

УДК 621.8; 621.914

О. В. Піонткевич, канд. техн. наук; О. В. Березюк, д-р техн. наук, доц.;
Д. О. Лозінський, канд. техн. наук, доц.; О. І. Кавецький

ЗАСТОСУВАННЯ CAD/CAE-СИСТЕМИ AUTODESK INVENTOR ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ФРЕЗЕРНО-ГРАВІРУВАЛЬНОГО ВЕРСТАТА З ЧПК

Сучасні фрезерно-гравірувальні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) бюджетного рівня є типовим рішенням для дрібного та середнього виробництва в Україні та у світі. Вони дешевіші за аналогічні промислові зразки фрезерних верстатів з ЧПК, проте можуть забезпечувати досить якісні характеристики точності для обробки нескладних виробів з кольорових металів, неметалів та інших матеріалів невисокої твердості. Фрезерно-гравірувальні верстати з ЧПК зазвичай досить компактні, мають зручну систему керування та можуть виконувати широкий ряд технологічних операцій: торцювання, утворення лисок і уступів, відрізання, гравірування і маркування, нарізання різи, зубів та шліців, фрезерування шпонкових та Т-подібних пазів тощо. Суттєвим недоліком верстатів є обмеженість в номенклатурі оброблюваних матеріалів, невисокі параметри жорсткості системи верстат-приспособлення-інструмент-деталь та порівняно низькі значення параметрів режимів різання.

В статті наведено результати аналізу конструкцій фрезерно-гравірувальних верстатів з числовим програмним управлінням. Розглянуто тривимірну модель прототипу фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК, розроблену в CAD/CAE-системі Autodesk Inventor. Проаналізовано сили різання для фрезерно-гравірувального верстата та запропоновано рішення для підвищення потужності.

Методом скінченних елементів виконано аналіз елементів конструкції фрезерно-гравірувального верстата. Знайдено напруження по Мізесу та величину деформації елементів корпусу фрезерно-гравірувального верстата для матеріалів: алюмінієвий сплав 6061 і текстоліт (на основі фенол-формальдегідної смоли). Отримані результати дозволяють удосконалити фрезерно-гравірувальний верстат з ЧПК за рахунок підвищення його потужності та забезпечити необхідні параметри жорсткості його корпусу.

Ключові слова: *фрезерно-гравірувальний верстат з ЧПК, CAD/CAE-системи, аналіз міцності, Autodesk Inventor, деформація, алюмінієвий сплав 6061, текстоліт, фенол-формальдегідна смола.*

Вступ

Сфера застосування фрезерно-гравірувальних верстатів з ЧПК досить широка. Ці верстати використовуються у меблевій та деревооброблюваній промисловості, для виготовлення декоративних та ювелірних виробів. Це зумовлено простотою обслуговування, відносно широким функціоналом та достатньою якістю обробки матеріалів з високими показниками продуктивності [1, 2].

Асортимент ринку фрезерно-гравірувальних верстатів з ЧПК досить широкий та дозволяє здійснити вибір обладнання з необхідними характеристиками для виконання необхідних задач. Наявність числового програмного керування дозволяє досить швидко переналагоджуватись на випуск різних типів продукції відповідно до потреб ринку, а також дає можливість виготовляти вироби досить складної конструкції, зокрема виконувати багатоосьову фрезерну обробку [3, 4]. Однак, вартість такого обладнання варіюється в широкому діапазоні і необхідно враховувати потреби виробництва під час закупівлі обладнання.

Постановка проблеми

Вартість сучасних фрезерно-гравірувальних верстатів з ЧПК може відрізнятися більше

ніж у два рази залежно від використовуваного обладнання, потужності головного приводу, оснащення тощо. Суттєвий вплив на вартість обладнання має наявність брендів комплектуючих, причому наявні аналоги можуть мати потрібні технічні характеристики.

Для дрібних виробництв необхідно обробляти матеріали з дерева, пластику, а також кольорових металів (наприклад, латунь). Запропоновано використати бюджетний варіант фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК, і покращити його технічні характеристики, проаналізувати показники міцності та жорсткості за допомогою CAD/CAE-систем Autodesk Inventor.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розглянуто результати, які застосовують для обробки та програмування на верстатах з ЧПК. Безпосередньо розглянуто можливості і переваги верстатів з ЧПК, системи координат, налагодження верстата, основні поняття та мова програмування [5]. Сучасним прикладом реалізації верстатів з ЧПК в машинобудуванні, є лазерні технологічні комплекси та гравери [6, 7], які можуть виконувати операції з розрізання листових матеріалів та гравірування.

