

ВЕРСТАТОБУДУВАННЯ – СЕРЦЕВИНА МАШИНОБУДУВАННЯ

Проаналізований стан виробництва верстатів в Україні в минулому і сучасному. Запропоновані заходи по відновленню верстатобудування в майбутньому і підготовці кадрів для успішної реалізації з врахуванням викликів Індустрія 4.0 і наближення Індустрія 5.0. Зроблений наголос на міждисциплінарний підхід, використання новітніх технологій і конвергенції знань. Наведені приклади верстатів нового покоління.

Основна риса сучасності в умовах четвертої промислової революції, названої INDUSTRY.4.0 – створення нової техніки та нових технологій у секторі засобів виробництва економічно розвиненої держави, де велика увага приділяється штучному інтелекту, екології, інтеграції науки, освіти, виробництва та сфери обслуговування, а також досягненню таких основних цілей: 1. Підвищення продуктивності. 2. Підвищення якості продукції. 3. Зниження витрат за екологічно чисте виробництво при економії енергії та матеріальних ресурсів. 4. Поліпшення та зниження частки фізичної праці. 5. Полегшення та скорочення монотонної інтелектуальної праці. 6. Розширення технологічних та функціональних можливостей обладнання. Це визначило світові тенденції розвитку машинобудування [1]. Досягнення зазначених цілей у незалежній високорозвиненій державі неможливе без вітчизняного верстатобудування – серцевини машинобудування, де основна продукція – верстати розглядаються як машини, що створюють інші машини. Без верстатів неможливе виготовлення іншого технологічного обладнання, інших технічних систем (ТС) різного функціонального призначення, що відносяться до антропогенних систем [1], що змінюються в часі внаслідок цілеспрямованої діяльності Людини. Ціль – на основі аналізу критичного стану вітчизняного верстатобудування запропонувати шляхи виходу з кризи з врахуванням останніх досягнень сучасної науки та проілюструвати на прикладах міждисциплінарного системно-структурного підходу.

Верстатобудування з перших років радянської влади обрало стратегічно згубний курс під девізом «Наздогнати та перегнати!» (перші токарні верстати московського заводу «Червоний пролетар», побудованого ще в 1857 р., називалися ДИП-200 (рос. догнать и перегнать, висота центрів 200 мм, але вони, навіть з ЧПУ, наприклад, мод. 16К20Ф3С1, так і не перегнали подібні верстати провідних інофірм). Нас завжди переконували в тому, що треба йти у фарватері провідних фірм та країн, дивлячись їм у зад та беручи за основу розробки, побачені на міжнародних виставках. Наприкінці 80-х років минулого століття були спроби йти іншим шляхом (приклад – Іванівський верстатозавод, який почав виготовляти багатоцільові верстати типу IP-500 на сучасному рівні, використовуючи модульний принцип, Київський завод верстатів-автоматів імені Горького, який виготовив первістки багатошпindelних токарних автоматів з ЧПУ). Однак трапилося непередбачене і багато верстатобудівних заводів не тільки здали свої позиції, але навіть припинили свою діяльність, наприклад, припинило існувати ВАТ «Веркон» (Київський завод верстатів-автоматів ім. Максима Горького), який раніше був широко популярним виробником багатошпindelних токарних автоматів (БТА) та напівавтоматів повної гами типорозмірів – від найлегших до надважких [1]. Сьогодні є ще можливість (за зміни підходу з боку держави) відродити вітчизняне верстатобудування та інші галузі машинобудування (авіабудування, суднобудування, сільгоспмашинобудування, приладобудування). Для цього необхідно обрати стратегічно вірний курс під девізом "Випередити, не наздоганяючи!" та здійснити інноваційний прорив у сфері науки, освіти та виробництва, використовуючи останні досягнення у різних науках (генетиці, кібернетиці, інформатиці, синергетиці, соціоніці та ін.), об'єднаних у міждисциплінарну галузь знань та побудованих на єдиному структурно-системному підході (приклад НБІК – технології: НАНО, БІО, ІНФО, КОГНО) [2]. Запропонований науковий підхід, що забезпечує інноваційний прорив Постулат нового наукового підходу – від живої Природи до створення антропогенних систем, до яких належать статичні та динамічні машинні, електричні, будівельні технічні системи (ТС) завдяки інтелекту Людини, що задекларовано у філософських ідеях та пророцтві акад. Вернадського В.І.: «З появою нашої планети обдарованого розумом живої істоти планета перетворюється на нову стадію своєї історії. Біосфера перетворюється на ноосферу (сферу розуму)... Ми лише починаємо створювати нездоланну міць наукової думки, найбільшої творчої сили Homo Sapiens, людської вільної особистості, найбільшого нам відомого прояви її космічної сили, царство якої попереду». Створення нових ТС неможливе без аналізу та врахування накопиченого людського досвіду, який як генетична інформація на різних носіях переноситься з покоління в покоління. Історія розвитку людського суспільства та еволюція техніки завжди була пов'язана з механікою. Проте з відкриттям електрики виявилася немислимою нині життєдіяльність Людини та розвитку ТС без неї [2]. Електрика стала основним джерелом енергії ТС та первинним перетворювачем її альтернативних джерел (води, вітру та сонця), конкуруючи з бензином та газом. Ця тенденція визначила особливу роль електромеханічної науки, пов'язаної з дослідженням та створенням електромеханічних наук [3].

Говорячи про майбутнє розвитку світового та вітчизняного верстатобудування [1], використано сучасні методи наукового прогнозування та генетичного передбачення на 50-100 і більше років наперед [2]. Один із прикладів верстата-робота майбутнього за патентом на винахід №101447 наведено на рис. 1.

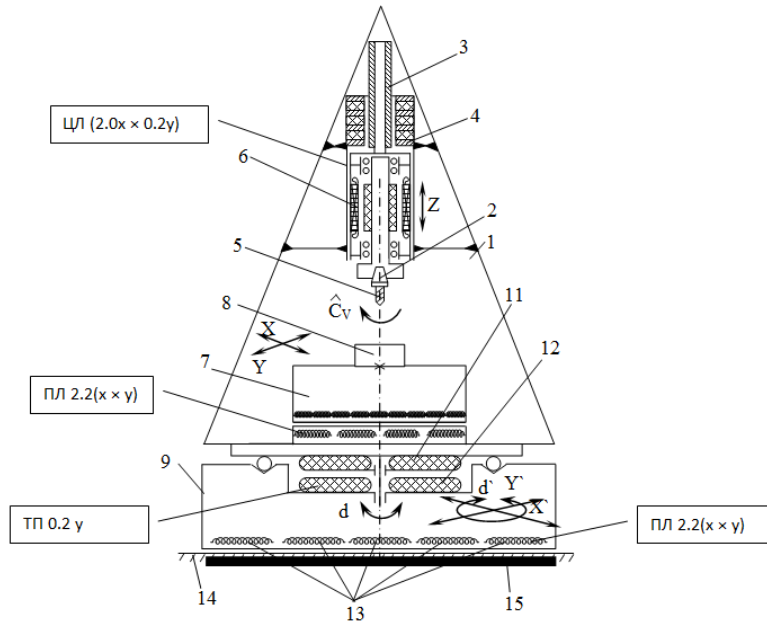


Рис. 1. Багатокоординатний мобільний свердлильно-фрезерний верстат-робот майбутнього без механічних передач із генетичними формулами

Із застосуванням ЧПУ в БТА докорінно змінилися кінематичні ланцюги та замість механічних з'явилися електромеханічні, що почало відлік нових поколінь БТА з урахуванням еволюції розвитку приводу головного руху, механізмів повороту та фіксації шпиндельного барабана (ШБ). На основі аналізу еволюції БТА можна передбачити 2 шляхи їх вдосконалення: 1.3 ШБ та електромеханічними системами приводу головного руху, приводу подач інструментальних супортів та головок, приводу затиску з геометричним замиканням у позиції завантаження – розвантаження, приводу подачі та упору прутка, механізмів повороту та фіксації шпиндельного барабана 2. Без ШБ та електромеханічними системами приводу головного руху з вбудованими в єдиний модуль мотор-шпинделем та автоматичним затискачем, приводу подач інструментальних супортів та головок, приводу подачі та упору прутка. Найбільш перспективним є другий шлях поворотного ШБ, що реалізує паралельну та паралельно-последовну схеми обробки з точки зору високої продуктивності та якості обробки деталей при максимальному використанні модульного принципу та мінімальних витратах матеріалів та енергії. Проте нижче розглянуто перший шлях еволюційного розвитку БТА, принципову схему якого наведено на рис.2 (патент №113767).

