

**О.А. Громовий, к.т.н., доц.
Г.М. Виговський, к.т.н., проф.
Н.О. Балицька, к.т.н., доц.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

Шляхи удосконалення процесу обробки плоских поверхонь деталей фрезеруванням

На основі аналізу зростаючих вимог до якості обробки деталей, підвищення надійності їх функціонування розглянуто питання щодо збільшення рівня продуктивності обробки плоских поверхонь деталей за рахунок використання торцевих фрез, оснащених надтвердими матеріалами. Встановлено напрями удосконалення процесу обробки плоских поверхонь шляхом використання нових комбінованих схем обробки поверхонь та удосконалення геометрії різальних частин фрез. Встановлено перспективні напрями створення нових конструкцій торцевих фрез із використанням складних формуютьоруючих рухів.

Визначено переваги кінематичного перетворення колової траєкторії формуютьоруючих рухів різальних та деформуючих елементів, що дає можливість забезпечення рівномірної шорсткості по ширині обробленої поверхні. Запропоновано раціональні режими обробки плоских поверхонь деталей удосконаленими комбінованими методами.

Ключові слова: торцеве фрезерування; торцева фреза; косокутне різання; ступінчасті фрези; різальні елементи.

Постановка проблеми. Станини верстатів та інших машин з плоскими протяжними поверхнями, якими переміщуються рухомі вузли (супорти, каретки, шпіндельні бабки, задні центри, допоміжні пристрої тощо), напрямні планки, стійки вантажопідіймачів, базові деталі вимірювальних машин, накладні напрямні ковзання становлять більше 15 % об'єму продукції машинобудування і металообробки. Матеріалами для виготовлення таких деталей є чавуни, конструкційні й леговані сталі. У технологічних процесах виготовлення деталей від 10 до 50 % повинні мати шорсткість оброблених поверхонь не більше 1,6 мкм.

Останнім часом чистова обробка плоских поверхонь все частіше виконується торцевим фрезеруванням, як правило, стандартними торцевими фрезами, які мають низку недоліків. Їх усунення є важливим завданням, що може вирішуватися у кількох напрямках. Одним з них є проєктування більш досконалих конструкцій фрез із комбінованими схемами різання з використанням, у тому числі, комбінування методів різання і поверхневого пластичного деформування (ППД).

Під час розробки спеціальних торцевих фрез з комбінованими схемами різання основною метою є встановлення раціональних конструктивних параметрів фрез та режимів експлуатації. Крім цього, застосування чистових торцевих фрез із комбінованими схемами різання зумовлює необхідність вивчення особливостей кінематики обробки.

Дослідження та вирішення питань, спрямованих на підвищення якості обробки плоских поверхонь деталей, є актуальним задачею і має велике значення на сучасному етапі розвитку інструментального виробництва та машинобудування в цілому.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У низці досліджень [4–9] було розглянуто питання розробки нових способів обробки і проєктування більш досконалих конструкцій фрез із комбінованими схемами різання, а також з комбінованими схемами обробки (фрезерування-вигладжування тощо). Забезпечення якісної обробки плоских поверхонь деталей під час нестационарної обробки реалізується за рахунок використання нових методів обробки і конструкцій різальних інструментів, раціональних режимів різання. Для забезпечення стійкості торцевих фрез застосовуються ступінчасті схеми різання та безвершинна геометрія різальних ножів, оснащених надтвердими матеріалами (НТМ).

Питанням забезпечення якісної і продуктивної обробки плоских поверхонь деталей машин торцевим фрезеруванням присвячено велику кількість робіт вітчизняних і закордонних вчених. Однак існуючі рішення в цьому напрямі мають частковий характер, у них відсутні основи створення ефективного інструменту для фрезерних верстатів, невирішені проблеми його працездатності, надійності, особливостей конструктивних елементів.

Суттєвим резервом підвищення продуктивності обробки є можливість створення нових конструкцій торцевих фрез, які б дозволили поєднати декілька операцій обробки (чорнову, напівчистову і чистову) за один прохід. В умовах високої вартості верстато-годин на сучасних верстатах це має велике значення на сьогоднішньому етапі розвитку інструментального виробництва та машинобудування.

Обробка деталей машин і механізмів насамперед стосується обробки їх відповідальних з точки зору експлуатації плоских протяжних поверхонь і вимагає забезпечення не тільки високої точності розмірів та форм, але й необхідних фізико-механічних параметрів поверхневого шару.