Під час розробки нових верстатів та їх обладнання позитивною практикою є використання сучасних CAD/CAE-систем [8, 9]. Це дозволяє ще на етапі проектування провести попередній аналіз міцності елементів, жорсткості конструкції та ввести необхідні корективи. Враховано також сучасні технології використання конструкційних матеріалів під час проектування елементів фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК [10, 11].

В статті [12] розглянуто особливості удосконалення фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК шляхом вибору сервоприводу, плати керування сервоприводом, керування рухами через IPC і PМАС, додавання інтерфейсу та програмуванням.

В статті [13] розглянуто особливості конструкції механізму та системи керування фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК. Експерименти показують, що цей верстат має можливості фрезерування та гравірування, може обробляти металеві та неметалічні деталі, що є високоефективним багатофункціональним обладнанням з ЧПК.

В статті [14] запропоновано конструкцію фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК для обробки матеріалів з дерева. Цей верстат має нижчу вартість, в порівнянні з аналогами та кращі показники точності за рахунок особливостей конструкції та програмування.

Розглянуто праці [15, 16] про підвищення продуктивності верстатів з ЧПК за рахунок результатів аналізу їх силових приводів. Гідравлічні приводи часто використовують як силові приводи верстата з ЧПК [17], а їх оптимізація [18, 19] та математичне моделювання [20, 21] є невід'ємною частиною удосконалення нового промислового обладнання.

Для бюджетних фрезерно-гравірувальних верстатів з ЧПК застосовують як виконавчі ланки головного руху швидкісні шпинделі [22], а результати апробації матеріалів по вибору шпинделя та проведення CAD/CAE-аналізу елементів фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК наведено в тезах [23, 24].

Мета дослідження

Метою роботи є покращення характеристик жорсткості та потужності головного приводу фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК для обробки металевих деталей з кольорових матеріалів за рахунок удосконалення конструкції наявного прототипу.

Основна частина

Розглянемо компактний фрезерно-гравірувальний верстат з ЧПК моделі CNC 6040T на рис. 1 [25]. Він має напрямні для руху портала у вигляді циліндричних рейок, якими рухається портал із фрезою. Робочий стіл верстата нерухомий та зібраний із алюмінієвого профілю. Верстат містить привід змінної частоти (VFD) з водяним охолодженням та електродвигун з потужністю 1.5 кВт. Щоб забезпечити четверту координату обробки на

робочий стіл встановлюють трьохкулачковий патрон. Фрезерно-гравірувальний верстат з ЧПК моделі CNC 6040T дозволяє обробляти безліч деталей з таких матеріалів, як алюміній, мідь, латунь, срібло, акрил, фотополімерна смола, пінопласт, різної породи дерево, фанера та деревноволокниста плита тощо.



Рис. 1. CNC 6040T чотирьохосьовий фрезерно-гравірувальний верстат з ЧПК

Фрезерно-гравірувальний верстат з ЧПК моделі CNC 3040, який показано на рис. 2, має дещо простішу конструкцію, ніж попередній та оснащений трьома осями переміщення робочих елементів [26]. Напрявні для руху вузла шпинделя виконують з полірованих валів, а станина виконана із алюмінію. Головний привід має потужність 0,4 кВт з частотою обертання від 500 до 8000 об/хв. Верстат також використовує USB-порт для під'єднання до персонального комп'ютера. Діапазон оброблюваних матеріалів для цього верстата такий самий як для попереднього.



Рис. 2. CNC 3040 трьохосьовий фрезерно-гравірувальний верстат з ЧПК

Найбільш бюджетним варіантом фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК є модель CNC 3018-Plus, яка показана на рис. 3 [27]. Такий верстат має три осі та може оброблювати деталі з акрилового пластику, алюмінію, полімер вінілхлориду, дерева тощо. Він економічний та більш компактний за рахунок відсутності захисних кожухів. Напрявні виконані у вигляді полірованих валів, що закріплені на торцях гвинтами. Робочий стіл

виконаний із алюмінієвого профіля. Головний привід має потужність 300 Вт або 500 Вт та частоту до 12000 об/хв. Також замість шпинделя може встановлюватися лазерний гравер.