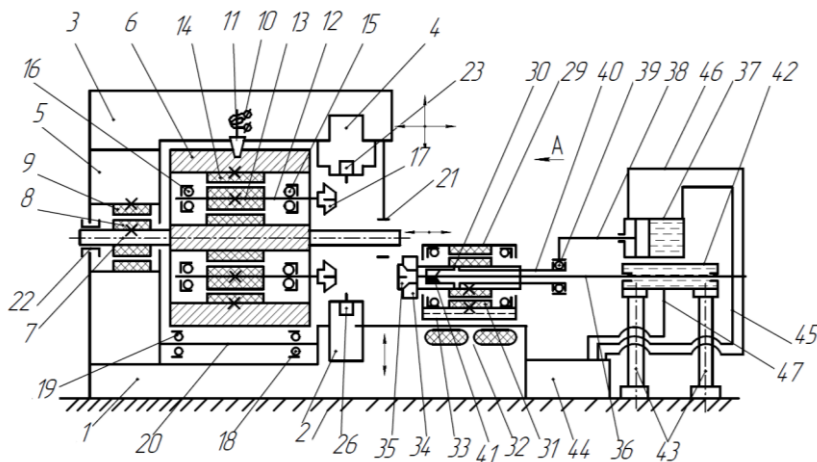


Рис. 2. Принципова схема БТА з ЧПУ без механічних передач

Сьогодні висувається гіпотеза про існування генетичної спорідненості електромагнітних і механічних структур, що володіють осью симетрії. якого використовується предметна область загальної системи, що породжує - генетичної класифікації (ГК) первинних джерел електромагнітного поля Як приклад на рис.3 представлені структури багатороторного конічного електродвигуна і радіально-упорного підшипника кочення, що володіють спільністю генетичної інформації на хромосомному рівні. $2 \llbracket (KN 0.2y) \rrbracket_{-1} : n \llbracket (KN 0.2y) \rrbracket_{-2}$, де $2 \llbracket (KN 0.2y) \rrbracket_{-1}$ – генетичний код первинної (батьківської) хромосоми.

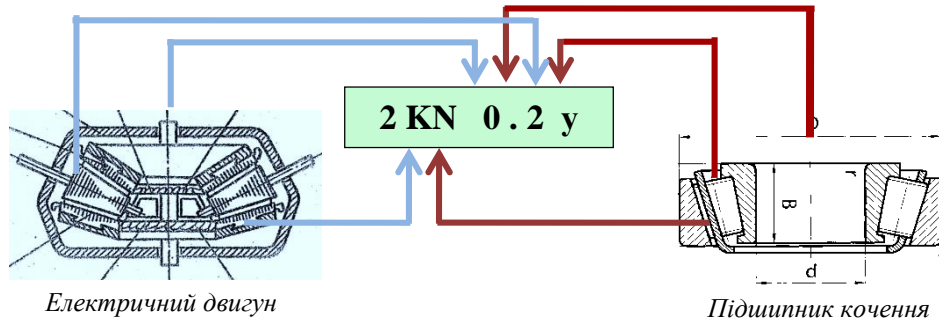


Рис. 3. Загальність складових генетичної інформації в осесиметричних електромеханічному та механічному об'єктах

Список використаної літератури:

1. Кузнецов Ю.М. Сучасний стан, перспективи розвитку і виробництва металорізальних верстатів в Україні // Вісті Академії інженерних наук України, №1(41), 2011. – с.2-10.
2. Шинкаренко В.Ф. Генетическое предвидение как системная основа в стратегии управления инновационным развитием технических систем // Праці Таврійського держ. агротехн. унів. – Вип. 11. – Том 4. – 2011. – с.3-19.
3. Yuriy Kuznetsov, Vasyly Shynkarenko. The genetic approach is the key to innovate synthesis of complicated technical systems // Journal of the Technical University – Sofia, Plovdiv branch, Bulgaria. Fundamental sciences and application, Vol. 16, book 2, 2011. – p.p. 15-34.
4. Yuriy Kuznetsov Morphological synthesis of the universal rotary welding device // Journal of the Technical University of Gabrovo, vol. 66, 2022. p. 1-4. <http://doi.org/10.62853/YELM2690>

Ловська А.О., професор, д.т.н., проф.
Равлюк В.Г., професор, д.т.н., проф.
Рибін А.В., доцент, к.т.н., доц.
Скуріхін Д.І., доцент, к.т.н., доц.

Український державний університет залізничного транспорту

ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ МІЦНОСТІ СКЛАДОВИХ РАМИ НАПІВВАГОНА

Забезпечення конкурентоспроможності залізничної галузі на сучасному етапі її розвитку зумовлює необхідність впровадження в експлуатацію принципово нових конструкцій рухомого складу [1, 2]. При створенні такого рухомого складу повинні враховуватися особливі вимоги, пов'язані з забезпеченням його міцності та надійності при експлуатаційних режимах навантаження. Це сприятиме зменшенню навантаженості складових несучих конструкцій, підвищенню ресурсу експлуатації, а як наслідок, зменшенню витрат на утримання. Відомо, що одним з найбільш затребуваних типів вагонів в експлуатації є напіввагон. Основним несучим елементом вагону є рама. Під дією експлуатаційних навантажень вона випробовує значні напруження, які викликають появу тріщин в складових конструкції (рис. 1) та необхідність здійснення позапланових видів ремонту або, взагалі, виключення вагона з інвентарного парку. Тому з метою забезпечення міцності рам напіввагонів важливим є проведення досліджень щодо можливості зменшення навантаженості їх конструкцій в експлуатації.

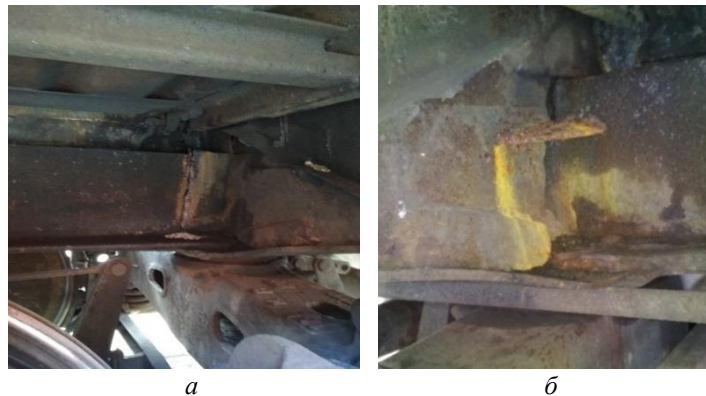


Рис. 1. Пошкодження рами напіввагона: а) тріщина в хребтовій балці; б) обрив зварювального шва

Для покращення міцності несучих конструкцій напіввагонів запропоновано створення їх складових із замкнених профілів. Дослідження проведено на прикладі хребтової балки, як найбільш навантаженого елемента рами вагона. Результати проведених теоретичних досліджень підтвердили доцільність запропонованого рішення. Використання прямокутної труби для виготовлення хребтової балки вагона сприяє зменшенню її навантаженості на 5% у порівнянні із застосуванням типового профілю виконання.

Для підтвердження теоретичних результатів досліджень проведено експериментальне визначення напружено-деформованого стану хребтової балки напіввагона. У зв'язку зі складністю проведення експерименту на повномасштабній конструкції рами, випробуванню підлягала її консольна частина, як найбільш навантажена при дії повздовжніх експлуатаційних сил. При цьому застосовано метод електричного тензометрування. Консольна частина рами імітувалася дослідними зразками, які представляють собою сталеві квадратні стрижні. Зразки були виготовлені з електрозварної труби із гнутих швелерів, сталь 09Г2С. При проведенні досліджень зразки мали масштаб зменшення 1:3. Кількість дослідних зразків-близнюків дорівнює трьом. До уваги прийнято найбільш неблагоприємний режим навантаження зразка – стиск.

Для навантаження конструкцій використано гідравлічний прес ПММ-125. Для дослідження характеру деформування експериментальних зразків використано тензорезистори з базою 10 мм та опором 100 Ом (рис. 2), які попередньо пройшли тарирування. Тарирування тензорезисторів здійснювалося на сталевій консольній балочці, рівній опору згину. На цю балку попередньо наклеювалися тензорезистори. На вантажний майданчик почергово вкладалися вантажі. Знімалися відповідні показання тензорезисторів із використанням реєструючої апаратури. Різниця відліків за приладом відповідала збільшенню відносних деформацій у крайніх точках балочки у розрізі. Обчисливши теоретично величину цієї відносної

деформації, знаючи геометричні розміри перерізу балочки та вагу вантажів, визначено ціну розподілу шкали приладу в одиницях відносної деформації. Монтаж тензорезисторів здійснено за мостовою схемою.

Показання тензорезисторів знімалися за допомогою тензометричної станції ВНП-8. Навантаження прикладали по 40 кН в інтервалі від 0 до 200 кН.

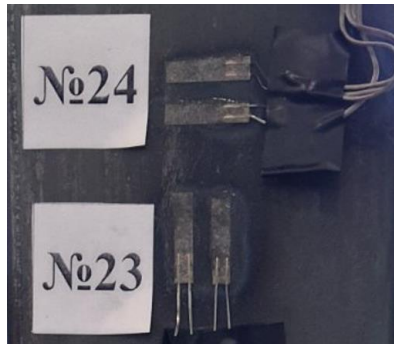


Рис. 2. Розміщення тензорезисторів на дослідному зразку

Результати досліджень показали, що напруження в дослідних зразках при дії на них навантаження у 200 кН не перевищують допустимих [3]. Розбіжність між експериментальними та теоретичними розрахунками на міцність склала близько 3%.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій вантажних вагонів та підвищенню ефективності їх функціонування.

