

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

Сучасний етап розвитку машинобудування характеризується швидким впровадженням автоматизованих та цифрових технологій, серед яких особливе місце займають верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК). Такі верстати забезпечують високу точність, стабільність процесів оброблення повторюваність операцій, що дозволяє виготовляти деталі складної конфігурації з мінімальними витратами. Проте в умовах жорсткої конкуренції та постійного зростання вимог до продуктивності виробництва навіть використання сучасних верстатів з ЧПК не гарантує максимальної ефективності роботи.

Одним із основних показників ефективності функціонування верстатного обладнання є продуктивність механічного оброблення. Вона визначає кількість деталей або об'єм матеріалу, який може бути оброблений за одиницю часу, а підвищення продуктивності без зниження якості оброблення в свою чергу дозволяє зменшити собівартість продукції, скоротити виробничий цикл і підвищити економічну ефективність машинобудівного підприємства. На сьогодні існує низка напрямів (рис. 1), які сприяють підвищенню продуктивності оброблення деталей на верстатах з ЧПК [4].



Рис. 1. Основні напрями підвищення продуктивності оброблення деталей на верстатах з ЧПК

Оптимізація режимів різання включає в себе вибір раціональних параметрів (швидкість різання, подача, глибина різання) з врахуванням властивостей матеріалу, типу інструмента та жорсткості системи «верстат-інструмент-заготовка». Використання адаптивного керування (Adaptive Control) дозволяє автоматично змінювати параметри обробки залежно від навантаження на інструмент [2]. Програми для симуляції різання (наприклад, VERICUT, Edgcam Simulation та інші) зазвичай застосовують для перевірки та оптимізації траєкторії руху інструменту.

Використання сучасного інструменту із твердих сплавів, кераміки, CBN або PCD дозволяє збільшити швидкість різання у кілька разів [6]. Інструменти з покриттями (TiN, TiAlN, AlCrN) підвищують зносостійкість, а модульні системи інструментів скорочують час переналадження [5].

Для контролю стану ріжучого інструменту використовують давачі або сенсори навантаження та вібрацій, які дозволяють запобігати поломкам інструменту. Також використовують системи моніторингу зношення інструмента для автоматичного коригування траєкторій або заміни інструменту при досягненні граничного зношення, а системи MDA/TDA (Machine Data Acquisition, Tool Data Acquisition) дають змогу відстежувати ефективність у реальному часі. Сучасні системи ЧПК такі як Fanuc, Siemens та Heidenhain мають функції високошвидкісної та високоточної обробки (High-Speed/High-Precision Machining), а використання цифрових двійників (Digital Twin) дозволяє тестувати програми й режими на віртуальній моделі верстата перед запуском.

Рациональне програмування з використанням CAD/CAM-систем (найпопулярніші – SolidCAM, Mastercam, NX, Fusion 360) дозволяють генерувати оптимальні траєкторії, мінімізувати холості переміщення [3]. Використання підпрограм і параметричне програмування скорочує час створення програм для однотипних деталей у серійному виробництві.

У контексті парадигми Industry 4.0 та переходу до Industry 5.0 для підвищення продуктивності механічного оброблення деталей використовують технології кіберфізичних систем (CPS), технології інтернету речей (IoT), Big Data-аналітики, штучного інтелекту (AI), доповненої реальності (AR) та хмарні обчислення, які дозволяють створювати «розумні» верстати, які здатні самостійно аналізувати параметри процесу оброблення (вібрації, температуру, навантаження на шпиндель та інші вузли обладнання [1]) і коригувати режими різання в реальному

часі для досягнення максимальної продуктивності. Застосування цифрових двійників (Digital Twin) деталей і технологічних процесів для моделювання, прогнозування зношування інструменту та оптимізації траєкторій оброблення дає змогу Інтегрувати САМ-системи з MES- і ERP-рівнем управління виробництвом, забезпечуючи єдиний інформаційний простір і повне відслідковування даних. Таким чином, у межах Industry 4.0 (так звана 4-та промислова революція) підвищення продуктивності оброблення досягається не лише за рахунок оптимізації режимів різання, а й через інтелектуальне управління виробничими процесами та автоматизований обмін даними між обладнанням, системами ЧПК і оператором. Підвищення продуктивності механічного оброблення деталей із застосуванням верстатів з ЧПК в умовах Industry 5.0 (так звана 5-та промислова революція) досягається завдяки інтелектуальному поєднанні людини, машини та інформаційно-цифрових технологій, де людина відіграє роль не оператора, а аналітика, проектувальника та контролера процесів.

На основі вище викладеного матеріалу можна зробити висновок, що підвищення продуктивності механічного оброблення деталей на верстатах з ЧПК досягається комплексом технічних, технологічних та організаційних заходів, серед яких провідну роль відіграють оптимізація режимів обробки, застосування сучасного інструменту та відповідних мастильно-охолоджувальних рідин, автоматизації технологічних процесів та використання ефективного спеціалізованого програмного забезпечення.

Список літератури:

1. Chetverzhuk T., Zabolotnyi O., Sychuk V., Polinkevych R., Tkachuk A.: A Method of Body Parts Force Displacements Calculation of Metal-Cutting Machine Tools Using CAD and CAE Technologies. *Annals of Emerging Technologies in Computing (AETiC)*, Vol. 3, No. 4, pp. 37-47. International Association of Educators and Researchers (IAER). (2019). DOI: <https://doi.org/10.33166/AETiC.2019.04.004>.
2. Kovalov V., Vasilchenko Y., Turmanidze R., Dašić P., Sukova T., Shapovalov M. The technique of designing high-power CNC lathes for enterprises of the heavy engineering industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 568 (2019) (Special Volume with: *Annual Session of Scientific Papers «IMT ORADEA 2019»*; Oradea, Felix Spa; Romania; 30-31 May 2019), Article № 012119; pp. 1-6. ISSN 1757-8981. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/568/1/012119>.
3. Sychuk V. et al. Practices of modernization of metal-cutting machine tool CNC systems. *Mechatronic Systems 2: Applications in Material Handling Processes and Robotics* (1st ed.). Routledge (2021). DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003225447-22>
4. Yao K-C, Chen D-C, Pan C-H, Lin C-L. The Development Trends of Computer Numerical Control (CNC) Machine Tool Technology. *Mathematics*. 2024; 12(13):1923. <https://doi.org/10.3390/math12131923>
5. Zaleta, O.M., Povstyanoy, O.Y., Ribeiro, L.F., Redko, R.G., Bozhko, T.Y., Chetverzhuk, T.I.: Automation of optimization synthesis for modular technological equipment. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 10(1), A6-A14 (2023). [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(1\).a2](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).a2)
6. Алексієнко Г.В. Використання високопродуктивного інструменту як метод скорочення часу виготовлення деталей на верстатах з ЧПУ. *Наукові нотатки*, №73: С21-28 (2022). DOI: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2022.73.3>