

РОЗДІЛ І. ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1\(43\)-9-21](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-9-21)

УДК 621.914

**Володимир Віталійович Кальченко¹, Антоніна Вікторівна Кологойда²,
Наталія Миколаївна Сіра³, Генадій Володимирович Пасов⁴,
Віра Петрівна Мурашківська⁵, Владислав Анатолійович Легеда⁶**

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: vvkalchenko74@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9072-2976>. **ResearcherID:** [G-6752-2014](https://orcid.org/0000-0002-9072-2976)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: kolohoida@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1742-2686>. **ResearcherID:** [I-1118-2014](https://orcid.org/0000-0002-1742-2686)

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: nnserya@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6242-5210>. **ResearcherID:** [K-2658-2017](https://orcid.org/0000-0002-6242-5210)

⁴кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування,
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: genapasov@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>. **ResearcherID:** [H-4455-2014](http://orcid.org/0000-0001-7248-9085)

⁵старший викладач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: vmurashkovska@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-0556-8709> **ResearcherID:** [G-9757-2016](https://orcid.org/0000-0002-0556-8709)

⁶здобувач вищої освіти, гр. ММБ-241

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: vladislavleheda@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОСЛІДОВНОСТІ ОБРОБКИ ДЕТАЛІ ГІДРАВЛІЧНОГО ПРИВОДУ НА ЇЇ ТОЧНІСТЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розглянуто вплив послідовності технологічних операцій на точність виготовлення корпусної деталі гідравлічного приводу на прикладі підшипникового вузла гідромотора. Проаналізовано два варіанти обробки, які характеризуються різною жорсткістю оброблюваного елемента. Проведено розрахунки режимів різання, крутного моменту, осьової сили та часу обробки. З використанням методу скінченних елементів у SolidWorks виявлено вплив режимів обробки на деформацію деталі в процесі свердління отворів. Встановлено, що вибір послідовності операцій впливає на точність отворів та продуктивність обробки.

Ключові слова: технологія виготовлення; свердління; точність; моделювання; метод скінченних елементів.

Рис.: 16. Табл.: 2. Бібл.: 8.

Актуальність теми дослідження. У сучасних умовах важливим критерієм якісного виробництва є отримання бажаної деталі за мінімальний період часу з мінімальними витратами на виробництво. Тобто важливим є не тільки кінцевий продукт, але і правильно визначена послідовність обробки та обрані режими. Тому задача дослідження впливу послідовності технологічних операцій виготовлення деталей та вибору режимів обробки є актуальною і дозволить оптимізувати процеси на виробництві та підвищити його конкурентоспроможність.

Постановка проблеми. Виготовлення деталей ускладненої геометрії потребує поєднання різноманітних операцій. У переважній більшості остаточне формоутворення та визначення точності геометричних розмірів деталі забезпечується на кінцевих етапах обробки. На стан поверхневого шару деталі значним чином впливають обрані режими різання, так при завищеній подачі та глибині різання збільшується температура в зоні обробки, що може призвести до виникнення припалів. Крім того, з підвищенням параметрів режимів обробки зростають сили різання, що викликають пружні деформації деталі та додатково впливають на точність геометричних розмірів, що особливо важливо

при обробці нежорстких частин виробу. Однак використання занижених параметрів режимів різання зменшує продуктивність обробки. Отже, на етапі вибору послідовності виготовлення деталі необхідно враховувати різні фактори, які дозволять забезпечити необхідну якість деталі при досягненні максимальної продуктивності її виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] розглянуто процес розточування отворів на багатоцільовому свердильно-фрезерно-розточувальному верстаті. При цьому точність міжосьових розмірів залежить від вибору баз, режимів обробки та черговості операцій. Автором визначено сумарну похибку обробки, а також узагальнено рівень впливу технологічних факторів на точність корпусних деталей. У роботі [2] автори розглядають особливості обробки великогабаритних корпусних деталей, де послідовність технологічних операцій виготовлення значним чином впливає на забезпечення точності, особливо при чистовій та оздоблювальній обробці. У [3] розглянуто особливості механічної обробки полімерних заготовок, виготовлених методом FDM-друку. У роботі [4] запропоновані загальні принципи просторового твердотільного моделювання деталей з метою подальшого дослідження, підготовки технічної документації та виготовлення. У [5] описані особливості підготовки моделі для проведення аналізу методом скінченних елементів у системі SolidWork, а також методика визначення параметрів дослідження та аналізу результатів розрахунку.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Однак, наразі не досліджено вплив вибору послідовності виготовлення деталей на їхню точність.

Мета статті. Головною метою роботи є дослідження впливу послідовності виконання технологічних операцій з виготовлення корпусної деталі на точність обробки.

Виклад основного матеріалу. У техніці широко використовуються різноманітні гідромотори, що призначені для перетворення енергії потоку рідини в механічну енергію обертання робочого органу. Є значна кількість типів гідромоторів та їх варіантів конструктивних виконань. Тип та конструкція гідромотора обирається залежно від бажаних механічних характеристик та загальної будови механізму, де цей мотор планується використовувати. Незалежно від конструкції гідромотора обов'язковим є наявність підшипникового вузла, який повинен забезпечити надійне позиціонування та вільне обертання робочих органів.

Для прикладу розглянемо існуючу конструкцію підшипникового вузла (рис. 1). Він складається з корпусної деталі 1 – підшипниковий вузол; дистанційної втулки 2; двох підшипників 3; стопорних кілець 4 та захисної манжети 5. Деталі 3, 4 та 5 є стандартними виробами, виготовляються масово на спеціалізованих підприємствах. Дистанційна втулка 2 є досить простою деталлю, яка призначена для забезпечення номінальної відстані між підшипниками 3. Найбільш складною і відповідальною в цьому вузлі є корпусна деталь 1 – підшипниковий вузол (рис. 2). Вона має значний вплив на працездатність всього вузла й потребує особливої уваги при виготовленні.