Плоскі поверхні деталей можуть бути термічно обробленими або покритими зносостійкими матеріалами. Обробка таких поверхонь переважно здійснюється шліфуванням (чорнове, чистове, тонке). При цьому забезпечується необхідна точність обробки і низька шорсткість поверхонь. Однак під час шліфування не завжди можливо отримувати необхідні з точки зору експлуатації фізико-механічні й структурні параметри поверхонь, що гарантують точну і довговічну роботу техніки. Крім того, для досягнення оптимальної з точки зору зношення шорсткості проводять доводку обробленої поверхні, що суттєво збільшує собівартість виробів.

Разом з тим під час шліфування взаємодія абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею відбувається за значних швидкостей різання (10–40 м/с і більше). Такі швидкості взаємодії характерні для удару тіла з перешкодою і є позитивними для збільшенні міцності поверхневого шару оброблюваної деталі. Досягаючи певної низької шорсткості і зміцнення поверхні під час шліфування неможливо уникнути місцевих фазових і структурних перетворень, які проявляються у формі окремих припалів, зменшенні твердості поверхні.

Структурні зміни призводять до локальної об'ємної зміни, яка викликає появу внутрішніх неоднакових напружень різних знаків. У разі перевищення тимчасового опору металу відбувається утворення поверхневих тріщин у центрі або по краях ділянок припалу. Крім того, відбувається шаржування поверхні відпрацьованим матеріалом шліфувального круга, що спричиняє прискорене зношування поверхонь тертя.

У менш відповідальних випадках з точки зору експлуатації машин і механізмів застосовують метод фінішної обробки плоских протяжних поверхонь чистовим торцевим фрезеруванням із застосуванням різальних елементів з надтвердих матеріалів. Отримувана гарантована шорсткість поверхонь становить для чавунних деталей $Ra = 0,6\text{--}1,1$ мкм, для сталевих загартованих – $Ra = 0,6\text{--}1,5$ мкм. Досягнення оптимальної шорсткості можливе тільки в разі певного часу припрацювання або проведення такої операції, як ППД.

Крім зазначених методів обробки застосовують тонке стругання, чистове протягування, суперфінішування, полірування і притирання. Можливості різних методів обробки плоских поверхонь у забезпеченні їх параметрів узагальнено у [8]. Всі методи механічної обробки призводять до різного ступеня зміцнення поверхневого шару, що суттєво впливає на експлуатаційні характеристики деталей.

Метою дослідження є розгляд питань з удосконалення процесу обробки плоских поверхонь фрезеруванням із забезпеченням необхідної продуктивності та якості обробки за рахунок використання нових інструментальних матеріалів та формуютьоруючих рухів для процесів торцевого фрезерування плоских поверхонь.

Викладення основного матеріалу. З точки зору багатьох дослідників, найбільш перспективним напрямом механічної обробки деталей машин і механізмів є застосування комбінованих способів обробки, які підрозділяються [1–3, 11] залежно від:

- виду зовнішнього впливу (тиск, різання, фізико-хімічний);
- співвідношення головних рухів (один, два, три головних рухи);

Перспективними є комбіновані процеси обробки різанням та пластичним деформуванням.

Запровадження комбінації лезової обробки з ППД має певні переваги перед іншими способами, які полягають у такому:

- зміцнення поверхні без застосування хімічних, електричних і теплових впливів;
- можливість утворення необхідного рельєфу поверхні;
- відсутність потреби у додатковому обладнанні й відповідних фахівцях для обслуговування;
- екологічна безпечність процесу;
- скорочення тривалості технологічного процесу виготовлення деталей;
- суттєве підвищення продуктивності праці й зниження собівартості виробів;
- зниження енергетичних витрат у 1,5–2 рази;
- скорочення виробничих площ і кількості обладнання.

Під час обробки плоских поверхонь зазвичай використовуються конструкції фрез, за яких видалення припуску здійснюється:

- нерухомими в процесі обробки відносно корпусу фрези різальними ножами;
- ножами, що змінюють своє положення відносно корпусу фрези у процесі обробки.

Підвищення продуктивності та якості обробки чистовими торцевими фрезами з нерухомими в процесі обробки відносно корпусу різальними ножами (РН) досягається [6, 7]:

1) збільшенням можливої кількості різальних ножів при зменшенні габаритів механізмів їх кріплення та регулювання, а також підвищення надійності фіксації різальних ножів у корпусі фрези;

- 2) перерозподіленням подач для чорнових та чистових різальних ножів, що забезпечує менше навантаження чистових різальних ножів;
- 3) забезпеченням одночасного регулювання кутів у плані та осевого вильоту різальних ножів;
- 4) використанням фрезерування торцевими фрезами з НТМ, для яких характерний малий розмірний знос і висока стійкість інструмента.