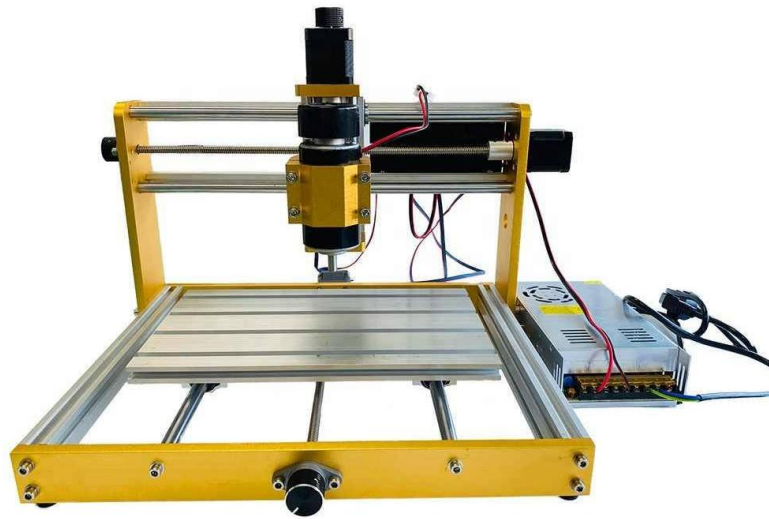


Рис. 3. CNC 3018-Plus трьохосьовий фрезерно-гравірувальний верстат з ЧПК

Вартість фрезерно-гравірувальних верстатів з ЧПК може суттєво варіюватися. Бюджетні фрезерно-гравірувальні верстати з ЧПК значно дешевші за їх промислові аналоги та доступні навіть для приватного використання. Також має місце різниця в вартості між брендами зі схожими характеристиками моделей. Проведено оцінку вартості фрезерно-гравірувальних верстатів з ЧПК на 2025 рік. Вказано кількості робочих осей та вид напрямних для забезпечення точності і швидкості робочих рухів. Результати оцінки вартості обладнання занесено до таблиці 1.

Таблиця 1

Вартість фрезерно-гравірувальних верстатів з ЧПК

| Модель верстата | Кількість осей | Потужність шпиндельного електродвигуна, кВт | Вид направляючих | Вартість верстата |
|-----------------|----------------|---|-------------------|-------------------|
| CNC 6040T | 4 | 1,5 | Циліндрична рейка | від 73 000 грн |
| CNC 3040 | 3 | 0,4 | Полірований вал | від 36 000 грн |
| CNC 3018-Plus | 3 | 0,3-0,5 | Полірований вал | від 21 000 грн |

В таблиці 2 наведено основні характеристики шпинделів для фрезерно-гравірувальних верстатів з ЧПК та їх вартість [22]. Тип цангового затискача для всіх однаковий: ER11.

Таблиця 2

Порівняння шпинделів для фрезерно-гравірувальних верстатів з ЧПК

| | | | | |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Потужність, кВт | 0,3 | 0,8 | 1,5 | 2,2 |
| Напруга, В | 12-48 | 110-220 | 110-220 | 110-220 |
| Частота обертання, об/хв | 3000-12000 | 6000-24000 | 6000-24000 | 6000-24000 |
| Ном. момент, Нм | 0,4 | 0,52 | 0,62 | 0,58 |
| Діаметр кріплення, мм | 52 | 65 | 80 | 80 |
| Вартість, грн | 2800 | 4200 | 5000 | 7400 |

Для підвищення продуктивності роботи фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК доцільно обирати шпиндель із найбільшим номінальним крутним моментом за високих частот обертання. Таким чином, обраний шпиндель забезпечує частоту обертання до 24000 об/хв, крутний момент до 0,62 Нм, а потужність 1,5 кВт. Вартість шпинделя потужністю 1,5 кВт відрізняється лише на 2200 грн від вартості встановленого прототипу 0,3 кВт на верстат CNC 3018-Plus. Удосконалення верстата CNC 3018-Plus за рахунок улаштування шпинделя потужністю 1,5 кВт [24] забезпечить суттєву економію порівняно з вартістю фрезерно-гравірувальних верстатів CNC 6040T та CNC 3018-Plus, або CNC 3040 та CNC 3018-Plus.