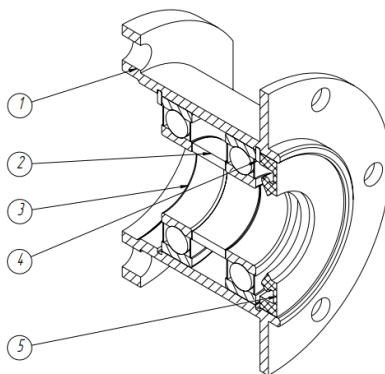


Рис. 1. Підшипниковий вузол гідромотора

Джерело: розроблено авторами.

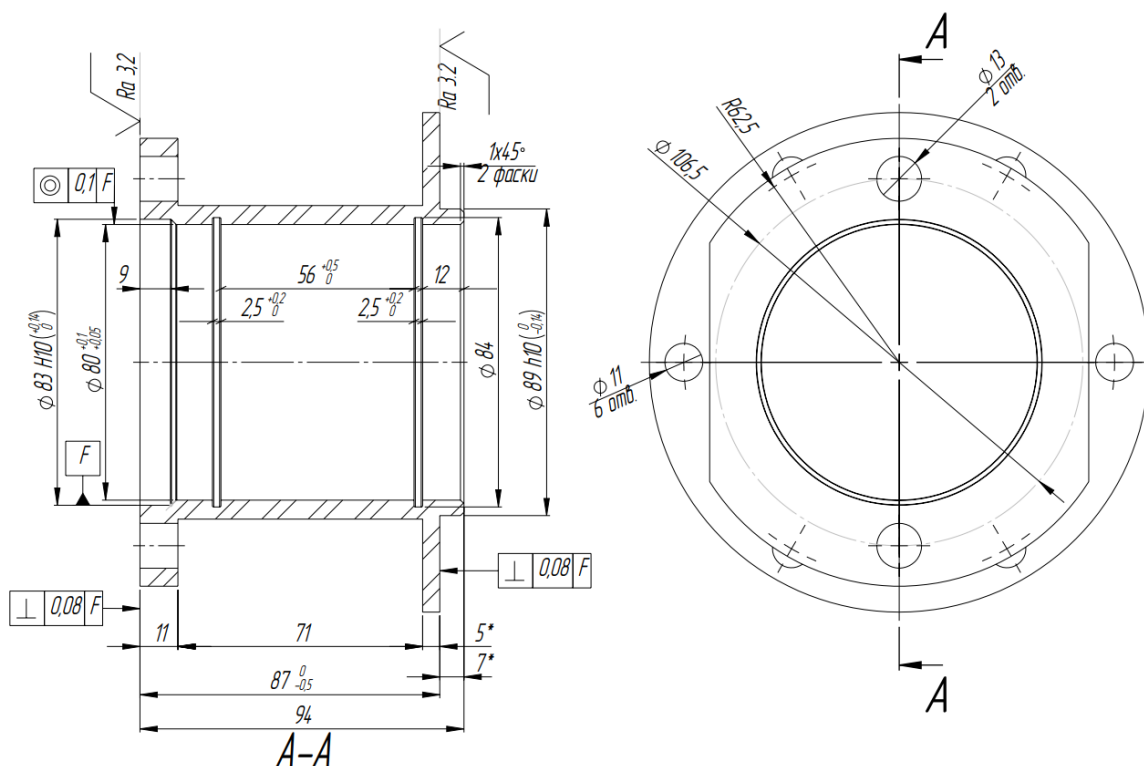


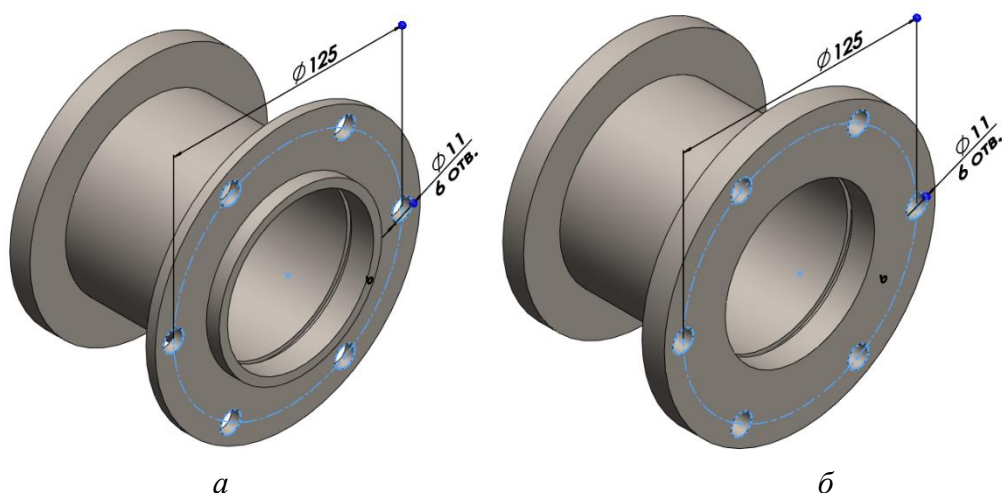
Рис. 2. Підшипниковий вузол

Джерело: розроблено авторами.

Загалом послідовність виготовлення деталі цієї конфігурації є типовою. Як заготовка обирається пруток діаметром $\varnothing 150$ мм. Враховуючи діаметр заготовки, пруток попередньо нарізають на штучні деталі, довжина яких складається із загальної довжини деталі та припусків на обробку торців. Подальша обробка здійснюється на токарному і фрезерному верстатах і включає підрізання торців, точіння по зовнішньому діаметру та розточування внутрішнього отвору. Обробка внутрішніх торцевих та зовнішньої циліндричної поверхонь виконується за декілька проходів з остаточним формуванням двох фланців. На кожному з фланців необхідно утворити ряд отворів, а на правому (рис. 2) – додаткові лиски. Товщина правого фланця становить 11 мм, що забезпечує його достатню жорсткість і не потребує додаткової уваги при обробці. При цьому товщина лівого фланця становить лише 5 мм і при свердлінні кругових отворів він буде деформуватись в осьовому напрямку, що негативно вплине на точність отворів. Для забезпечення бажаної жорсткості при обробці доцільно спочатку виконати кругові отвори, а вже потім остаточні сформувати зовнішній контур із визначенням заданої товщини фланця.

