

АГРЕГАТНІ ФРЕЗЕРНІ ГОЛОВКИ ДЛЯ ОБРОБЛЕННЯ ВЕЛИКИХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ

Остапенко Богдан Андрійович

аспірант

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0002-7862-6738

b.ostapenko@tmvi.sumdu.edu.ua

Кушніров Павло Васильович

кандидат технічних наук, доцент

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0000-0001-5894-538X

p.kushnirov@tmvi.sumdu.edu.ua

Динник Оксана Дмитрівна

кандидат технічних наук, доцент

Класичний фаховий коледж Сумського державного університету, м. Конотоп, Сумська обл., Україна

ORCID: 0000-0002-1221-2065

odkonotop39@gmail.com

Омеляненко Андрій Євгенійович

студент

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0009-0001-6094-982X

andreybraihenko@gmail.com

У статті розглядаються проблеми підвищення продуктивності фрезерування площин заготовок, що мають великі розміри. До таких заготовок відносять станини центрифуг та металорізальних верстатів, столи паперорізальних машин, різні плити та корпуси, рами, деталі транспортної техніки. Розміри площин цих деталей зазвичай перевищують десятки сантиметрів і часто досягають метрових значень, що створює певні труднощі при обробленні. Оскільки фрезерування є одним з найефективніших методів оброблення, виникає проблема зниження часу фрезерування великогабаритних заготовок.

Однопрохідне фрезерування площин однією фрезою в даному випадку не завжди може бути реалізовано, оскільки для цього потрібна торцева фреза дуже великих значень: діаметром 400 – 630 мм і більше. Часто застосовують багатопрохідне фрезерування, що знижує якість поверхні і веде до збільшення часу оброблення. Тому одним із варіантів є застосування агрегатних фрезерних головок (АФГ), які мають свій привід і містять кілька торцевих фрез. Наприклад, якщо потрібно оброблення взаємно перпендикулярних плоских поверхонь, то запропоновано АФГ, що містить чотири шпindelі з встановленими на них торцевими фрезами. Кожна пара сусідніх фрез має траєкторії ріжучих ножів, що перетинаються. Такі АФГ дозволяють отримувати безперервну оброблену поверхню при відносному переміщенні заготовки та столу верстата. Максимальна ширина фрезерування АФГ дорівнює майже подвійному діаметру торцевої фрези. АФГ може працювати в будь-якому напрямку поздовжньої та поперечної подачі. Запропонована АФГ розширює технологічні можливості фрезерування, оскільки дозволяє оброблення великих плоских поверхонь у взаємно перпендикулярних напрямках.

Якщо є необхідність регулювання ширини фрезерування із застосуванням АФГ (наприклад, при обробленні площин пазів з бічними стінками), то запропоновано конструкцію АФГ із поворотним шпindelним блоком. В цій АФГ три торцеві фрези розташовані в ряд і здатні повертатись разом із шпindelним блоком на заданий кут, тим самим змінюючи ширину фрезерування. Величина ширини фрезерування може змінюватись від максимального значення, що дорівнює приблизно сумі діаметрів трьох фрез, – до мінімального значення, що дорівнює одному діаметру фрези. В дослідженні визначено залежність ширини фрезерування від кута повороту α (0° – 360°) шпindelного блока АФГ, що містить три фрези діаметром $D_{\text{фр}} = 315$ мм.

Запропоновані АФГ забезпечують зниження машинного часу фрезерування великих плоских поверхонь за рахунок зменшення кількості проходів інструменту. Порівняння параметрів нормування операцій фрезерування станини центрифуги типу «ОГШ» повністю підтверджує перевагу використання АФГ у порівнянні зі звичайною торцевою фрезою.

Ключові слова: велика плоска поверхня, агрегатна фрезерна головка, торцева фреза, шпindelний блок, ширина фрезерування, кількість проходів

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3.4>

Вступ. Плоскі поверхні за кількістю займають одне з провідних місць з усіх видів поверхонь, що обробляються, в машинобудуванні. Для оброблення плоских поверхонь можуть застосовуватися різні методи: фрезерування, стругання, протягування, шліфування та інші. Саме фрезерування є найбільш ефективним з точки зору продуктивності та якості оброблення. Економія часу і якість отриманих плоских поверхонь визначають рівень прогресивності технологічного процесу, а також впливають на працездатність деталей і вузлів. Тому дослідження в галузі оброблення плоских поверхонь заготовки є актуальним завданням.

Подальший розвиток машинобудівного комплексу країни передбачає вдосконалення технології оброблення великих площин заготовок, що мають значні розміри за шириною та довжиною. Прикладами таких великогабаритних заготовок є різні плити, станини центрифуг, корпусні деталі, рами, столи паперорізальних машин, деталі аеро- та космічної техніки, станини верстатів тощо (рис. 1).