Список використаної літератури:

1. G. L. Vatulia, A. O. Lovska, A. V. Rybin, M. V. Pavliuchenkov, D. H. Petrenko. Experimental research of the stress-strain state of the energyabsorbing center sill of an open wagon. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2025. Vol. 1499 012072. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012072>
2. Emmanuel Matsika, C. O'Neill, Marzio Grasso, Antonio De Iorio. Selection and ranking of the main beam geometry of a freight wagon for lightweighting. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F. Journal of Rail and Rapid Transit. 2016. Vol. 232(2). <https://doi.org/10.1177/0954409716677075>
3. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.

ВПЛИВ ВІБРАЦІЙ НА ІНТЕНСИФІКАЦІЮ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ПРОФІЛЮ КОЧЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІСНИХ ПАР НА КОЛЕСО-ТОКАРНИХ ВЕРСТАТАХ

Процес механічної обробки колісних пар являє собою складну систему механічної взаємодії різального інструменту з матеріалом знімного шару оброблюваного колеса. Механічну обробку доцільно розглядати як розімкнену систему, в межах якої одночасно протікають взаємопов'язані процеси пластичної деформації та руйнування матеріалу, тертя і зношування, теплообміну, контактної взаємодії, а також хімічні, електромагнітні та інші супутні явища. Результати досліджень і практичний досвід свідчать про нестійкий характер перебігу зазначених процесів, оскільки їх параметри мають випадкову природу [1-3].

До керованих належать параметри, які можуть бути цілеспрямовано обрані або змінені в процесі обробки колісних пар. Зокрема, до них відносяться тип верстата, жорсткість технологічної системи, різальні властивості інструментального матеріалу, конструктивні характеристики різального інструменту, режими різання тощо. Надійність і стабільність якості обробки визначаються кількістю значущих керованих параметрів: зі зростанням їх числа підвищується ефективність експлуатації верстатного обладнання та різального інструменту.

У процесі різання умовно розрізняють два види коливань: шкідливі вібрації — власні коливання, що виникають під час механічної обробки, та корисні — керовані спрямовані вібрації, які спеціально застосовуються з метою інтенсифікації процесу різання. Шкідливі вібрації, у свою чергу, поділяються на низькочастотні та високочастотні. Низькочастотні коливання, як правило, відбуваються з частотами, близькими до власних частот елементів несучої системи верстата (10...1000 Гц). Високочастотні коливання характеризуються частотами, наближеними до власних частот коливань різального інструменту (1000...7000 Гц). У зв'язку з цим для дослідження динамічних процесів при контурній обробці збірними різцями необхідне застосування вібровиміральної апаратури, здатної реєструвати параметри коливань у зазначених діапазонах. Як ідентифікаційні ознаки коливальних процесів, що виникають при контурній обробці на важких токарних верстатах, використовуються значення відносних віброприскорень збірних різців.

Вібрації шпинделя верстата. Контроль технічного стану шпинделя верстата виконується у відповідності до ISO 17243, який включає наступні різні частини [4]:

-ISO 17243-1: Вбудовані шпинделі на підшипниках від 600 до 30 000 об/хв. [5].

-ISO 17243-2: Шпинделі з прямим або ремінним приводом на підшипниках від 600 до 30 000 об/хв [6].

-ISO 17243-3: Шпинделі із зубчастою передачею на підшипниках, від 600 до 12000 об/хв. [7].

Точки виміру вібрації на шпинделі верстата наведено на рис. 1.

Умови виконання вимірювань: вимірювання проводять "без механічної обробки або шліфування", по можливості, шпиндель має бути вільним від інструментів, які можуть призвести до дисбалансу.

Контроль рівня вібрації доцільно виконувати портативними приборами закордонних або вітчизняних виробників, наприклад SPM: Leonova Diamond, Leonova Emerald [8-9], EMERSON: аналізатор AMS 2140 [10], TETRA: ИДП-07 [11].

Технічні дані прибора ИДП-07 українського виробника TETRA, LTD наведено нижче [10].

ИДП-07 – це портативний прилад, призначений для контролю вібрації електричних та інших роторних машин, стану їх підшипників кочення. *ИДП-07* забезпечує перевірки: вібрації машини; зносу доріжок і тіл кочення підшипника; якості мастила і установки підшипника; рівня локальних дефектів підшипника (тріщин, сколів, раковин); нагріву підшипника. *ИДП-07* призначений для підприємств, що експлуатують електричні та інші роторні машини потужністю до 400 кВт із частотою обертання від 300 до 6000 об/хв.

Принцип роботи:

– при перевірках вібрації машини, зносу доріжок і тіл кочення, якості мастила і установки, рівня локальних дефектів підшипника індикатор вимірює значення відповідних параметрів, що контролюються, і вказує зони оцінки та інтервали в межах цих зон, в які потрапляють виміряні значення.
– при перевірці нагріву підшипника індикатор вимірює температуру підшипника (безконтактним способом за допомогою інфрачервоного датчика), порівнює її з гранично допустимою (100°C) і показує результат цього порівняння.

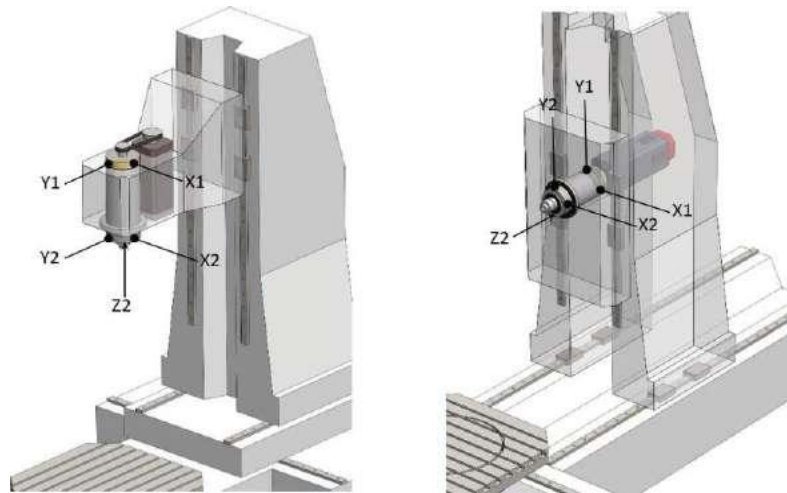


Рис. 1. Точки виміру вібрації на шпинделі верстата

Параметри, що контролюються:

- при перевірці вібрації машини: віброшвидкість (середнє квадратичне значення);
- при перевірках зносу доріжок і тіл кочення, якості мастила і установки підшипника: віброприскорення (середнє квадратичне значення);
- при перевірці локальних дефектів підшипника: пікове ударне прискорення (максимальне значення для серії ударних імпульсів);
- при перевірці нагріву підшипника: температура;

Динамічний діапазон, що контролюється:

- при перевірці вібрації машини, дБ: 49;
- при перевірках зносу доріжок і тіл кочення, якості мастила та установки, рівня локальних дефектів підшипника, дБ: 40;

Діапазон частот, що контролюється Гц:

- при перевірці вібрації машини: 5÷1000;
- при перевірці зносу доріжок і тіл кочення підшипника: 500÷1800;
- при перевірці якості мастила і установки підшипника: 2000÷10000;
- при перевірці рівня локальних дефектів підшипника: 25000÷31000;

Діапазон температур, що контролюється, °С: -10 ... +120;

Індикація: світлодіодна та рідкокристалічна;

Живлення: автономне або від зовнішнього блока живлення, напруга живлення: 5 В, потужність, що споживається: не більше 5 Вт;

Габаритні розміри: 205×80×50 мм;

Маса: не більше 0.4 кг.

Дослідження характеристик вібрацій, віброприскорень та вібропереміщень, виникаючих під час лезової обробки профілю кочення залізничних колісних пар та їх вплив на інтенсифікацію процесу різання потребує більш детального вивчення та аналізу під час проведення подальших наукових досліджень.

Список використаної літератури:

1. Струтинський, В. Б. Математичне моделювання металорізальних верстатів : монографія / В.Б. Струтинський, П. П. Мельничук. - Житомир : ЖІТІ, 2002. - 570 с.
2. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки : підручник / В.Б. Струтинський. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 612 с. – ISBN 966-7570-94-0.
3. Полупан І.І. Підвищення ефективності процесу відновлення профілю колісних пар збірними різцями//Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. -2016р.-213с.
4. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/59471/f0d7c85e26f44e3ba3f8b0d5b9fb9b0b/ISO-TR-17243-1-2014.pdf>
5. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/59471/f0d7c85e26f44e3ba3f8b0d5b9fb9b0b/ISO-TR-17243-2-2017.pdf>
6. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/66432/d72b853f6b574aefbe90c1fab3cd933d/ISO-TR-17243-3-2020.pdf>
7. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/74650/3f3d36bc617247d9b2a98e3731b27bee/ISO-TR-17243-3-2020.pdf>
8. <https://www.spminstrument.com/products-and-services/portable-instruments/>
9. <https://www.spminstrument.com/products-and-services/portable-instruments/leonova-diamond/>
10. <https://www.emerson.com/en-us/catalog/ams-a2140>
11. <https://tetra.kharkiv.com/podshipniki-uk-idp-07/>

Равлюк В.Г.¹, завідувач кафедри інженерії вагонів та якості продукції, д.т.н., проф.
Дерев'янчук Я.В.¹, аспірант кафедри інженерії вагонів та якості продукції
Дерев'янчук О.В.², доц. кафедри професійної та технологічної освіти і загальної фізики, к.фіз.-мат.н., доц.