Під час аналізу фізико-механічних характеристик елементів конструкції прототипу фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК будемо використовувати тривимірну модель прототипу в CAD/CAE-системі Autodesk Inventor [14], яка показана на рис. 4.

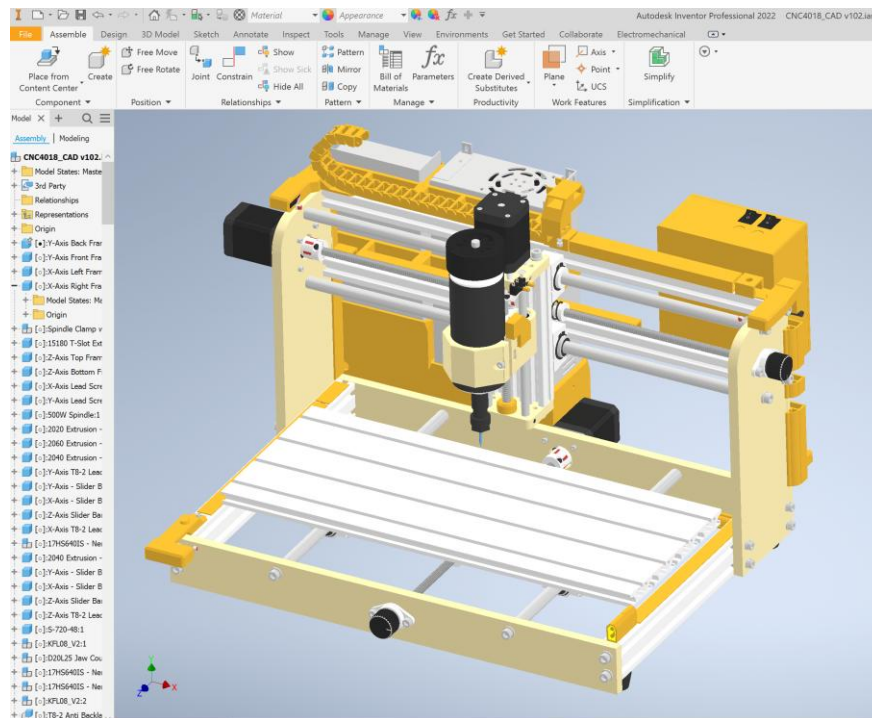


Рис. 4. Тривимірний прототип фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК в CAD/CAE-системі Autodesk Inventor

Для подальших досліджень доцільно спростити конструкцію прототипу фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК до несівної конструкції (усі елементи, які не впливають на жорсткість конструкції не розглядаються).

Проведено аналіз дії режимів різання під час фрезерування латуні на елементи конструкції прототипу за допомогою статичного аналізу. Проведено порівняння конструктивного виконання елементів основи верстата та портала із алюмінієвого сплаву 6061 та текстоліту на основі фенол-формальдегідної смоли. Ці матеріали зазвичай використовуються для комплектування несучих конструкцій фрезерно-гравірувальних верстатів з ЧПК.

Основні характеристики алюмінієвого сплаву 6061 та текстоліту (на основі фенол-формальдегідної смоли) показано на рис. 5 із бібліотеки матеріалів CAD/CAE-системи Autodesk Inventor.

Фенол-формальдегідна смола за фізико-хімічними властивостями дещо поступається алюмінієвому сплаву 6061. Однак, вона достатньо міцна для забезпечення необхідних показників жорсткості. При цьому фенол-формальдегідна смола має вартість у два рази меншу, ніж алюмінієвий сплав.