Рекомендовані методи оброблення великих за розмірами плоских поверхонь розглянуто у (Taurit et al., 1981). Показано, що торцеве фрезерування є одним із найпродуктивніших методів оброблення значних за площею заготовок. Однак при використанні торцевих фрез великих діаметрів (наприклад, 315 мм, 400 мм, 630 мм) виникають деякі труднощі. Зокрема, торцеві фрези таких діаметрів мають велику масу, що ускладнює їх установлення та зняття на верстаті. Також проблемою

є необхідність використання обладнання високої вартості з відповідним великим діаметром шпинделя (Loiev & Kravchuk, 2009). Одним із виходів із цієї ситуації є застосування спеціальних агрегатних фрезерних головок (АФГ), що містять свій індивідуальний привід (Pavlova et al., 2022). Такі АФГ мають високу жорсткість і можуть містити одну або кілька торцевих фрез (Kushnirov & Stupin, 2017). Оскільки зазначені АФГ мають високу продуктивність, їх застосування призводить до зниження машинного та допоміжного часу оброблення. Недоліками цих конструкцій АФГ є неможливість фрезерувати широкі плоскі поверхні у взаємно перпендикулярних напрямках без спеціального поворотного технологічного оснащення та відсутність регулювання ширини оброблення.

У конструкціях АФГ можна використовувати торцеві фрези, встановлені з перетином траєкторій різальних ножів (Kushnirov et al., 2020). Це дозволяє отримувати безперервну за шириною оброблену поверхню при відносному переміщенні заготовки та столу верстата в напрямку поздовжньої подачі.

Вибір раціонального технологічного процесу для оброблення поверхонь залежить від багатьох критеріїв, наприклад, від характеристик обладнання (Jozwik et al., 2014) або різального інструменту (Cisar et al., 2017) тощо.

У роботі (Yin et al., 2021) проведено дослідження герметичності плоских сполучених поверхонь, отриманих торцевим фрезеруванням, на базі метрології високої роздільної здатності, при цьому встановлено,

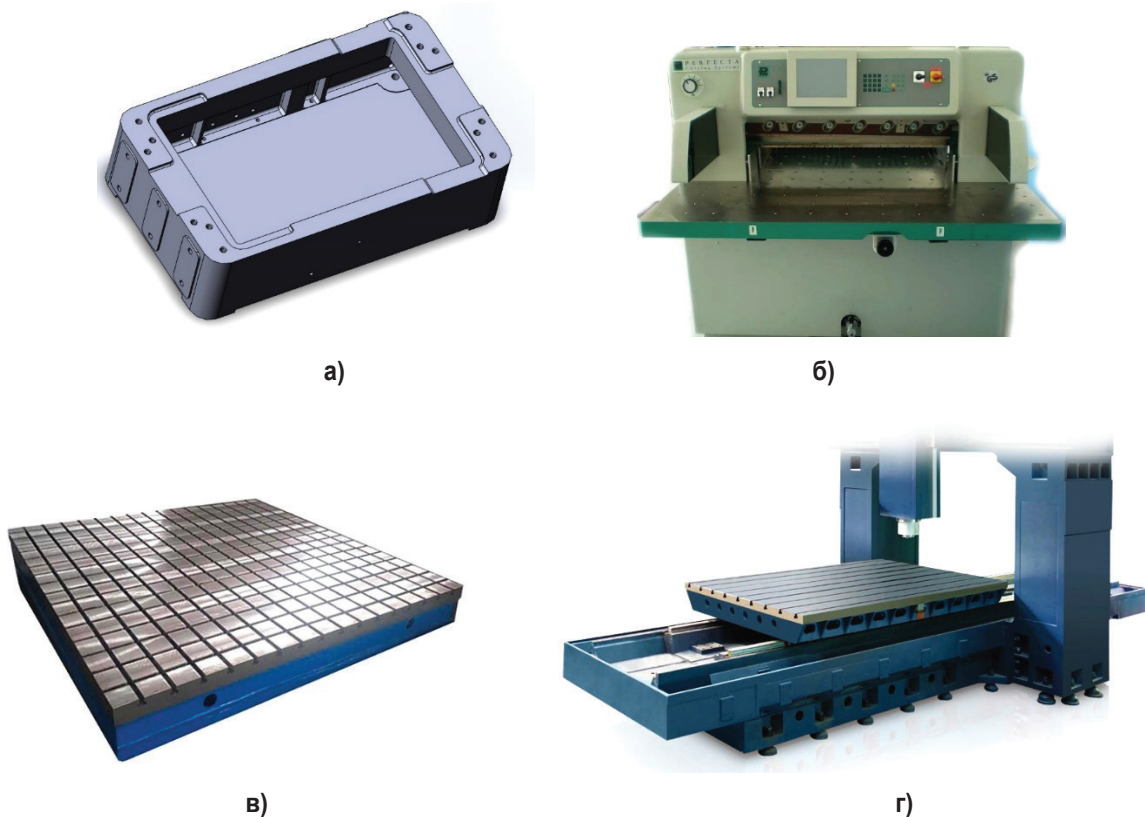


Рис. 1. Приклади деталей, що містять великі плоскі поверхні: станина центрифуги типу «ОГШ» (а), стіл паперорізальної машини (б), плита монтажно-зварювальна (в), стіл фрезерного верстата (г)

що напрямок фрезерування впливає на подальші експлуатаційні характеристики. Дослідження (Aгіzmeñdi & Jimenez, 2019) присвячено моделюванню і аналізу рельєфу поверхні та визначенню її шорсткості, отриманої під час торцевого фрезерування, залежно від геометричних параметрів різця, биття його ріжучих кромки та умов різання з подальшою експериментальною перевіркою теоретичних результатів.