¹Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків)
²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича (м. Чернівці)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ПНЕВМОЦИЛІНДРІ ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНОГО ГАЛЬМА ПАСАЖИРСЬКОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Вступ. Забезпечення ефективної та безпечної роботи пасажирського рухомого складу залізничного транспорту є одним із ключових завдань сучасної транспортної галузі. Важливу роль у цьому відіграють електропневматичні гальма, які забезпечують регулювання швидкості руху поїзда та його зупинку в різних умовах експлуатації. Надійність функціонування гальмової системи значною мірою залежить від ефективності роботи пневмоциліндра. Для підвищення ефективності дослідження робочих процесів у гальмових системах доцільним є використання математичного моделювання, яке дозволяє аналізувати динаміку процесів, прогнозувати поведінку системи та оптимізувати її параметри без проведення високовартісних експериментальних досліджень.

Викладення основного матеріалу. Головною умовою безпеки руху на АТ «Укрзалізниця» є забезпечення довговічності й надійності гальмового обладнання пасажирських поїздів, як одного з найбільш відповідальних вузлів. Для підвищення надійності гальм сучасного рухомого складу необхідно встановити режими роботи пневмоциліндра (рис. 1) при справних елементах гальмового обладнання.

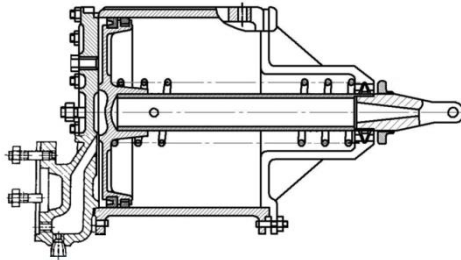


Рис. 1. Вид пневмоциліндра пасажирського вагона

Під час гальмування стиснене повітря подається в порожнину нагнітання та діє на поршень, що переміщується, стискає зворотну пружину та підвищує тиск у порожнині з її боку, що з'єднана з атмосферою. Сила зі штока передається через важільну передачу пасажирського вагона до колодок.

Під час розроблення математичної моделі пневмоциліндра електропневматичних гальм прийнято ряд припущень, зокрема: квазістаціонарність газодинамічних процесів, ізотермічний характер течії газу в трубопроводах, незмінність параметрів повітря в магістралі, а також нехтування витоками та теплообміном у порожнинах пневмоциліндра.

Математичну модель пневмоциліндра представлено системою диференціальних рівнянь, яка включає:

- рівняння руху виконавчого органу (поршня);
- рівняння зміни тиску в порожнині нагнітання;
- рівняння зміни тиску у порожнині з боку пружини.

Рівняння зміни тиску в порожнині нагнітання отримано на підставі першого закону термодинаміки з урахуванням підведеної енергії, зміни внутрішньої енергії газу та виконаної роботи. При цьому використано залежності, що описують ентальпію газу, витрату повітря, а також рівняння стану ідеального газу. Важливим є врахування змінного об'єму робочої порожнини, який залежить від координати переміщення поршня x .

$$\left. \begin{aligned}
 M \frac{d^2x}{dt^2} &= P_1 F_1 - P_2 F_2 - P_A (F_1 - F_2) - N, \\
 \frac{dp_1}{dt} &= \frac{kf \sqrt{R T_M}}{F_1 (x + x_{01}) \sqrt{\zeta_1}} \sqrt{P_M^2 - P_1^2} - \frac{k p_1}{x + x_{01}} \frac{dx}{dt}, \\
 \frac{dp_2}{dt} &= \frac{kf_2 \sqrt{R T_M}}{F_2 (S - x + x_{02}) \sqrt{\zeta_2}} \left(\frac{P_2}{P_M} \right)^{\frac{k-1}{k}} \sqrt{P_2^2 - P_A^2} + \frac{k P_2}{(S - x + x_{02})} \frac{dx}{dt}, \\
 \frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{dx}{dt} = x = 0, \text{ якщо } x \leq 0, \\
 \frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{dx}{dt} = 0, \text{ якщо } x \geq S.
 \end{aligned} \right\} (1)$$

де S – максимальне переміщення поршня, м; x – координата положення поршня від 0 до S , м; x_{01} – координата, що характеризує обсяг шкідливого простору з боку порожнини нагнітання, м; x_{02} – координата, що характеризує обсяг шкідливого простору порожнини з боку пружини, м; N – сила опору переміщенню поршня, Н; k – показник адиабати (коефіцієнт Пуассона); R – постійна газова, Дж/(кг·К); ρ – густина газу, кг/м³; T – абсолютна температура газу, К; P_1 – тиск у порожнині нагнітання, Па; P_2 – тиск у порожнині з боку пружини, Па; P_A – тиск на виході, Па; P_M – тиск живлення, Па; G – масова витрата газу, кг/с; f – площа прохідного перерізу, м²; ζ – коефіцієнт опору лінії, дроселів; M – маса рухомих частин, кг; F_1 – площа поршня у порожнині нагнітання, м²; F_2 – площа поршня у порожнині з боку пружини, м².

Аналогічно отримано рівняння зміни тиску у порожнині з боку пружини, яке враховує процес витікання газу, зміну внутрішньої енергії та роботу стискання. При цьому процеси в порожнині розглядаються як наближено ізотермічні або адиабатичні залежно від умов роботи.

На підставі розробленої математичної моделі створено програмну реалізацію у середовищі Mathcad, що дозволяє досліджувати перехідні процеси в пневмоприводі (рис. 2).

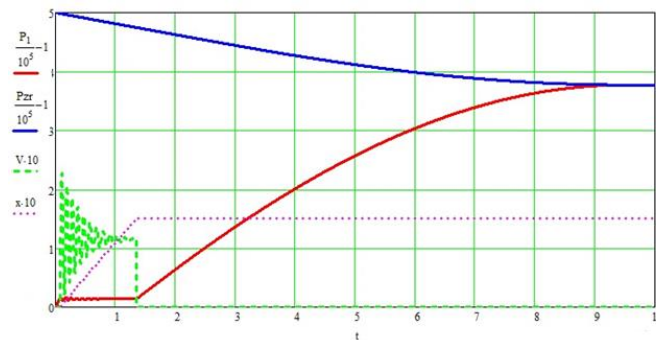


Рис. 2. Робота програми з розрахунку роботи пневмоциліндра при гальмуванні

Результати моделювання показують характер зміни тисків у пневмоциліндрі P_1 та запасному резервуарі P_2 , а також динаміку переміщення поршня V під час гальмування. Особливістю побудованої математичної моделі є врахування реальних обмежень руху поршня пневмоциліндра. Введено логічні умови, які обмежують координату переміщення поршня границями його ходу, що забезпечує фізичну адекватність моделі. Також враховано вплив сил опору, які включають корисне навантаження, сили тертя та демпфування.

Висновки. У результаті виконаних досліджень розроблено математичну модель пневмоциліндра електропневматичних гальм пасажирського рухомого складу, яка описує динаміку руху виконавчого органу та зміну параметрів робочого середовища в порожнинах приводу. Встановлено, що використання диференціальних рівнянь, отриманих на основі законів термодинаміки та газодинаміки, дозволяє адекватно відобразити фізичні процеси, що відбуваються у пневмоциліндрі. Врахування змінного об'єму порожнин, витрати газу та обмежень руху поршня забезпечує підвищення точності моделювання.

Розроблена модель може бути використана для дослідження режимів роботи гальмових систем, оцінювання їх ефективності, а також для вдосконалення конструкцій пневматичних елементів і алгоритмів керування електропневматичними гальмами.

Список використаної літератури:

1. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України: ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015: Затв. нак. Укрзалізниця від 28.10.1997. № 264-Ц. Київ : 2004. 146 с.
2. Вагони вантажні. Система технічного обслуговування та ремонту за технічним станом: СТП 04 – 010:2018: затв. нак. АТ «Укрзалізниця» від 08.08.2019 р. №519. 2018. 25 с.