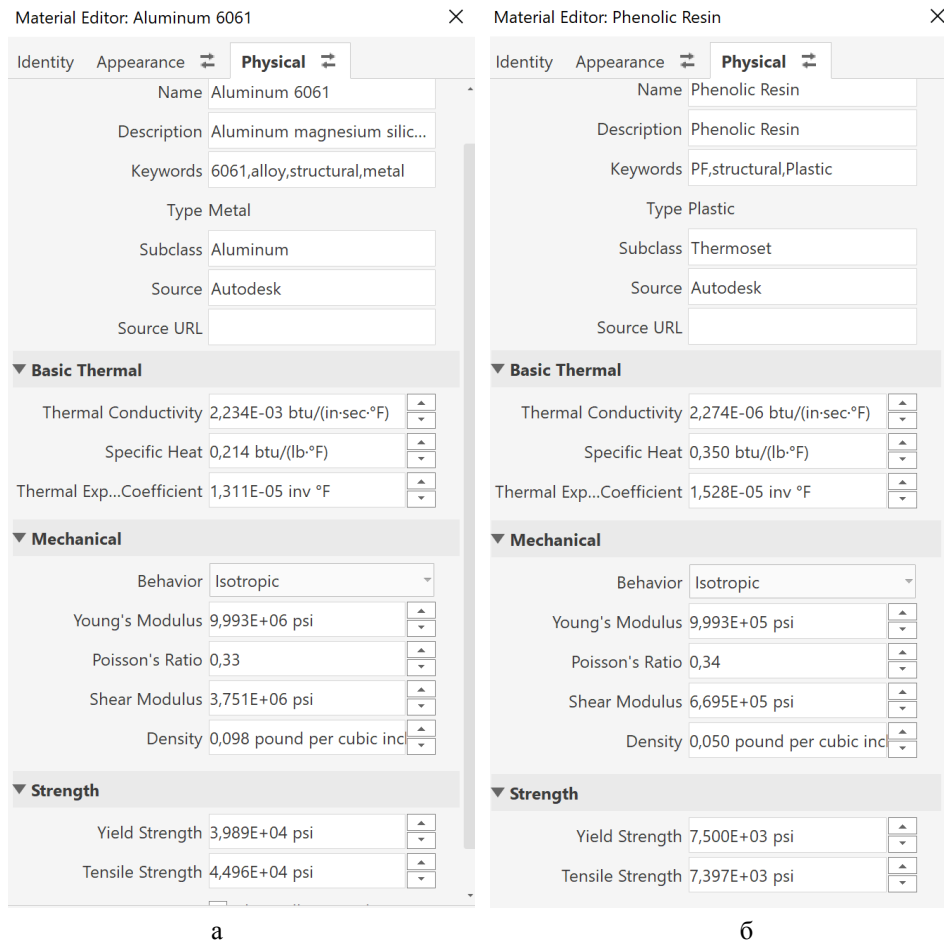


Рис. 5. Вибір матеріалів для елементів конструкції прототипу: а – алюмінієвий сплав 6061, б – фенол-формальдегідна смола

Для досліджень конструкцію прототипу верстата CNC 3018-Plus розділено на стійки з порталом та основу верстата. Під час досліджень суттєвих змін в жорсткості стійок з порталом не спостерігалось [23]. Для аналізу міцності основи верстата створено сітку скінченних елементів та прикладено всі необхідні діючі сили і взаємозв'язки, як показано на рис. 6.

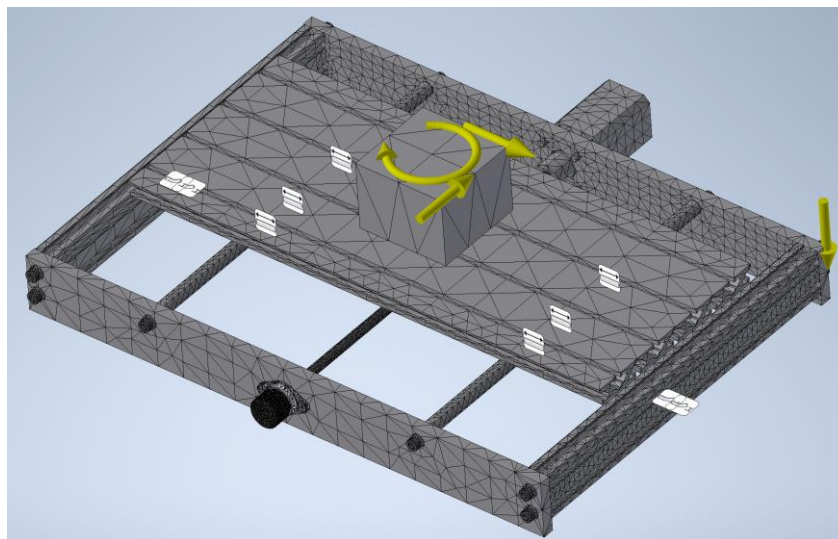


Рис. 6. Основа верстата розбита сіткою кінцевих елементів для розрахунків аналізу міцності
Результат розрахунку напружень та максимального зміщення елементів конструкції

основи верстата показано на рис. 7 та 8. За проміжними результатами побудовано залежності зміни напруження по Мізесу та максимальне зміщення елементів конструкції основи верстата. Отримані результати показано графічно на рис. 9.