Джерело (Pimenov et al., 2018) розглядає методику моделювання відхилення від площинності під час торцевого фрезерування з урахуванням кутового зміщення компонентів системи верстата та зношування інструменту, що дозволяє мінімізувати відхилення шляхом варіювання описаних параметрів. Вплив технологічних факторів на стан і цілісність поверхонь оброблених алюмінієвих заготовок після торцевого фрезерування розглянуто в (Perez et al., 2018). В дослідженні (Borysenko et al., 2019) наведено вплив макрогеометрії торцевої фрези на технологічні характеристики та стан деталі. Завдяки забезпеченню надійності та високої довговічності інструменту в джерелі (Sandvik Coromant, 2021) запропоновано використання правильно підібраної траєкторії руху фрези.

Залежність довжини ходу торцевої фрези від довжини та ширини площини досліджено в роботі (Ramakrishnan & Wysk, 2002). В джерелі (Hadad & Ramezani, 2016) запропоновано модель геометрії та розташування торцевих фрез при фрезеруванні різних площин. Але всі ці підходи не враховують особливості фрезерування площин великогабаритних заготовок і не надають рекомендацій по скороченню загального часу оброблення.

Метою дослідження є зниження часу фрезерування великих плоских поверхонь за рахунок зменшення кількості проходів інструменту шляхом розробки конструкцій АФГ, що забезпечують як постійну, так і регульовану ширину фрезерування.

Матеріали і методи досліджень. Для здійснення запланованого дослідження використаємо такі методи:

- аналіз конструкцій АФГ, систематизація отриманої в результаті аналізу інформації, узагальнення інформації та рекомендації для подальших дій;
- синтез нових конструкцій на базі проведеного теоретичного аналізу;
- моделювання та методи розрахунків;
- аналіз результатів, отриманих при дослідженні.

Розглянемо приклад оброблення плоскої поверхні заготовки за допомогою однієї торцевої фрези (рис. 2).

Торцева фреза 1 діаметром $D_{\text{фр}}$ починає обробляти поверхню заготовки W в напрямку робочої подачі D_{S1} . Максимально можлива ширина фрезерування B дорівнює величині діаметра фрези $D_{\text{фр}}$. Далі напрямок робочої подачі фрези змінюється на 90° : оброблення нової ділянки продовжується в напрямку D_{S2} . Аналогічно відбувається і подальше оброблення у напрямках D_{S3} та D_{S4} . Починаючи з позиції, де йде оброблення в напрямку D_{S5} , відбувається з'єднання по ширині між попередньо обробленою секцією D_{S1} і секцією D_{S5} , що обробляється. Потім оброблення продовжують у напрямках D_{S6} , D_{S7} , D_{S8} таким же чином. В результаті ми отримуємо повністю оброблену поверхню заготовки.

Як бачимо з наведеного прикладу, торцевій фрезі необхідно подолати велику відстань, здійснюючи багато проходів, поки не завершиться повне оброблення поверхні заготовки. Це обумовлено тим, що ширина оброблення однією фрезею обмежена її діаметром. В результаті ми отримуємо значне збільшення машинного часу і низьку ефективність процесу фрезерування.

Одним із шляхів рішення проблеми тривалого машинного часу та малої ефективності фрезерування є застосування АФГ спеціальних конструкцій.

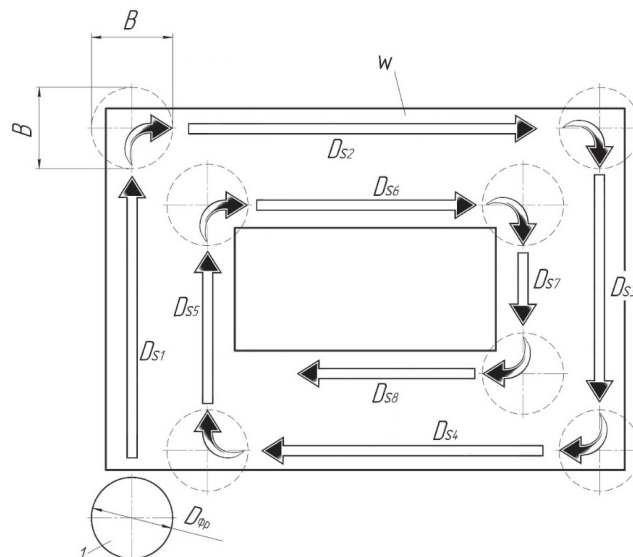


Рис. 2. Схема фрезерування однією торцевою фрезою: 1 – торцева фреза; W – заготовка; $D_{\text{фр}}$ – діаметр фрези; B – максимально можлива ширина фрезерування; D_{S1} , D_{S2} , D_{S3} , D_{S4} , D_{S5} , D_{S6} , D_{S7} , D_{S8} – напрямки подачі