Недоліком таких конструкцій є виникнення похибок розташування різальних ножів фрез відносно координатних осей верстата. Це призводить до нерівномірного навантаження різальних ножів, сприяє їх підвищеному зношуванню і не дає можливості забезпечити необхідну якість обробки.

Розглянуті конструкції торцевих фрез реалізують колову траєкторію контакту різальних ножів фрези із заготовкою.

Процес різання чистовими торцевими фрезами з нерухомими в процесі обробки різальними ножами характеризується такими факторами:

- 1) коливаннями товщини зрізу по дузі контакту різального ножа фрези із заготовкою;
- 2) змінною кількістю різальних ножів торцевої фрези, які беруть участь у різанні;
- 3) переривчастістю обробки.

Різання торцевої фрези в метал заготовки є періодичним процесом, який супроводжується ударами, що може спричинити підвищений знос і викришування різальної кромки, а також створювати несприятливі умови для роботи верстата.

В той же час відомі конструкції торцевих фрез, у яких використовуються рухомі різальні ножі, що дає можливість отримати стабільну шорсткість по ширині обробки (наприклад, фрезерування-стругання тощо) [7].

Конструкції, в яких різальні ножі торцевих фрез нерухомі в процесі обробки, а також конструкції, в яких різальні ножі рухаються в процесі обробки, причому для останніх рух різальних ножів здійснюється за допомогою регулюючих пристроїв, що здійснюють зворотний зв'язок, узагальнені на рисунку 1.



Рис. 1. Конструктивні особливості чистових торцевих фрез [7]

З метою інтенсифікації технологічних процесів фінішної обробки плоских поверхонь застосовують спеціальний інструмент, в якому поєднуються попередня чистова обробка фрезеруванням і фінішна обробка поверхневим пластичним деформуванням.

Комбінований інструмент для фінішної обробки плоских поверхонь можна розділити на інструмент послідовної дії (деформуючі елементи розташовані услід за ріжучими елементами на деякій відстані), інструмент одночасної дії (ріжучі і деформуючі елементи розташовані на одній відстані від осі обертання) і інструмент з упередженням різання деформуванням (ріжучий елемент видаляє деформований шар металу) [10, 11].

Усі відомі конструкції комбінованого інструменту (різання + ППД) можливо систематизувати таким чином (рис. 2):



Рис. 2. Конструктивні варіанти комбінованого інструменту (різання і поверхневе пластичне деформування) для обробки плоских поверхонь [8]

У [8–10] проведено систематизацію досліджень, пов'язаних з нестационарністю процесів лезової обробки, а також урівноваження складових сили різання.

Авторами [11] розглянуто аспекти динаміки торцевого фрезерування фінішним інструментом і торцевими фрезами з величинами припусків до 6–8 мм, проаналізовано дію моментів врізання інструмента в заготовку, а також побудовано математичний апарат для визначення мінімуму коефіцієнта динамічності технологічної системи.

Теоретично визначено й експериментально доведено переваги кінематичного перетворення колової траєкторії руху чистового різального ножа і вигладжувача у прямолінійну, перпендикулярну до вектора подач заготовки під час комбінування різання з ППД, що забезпечує отримання рівномірної шорсткості по ширині обробленої поверхні. Це дало можливість для визначення оптимальних режимів обробки поверхонь деталей удосконаленим комбінованим методом, що поєднує торцеве ступінчасте фрезерування, чистове стругання і вигладжування залежно від матеріалу і термообробки заготовки.

Аналіз проведених досліджень показує, що оптимальними значеннями зусиль деформування поверхневого шару залежно від матеріалу заготовок є: для сталі 40X (50...54 HRC) – 120...150 Н; для чавуну СЧ21 (45...50 HRC) – 120...130 Н; для чавуну СЧ21 (170...241 HB) – 60...90 Н. Це дає можливість отримання стабільної шорсткості плоских протяжних поверхонь деталей із загартованих сталей, чавунів і незагартованих чавунів в межах Ra 0,1...0,4 мкм.