Єфіменко Н.А., проф. кафедри
інформаційно-вимірювальних технологій, д.е.н., проф.
Єфіменко В.С., студент гр. ПМ - 143
Державний університет «Житомирська політехніка»

МЕХАНІЗМ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ НА МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Для підтвердження необхідного рівня якості більшість машинобудівних підприємств впроваджують систему управління якістю (СУЯ), основою якої, як відомо, є: процесний підхід, опис бізнес-процесів, системний аналіз. Спостерігається тенденція переходу від окремих критеріїв до критеріїв якості, які мають багатофакторний характер. Перехід до організації та виробництва на основі стандартів якості вимагає рішення великого числа завдань. Це завдання навчання, управління або менеджменту якості, контролю забезпечення якості та ін. Всі ці завдання в сучасних умовах повинні реалізовуватися на основі інформаційних технологій. Розібратися у всіх процесах і проаналізувати всю систему на предмет відповідності заданим вимогам можуть допомогти автоматизовані інформаційні системи (АІС) контролю якості, навчання, оцінки якості, побудовані на основі сучасних інформаційних технологій і математичних моделей.

Більшість бізнес-процесів будь-якого сучасного машинобудівного підприємства підлягають автоматизації та інформатизації. Засобом автоматизації та інформатизації є АІС, яка формується, а згодом еволюціонує, відповідно до вимог, що пред'являються до неї бізнесом, користувачами, а також законодавчої та нормативної середовищем [2].

Проблема полягає в тому, що в проектах спостерігається тенденція до переваги використання засобів управління проектами над засобами управління якістю, які в свою чергу будуть застосовуватись тільки на окремих етапах проекту. Для забезпечення якості великих проектів логічним є не тільки виділення і пріоритетне забезпечення якості найбільш критичних об'єктів, а й досягнення якості на всіх етапах життєвого циклу (ЖЦ) проекту, починаючи інтегрувати його з етапу планування проекту. Рішення подібних завдань вимагає застосування відповідних інформаційно-аналітичних систем інтегруючих засоби управління якістю, механізми управління проектами і багатоаспектний аналіз даних.

Слід зазначити, що в сучасних умовах ринкового середовища, одним із перспективних шляхів створення результативної АІС інтегрованої у СУЯ є цілеспрямований вибір структурних елементів конфігурації системи. Очевидно, такий підхід повинен базуватися на встановленні аналітичних залежностей та розробки на їх основі методології формалізованого проектування моделі АІС. Структурний аналіз стандартів показує, що склад їх вимог за багатьма параметрами є ідентичним та має однакові підходи в сфері опису нормативних складових, що і є однією із передумов можливості їх впровадження у виробничу систему машинобудівних підприємств для подальшої оптимізації виробничої системи, враховуючи специфіку виробництва та управління. У цих умовах завдання досягнення якості виводять на новий рівень застосування інформаційних технологій у сфері управління якістю. Для забезпечення необхідного рівня управління якістю необхідні інформаційні системи, здатні стати надійним засобом допомоги фахівцям як в області управління проектами, так і в області управління якістю на всіх етапах ЖЦ проекту.

Для вирішення проблеми забезпечення якості при управлінні проектами розробки та впровадження інформаційних технологій на всіх етапах ЖЦ необхідно провести аналіз засобів управління якістю та засобів управління проектами, розробити методику та інформаційно-аналітичну систему, здатну інтегрувати засоби управління якістю в засоби управління проектами. Відповідно до загальноприйнятої методології ЮМ Rational Unified Process, яка регламентує розробку АІС, управління вимогами (УВ) до АІС є одним з основних процесів, що забезпечують якість розробки АІС. Мета УВ полягає в тому, щоб гарантувати документування, перевірку і задоволеність потреб замовників від машинобудівного підприємства. Оскільки вимога має будь-які парні йому «відповіді» (результати валідації, реалізації, тестування), то актуально повторне використання вимоги з одного великого типового проекту в одному або декількох інших проектах, і, як наслідок, використання результатів реалізації цієї вимоги [3].

Слід враховувати, що АІС – це досить складний і динамічний організм. Вона буде забезпечувати бажаний результат тільки в тому випадку, якщо визначені не тільки функції і взаємозв'язки кожного її елемента, але і відповідальні виконавці. Визначальну роль в реалізації системи відіграє створення гнучкого механізму управління і постійне вдосконалення елементів системи. Потребується створення методики оцінки якості частин проекту і розробка заходів по скороченню числа проектних операцій в процесі розробки проекту за рахунок застосування уніфікованих рішень. Також необхідна система технологічного забезпечення процесу проектування. Номенклатура показників якості на кожному етапі проектування

залежить від складу і властивостей виконуваних операцій, змісту техніко-економічної та організаційної інформації, характеру і складності прийнятих рішень. Для вирішення завдання підвищення якості управління процесом розробки, впровадження та валідації АІС на машинобудівному підприємстві був виконаний структурно-функціональний аналіз даного процесу в проектній організації. З метою вдосконалення проектної процесу відповідно до концепції загального управління якістю необхідно розробити методику проведення процесу валідації АІС, сутність якої полягає в оцінці кожного виду невідповідності з точки зору цілісності, безпеки даних і впливу на якість АІС в цілому.

Повсюдне використання інформаційних технологій поряд з усвідомленням універсальності принципів системного управління процесами менеджерами і розробниками інформаційних систем знайшло відображення в зближенні методів менеджменту та інформаційних технологій. На думку, викладених в [2], найближчим часом слід очікувати появи і повсюдного впровадження нових концепцій управління підприємством, заснованих на синергії менеджменту і новітніх досягнень комп'ютерної індустрії для реалізації принципів TQM розроблені методи інжинірингу якості, що включають в себе широкий набір технологій, що застосовуються на різних стадіях ЖЦ продукції і процесів. У сучасних умовах ефективне використання цих методів неможливо без широкого використання інформаційних технологій. Все більше застосування в забезпеченні якості в організації знаходять як АІС, що автоматизує рутинні процеси, так і системи, що використовують наукомісткі технології штучного інтелекту, нейронних мереж і ін. Застосування АІС для інформаційного забезпечення діяльності підприємства (в т.ч. на основі СУЯ) дозволяє реалізувати принципи TQM.

Підвищення ролі інформації в сучасних умовах інформаційного суспільства інтенсифікація інформаційного обміну поряд з ростом наукоємності та технологічної складності процесів організації, розвитку сертифікації продукції, послуг і процесів [46] обумовлюють високі вимоги до якості АІС організації. Під якістю АІС необхідно розуміти ступінь відповідності властивих характеристик АІС вимогам організації і ключових користувачів.

Структурно-інформаційні системи складаються з наступних компонентів (підсистем): технічного, математичного, програмного, інформаційного, методичного, лінгвістичного, ергономічного, правового та організаційного забезпечення. Основна увага в області АІС приділяється теоретичним і практичним проблемам розробки технічного, математичного та програмного забезпечення.

Порядок здійснення ІТ-проектів аналогічний проектам впровадження TQM і технологій реорганізації (реінжинірингу) діяльності організації і часто невіддільний від них, тому перспективним напрямком забезпечення якості процесів на підприємстві є розробка АІС, орієнтованих на процес, що функціонують в рамках СУЯ, а також розробка АІС за рахунок ДСТУ ISO 9000:2015. У цьому випадку підвищується ефективність застосування АІС і СУЯ за рахунок більш точного відображення предметної області, раціонального використання фахівців в області СУЯ і інформаційних технологій і економії всіх видів ресурсів. Проблеми створення і експлуатації АІС багато в чому схожі з проблемами, що виникають при впровадженні СУЯ: складність вибору концепції АІС (цілі, завдання, варіант створення, технології); відступ від плану створення АІС, розподілу повноважень; коректність відображення інформації в АІС; формальний підхід до впровадження. нерациональне організаційне інформаційне забезпечення створення АІС; перевищення запланованого ресурсного забезпечення проекту; неузгодженість дій проектної групи; опір нововведенням певної частини персоналу; недостатня увага, що приділяється навчанню персоналу; відсутність необхідної підтримки і супроводу після створення; очікування миттєвого кардинального поліпшення діяльності машинобудівного підприємства.

Висновки. З вище наведеного можна зробити висновок, що своєчасне впровадження АІС у систему управління якістю на машинобудівному підприємстві відповідно до вимог міжнародного стандарту ДСТУ ISO 9001:2015 на сьогоднішній день має орієнтуватися на специфіку вітчизняних машинобудівних підприємств для надання їм гнучкості управління при впливі швидкозмінних зовнішніх та внутрішніх факторів.