Результати досліджень. Щоб скоротити вказаний машинний час, запропоновано конструкцію спеціальної АФГ, що дозволяє здійснювати фрезерування за один прохід великих по ширині поверхонь у взаємно перпендикулярних напрямках (Stupin et al., 2022). Дана АФГ (рис. 3) містить чотири шпинделі з встановленими на них торцевими фрезами, причому кожна пара сусідніх фрез має траєкторії ріжучих ножів, що перетинаються (Gelatko et al., 2023). Такі АФГ дозволяють отримувати безперервну оброблену поверхню при відносному переміщенні заготовки та столу верстата у напрямках поздовжньої та поперечної подачі. У кожній парі сусідніх фрез одна з фрез є праворізальною, а друга фреза – ліворізальною. На схемі праворізальними є фрези 1 і 3 (напрямок обертання D_{r1} та D_{r3}), а ліворізальними є торцеві фрези 2 і 4 (напрямок обертання D_{r2} та D_{r4}). Торцеві фрези 1, 2, 3 і 4 розташовані так, що осі шпинделів, на яких встановлено фрези, знаходяться у двох паралельних площинах, перпендикулярних до площини можливих подач у напрямках D_s . Ножі (різальні вставки) кожної фрези знаходяться між ножами інших фрез. Фрези приводяться в обертання незалежним приводом, з'єднаним через зубчасті передачі зі шпинделями, які обертаються в напрямках D_{r1} , D_{r2} , D_{r3} , D_{r4} . У разі переміщення АФГ з подачею D_s відносно заготовки стає можливим фрезерування шириною B у взаємно перпендикулярних напрямках.

Максимальна ширина фрезерування B дорівнює подвійному діаметру торцевої фрези $D_{фр}$ за вирахуванням величини перекриття Δ траєкторій різальних вставок. Крім того, фрезерування може здійснюватися будь-яким перпендикулярним рухом D_s фрезерної головки або заготовки.

На рис. 4 показаний запропонований приклад оброблення плоских поверхонь. АФГ, що містить чотири торцеві фрези діаметром $D_{фр}$ кожна, починає фрезерувати поверхню заготовки W у напрямку робочої подачі D_{sr} . Тут

здіяна пара торцевих фрез 1 та 2. Потім напрям подачі змінюють на 90 градусів і здійснюють процес фрезерування поверхні заготовки в напрямку D_{s2} фрезами 2 і 3. Пройшовши цю ділянку, знову змінюємо напрям подачі на 90 градусів і починаємо працювати в напрямку D_{s3} фрезами 3 і 4. Далі йде оброблення на наступній ділянці в напрямку D_{s4} , де задіяні фрези 1 і 4.

Отже, кожна пара сусідніх фрез фрезерує свою ділянку поверхні заготовки. Після завершення фрезерування ділянки в напрямку D_{s4} отримуємо повністю оброблену площину заготовки.

Розглянемо альтернативну конструкцію АФГ із поворотним шпиндельним блоком (Ostapenko et al., 2022), (Kushnirov et al., 2022). Особливістю даної конструкції є те, що три торцеві фрези розташовані в ряд і здатні повертатись разом із шпиндельним блоком на заданий кут α , тим самим змінюючи ширину фрезерування B . Симетричність зміни ширини B забезпечується тим, що вісь обертання шпиндельного блока співпадає з віссю центральної фрези (рис. 5).

Торцеве фрезерування поверхні шириною B виконується в напрямку подачі D_s . Шпиндельний блок АФГ містить три торцеві фрези діаметром $D_{фр}$. Поворот шпиндельного блока на кут α може здійснюватися в діапазоні 0° – 360° . Зміна ширини фрезерування B відбувається завдяки попередньому (до початку фрезерування) повороту шпиндельного блока з подальшою фіксацією цього куткового положення. Таким чином змінюється можлива ширина B оброблення площини заготовки. Значення B змінюється від максимального значення B_{max} (дорівнює приблизно сумі діаметрів трьох фрез, $B_{max} \approx 3D$) до мінімального значення (дорівнює одному діаметру фрези, $B_{min} = D$).

На рис. 6 зображено 3D-модель запропонованої конструкції АФГ з трьома торцевими фрезами та зі шпиндельним блоком, що повертається на кут α (Ivchenko et al., 2022).

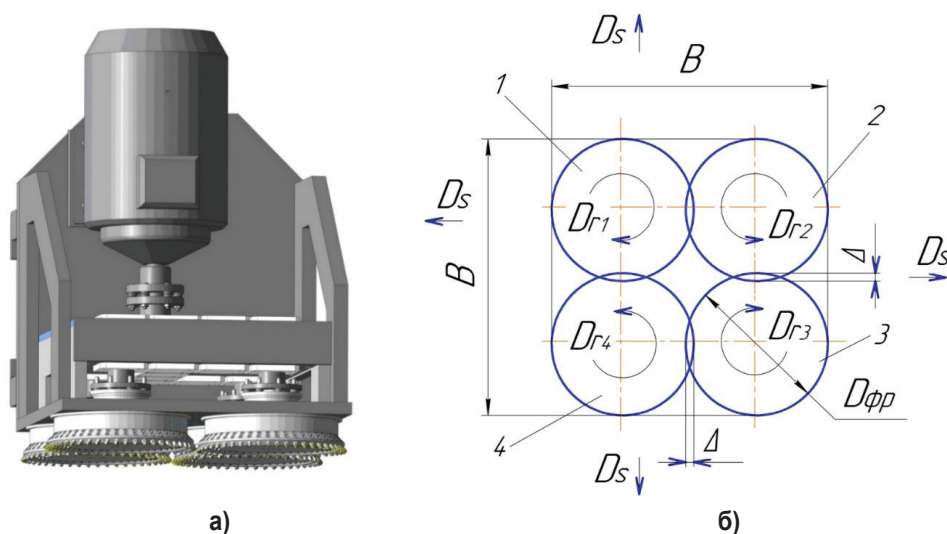


Рис. 3. 3D-модель АФГ з чотирма торцевими фрезами (а) та схема розташування фрез (б): 1, 2, 3, 4 – фрези; $D_{фр}$ – діаметр фрез; D_{r1} , D_{r2} , D_{r3} , D_{r4} – напрямки обертання шпинделів; B – максимально можлива ширина фрезерування; Δ – перекриття траєкторій різальних ножів фрези; D_s – можливий напрям робочої подачі