Розглянемо два варіанти утворення набору 6 кругових отворів діаметром 11 мм по торцевій частині деталі (рис. 3). А саме, з попереднім виконанням повної токарної обробки циліндричної та торцевої частин (рис. 3, а) та з частковою токарною обробкою контуру, при якій залишається припуск по торцевій поверхні, для збереження жорсткості (рис. 3, б).

Розглянемо схему свердління отворів за другим методом (рис. 4). При виготовленні цих отворів, наявний установчий рух – позиціонування свердла відносно поверхні деталі, головний рух різання – обертання, та осьова подача для забезпечення утворення наскрізного отвору в деталі. В процесі свердління виникає осьова сила різання, що намагається вигнути деталь. При збільшенні осьової подачі збільшується сила різання, а відповідно і величина відгинання заготовки, що негативно впливає на точність отвору.



*Рис. 3. Методи виконання кругових отворів:
а – з попереднім виконанням повної токарної обробки;
б – з частковою токарною обробкою контуру*

Джерело: розроблено авторами.

Для свердління отворів обираємо твердосплавне свердло діаметром 11 мм SCD 110-040-120 AP3N [6]. Обраний інструмент додатково має покриття з нітриду титану алюмінію (TiAlN), що забезпечує високу термостійкість і зносостійкість, та дозволяє ефективно використовувати свердло при обробці різних сталей, чавуну, твердих сплавів тощо.

Відповідно до схеми свердління отворів (рис. 4) деталь 1 закріплюється в патроні за допомогою додаткового пристосування, свердло 2 здійснює переміщення X_c , вздовж осі X для забезпечення позиціонування, обертається з кутовою швидкістю ω і здійснює осьове переміщення S .

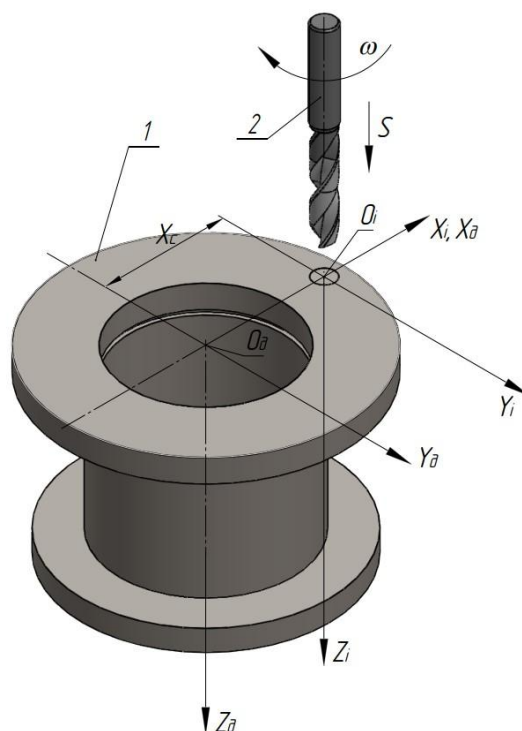


Рис. 4. Просторова схема свердління отворів 11 мм

Джерело: розроблено авторами.

Розрахуємо основні режими різання та параметри обробки за методикою, наведеною в [7].

Глибина різання для обох схем обробки (рис. 3) буде однаковою: $t = D/2 = 11/2 = 5$ мм.

Визначаємо глибину отвору (глибокий чи неглибокий). Для цього знайдемо співвідношення: $l_1/D = 5/11 = 0,45$ для першої схеми обробки та $l_1/D = 12/11 = 1,1$ для другої схеми обробки. В обох випадках співвідношення менше 5, отже, отвір не є глибоким.

Обираємо максимально допустиму за міцністю свердла подачу. Відповідно до [29] для діаметра свердла 11 мм при обробці конструкційної сталі рекомендовано $S_l = 0,3$ мм/об.

Корегуємо подачу з врахуванням параметрів обробки:

$$S = S_1 \cdot K_{ls} \cdot K_{so} \cdot K_{js} \cdot K_{is}, \quad (1)$$

де K_{ls} – поправковий коефіцієнт на глибину отвору; $K_{ls} = 1$; K_{so} – поправковий коефіцієнт для досягнення більш високої якості у зв'язку з наступними операціями зенкерування або розсвердлювання. Оскільки подальша обробка не передбачена, тому $K_{so} = 1$; K_{js} – поправковий коефіцієнт на недостатню жорсткість системи верстат - пристосування - інструмент – деталь (ВПД), система ВПД верстату з достатньою жорсткістю, тому $K_{js} = 1$; K_{is} – поправковий коефіцієнт на інструментальний матеріал. Оскільки матеріал свердла – твердий сплав, то $K_{is} = 0,6$.

Отже, $S = 0,18$ мм/об.

Швидкість різання під час свердління розраховуємо за формулою

$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot S^y} \cdot K_v, \quad (2)$$

де коефіцієнт $C_v = 7$, показники $q = 0,4$, $y = 0,7$, $m = 0,2$; T – період стійкості, $T = 20$ хв; K_v – загальний поправковий коефіцієнт, який враховує фактичні умови роботи: $K_v = K_{Mv} \cdot K_{iv} \cdot K_{lv}$, де K_{iv} – коефіцієнт, який враховує матеріал різального інструменту, для обраного свердла $K_{iv} = 0,65$; K_{lv} – коефіцієнт, який враховує глибину свердління, враховуючи що $l/D < 3$, то $K_{lv} = 1$; K_{Mv} – коефіцієнт, який враховує матеріал оброблюваної заготовки. Для сталі

розраховують за формулою: $K_{Mv} = K_r \cdot \left(\frac{750}{\sigma_B} \right)^{n_v}$, коефіцієнт $K_r = 1$, $\sigma_B = 450$ МПа – межа

міцності, показник ступеня $n_v = 1$, отже $K_{Mv} = 1 \cdot \left(\frac{750}{450} \right)^1 = 1,67$, та $K_v = 1,67 \cdot 0,65 \cdot 1 = 1,08$.

