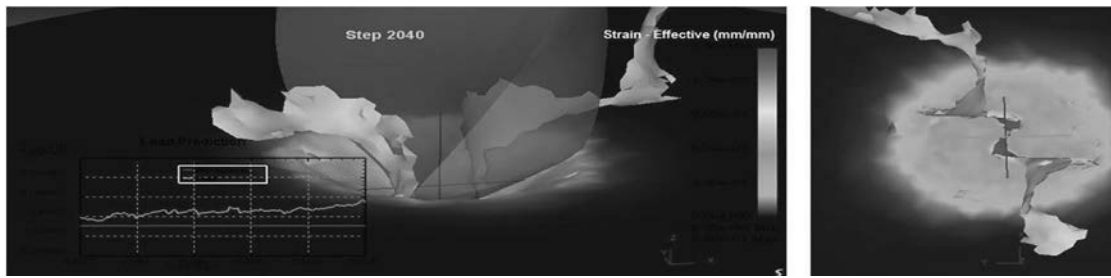


Рис. 13. Еквівалентні деформації в зоні різання ( $\min=0\text{мм/мм}$ ,  $\max=0,88\text{мм/мм}$ ) із центруванням і подачею МОР

Таблиця 2

### Результати замірів

	Без центрування				Із центруванням та охолодженням			
	30	60	90	105	30	60	90	105
Глибина свердління, мм	30	60	90	105	30	60	90	105
Температура, $^{\circ}\text{C}$	39	63	72	80	29	60	66	79
Діаметр отвору D, мм	8,70	8,83	8,85	8,90	8,7	8,83	8,85	8,90
Зміщення відносно осі b, мм	0,05	0,1	0,2	0,3	0,02	0,1	0,2	0,3

**Висновки.** Результати проведених досліджень процесу обробки отворів малого діаметра глибокого свердління наведено у табл. 1, 2. За результатами досліджень найбільшою стійкістю свердла є при подачі МОР під тиском 3 МПа при витраті 15 л/хв, проте подальше збільшення подачі МОР під тиском не забезпечує підвищення його стійкості.

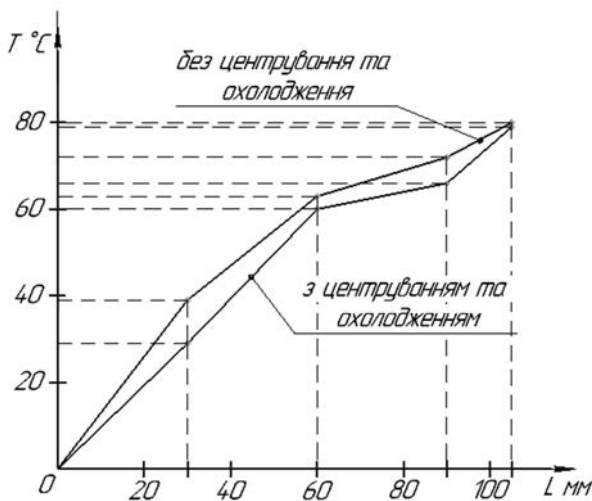


Рис. 14. Графік зміни температури відносно глибини свердління

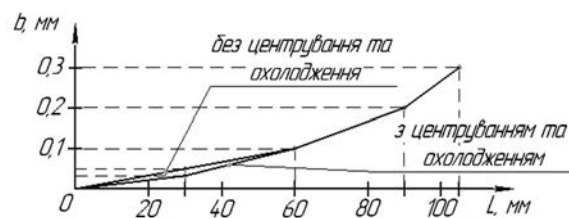


Рис. 15. Графік зміщення осі отвору до глибини

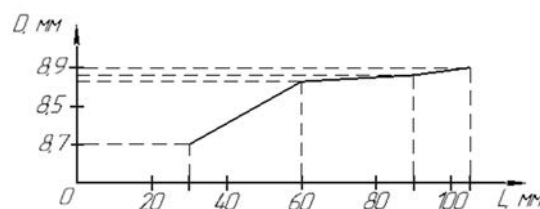


Рис. 16. Графік діаметра отвору до глибини

Оскільки застосування МОР при свердлінні отворів сприяє покращенню відведення стружки та зменшує температуру у зоні різання, такі технологічні методи забезпечують зменшення деформацій інструмента і, як наслідок, збільшення точності виконання розмірів глибоких отворів малого діаметра.

1. Косилова А. Г. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. Т. 2 / под ред. А. Г. Косилової, Р. К. Мецержкова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с. 2. Мариуба В. П.

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

3. Аваков А. А. *Физические основы теории стойкости режущих инструментов* / А. А. Аваков. – М. : Машигиз, 1960. – 308 с.

4. Гречишников В. А. *Режущие инструменты: учеб. пособие* / В. А. Гречишников, С. Н. Григорьев, А. Г. Схиртладзе и др. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 388 с.

5. Грановский Г.И. *Резание металлов* / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский – М. : Высш. шк., 1985. – 304 с.

6. Юдковский П. А. *Повышение качества спиральных сверл* / П. А. Юдковский, И. К. Крючков, А. П. Шевель. – Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 1970. – 110 с.

7. Маршуба В. П. *Фізичне моделювання процесу пакетування стружки при глибокому свердлінні* / В. П. Маршуба, А. О. Дігтяр // *Машинобудування*. – 2008. – № 3. – с. 96–100.

8. Синельщиков А. К. *Повышение эффективности обработки спиральными сверлами* / А. К. Синельщиков, Г. В. Филиппов – М. : Станки и инструмент. – 1974. – № 3. – С. 35–37.

9. Шпеньков Г. П. *Физикохимия трения* / Г. П. Шпеньков – Минск : Университетское, 1991 – 397 с.

10. Руденко П. О. *Проективання технологічних процесів у машинобудуванні* / навч. посіб. П. О. Руденко – К.: Вища шк., 1993. – 414 с.

11. Анурьев В. И. *Справочник конструктора-машиностроителя* / В. И. Анурьев – М.: Машиностроение, 1982. – Т. 1. – 736 с., Т. 2. – 559 с.

12. Корсаков В. С. *Основы конструирования приспособлений* / В. С. Корсаков – М.: Машиностроение, 1983.

13. [http:// www.deform.com\\_](http://www.deform.com_)

14. P. J. Arrazola, T. Ozel, D. Umbrello, M. Davies, I. S. Jawahir. *Recent advances in modelling of metal machining processes, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 62, 2013, P. 695–718.*