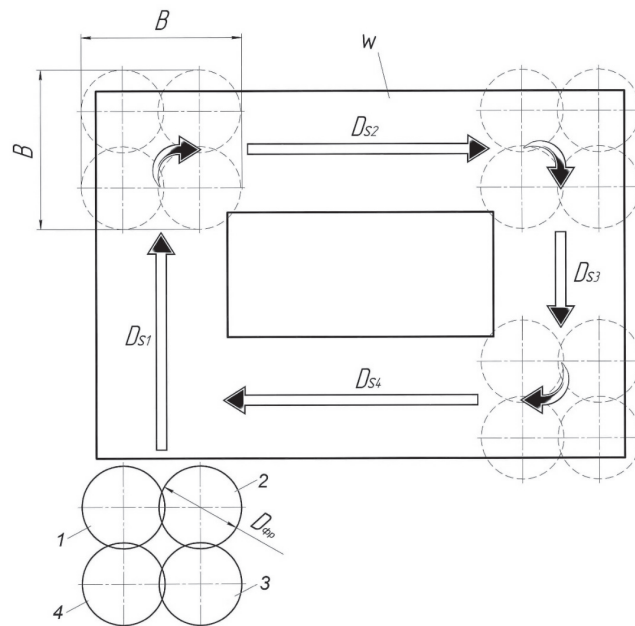


Рис. 4. Схема фрезерування 4-шпindelною АФГ: 1, 2, 3, 4 – чотири торцеві фрези, встановлені з перетином траєкторій різальних ножів; W – заготовка; $D_{фп}$ – діаметр фрез; B – максимально можлива ширина фрезерування; D_{S1} , D_{S2} , D_{S3} , D_{S4} – напрямки подачі

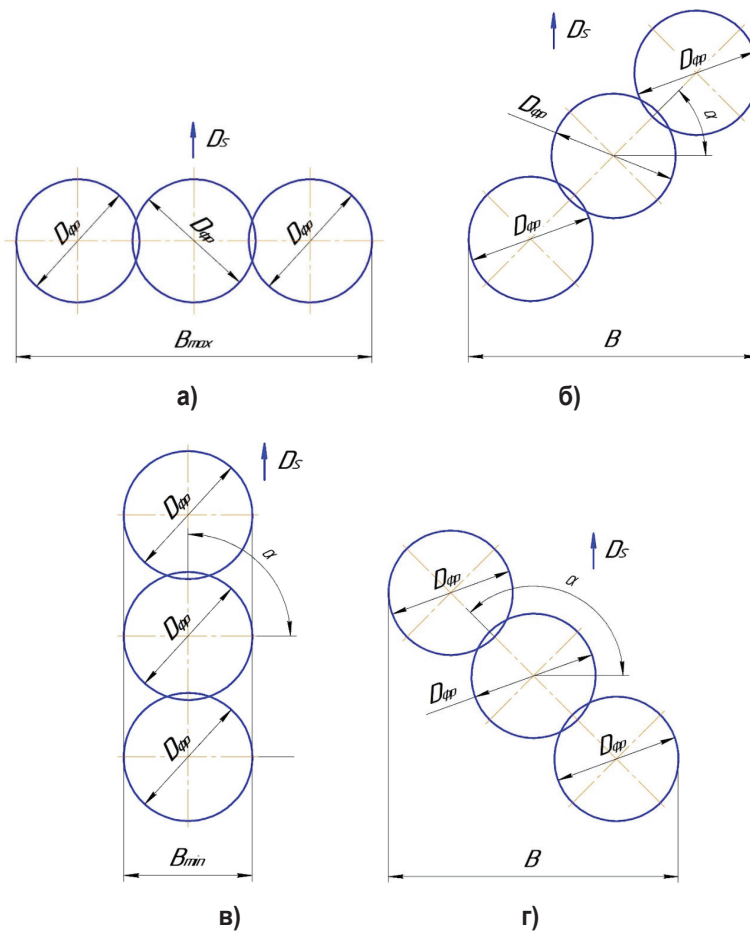


Рис. 5. Приклади схем оброблення плоскої поверхні шириною B за допомогою АФГ, що містить три фрези діаметром $D_{фп}$ кожна, з поворотом шпindelного блоку на кут α , з напрямком робочої подачі D_s : $\alpha = 0^\circ$ і $\alpha = 180^\circ$ (а), $\alpha = 45^\circ$ (б), $\alpha = 90^\circ$ (в), $\alpha = 135^\circ$ (г)