Таким чином швидкість різання становитиме

$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m \cdot S^y} \cdot K_v = \frac{7 \cdot 11^{0,4}}{20^{0,2} \cdot 0,18^{0,7}} \cdot 1,08 = 36,1 \text{ м/хв.}$$

Крутний момент під час свердління

$$M_{kp} = 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot S^x \cdot K_p, \quad (3)$$

де коефіцієнт $C_M = 0,0345$, значення показників $q = 2$, $x = 0,8$; K_p – загальний поправковий коефіцієнт, який враховує фактичні умови роботи, залежить тільки від матеріалу

оброблюваної заготовки $K_p = K_{Mp} = \left(\frac{\sigma_B}{750} \right)^n$, де $\sigma_B = 450$ МПа – границя міцності, показник ступеня $n = 0,75$ для різальної частини із твердого сплаву і швидкорізальної сталі.

Тоді $K_p = K_{Mp} = \left(\frac{450}{750} \right)^{0,75} = 0,68$.

Відповідно крутний момент становить

$$M_{kp} = 10 \cdot 0,0345 \cdot 11^2 \cdot 0,18^{0,8} \cdot 0,68 = 7,22 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Осьова сила під час свердління

$$P_o = 10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot S^y \cdot K_p, \quad (4)$$

де коефіцієнт $C_p = 68$, значення показників $q = 1,0$; $y = 0,7$; $K_p = 0,68$.

Отже, осьова сила при свердлінні отворів становить

$$P_o = 10 \cdot 68 \cdot 11^1 \cdot 0,18^{0,7} \cdot 0,68 = 1535,34 \text{ Н} = 1,5 \text{ кН}.$$

Частота обертання шпинделя

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 36,1}{3,14 \cdot 11} = 1045 \frac{\text{об}}{\text{хв}}. \quad (5)$$

Обираємо найближчу більшу частоту обертання шпинделя за паспортом верстата: $n = 1000$ об/хв.

Основний технологічний час, для обробки одного отвору

$$T_o = \frac{L \cdot i}{n \cdot S}, \quad (6)$$

де i – кількість проходів у певному переході, $i = 1$; L – розрахункова довжина обробки, мм: $L = l + l_1 + l_2$, l – довжина отвору, мм; l_1 – величина на врізання інструмента, приймаємо 3 мм; l_2 – величина на вихід інструмента, мм:

$$l_2 = t \cdot \operatorname{tg} 70^\circ + 1 = 5,5 \cdot \operatorname{tg} 70^\circ + 1 = 16,07 \text{ мм}.$$

Отже, для обробки отвору за першою схемою $L_1 = 5 + 3 + 16,07 = 24,07$ мм, за другою схемою – $L_2 = 12 + 3 + 16,07 = 31,07$ мм.

Підставляємо дані у формулу основного технологічного часу (6)

$$T_{o1} = \frac{24,07 \cdot 1}{1000 \cdot 0,18} \cdot 60 = 8,69 \text{ с}, \quad T_{o2} = \frac{31,07 \cdot 1}{1000 \cdot 0,18} \cdot 60 = 10,35 \text{ с}.$$

Згідно з розрахунком основних режимів різання для двох схем значення подачі (1), швидкості різання (2), крутного моменту (3) та сил різання (4) буде однаковим для двох варіантів обробки. Однак, за другою схемою, у порівнянні з першою, збільшується час обробки на 1,66 секунди.

Побудуємо графіки залежності крутного моменту, сили різання та часу обробки від значення подачі для другої схеми обробки, що має більшу жорсткість (рис. 3, б).

За описаними вище рівняннями розрахуємо значення крутного моменту (3), осьової сили різання (4) та часу обробки (6) залежно від зміни величини подачі на оберт. Подачу на оберт умовно приймемо від 0,1 мм/об до 0,36 мм/об, з кроком зміни 0,02 мм/об. Результати розрахунку зобразимо у вигляді таблиці 1 та відповідних графічних залежностей (рис. 5, 6, 7).

Таблиця 1 – Залежність режимів обробки від подачі

S , мм/об	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22
$M_{кр}$, Н·м	4,51	5,219	5,904	6,569	7,218	7,853	8,475
P_o , Н	1017	1156	1288	1414	1535	1653	1767
T_o , с	18,64	15,54	13,32	11,65	10,36	9,321	8,474
S , мм/об	0,24	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34	0,36
$M_{кр}$, Н·м	9,086	9,687	10,28	10,86	11,44	12,01	12,57
P_o , Н	1878	1986	2092	2195	2297	2396	2494
T_o , с	7,768	7,17	6,658	6,214	5,826	5,483	5,178

Джерело: розроблено авторами.

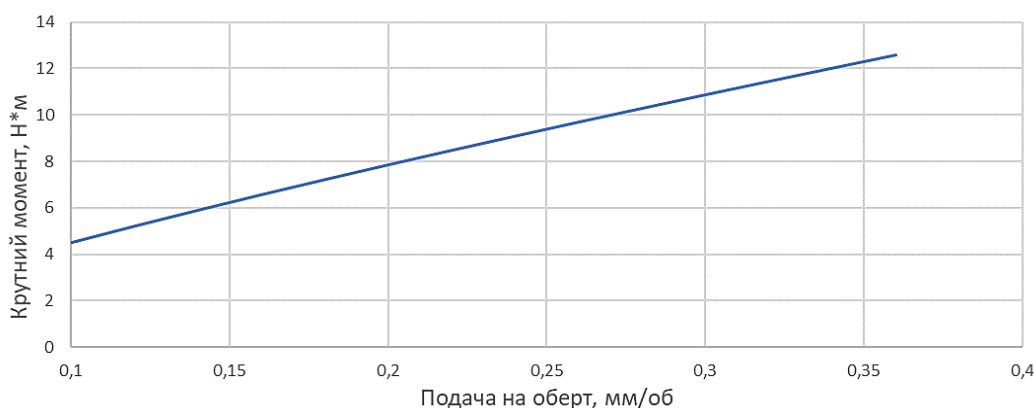


Рис. 5. Графік зміни крутного моменту залежно від величини подачі на оберт
Джерело: розроблено авторами.