Список використаної літератури:

1. Єфіменко Н. А. Дослідження особливостей контролю якості виготовлення машинобудівної продукції / В.С. Єфіменко, О. В. Банзак, Г. В. Банзак, О. І. Лещенко / Матеріали V науково-практичної конференції «Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку» / Луцький національний технічний університет. – 2024 – С. 31 – 32.
2. Єфіменко Н. А. Ключові елементи методики планування валідації, для забезпечення та контролю якості проекту розробки та впровадження автоматизованої інформаційної системи / Н. А. Єфіменко, С. В. Медушевський // Nauka I Studia. Серія: Технічні науки. – 2017. – № 19 – С. 6 – 12.
3. Yefimenko N. Simulation of maintenance process "On condition" with adaptive change in the period of control / Н. Banzak, О. Banzak / The 7 th International scientific and practical conference "Science, innovations and education: problems and prospects"(February 9-11, 2022) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2022. – P. 171 – 175.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТОРЦЕВИХ ФРЕЗ, ЩО МІСТЯТЬ ЦИЛІНДРИЧНІ РІЗАЛЬНІ ВСТАВКИ

Питання підвищення надійності збірних торцевих фрез із циліндричними різальними вставками залишається актуальним, оскільки від цього залежить безпека та ефективність інструменту. Під поняттям «надійність» розуміють комплексну характеристику, яка не кількісно відображає безвідмовність, ремонтпридатність та можливість технічного обслуговування. Водночас надійність визначають як здатність об'єкта зберігати задані параметри роботи в установлених умовах протягом визначеного часу. У роботі [1] запропоновано метод оцінки надійності якості обробки з урахуванням різноманітних відмов. Цей підхід дає змогу моделювати та обчислювати надійність обробки під час фрезерування за різних режимів різання. В дослідженні [2] проаналізовано конструкції збірних торцевих фрез із спеціальними стопорними пристроями, які запобігають випадінню різальних вставок з отворів корпусу через послаблення кріпильних гвинтів.

Аналіз факторів, що погіршують надійність збірних торцевих фрез, розкриває їхню часткову структуру (рис. 1). Конструктивні недоліки (наприклад, відсутність стопоріння вставок чи недостатня жорсткість фрези) спричиняють близько 40% випадків саморозкріплення затискних гвинтів. Технологічні помилки на етапі виробництва (недостатня твердість матеріалів, порушення точності та шорсткості контактних поверхонь тощо) і складання (неточність розмірних ланцюгів, надмірні люфти, слабе затискання) можна звести до 5% за рахунок контролю.

Найсуттєвіші та найменш керовані фактори – зовнішні впливи (сили різання, вібрація системи, відцентрові сили від обертання), які становлять до 55% причин. За інтенсивних умов фрезерування (великі глибини різання і подачі, важкооброблювані матеріали заготовок, високі оберти інструменту) розробник мусить доповнювати базове кріплення деталей додатковими стопорами, щоб мінімізувати ризик розкріплення чи втрати складових елементів торцевої фрези.

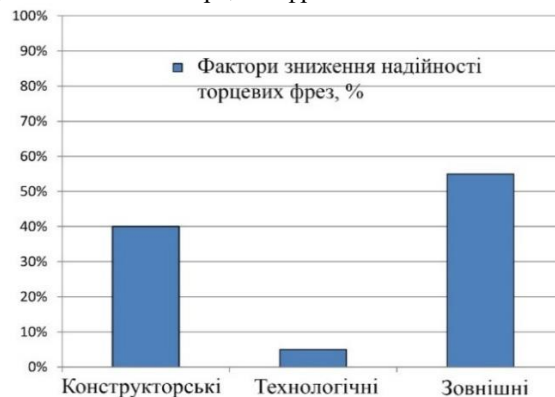


Рис. 1. Діаграма розподілу факторів зниження надійності торцевих фрез

Прикладами запобіжних засобів, що підвищують надійність фрез, можуть бути:

- додаткові стопорні гвинти, що вкручуються у нарізні отвори зверху кріпильних гвинтів;
- виконання на торці одного з кріпильних гвинтів співвісної циліндричної ділянки, що контактує з відповідним радіальним отвором на різальній вставці;
- виконання кінцевого отвору, вісь якого перпендикулярна осі різальної вставки.

Таким чином, впровадження додаткових стопорних елементів у конструкцію інструменту суттєво посилює надійність фіксації циліндричних вставок у корпусі фрези.

Список використаної літератури:

1. Miao H., Li C., Liu C., Wang C., Zhang X., Sun W. Machined surface prediction and reliability analysis in peripheral milling operations // International Journal of Mechanical Sciences. – 2024. – Vol. 272. – P. 109-193. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109193>
2. Орлов, Р.О. Шляхи підвищення надійності збірних торцевих фрез із циліндричними різальними вставками / Р.О. Орлов, П.В. Кушніров, А.В. Євтухов, І.М. Дегтярьов, А.П. Лизогуб // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, випуск 3 (61), 2025. – С. 95-101. <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.3.14>

ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПРОЕКТУВАННІ ДОРІЖНИХ МАШИН

У роботі розглянуто сучасні підходи до використання комп'ютерних технологій у машинобудуванні, зокрема під час проектування дорожніх машин. Проаналізовано переваги цифрового моделювання, автоматизованих систем проектування та інтелектуальних методів оптимізації конструкцій. Особливу увагу приділено використанню цифрових двійників і технологій штучного інтелекту для підвищення ефективності експлуатації техніки.

Сучасне машинобудування неможливо уявити без застосування комп'ютерних технологій. Особливо це актуально для проектування дорожніх машин, які мають відповідати високим вимогам надійності, ефективності та економічності. Використання цифрових інструментів дозволяє суттєво скоротити час розробки та підвищити якість кінцевого продукту.

Одним із ключових напрямів розвитку є впровадження систем автоматизованого проектування (CAD). Такі системи дозволяють створювати точні тривимірні моделі дорожніх машин та їх вузлів, проводити аналіз міцності, динаміки та зносостійкості елементів конструкції. Завдяки цьому розробники можуть виявляти потенційні дефекти ще етапі проектування.

Комп'ютерне моделювання також активно використовують для аналізу робочих процесів дорожніх машин. Наприклад, моделювання взаємодії робочих органів із ґрунтом дозволяє оптимізувати конструкцію ковзів, ножів та інших елементів (1). Це особливо важливо для підвищення продуктивності техніки та зниження енерговитрат.

Додатково застосовують методи чисельного аналізу, такі як метод кінцевих елементів. Вони дозволяють проводити розрахунки напружено деформованого стану конструкцій, що забезпечує підвищення надійності машин (2). У разі експлуатації дорожня техніка піддається значним навантаженням, тому точність розрахунків грає критичну роль.

Сучасні програмні комплекси дозволяють виконувати оптимізацію конструкцій за різними критеріями: мінімізації маси; підвищення жорсткості; зменшення витрат матеріалів.

Оптимізаційні алгоритми допомагають знаходити найбільш ефективні рішення без необхідності створення великої кількості фізичних прототипів.

Сучасні тенденції включають інтеграцію технологій штучного інтелекту. Алгоритми машинного навчання використовуються для прогнозування відмов, оптимізації режимів роботи та підвищення ефективності експлуатації техніки. Це особливо актуально для великогабаритних дорожніх машин, що працюють у складних умовах.

Ще одним важливим напрямом є використання цифрових двійників. Така технологія дозволяє створити віртуальну копію машини, яка повністю відбиває її стан у реальному часі. Це дає можливість проводити діагностику, прогнозувати зношування та своєчасно проводити технічне обслуговування (3).

Подальший розвиток комп'ютерних технологій у машинобудуванні пов'язаний із: впровадженням хмарних обчислень; використанням великих даних (Big Data); розвитком автономної техніки; екологізацією дорожніх машин.

Висновки. Таким чином, застосування комп'ютерних технологій у машинобудуванні суттєво розширює можливості проектування дорожніх машин. Використання CAD-систем, методів чисельного аналізу та інтелектуальних алгоритмів дозволяє підвищити надійність, знизити витрати та прискорити процес розробки. У перспективі очікується подальший розвиток цифрових технологій, що призведе до створення більш ефективної та екологічної дорожньої техніки.

Список використаної літератури:

1. Іваненко О.В. Комп'ютерне моделювання в машинобудуванні // Вісник машинобудування. – 2021. – №3. – С. 45–50.
2. Петренко М.С. Методи кінцевих елементів у проектуванні техніки. – Київ: Техніка, 2020. – 210 с.
3. Сидоренко Л.Г. Цифрові технології в інженерії дорожніх машин // Сучасні технології. – 2022. – №1. – С. 12–18.

Васильчук К.М., студ., гр. ПМ-143, ФКІТМР
Данилюк Т.М., студ., гр. ПМ-143, ФКІТМР
Коваль Б.С., студ., гр. ПМ-143, ФКІТМР
Ночвай В.М., к.т.н., доц.
Полонський Л.Г., д.т.н., проф.
Державний університет «Житомирська політехніка»

МОДЕРНІЗАЦІЯ СУПОРТА УСТАНОВКИ КНПА-1,2М

В лабораторії газотермічних покриттів та зварювання Державного університету «Житомирська політехніка» розроблено та виготовлено експериментально-дослідну установку КНПА-1,2М, призначену для механізованого напилення покриттів на плоскі деталі та деталі типу «вал». Задачі, які вирішуються за допомогою даної установки: закріплення деталі в центрах установки; обертання деталі із заданою швидкістю; закріплення апарата напилення покриттів та повздовжнє переміщення його із заданою швидкістю; відведення продуктів згоряння газів та пилу із робочої зони. Основою установки є камера для напилення, в якій встановлені: передня та задня бабки, в центрах яких закріплюють напилювану деталь; робочий стіл для розташування плоских деталей; привід обертання деталі; супорт для закріплення апарата напилення та привід для поздовжнього переміщення; пульт керування.