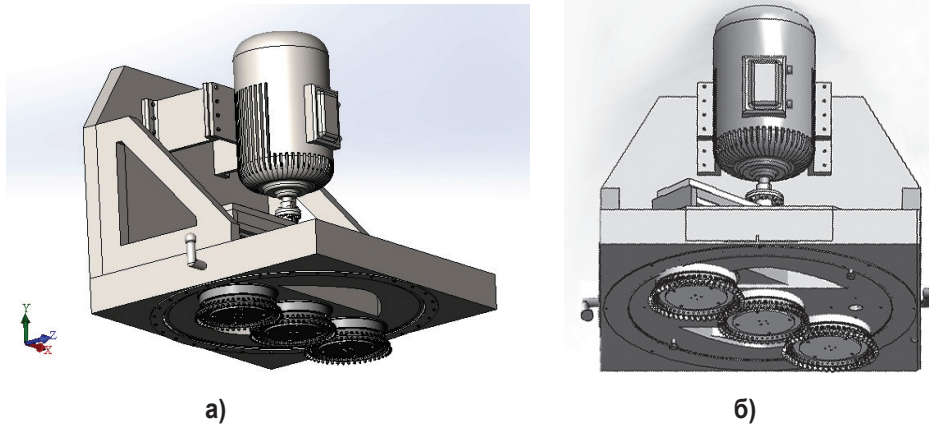


Рис. 6. 3D-модель конструкції АФГ з поворотним шпindelним блоком на кут $\alpha = 0^\circ$ (а) та $\alpha = 135^\circ$ (б)

Максимальне значення ширини фрезерування B відповідає куту повороту шпindelного блоку $\alpha = 0^\circ$. Таке ж саме максимальне значення робочої ширини B буде і при $\alpha = 180^\circ$. Однак, при обробленні заготовок часто потрібне менше значення ширини B . Наприклад, ця необхідність виникає при фрезеруванні нижньої площини паза, де бічні стінки паза обмежують ширину ріжучого інструменту (загальний розмір по ширині інструменту перевищує розмір ширини паза). Тому перед початком фрезерування, щоб змінити величину B , необхідно повернути шпindelний блок на кут α . Зменшення величини B відбувається, коли кут α знаходиться у проміжку від 0° до 90° . При куті $\alpha = 90^\circ$ ширина B має бути мінімальною. Поворот шпindelного блоку на кут α від 90° до 180° призводить до збільшення величини B від мінімального значення до максимального. Таким чином, можна регулювати величину B шляхом зміни значення кута α . Подальше обертання шпindelного блоку на кут α понад 180° має давати циклічно

повторювану зміну значення ширини B , подібну до розглянутої вище. На рис. 7 наведено залежність ширини фрезерування B від кута повороту α (0° – 360°) шпindelного блоку АФГ, що містить три торцевих фрези діаметром $D_{фр} = 315$ мм.

Обговорення. Порівнюємо продуктивність роботи АФГ (з поворотним шпindelним блоком, три торцеві фрези $\varnothing 315$ мм) зі звичайним багатопрохідним торцевим фрезеруванням (торцева фреза $\varnothing 125$ мм) на прикладі оброблення станини 1.1650-041.00.06 центрифуги ОГШ-321-К-01 (рис. 1). Матеріал заготовки – сірий чавун СЧ20. Матеріал різальної частини фрез – композит 10. Розрахуємо основний час T_0 при фрезеруванні верхньої площини станини центрифуги розміром 910×536 мм для обох випадків, використовуючи стандартні залежності з нормування технологічних операцій.

Оскільки $T_{02} > T_{01}$, то продуктивність АФГ з поворотним шпindelним блоком більш ніж у три рази є вищою, ніж фрезерування однією фрезою.

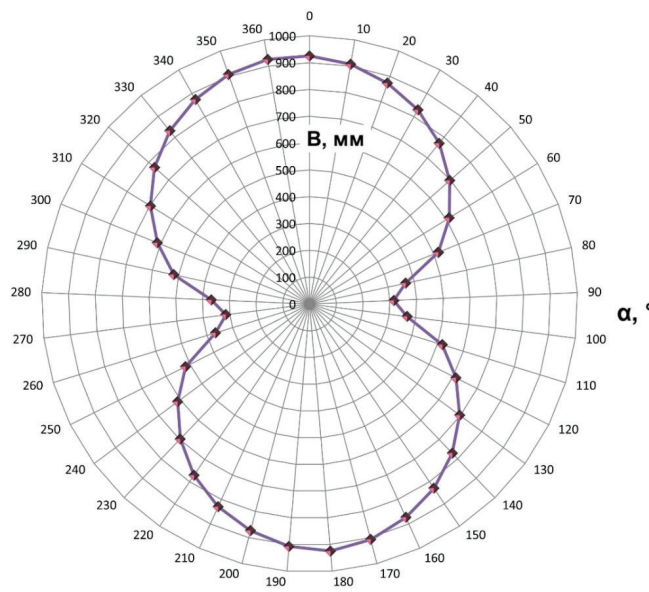


Рис. 7. Залежність ширини фрезерування B від кута повороту α (0° – 360°) шпindelного блоку АФГ, що містить три фрези діаметром $D_{фр} = 315$ мм