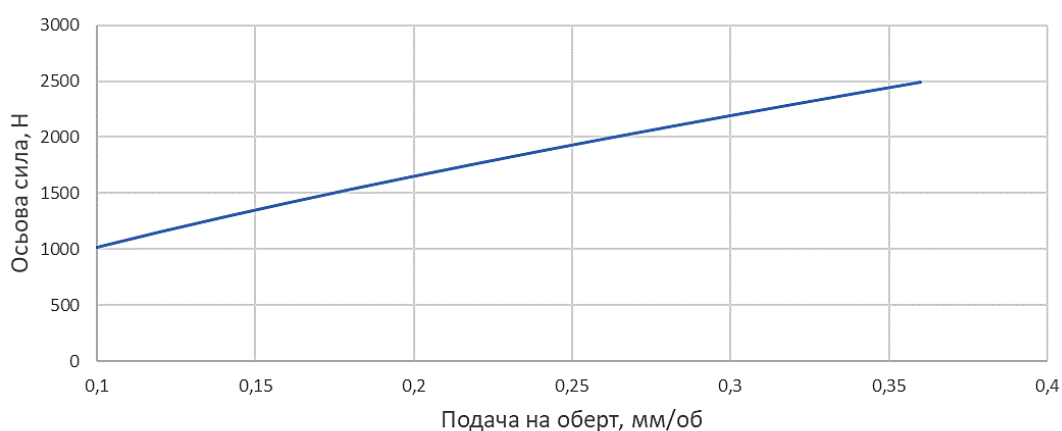


Рис. 6. Графік зміни осьової сили різання залежно від величини подачі на оберт
Джерело: розроблено авторами.

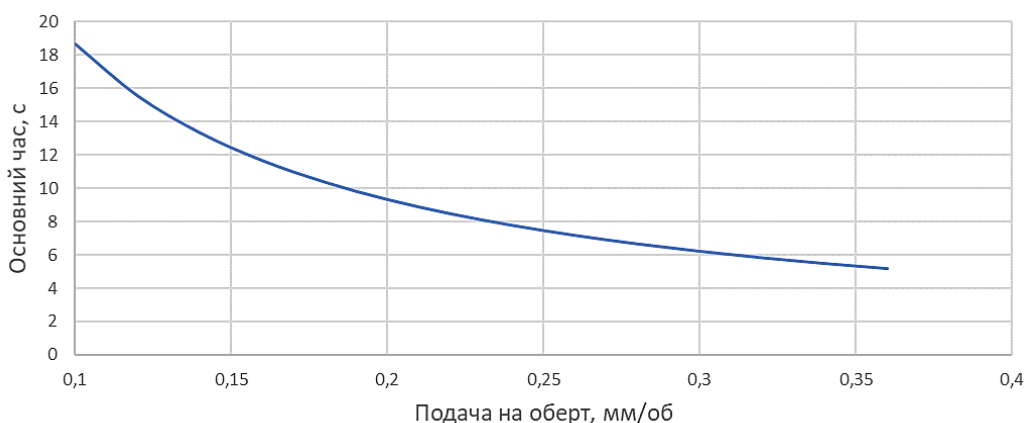


Рис. 7. Графік зміни основного часу обробки одного отвору
залежно від величини подачі на оберт

Джерело: розроблено авторами.

Аналіз графіків показує, що при збільшенні подачі на оберт крутний момент збільшується, що вимагає наявності більш потужного двигуна приводу головного руху. Також збільшується осьова сила різання, а разом із нею – деформація тонкої стінки заготовки, що, відповідно, зменшить геометричну точність отвору. Однак при цьому значно зменшується час обробки і збільшується продуктивність виготовлення деталі загалом.

З графіків (рис. 6, 7), а також відповідних рядків таблиці 1 видно, що при постійній зміні подачі на 0,02 мм/об сила різання в середньому збільшується на 100 Н, а зміна часу зі зміною подачі відбувається нелінійно.

Відповідно до можливих схем обробки торцевих отворів (рис. 3) проведемо дослідження величини пружного відтискання фланця деталі при свердлінні з використанням методу кінцевих елементів у системі Solidworks. За базове дослідження приймемо основний варіант підбору режимів різання. А саме: подача на оберт становить 0,18 мм/об, сила різання – 1535 Н, час обробки – 10,35 с.

На рис. 8 показано схему закріплення та місце прикладання сили для двох схем свердління: з попереднім виконанням повної токарної обробки циліндричної та торцевої частин (рис. 8, а) та з частковою токарною обробкою контуру, при якій залишається припуск по торцевій поверхні, для збереження жорсткості (рис. 8, б).

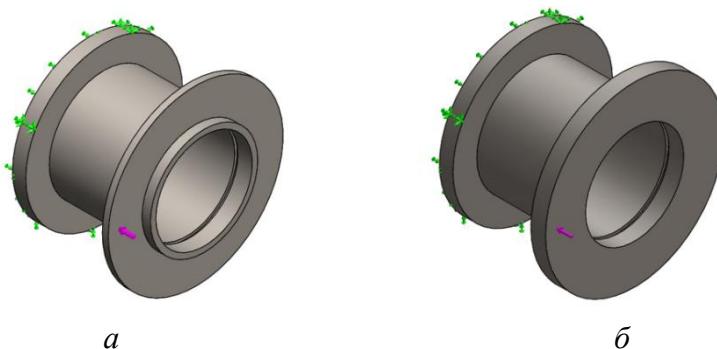


Рис. 8. Схема закріплення та прикладання осьової сили різання:
 а – з попереднім виконанням повної токарної обробки;
 б – з частковою токарною обробкою контуру

Джерело: розроблено авторами.