Авторами [11] виконано дослідження впливу нерівномірностей подач робочих органів руху верстатів на якість обробки плоских поверхонь деталей машин і механізмів. Отримані аналітичні залежності дозволили визначати закон навантаження різального елемента інструмента для досягнення мінімуму динамічного впливу на інструмент. Розроблено математичну модель процесу глибинного торцевого фрезерування для розрахунку складових сили різання, яка враховує похибки розташування ножів фрези і елементів режимів різання та перехідні процеси під час врізання й виходу ножів. Встановлено, що збільшення подачі на зуб до 0,05–0,25 мм/зуб (630–1600 мм/хв) та глибини різання до 6–12 мм призводить до зменшення коефіцієнта нерівномірності фрезерування на 15–20 %, а зростання відношення ширини заготовки до діаметра фрези від 0,4 до 0,8 у 2,5–3 рази. Встановлено, що зі зменшенням діаметра фрези перевага має надаватися конструкціям з більшою кількістю спіралей, при кількості ножів у спіралі 6–12 перевагу має спіраль Архімеда, для вузьких поверхонь – параболічна спіраль, а для широких поверхонь – логарифмічна спіраль.

У [5–7] експериментально досліджено вплив геометричних параметрів різальних частин ножів ступінчастих торцевих фрез, оснащених надтвердими матеріалами, та режимів різання на якість оброблених поверхонь. Для покращення якості обробленої поверхні запропоновано використовувати ножі з безвершинною радіусною різальною кромкою і використання комбінування різання й поверхневого пластичного деформування. Встановлено раціональні параметри різальних частини фрез, оснащених НТМ: під час фрезерування загартованої сталі $\gamma = -10-15^\circ$, $\alpha = 8-10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$; під час фрезерування сірого чавуну $\gamma = -10-15^\circ$, $\alpha = 10-12^\circ$, $\varphi = 30-45^\circ$, що підвищує стійкість торцевих фрез з НТМ. Найбільш раціональними для умов врізання фрези у заготовку будуть величини кута λ в межах $\lambda = -20-0^\circ$.

Розроблені способи формоутворення плоских поверхонь деталей дозволяють розширити використання процесів чистової та чорнової лезової обробки деталей інструментами, оснащеними надтвердими матеріалами, та підвищити продуктивність обробки. Запропоновані методи обробки плоских поверхонь зменшують трудомісткість обробки деталей у 1,5–1,8 раза відносно традиційних методів обробки.

Висновки:

1. Проведений аналіз свідчить, що використання комбінованих способів формоутворення плоских поверхонь із застосуванням прогресивних конструкцій інструментів та надтвердих матеріалів, оптимізації геометрії інструмента і режимів різання дозволяє усунути дефекти поверхневого шару, які властиві традиційним методам обробки, та виключити із технологічних процесів обробку малопродуктивними абразивними інструментами;

2. Встановлено перспективні напрями створення нових конструкцій торцевих фрез із використанням складних формоутворюючих рухів. Визначено переваги кінематичного перетворення колової траєкторії формоутворюючих рухів різальних та деформуючих елементів, що дає можливість забезпечення рівномірної шорсткості по ширині обробленої поверхні. Запропоновано раціональні режими обробки плоских поверхонь деталей удосконаленими комбінованими методами, що дає можливість зменшити трудомісткість обробки деталей у 1,5–1,8 раза відносно традиційних методів обробки.

Список використаної літератури:

1. *Сенькин Е.Н.* Конструкции и эксплуатация фрез, оснащенных композитами / *Е.Н. Сенькин, Г.В. Филиппов, А.В. Колядин* // Библиотека фрезеровщика. – Л. : Машиностроение, 1988. – 63 с.
2. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов / *В.И. Баранчиков, А.В. Жаринов, Н.Д. Юдина, А.И. Садыхов*. – М. : Машиностроение, 1990. – 400 с.
3. Конструкции и эксплуатация торцевых фрез из сверхтвердых материалов на основе нитрида бора. Методические рекомендации. – М. : НИИмаш, 1984. – 66 с.
4. *Подураев В.Н.* Эффективность обработки резанием с опережающим пластическим деформированием / *В.Н. Подураев, В.Н. Ярославцев, Н.А. Ярославцев* // Вестник машиностроения. – 1972. – № 12. – С. 58–61.
5. *Виговський Г.М.* Використання кінематичних схем різання при чистовому торцевому фрезеруванні / *Г.М. Виговський, П.П. Мельничук, О.А. Громовий* // Вісник ЖІТІ. Серія : Технічні науки. – 2000. – № 13. – С. 26–31.
6. *Виговський Г.М.* Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к.т.н. / *Г.М. Виговський*. – Київ : НТУУ «КПІ», 2000. – 16 с.
7. *Громовий О.А.* Розробка чистових косокутних торцевих фрез з комбінованими схемами різання : дис. ... к.т.н. : спец. 05.03.01 / *О.А. Громовий*. – К., 2002. – 172 с.
8. *Лоев В.Ю.* Удосконалення комбінованого методу обробки плоских поверхонь деталей різанням і поверхневим пластичним деформуванням / *В.Ю. Лоев* // Вісник ЖДТУ. – 2004. – Вип. 2 (29). – С. 29–36.
9. Безвершинне косокутне фрезерування. Зношення та стійкість / *Г.М. Виговський, О.А. Громовий, П.П. Мельничук, В.С. Ольшевський* // Вісник ЧІТІ. – 2000. – № 4. – 5 с.
10. Декларативний патент на винахід 40156 А Україна, В23С3/00. Спосіб плоского фрезерування торцевими фрезами / *Г.М. Виговський, О.А. Громовий, В.Ю. Лоев, П.П. Мельничук* (Україна). – № 2000074236 ; заявл. 17.07.2000 ; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 16.
11. Підвищення ефективності обробки плоских поверхонь фрезеруванням / *П.П. Мельничук, Г.М. Виговський, О.А. Громовий та ін.* ; під ред. *П.П. Мельничука*. – Житомир : ФОП Євро-Волинь, 2017. – 287 с.

References:

1. Sen'kin, E.N., Filippov, G.V. and Kolyadin, A.V. (1988), «Constructions and operation of mills equipped with composites», *Milling Machine Library*, Mashinostroenie, L., 63 p.
2. Baranchikov, V.I., Zharinov, A.V., Yudina, N.D. and Sadykhov, A.I. (1990), *Advanced cutting tools and metal cutting modes*, Mashinostroenie, M., 400 p.
3. *Design and operation of face mills equipped with superhard materials based on boron nitride. Methodical recommendations* (1984), NIImash, M., 66 p.
4. Poduraev, V.N., Yaroslavtsev, V.N. and Yaroslavtsev, N.A. (1972), «Cutting efficiency with advanced plastic deformation», *Vestnik mashinostroeniya*, No. 12, pp. 58–61.

5. Vygovs'kyj, G.M., Mel'nychuk, P.P. and Gromovyj, O.A. (2000), «The use of kinematic cutting schemes in finishing face milling», *Bulletin of ZhITI, Series Technical sciences*, No. 13, pp. 26–31.
6. Vygovs'kyj, G.M. (2000), «Improving the efficiency of face mills for the finishing of flat surfaces», Abstract of Ph.D. dissertation, NTUU «KPI», Kyiv, 16 p.
7. Gromovyj, O.A. (2002), «Development of finishing face mills with combined cutting schemes», Ph.D. Thesis of dissertation, spec. 05.03.01, K., 172 p.
8. Lojev, V.Ju. (2004), «Improvement of the combined method of machining of flat surfaces of parts by cutting and surface plastic deformation», *Bulletin of ZhDTU*, Issue 2 (29), pp. 29–36.
9. Vygovs'kyj, G.M., Gromovyj, O.A., Mel'nychuk, P.P. and Ol'shevs'kyj, V.S. (2000), «Inverted Oblique Milling. Wear and stability», *Bulletin CHITI*, No. 4, 5 p.
10. Vygovs'kyj, G.M., Gromovyj, O.A., Lojev, V.Ju. and Mel'nychuk, P.P., *The method of flat milling by face mills*, Declarative patent for the invention 40156 A Ukraine, B23S3/00/, No. 2000074236, Claimed 17.07.2000, Publ. 16.07.2001, Bull. No. 16.
11. Mel'nychuk, P.P., Vygovs'kyj, G.M., Gromovyj O.A. et. al. (2017), *Improving the efficiency of machining flat surfaces by milling*, in Mel'nychuk, P.P. (ed.), FOP Euro-Volyn, Zhytomyr, 287 p.

Громовий Олексій Андрійович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

Виговський Георгій Миколайович – кандидат технічних наук, професор Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

Балицька Наталія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- обробка матеріалів різанням;
- проектування різальних інструментів.

Стаття надійшла до редакції 30.06.2020.