Порівняльні параметри нормування для операції фрезерування станини

Параметри	АФГ з поворотним шпindelним блоком, торцеві фрези $\varnothing 315$ мм	Торцева фреза $\varnothing 125$ мм
Подача на зуб (мм/зуб)	0,02	0,02
Кількість ножів фрези (шт.)	48	18
Кількість обертів шпинделя за хвилину (об/хв)	1300	3000
Довжина підводу, врізання і перебігу (мм)	45	15
Довжина проходу (мм)	996	2807
Результат:		
Основний час T_o (хв)	$T_{o1} = 0,8$	$T_{o2} = 2,6$

Висновки. В дослідженні розглянуто новий підхід до оброблення плоских поверхонь широких заготовок із використанням АФГ. Проаналізовано дві конструкції АФГ, доведено їх перевагу та доцільність використання у порівнянні з обробленням плоских поверхонь звичайною торцевою фрезою.

АФГ з торцевими фрезами, в яких перетинаються траєкторії ріжучих ножів, дозволяють отримувати безперервну оброблену поверхню при відносному переміщенні заготовки та столу верстата.

Запропонована АФГ, що містить чотири шпинделі зі встановленими на них торцевими фрезами, розширює технологічні можливості фрезерування, оскільки дозволяє оброблення великих плоских поверхонь у взаємно перпендикулярних напрямках.

Запропонована АФГ, що містить три торцеві фрези, дозволяє шляхом повороту шпindelного блока на кут α (0° – 360°) регулювати величину ширини фрезерування. Це забезпечує можливість оброблення площин закритих з боків пазів різної ширини.

Використання запропонованих конструкцій АФГ забезпечує зниження часу фрезерування великих плоских поверхонь за рахунок зменшення кількості проходів інструменту.

Надана порівняльна характеристика продуктивності роботи звичайної торцевої фрези $\varnothing 125$ мм та АФГ з поворотним шпindelним блоком, що містить три торцеві фрези $\varnothing 315$ мм, при фрезеруванні станини 1.1650-041.00.06 центрифуги типу ОГШ. Визначено, що АФГ є більш продуктивною та дозволяє зменшити час оброблення плоскої поверхні деталі у 3 рази.

Бібліографічні посилання:

1. Arizmendi, M., & Jimenez, A. (2019). Modelling and analysis of surface topography generated in face milling operations. *International Journal of Mechanical Sciences*, 163, Article 105061. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105061>
2. Borysenko, D., Karpuschewski, B., Welzel, F., Kundrak, J., & Felho, C. (2019). Influence of cutting ratio and tool macro geometry on process characteristics and workpiece conditions in face milling. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 24, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.12.003>
3. Cisar, M., Kuric, I., Cubonova, N., & Kandra, M. (2017). Design of the clamping system for the CNC machine tool. *MATEC Web of Conferences*, 137(1): 01003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713701003>
4. Gelatko, M., Kushnirov, P., Dehtiarov, I., Evtuhov, A., Stupin, B., Neshta, A., & Ostapenko, B. (2023). Milling Heads for Machining Mutually Perpendicular Flat Surfaces. *MM Science Journal*, 6441–6445. https://doi.org/10.17973/MMSJ.2023_06_2023008
5. Hadad, M., & Ramezani, M. (2016). Modeling and analysis of a novel approach in machining and structuring of flat surfaces using face milling process. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 05, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.03.005>
6. Ivchenko, O. V., Kushnirov, P. V., Denysenko, Yu. O., Dehtiarov, I. M., Yevtukhov, A. V., Stupin, B. A., Panchenko, V. O., Meleichuk, S. S., Kulyk, V. V., Denysov, R. V., Riasna, O. V., Dynnyk, O. D., Fesenko, D. I., Dumenko, O. P., & Ostapenko, B. A. (2022). *Ahrehatna frezerna holovka z reholovanoiu shyrynoiu obrobky [Aggregate milling head with adjustable machining width]* (Patent of Ukraine No. 151784) (in Ukrainian)
7. Józwiak, J., Kuric, I., Grozav, S., & Ceclan, V. (2014). Diagnostics of CNC machine tool with R-test system. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 12(1), 52–57.
8. Kushnirov, P., & Stupin, B. (2017). Applying of several face mills in composite milling heads. *Modern engineering and innovative technologies*, 1(2), 16–21. <https://doi.org/10.21893/2567-5273.2017-02-01-025>
9. Kushnirov, P., Denysenko, Y., Ostapenko, B., Zhyhylii, D., & Stupin, B. (2022). Improvement of the Milling Effectiveness by Application of Composite Milling Heads. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 293–301. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_29
10. Kushnirov, P., Zhyhylii, D., Ivchenko, O., Yevtukhov, A., & Dynnyk, O. (2020). Investigation of the dynamic state of adjustable milling heads. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE–2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 169–179. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_17
11. Loiev, V. Yu., & Kravchuk, O. M. (2009). Tortseve frezeruvannia shyrokyykh ploskykh poverkhon nezhorstkykh detalei. Suchasnyi stan problemy [Face milling of wide flat surfaces of non-rigid parts. The current state of the problem]. *Bulletin of the Zhytomyr State University of Technology*, (7), 114–129 (in Ukrainian)
12. Ostapenko, B. A., Skabenok, M. M., & Kushnirov, P. V. (2022). Ahrehatni frezerni holovky z troma tortsevymy frezamy [Composite milling heads with three face mills]. In: *Technologies of the 21st century*. SNAU, 23 (in Ukrainian)