Сітку скінченних елементів формуємо в автоматичному режимі, що повною мірою задовольняє необхідну точність розрахунків. У результаті автоматизованого розрахунку отримаємо такі діаграми: переміщень заготовки під дією сили різання (рис. 9), розподілу напружень Von Mises Stress (рис. 10) та еквівалентних деформацій Equivalent Strain (рис. 11) для двох схем свердління: з попереднім виконанням повної токарної обробки циліндричної та торцевої частин та з частковою токарною обробкою контуру.

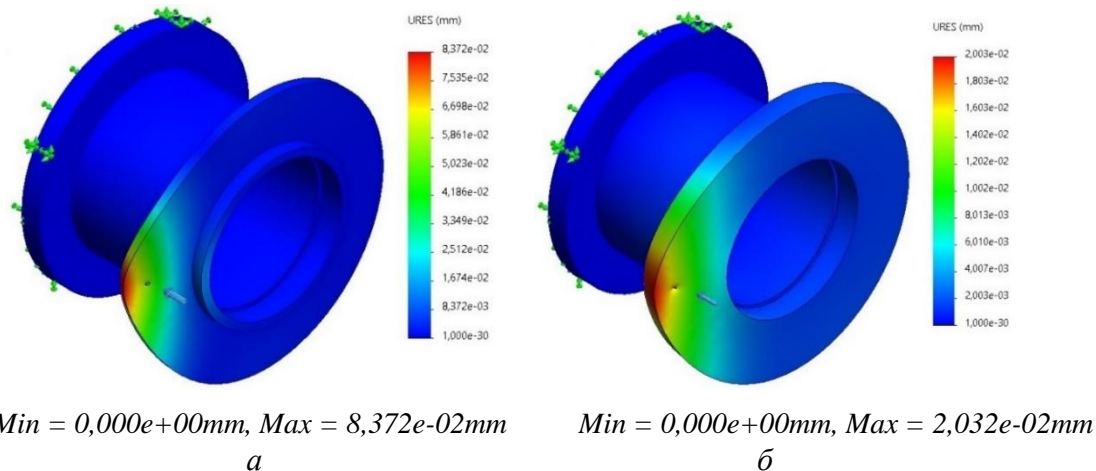


Рис. 9. Переміщення заготовки під дією сили різання при свердлінні:
 а – з попереднім виконанням повної токарної обробки;
 б – з частковою токарною обробкою контуру

Джерело: розроблено авторами.

Побудуємо відповідні графіки залежності. На рисунку 12 показано графік максимального переміщення деталі залежно від подачі на оберт, а на рисунку 13 – залежно від осьової сили різання. При цьому ряд 1 відповідає обробці за схемою а, ряд 2 – обробці за схемою б.

Аналіз графіків показує, що максимальне зміщення деталі при свердлінні отвору збільшується зі збільшенням подачі i , відповідно, осьової сили різання. Також видно, що при обробці за схемою а сила різання більше впливає на величину деформації. Крім того, номінальне значення переміщення теж значно вище, орієнтовно вдвічі, і зі збільшенням подачі ця різниця зростає.

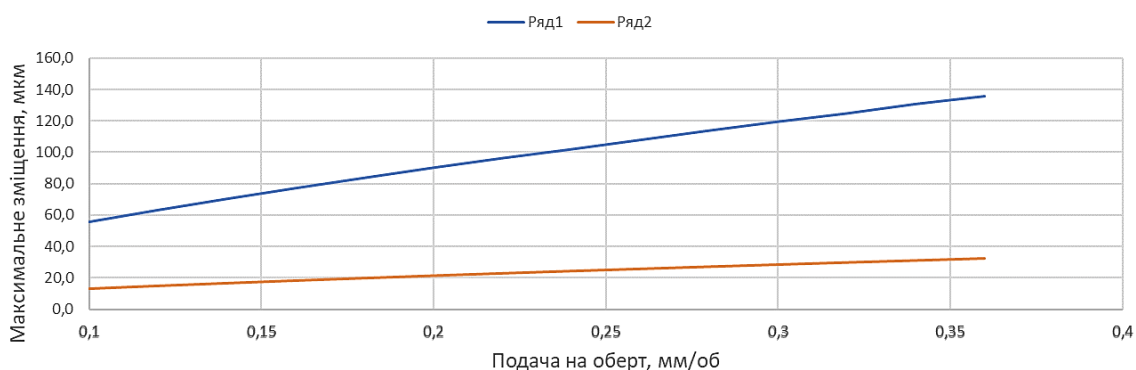


Рис. 12. Графік максимального переміщення деталі залежно від подачі на оберт
Джерело: розроблено авторами.

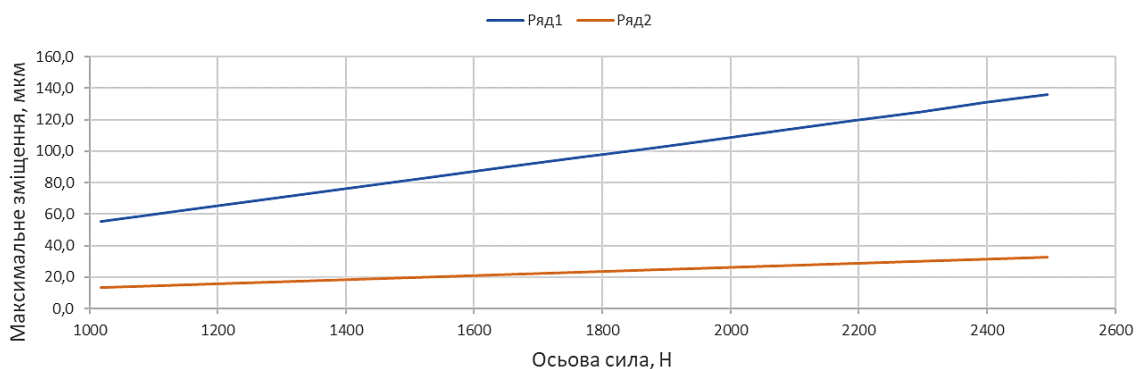
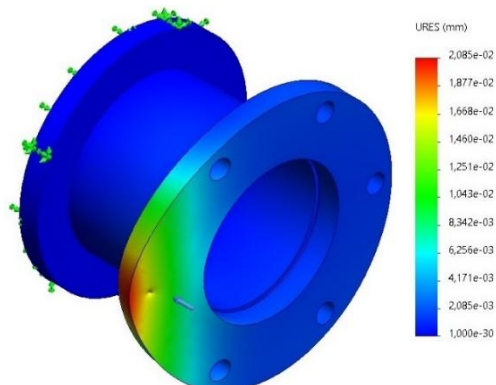


Рис. 13. Графік максимального переміщення деталі залежно від осьової сили різання
Джерело: розроблено авторами.