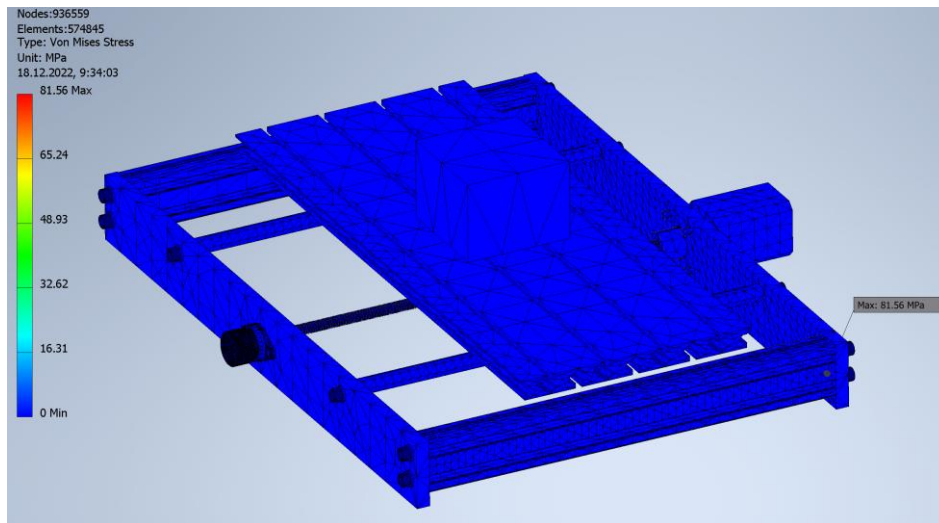


Рис. 7. Напруження в елементах конструкції основи верстата по Мізесу під дією сил фрезерування

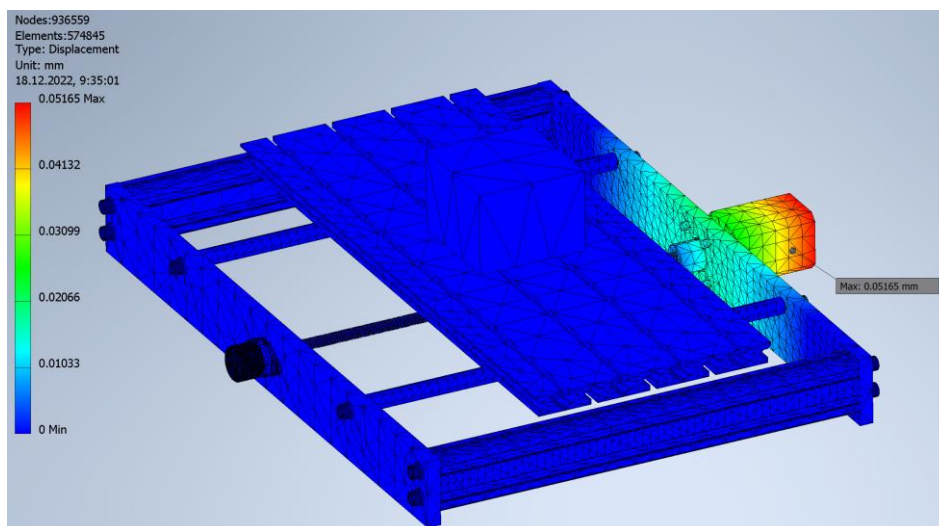


Рис. 8. Максимальне зміщення елементів конструкції основи верстата під дією сил фрезерування