13. Pavlova, O. O., Hryhorash, O. V., Kushnirov, P. V., Marchuk, N. A., Nedilska, S. A., & Sirenko, V. A. (2022). Evoliutsiia konstruktii ahrehatnykh frezernykh holovok dlia obrobky shyrokykh ploskykh poverkhon [Evolution of designs of composite milling heads for machining wide flat surfaces] (P. V. Kushnirov). In: *Innovative science, education, production and transport: education, medicine, economics, technology*. Book 21. Part 2. KUPRIIeNKO SV, Odesa, 86–96. <https://doi.org/10.30888/2663-5569.2022-21-02-004> (in Ukrainian)
14. Perez, I., Madariaga, A., Cuesta, M., Garay, A., Arrazola, P., Ruiz, J., Rubio, F., & Sanchez, R. (2018). Effect of cutting speed on the surface integrity of face milled 7050–T7451 aluminium workpieces. *Procedia CIRP*, 71(1), 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.034>
15. Pimenov, D., Guzeev, V., Krolczyk, G., Mia, M., & Wojciechowski, S. (2018). Modeling flatness deviation in face milling considering angular movement of the machine tool system components and tool flank wear. *Precision Engineering*, 54, 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2018.07.001>
16. Ramakrishnan, S., & Wysk, R. (2002). Optimization of the length of travel in face milling operations for flat surfaces. *Transactions of The North American Manufacturing Research Institute of SME*, XXX, 431–438.
17. Sandvik Coromant (2021). Cutter Path and Chip Formation in Milling. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/cutter-path-and-chip-formation.aspx>
18. Stupin, B. A., Ostapenko, B. A., & Kushnirov, P. V. (2022). Ahrehatni frezerni holovky dlia obroblennia ploskykh poverkhon, shcho ye vzaiemno perpendykuliarnymi [Composite milling heads for machining flat surfaces that are mutually perpendicular]. In: *Modern technologies in industrial production*. Sumy State University, 34 (in Ukrainian)
19. Taurit, H., Pukhovskiy, Ye., & Hryshchenko, Ye. (1981). *Obrobka velykohabarytnykh detalei [Machining of Large-Sized Parts]*. Tekhnika, Kyiv, 207 (in Ukrainian)
20. Yin, Y., Du, S., Shao, Y., Wang, K., & Xi, L. (2021). Sealing analysis of facemilled surfaces based on high definition metrology. *Precision Engineering*, 73(1), 23–39. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.08.020>

Ostapenko B. A., Postgraduate, Sumy State University, Sumy, Ukraine

Kushnirov P. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Sumy State University, Sumy, Ukraine

Dynnyk O. D., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Classical Professional College of Sumy State University, Konotop, Sumy region, Ukraine

Omelianenko A. Ye., Student, Sumy State University, Sumy, Ukraine

Composite milling heads for machining large flat surfaces

The article deals with the problems of increasing the productivity of milling the planes of workpieces with large dimensions. Such workpieces include the frames of centrifuges and metal-cutting machines, tables of paper-cutting machines, various plates and cases, frames, and parts of transport equipment. The dimensions of the planes of these parts usually exceed tens of centimeters and often reach meter values, which creates certain difficulties during machining. Since milling is one of the most efficient methods of machining, there is a problem of reducing the milling time of large workpieces.

In this case, one-pass milling of planes with one cutter cannot always be implemented, since this requires a face mill of very large values: with a diameter of 400–630 mm and more. Multi-pass milling is often used, which reduces the quality of the surface and leads to an increase in machining time. Therefore, one of the options is the use of composite milling heads (CMH), which have their own drive and contain several face mills. For example, if the machining of mutually perpendicular flat surfaces is required, then an CMH containing four spindles with face mills installed on them is proposed. Each pair of adjacent cutters has trajectories of cutting knives that intersect. Such CMH allow obtaining a continuous machined surface with relative movement of the workpiece and the machine table. The maximum milling width of the CMH is almost twice the diameter of the face mill. CMH can work in any direction of longitudinal and transverse feed. The proposed CMH expands the technological capabilities of milling, as it allows the machining of large flat surfaces in mutually perpendicular directions.

If there is a need to adjust the width of milling with the use of CMH (for example, when machining the planes of grooves with side walls), then the design of CMH with a rotating spindle block is proposed. In this CMH, three face mills are arranged in a row and are able to rotate together with the spindle block at a given angle α , thereby changing the milling width. The size of the milling width can vary from a maximum value equal to approximately the sum of the diameters of three cutters to a minimum value equal to one diameter of the cutter. The research determined the dependence of the milling width on the angle of rotation α (0° – 360°) of the CMH spindle block, which contains three milling cutters with a diameter of $D_{fr} = 315$ mm.

The proposed CMHs provide a reduction in the machining time of milling large flat surfaces by reducing the number of tool passes. A comparison of the normalization parameters of milling operations of the «OGSH»-type centrifuge bed fully confirms the advantage of using an CMH compared to a conventional face mill.

Key words: large flat surface, composite milling head, face mill, spindle block, milling width, number of passes.