Конструкція супорта установки дає можливість закріплювати на ньому газополуменеві пальники для напилення покриттів мод. ГАЛ-6 [1]. З метою розширення функціональних можливостей установки виконано модернізацію її супорта: розроблено комплект пристосувань для закріплення на супорті установки різних робочих інструментів – газополуменевих пальників мод. ГАЛ-6, пістолетів-розпилювачів установок мод. Л5405А, мод. УГПТ-П, мод. УГПТ, електродугових металізаторів мод. ЕМ-14, газових металізаторів мод. МГИ-4, плазмотронів установок плазмового напилення покриттів мод. УПУ-8М, «Київ-7» тощо [2].

Напилювану деталь типу «вал» закріплюють у трикулачковому патроні горизонтального механізму обертання деталі і фіксують з іншої сторони за допомогою розробленого пристрою з обертним центром. Апарат для напилення закріплюють на супорті, переміщення якого паралельне осі обертання деталі забезпечується спеціальним приводом. Газовий струмінь пістолета-розпилювача знаходиться у горизонтальному положенні. При нанесенні покриттів на плоскі деталі останні розміщують на робочому столі установки. Апарат для напилення за допомогою розробленого пристосування закріплюють на супорті установки. Газовий струмінь при цьому знаходиться у вертикальному положенні.

Лабораторні випробування модернізованої установки КНПА-1,2М показали, що переміщення супорта з апаратом напилення із заданою швидкістю забезпечує отримання напиленого покриття однакової товщини по всій поверхні деталі (рис. 1).



Рис. 1. Палець з напиленим покриттям

Модернізована установка КНПА-1,2М в лабораторії газотермічних покриттів та зварювання використовується для нанесення багатошарових покриттів в напівавтоматичному режимі при проведенні наукових досліджень і у навчальному процесі.

Список використаної літератури:

1. Ночвай В.М. Модернізація установки для механізованого напилення газополуменевих покриттів / В. М. Ночвай, О. А. Громовий Л. Г. Полонський // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнарод. наук.-техн. семінару, 26–27 березня 2024 р. – К.: АТМ України, 2024. – С. 111–113.
2. Береговець Б.С. Розробка пристосувань для кріплення робочих інструментів на супорті установки КНПА-1,2М / Б. С. Береговець, О. О. Данюк, М. І. Коваленко, В. М. Ночвай, Л. Г. Полонський // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті : Матеріали 26-го Міжнарод. наук.-техн. семін., 31 березня – 02 квітня 2026 р., м. Київ . – К.: АТМ України, 2026. – С. 16–17.

МЕТОДИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І РОЗРАХУНКІВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ШПИНДЕЛЬНИХ ГІДРОСТАТИЧНИХ ПІДШИПНИКІВ

Підвищення точності та продуктивності металообробних верстатів напряму залежить від динамічних характеристик шпиндельних вузлів. Гідростатичні підшипники забезпечують високу демпфувальну здатність, довговічність, жорсткість та точність позиціонування, що робить їх незамінними у прецизійному машинобудуванні.

В основі теоретичних досліджень підшипників рідинного ковзання лежить метод математичного моделювання, який будується на математичній моделі заснованій на рівняннях Нав'є-Стокса, які є фундаментом механіки рідин та газів та являють собою другий закон Ньютона, адаптований для рідини:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right) = -\nabla p + \eta \Delta v + \left(\zeta + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \operatorname{div} v, \quad (1)$$

де v – поле швидкості рідини, ρ – густина, p – тиск, η – коефіцієнт динамічної в'язкості, ζ – друга в'язкість, ∇ – оператор Набла, Δ – оператор Лапласа.

Система диференціальних рівнянь у частинних похідних Нав'є-Стокса описує повну картину руху рідини, враховуючи інерцію, в'язкість, зміну тиску та зовнішні сили та є складною з математичної точки зору. Тому дане рівняння, в їх класичному вигляді, не використовуються для розрахунку підшипників рідинного ковзання. В інженерній практиці, як правило, використовується спрощений алгоритм, який базується на рівнянні Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) + R^2 \frac{\partial}{\partial z} \left(h^3 \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -6\mu\omega R^2 \frac{\partial h}{\partial \varphi}, \quad (2)$$

де R – радіус сполучених поверхонь, φ – кутова координата, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, ω – швидкість у напрямку φ , p – тиск в кармані опори, z – лінійна координата, h – товщина шару робочої рідини, μ – в'язкість робочої рідини.

Рівняння Рейнольдса – це, по суті, спрощення математичної моделі Нав'є-Стокса, виведене саме для тонких шарів мастильного матеріалу. Воно перетворює систему складних 3D-рівнянь на одне диференціальне рівняння відносно тиску. Товщина масляного шару в підшипнику мізерна порівняно з його довжиною чи діаметром. Це дозволяє знехтувати зміною тиску по товщині шару та інерційними силами. Для розрахунку несучої здатності та витрати мастила ефекти інерції, які враховують залежність Нав'є-Стокса, настільки малі, що практично не впливають на результат.

При цьому рівняння Рейнольдса приводиться до безрозмірного вигляду (2), що робить математичну модель більш універсальною та забезпечує можливість дослідження геометрично подібних областей різних розмірів та дозволяє масштабувати результат під будь-яку в'язкість чи швидкість.

Такий підхід дає можливість розрахувати ключові експлуатаційні параметри шпиндельних гідростатичних підшипників – несучу здатність, витрату мастила, гідродинамічну жорсткість, коефіцієнт демпфування, втрати на тертя, розподіл тиску в масляному матеріалі, температурний режим роботи мастила.

Слід зазначити, що традиційні аналітичні методи для спрощених моделей поступаються чисельному методу скінчених різниць та методу скінчених елементів, якщо потрібен високошвидкісний шпиндель або складна форма кишень. Комплексне поєднання методу скінчених елементів з тепловими та пружними моделями дозволяє ще на етапі проектування прогнозувати поведінку шпинделя з точністю до 90-95%. Перспективним напрямком є розробка систем інтелектуального адаптивного керування тиском у кишнях для компенсації робочих похибок у реальному часі. Дослідження активного керування тиском за допомогою п'єзоелектричних регуляторів або мембранних компенсаторів дозволяє підвищувати жорсткість шпинделів до високого рівня

Список використаної літератури:

1. Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Міхєєв А.О., Четвержук Т.І. Управління точністю траєкторних переміщень виконавчих органів верстата на гідростатичних підшипниках. «Перспективні технології та прилади»: Збірник наукових праць. Луцьк: ЛНТУ, 2024. Вип. 25. – С. 64-72. DOI: <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-10>, ISSN: 2313-5352

2. Федориненко Д. Ю. Шпиндельні гідростатичні підшипники: монографія / Д. Ю. Федориненко, С. П. Сапон. – Чернігів : ЧНТУ, 2016. – 403 с.

Красота А.М., аспірант
Шепеленко І.В., д.т.н., проф.
Красота М.В., к.т.н., доц.

Центральноукраїнський національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІНІШНОЇ АНТИФРИКЦІЙНОЇ БЕЗАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ АВТОМОБІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ

Підвищення надійності та довговічності машин є однією з основних проблем сучасного машинобудування. Аналіз літературних джерел [1 - 4] показує, що головною причиною виходу з ладу машин є зношування деталей рухомих з'єднань під впливом сил тертя. Зважаючи на це, важливого значення отримує підвищення зносостійкості деталей технологічними методами, що визначають характеристики робочих поверхонь.

Серед технологічних методів підвищення зносостійкості поверхонь досить широко застосовується метод фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО). За даною технологією сталеві деталі для запобігання схоплюванню, покращення припрацювання та підвищення протизадирних властивостей покривають тонким шаром міді або її сплаву [5,6].

Моделювання умов роботи кулачків розподільних валів при наявності на їх робочих поверхнях антифрикційного покриття [7] дозволило стверджувати про ефективність такої технології.

Обґрунтування схеми ФАБО для обробки профільної частини кулачків розподільних валів дало змогу запропонувати конструкцію пристрою для її здійснення [8].

Якість антифрикційних покриттів, що отримуються в результаті ФАБО, значною мірою зумовлена режимами обробки, які визначають умови взаємодії інструмента з деталлю. У роботі [5] досліджено вплив режимів ФАБО на суцільність та мікротвердість покриттів; зносостійкість, шорсткість та геометрію поверхні. Однак отримані результати мають відношення тільки до конкретної схеми нанесення антифрикційних покриттів, і кожна нова технологія ФАБО вимагає проведення окремих досліджень щодо обрання режимів обробки.

Отже, встановлення оптимальних параметрів процесу ФАБО з урахуванням особливостей обраної схеми нанесення антифрикційних покриттів є актуальним та важливим завданням, що потребує проведення спеціальних досліджень.

Дослідження, представлені в даній роботі дозволили встановити вплив технологічних параметрів процесу ФАБО при обробці кулачків розподільних валів на якість антифрикційних покриттів та отримання їх раціональних значень.