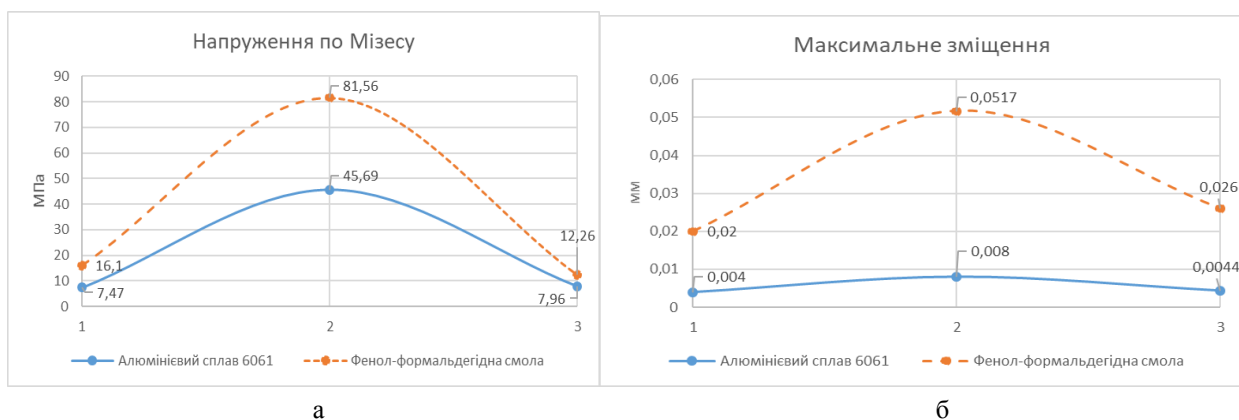


Рис. 9. Залежності зміни напруження по Мізесу а) та максимального зміщення б) елементів конструкції основи верстата

Із отриманих залежностей доцільно приймати матеріал для перемичок основи верстата з текстоліту на основі фенол-формальдегідної смоли. Однак, необхідно врахувати точність

виконуваних операцій так, як параметр жорсткості системи верстат-приспосовування-інструмент-деталь буде перевищувати максимальне зміщення в 0,0517 мм.

Висновки

Запропоновано удосконалення конструкції фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК шляхом обґрунтованого вибору шпинделя вузла головного привода та зміни матеріалу несівної конструкції на основі інженерного аналізу, що забезпечило необхідну міцність та жорсткість елементів.

Розраховано, що максимальне зміщення елементів конструкції основи фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК для алюмінієвого сплаву 6061 складає 0,008 мм, а для текстоліту на основі фенол-формальдегідної смоли – 0,0517 мм.

Отримані значення зміщення елементів конструкції дають можливість враховувати ці результати у керуючій програмі фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК та забезпечувати покращені параметри точності обробки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Design and fabrication of portable laser cutting and engraving machine / Jmaleswara Kumar P. et al. *International Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 7 (1.1). P. 570–573. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i1.1.10170>.
2. Технологія механічної обробки на металообробних верстатах / Стискін Г. М., Ревнівцев М. П., Томашенко В. В., Берізко М. М. Київ: Техніка, 2005. 512 с.
3. Технологічні основи програмування обробки деталей на верстатах з числовим програмним керуванням / Стискін Г. М., Ревнівцев М. П., Берізко М. М., Гаєвський В. Д. Львів: Видавництво «Оріяна-Нова», 2002. 207 с.
4. Фрезерні верстати: URL: https://stud.com.ua/36360/tovarovnavstvo/frezerni_verstati (дата звернення: 15.01.2025).
5. Онофрейчук Н. В. Основи обробки та програмування на верстатах з числовим програмним керуванням: підручник. Львів: Світ, 2019. 352 с.
6. Про лазерний технологічний комплекс на машинобудівному підприємстві / О. В. Піонткевич та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2022. №2. С. 96–100.
7. Design and experimental verification of a laser engraving machine / M. S. Khalid et al. *Proceedings of the International Conference on Emerging Power Technol. (ICEPT)*, Topi, Pakistan. 2023. P. 1–6, <https://doi.org/10.1109/ICEPT58859.2023.10152428>.
8. Застосування CAD/CAE-системи Solidworks у задачах аналізу міцності деталей верстатних пристосувань / О. В. Петров та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. Вип. 19. № 1. С. 95–102.
9. Покращення фізико-механічних характеристик елементів приводу подрібнювача за допомогою CAD/CAE-систем / А. Д. Барановський та ін. *LI науково-технічна конференція підрозділів ВНТУ*, Вінниця. 2022. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2022/paper/view/15983> (дата звернення: 15.01.2025).
10. Власенко А. М. Матеріалознавство та технологія металів: підручник. Київ: Літера ЛТД, 2019. 224 с.
11. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство, розділ Матеріалознавство: Навчальний посібник / Л. Г. Бодрова та ін. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2023. 157 с.
12. Research of PMAC-based open NC system for Engraving and milling machine / P. Lian et al. *Int. Conf. on Mechanic Automation and Cont. Engg.*, Wuhan, China, 2010. P. 3424–3427. <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5536627>.
13. Engraving and milling machine design based on open CNC system / S. K. Cao et al. *Appl. Mech. and Mater.*, 2011 Vol. 52-54, P. 881–886. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.52-54.881>.
14. CNC PCB milling and wood engraving machine / R. Choudhary et al. *Proceedings of the International Conference on Smart Techn. For Smart Nation (SmartTechCon)*, Bengaluru, India, 2017. P. 1301–1306. <https://doi.org/10.1109/SmartTechCon.2017.8358577>.
15. Sameera and Mohd Asif Hasan. Understanding Features and Requirements of Power Drives for Performance Improvement of the CNC Machines. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*. January-March, 2018. Vol. 5, Issue 1. P. 8–13
16. Sameera and Mohd Asif Hasan. A Study of Stepper Motors for Performance Improvement of the CNC Machines. *Advanced Research in Electrical and Electronic Engineering*. July-September, 2017. Vol. 4, Issue 4. P. 240–244
17. Mechanical hydraulic control design of CNC equipment fault based on part quality / Y. He et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2021, № 1. P. 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2021/1/012014>.