Отже, з рисунків 12, 13 видно, що схема обробки, а саме послідовність виконання операцій значним чином впливає на жорсткість деталі і її миттєве зміщення в процесі обробки, відповідно – і на точність виконання отвору.

Додатково перевіримо, чи впливає наявність вже виконаних отворів на точність наступних. Проведемо аналогічне статичне дослідження для випадку обробки останнього 6-го отвору. При цьому схема закріплення, напрям дії сили різання та генерація сітки скінченних елементів здійснюється аналогічно попереднім дослідженням (рис. 8).

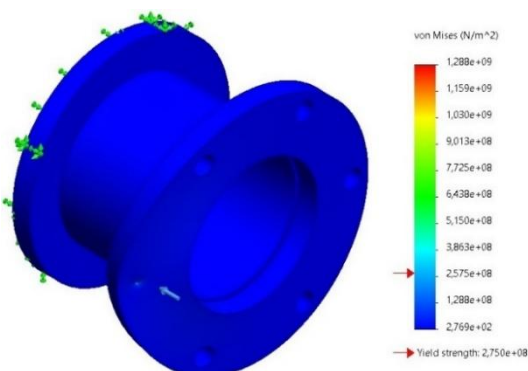
Результати статичного аналізу, а саме карта зміщень Displacement зображена на рис. 14, діаграма розподілу напружень Von Mises Stress – на рис. 15, та еквівалентних деформацій Equivalent Strain – на рис. 16.



$Min = 0,000e+00mm, Max = 2,085e-02mm$

Рис. 14. Переміщення заготовки при обробці останнього отвору

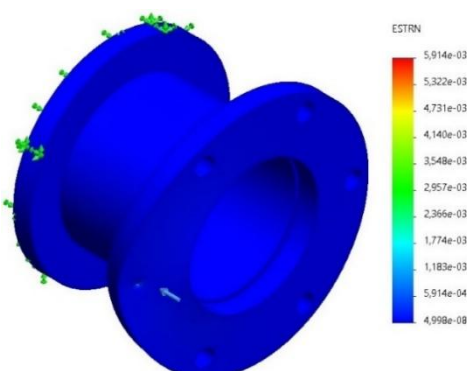
Джерело: розроблено авторами.



$Min = 2,769e+02N/m^2, Max = 1,288e+09N/m^2$

Рис. 15. Розподіл напружень (Von Mises Stress) при обробці останнього отвору

Джерело: розроблено авторами.



$Min = 4,998e-08, Max = 5,914e-03$

Рис. 16. Еквівалентні деформації (Equivalent Strain) при обробці останнього отвору

Джерело: розроблено авторами.

Порівнявши результати розрахунку процесу свердління останнього отвору з першим за схемою б (рис. 9, 10, 11), видно, що показники змінилися несуттєво. Так, наприклад, максимальне переміщення точки деталі для останнього отвору становить 20,85 мкм, а для першого – 20,32 мкм, тому різницю в 0,53 мкм можна вважати несуттєвою. Однак у випадку обробки таких деталей з більшими вимогами до точності, є доцільним зменшувати подачу на оберт для кожного наступного отвору.

Висновки. У роботі розглянуто особливості процесу свердління отворів у торцевій поверхні корпусної деталі. Розраховано режими різання, побудовані графіки залежності крутного моменту, сили різання та часу обробки залежно від подачі на оберт. Показано, що при збільшенні подачі підвищується продуктивність, що є позитивним, однак разом із тим збільшується і сила різання, що приводить до відтискання та деформації деталі в процесі свердління і негативно впливає на якість отвору. Досліджено два варіанти свердління отворів: при їх утворенні в готовій деталі та у випадку цілеспрямованого залишення припуску на торцевій поверхні з метою підвищення жорсткості фланця. Шляхом проведення статичного аналізу в системі SolidWorks з'ясовано, що величина відтискання деталі значним чином залежить від товщини фланця, і при її збільшенні величина пластичної деформації в зоні свердління зменшується, при цьому час виконання отворів майже не змінюється. Порівняльний аналіз обробки першого та останнього отворів показує, що жорсткість деталі зменшується з утворенням кожного наступного отвору, однак суттєвого впливу на величину пружного відтиску деталі не має,

і в загальному випадку відсутня необхідність корегування режимів різання. Методика, описана в дослідженні, може бути використана при визначенні послідовності обробки елементів корпусних деталей з метою покращення точності та підвищення продуктивності.

Список використаних джерел

1. Нікітюк, М. В. (2021). *Аналіз впливу технологічних факторів на точність розмірів між осями головних отворів корпусних деталей і базовими площинами, що забезпечуються розточуванням на багатоцільовому верстаті*. У Всеукраїнській науково-практичній Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2021), 1–14 травня 2021 р. Вінниця, Україна: ВНТУ. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/45517>.
2. Пуховський, Є. С., Фролов, В. К., Приходько, В. П., & Бецко, Ю. М. (2023). Технологічні проблеми виготовлення корпусних деталей хімічних машин та апаратів. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*, 4(50), 92–103. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.4.13>.
3. Кушнірчук, А., Ткачук, В., & Харжевський, В. (2023). Дослідження впливу геометрії інструменту та режимів різання на точність оброблення деталей, отриманих FDM-друком. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 329(6), 217–222. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-217-222>.
4. Кальченко, В., Кологойда, А., Пасов, Г., Сіра, Н., Зюзько, Д., & Пивовар, Д. (2023). Сучасні 3D-технології в машинобудуванні та автомобільному транспорті. *Технічні науки та технології*, (2)32, 33–41. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-33-41](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-33-41).
5. SolidWorks. (n.d.). *Офіційний вебсайт компанії*. <https://www.solidworks.com/>
6. Drilling Solid Tools. (n.d.). *Електронний каталог різального інструменту*. ISCAR. <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=6154787&fnum=4008&map=DR&app=501&GFSTYP=M&isoD=1>.
7. Бараускене, О. І., Киричок, П. О., & Зигуля, С. М. (Уклад.). (2021). *Основи технології поліграфічного машинобудування*. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 94 с.