18. Оптимізація електрогідравлічного розподільника з незалежним керуванням потоків / Д. О. Лозінський та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2023. № 1. С. 87–91. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-87-91>.
19. Дослідження динамічних характеристик пропорційного електрогідравлічного розподільника з незалежним керуванням потоків та стежною системою / Д. О. Лозінський та ін. *Вісник факультету машинобудування та транспорту*. 2018. №2. С. 45–50
20. Березюк О. В. Аналітичне дослідження математичної моделі гідроприводу вивантаження твердих побутових відходів із сміттєвоза. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2011. № 34 (4). С. 80–83.
21. Ultrasonic microcontroller device for distance measuring between dustcart and container of municipal solid wastes / O. Bereziuk et al. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2019. № 4. P. 146–150. <http://dx.doi.org/10.15199/48.2019.04.26>.
22. Каталог сайту: «<https://uamper.com/>». URL: <https://surl.li/ihjtjxb> (дата звернення: 15.01.2025).
23. CAD/CAE аналіз елементів фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК / І. В. Буткалюк та ін. *LII науково-технічна конференція підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2023. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2023/paper/view/17391> (дата звернення: 15.01.2025).
24. Підбір шпинделя для фрезерно-гравірувального верстата з ЧПК / О. А. Солецький та ін. *LII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*, Вінниця, 2023. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fmt/all-fmt-2023/paper/view/17390> (дата звернення: 15.01.2025).
25. Каталог сайту: «<https://www.amazon.com/>». CNC 6040T Router 4-Axis USB 1.5 kW VFD Milling Machine with Remote Control Metal and Wood. URL: <https://surl.li/idiryu> (дата звернення: 15.01.2025).
26. Каталог сайту: «<https://www.ebay.com/>». CNC 3040 Router Engraver/Engraving Drilling and Milling Machine Cutting Tool. URL: <https://surl.li/cgxkbf> (дата звернення: 15.01.2025).
27. Каталог сайту: «<https://tozетка.com.ua/>». Верстат фрезерний з ЧПК CNC 4018 Pro Metal гравер 500W. URL: <https://surl.li/ywziui> (дата звернення: 15.01.2025).

Стаття надійшла до редакції 05.03.2025.

Стаття пройшла рецензування 26.03.2025.

Піонткевич Олег Володимирович – канд. техн. наук, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування, e-mail: piontkevych@vntu.edu.ua.

Березюк Олег Володимирович – д-р техн. наук, професор кафедри безпеки життєдіяльності та педагогіки безпеки.

Лозінський Дмитро Олександрович – канд. техн. наук, доцент кафедри технологій та автоматизації машинобудування.

Кавецький Олександр Ігорович – аспірант факультету машинобудування та транспорту.
Вінницький національний технічний університет.