References

1. Nikityuk, M. V. (2021). *Analiz vplyvu tekhnolohichnykh faktoriv na tochnist rozmiriv mizh osiamy holovnykh otvoriv korpusnykh detalei i bazovymy ploschynamy, shcho zabezpechuiutsia roztochuvanniam na bahatotsilovomu verstati* [Analysis of technological factors affecting the accuracy of distances between axes of main holes and base planes in housing parts processed on multifunctional machines] [Conference paper]. *U Vseukrainskii naukovopraktychnii Internet-konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv «Molod v nauksi: doslidzhennia, problemy, perspektyvy» All-Ukrainian Scientific and Practical Internet Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists “Youth in Science: Research, Problems, Prospects”*, Vinnytsia National Technical University. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/45517>.
2. Pukhovskiy, Y. S., Frolov, V. K., Prykhodko, V. P., & Betsko, Y. M. (2023). *Tekhnolohichni problemy vyhotovlennia korpusnykh detalei khimichnykh mashyn ta aparativ* [Technological problems of manufacturing housing parts of chemical machines and apparatuses]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. Serii: Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv* – Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Mechanization and Automation of Production Processes, 4(50), 92–103. <https://doi.org/10.32845/msnau.2022.4.13>.
3. Kushnirchuk, A., Tkachuk, V., & kharzhevskiy, V. (2023). *Doslidzhennia vplyvu heometrii instrumentu ta rezhymiv rizannia na tochnist obrobлення detalei, otrymanykh FDM-drukomy*. [Study of the influence of tool geometry and cutting modes on the accuracy of processing parts obtained by FDM printing]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 329(6), 217–222. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-329-6-217-222>.
4. Kalchenko V., Kolohoida A., Pasov G., Sira N., Zyuzko D., Pivovar D. (2023). *Suchasni 3D-tekhnolohii v mashynobuduvanni ta avtomobilnomu transporti*. [Modern 3D technologies in engineering and road transport.] *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, (2(32)), 33–41. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2\(32\)-33-41](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-33-41).
5. Ofitsiyniy veb-sait: Solidworks Company. <https://www.solidworks.com/>.

6. Elektronnyi katalog rizalnoho instrument: Drilling Solid Tools. <https://www.iscar.com/eCatalog/Item.aspx?cat=6154787&fnum=4008&mapp=DR&app=501&GFSTYP=M&isoD=1>.

7. Barauskiene, O. I., Kyrychok, P. O., & Zyhulia, S. M. (2021). *Osnovy tekhnologii polihrafichnoho mashynobuduvannia [Electronic resource: textbook for students of specialty 186 "Publishing and Printing"]*. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

Дата першого надходження статті до видання: 01.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.12.2025

UDC 621.914

**Volodymyr Kalchenko¹, Antonina Kolohoida², Nataliia Sira³, Genadiy Pasov⁴,
Vira Murashkovska⁴, Vladislav Leheda⁶**

¹Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vvkalchenko74@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9072-2976>. ResearcherID: [G-6752-2014](https://orcid.org/0000-0002-9072-2976)

²PhD, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: kolohoida@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1742-2686>. ResearcherID: [I-1118-2014](https://orcid.org/0000-0002-1742-2686)

³PhD, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: nnserraya@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6242-5210>. ResearcherID: [K-2658-2017](https://orcid.org/0000-0002-6242-5210)

⁴PhD, Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: genapasov@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7248-9085>. ResearcherID: [H-4455-2014](http://orcid.org/0000-0001-7248-9085)

⁵Senior Lecturer of the Department of Road Transport and Industrial Engineering
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vmurashkovska@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0556-8709>. ResearcherID: [G-9757-2016](https://orcid.org/0000-0002-0556-8709)

⁶student of higher education, gr. MMB-221

Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: vladislavleheda@gmail.com

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF MACHINING SEQUENCE ON THE ACCURACY OF A HYDRAULIC DRIVE PART USING THREE-DIMENSIONAL MODELING

In modern manufacturing conditions, a key criterion for production quality is achieving the desired part within the shortest possible time and with minimal production costs. Therefore, the study of the influence of the sequence of technological operations and the selection of machining parameters is highly relevant and enables optimization of manufacturing processes.

The production of parts with complex geometries requires the integration of various operations. At the stage of determining the manufacturing sequence, it is essential to consider multiple factors that ensure the required quality of the part while maximizing production efficiency.

A significant part of research has been devoted to the study of machining processes for housing-type components. The influence of technological datum selection on product accuracy has been investigated, and the mechanical characteristics of various blanks have been analyzed.

However, the impact of the manufacturing sequence on part accuracy has not yet been thoroughly explored.

The primary objective of this study is to examine how the sequence of technological operations in the production of a housing-type part affects machining accuracy.

This work analyzes the specifics of the drilling process for holes located on the end surface of a housing component. Cutting parameters were calculated, and graphs were constructed to show the dependence of torque, cutting force, and machining time on feed per revolution. It was demonstrated that increasing the feed rate enhances productivity, but also raises cutting forces, which negatively affects hole quality due to deflection and deformation of the part during drilling.

Two drilling scenarios were investigated: drilling holes in a finished part, and drilling with a deliberately retained machining allowance on the end surface to increase flange rigidity. Through static analysis in SolidWorks, it was found that the degree of part deflection significantly depends on flange thickness. As the thickness increases, plastic deformation in the drilling zone decreases, while the time required to complete the holes remains nearly unchanged.

Keywords: manufacturing technology; drilling; precision; modeling; finite element method.

Fig.: 16. Table: 2. References: 7.