Для попередніх досліджень використовували зразки, виготовлені із сталі 18ХГТ, що відповідає матеріалу деталі.

В якості вхідних параметрів розглянуто режими ФАБО при обробці кулачків: тиск P , МПа, з яким інструмент діє на поверхню деталі; швидкість ковзання інструменту по поверхні, V_k , м/с; величина поздовжньої подачі інструменту s , мм/об. Розроблений склад технологічного середовища та параметр шорсткості підтримували постійним.

З метою отримання якісних покриттів, що формуються в результаті ФАБО, в роботі визначено критерії оптимізації, якими обрано показники, що характеризують якість нанесених антифрикційних покриттів, зокрема суцільність та відносну шорсткість поверхні, а також експлуатаційний показник – інтенсивність зношування поверхні. За параметри оптимізації прийнято основні режими ФАБО: тиск, швидкість ковзання та поздовжня подача інструменту. Експериментально визначено вплив технологічних параметрів процесу нанесення антифрикційних покриттів на їх якість.

Оптимізація технологічних параметрів ФАБО здійснювалася з використанням математичних методів планування експерименту.

Отримані результати дали можливість визначити оптимальні режими, при яких інтенсивність зношування буде мінімальною: тиск інструмента – $P=41,8$ МПа; швидкість ковзання інструмента – $V_k=1,68$ м/с; подача інструмента – $s=0,21$ мм/об.

При вказаних оптимальних параметрах прогнозовані значення вихідних змінних були отримані відповідно:

- суцільність покриття $S_p/S=0,92 \dots 1,0$;
- інтенсивність зношування $I=0,67 \cdot 10^{-4} \dots 0,73 \cdot 10^{-4}$ г/м;
- відносна шорсткість $R_a/R_{a \text{вих}}=0,45 \dots 0,53$.

Встановлено, що при підвищенні тиску до 70 МПа досягається максимальне значення суцільності

покриття та мінімальна відносна шорсткість. Подальше збільшення тиску майже не приводить до покращення вказаних параметрів. При підвищенні тиску до 60 МПа відбувається зниження інтенсивності зношування, однак при подальшому збільшенні тиску інтенсивність зношування має тенденцію до збільшення. Цей факт може бути пояснений розміщенням (перенаклепу) поверхневих шарів та вириванням часток покриття внаслідок високої силової дії інструменту.

При значеннях швидкості ковзання близько 2,0 м/с відбувається збільшення суцільності покриття до максимальних значень, подальше збільшення швидкості ковзання негативно впливає на суцільність поверхні через недостатнє заповнення западин мікрорельєфу та неякісного утворення антифрикційного покриття.

При збільшенні швидкості ковзання інструменту до значень 2,0 м/с спостерігається зниження величини відносної шорсткості обробленої поверхні, що вказує на якісне заповнення западин антифрикційним матеріалом, а також змінання верхівок нерівностей поверхневого шару, при подальшому збільшенні швидкості значення відносної шорсткості майже не змінюються.

Також, при швидкостях до 2,0 м/с інтенсивність зношування поверхні спадає, при більших значеннях спостерігається її підвищення. Цей факт можливо пояснити гіршим формоутворенням покриття на високих швидкостях.

При величині подачі до значень 0,2 мм/об суцільність поверхні майже не змінюється, однак при більших значеннях спостерігається її зниження, що пояснюється недостатнім заповненням антифрикційним матеріалом западин нерівностей поверхні.

Також, при значеннях подачі до 0,2 мм/об інтенсивність зношування дещо знижується. Подальше збільшення величини подачі негативно впливає на інтенсивність зношування зразка через значне зниження якості покриття. Слід відмітити, що підвищення подачі у всьому діапазоні негативно позначається на відносній шорсткості, отже при обробці слід дотримуватися її мінімальних значень.

Таким чином, встановлено оптимальні варіанти значень технологічних факторів, при яких отримуються якісні та експлуатаційні характеристики антифрикційних покриттів. Визначені раціональні значення режиму нанесення покриттів та геометричних параметрів вихідної поверхні.

Список використаної літератури:

1. Chernovol M., Shepelenko I., Budar Mohamed R.F. Selection of a processing medium for the finishing antifriction nonabrasive treatment/ M. Chernovol, I. Shepelenko, R.F. Budar Mohamed //Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. 2015. – № 28. С. 19 – 23.
2. Косіюк М.М., Костюк С.А., Костюк М.А. Технологічне забезпечення нанесення антифрикційного покриття на неповні сферичні поверхні фрикційно-механічним способом/ М.М. Косіюк, С.А. Костюк, М.А. Костюк //Вісник Хмельницького національного університету, 2018. №4. с. 39 – 43.
3. Шепеленко І.В. Зміна шорсткості поверхні при нанесенні антифрикційних покриттів/ І.В. Шепеленко, А.М. Кириченко, С.О.Магопець, [та ін.]//Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 2022 вип. 52. С. 156–165. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\)](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39)). (дата звернення 02.11.2023.)
4. Дідур В.А., Мушкевич О.І. Технологія фрикційного латунювання переривчастої поверхні золотника гідророзподільника/ В.А. Дідур, О.І. Мушкевич // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки. 2015. - Вип. 15, т. 4. - С. 3 – 10.
5. Красота А.М., Шепеленко І.В., Красота М.В., Осін Р.А. Обґрунтування ефективності та класифікація компонентів технологічних середовищ для фінішної антифрикційної безабразивної обробки деталей машин/ А.М. Красота, І.В. Шепеленко, М.В. Красота, Р.А.Осін//Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. - 2024. - Вип. 10(41), ч. II. С. 104 – 112.
6. Косіюк М.М., Костюк С.А., Костюк М.А. Технологічне забезпечення нанесення антифрикційного покриття на неповні сферичні поверхні фрикційно-механічним способом/ М.М. Косіюк, С.А. Костюк, М.А. Костюк //Вісник Хмельницького національного університету, 2018. №4. с. 39 – 43.
7. Шепеленко І. В., Красота А. М., Красота М. В. Зміна напружено-деформованого стану робочої поверхні деталі з антифрикційним покриттям. Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2025. Вип. 11(42), ч. I – с. 179-189. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.179-189](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.179-189)
8. Шепеленко І.В., Красота А.М., Гуцул В.І., Красота М.В. Обґрунтування конструкції пристрою для обробки кулачків розподільних валів фрикційно-механічним методом // Збірник наукових праць. Науковий вісник. Технічні науки. №11 (42) II. – Кропивницький, 2025. С.169–176. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.169-176](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.169-176)

ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ

Аддитивні технології дедалі ширше застосовуються у машинобудуванні, приладобудуванні, архітектурному макетуванні, прототипуванні, виробництві оснащення, функціональних деталей і допоміжних елементів технологічного обладнання. Особливий інтерес становить виготовлення габаритних деталей методом 3D-друку, оскільки це дає змогу скоротити витрати матеріалу, зменшити кількість технологічних операцій та виготовляти вироби складної форми без застосування традиційного формоутворювального інструменту. У останніх роботах [1, 2] великоформатне аддитивне виробництво розглядається як перспективний напрям виготовлення складних і великих геометричних об'єктів із потенційним зменшенням матеріальних та енергетичних витрат.

Водночас збільшення габаритів друкованої деталі істотно ускладнює забезпечення її якості [3]. Для технологій FDM/FFF характерним є поширене нанесення розплавленого полімерного матеріалу, який після виходу з сопла охолоджується, твердне і зазнає усадки. Чим більші розміри деталі, тим складніше забезпечити рівномірність температурного поля по всій площі виробу. Унаслідок цього виникають внутрішні напруження, деформації, викривлення кутів, відрив країв від платформи, порушення розмірної точності та погіршення зовнішнього вигляду виробу. Проблеми короблення, усадки, міжшарової міцності та розмірної точності є типовим обмеженням FDM-друку, особливо для великих деталей і матеріалів на основі ABS, PC, PETG, поліамідів та інших термопластів із помітною термічною усадкою.

Згідно робіт [4, 5], особливо гостро ця проблема проявляється під час друку довгих, широких або плоских деталей, коли площа контакту першого шару з робочою платформою є значною, а краї виробу охолоджуються швидше, ніж центральна частина. У результаті між шарами виникають різні температурні деформації, що призводить до накопичення залишкових напружень. Вивчення термічних і напружено-деформованих процесів у FDM-друці підтверджують, що температурне поле та термічні напруження безпосередньо впливають на формування короблення деталі.

Тому актуальною задачею є розроблення простих, технічно доступних і економічно доцільних способів підвищення якості 3D-друку габаритних деталей. Одним із таких способів може бути локальний або зональний підігрів основи гарячим повітрям, який дає змогу підтримувати нижні шари деталі в більш стабільному температурному режимі та зменшувати різницю температур між платформою, надрукованим матеріалом і навколишнім середовищем.

Під якістю виготовлення габаритної деталі [5] у цьому випадку розуміють сукупність таких показників: відповідність заданим геометричним розмірам, мінімальне короблення, надійне зчеплення першого шару з платформою, відсутність відшарування між шарами (деламінації), стабільність форми після охолодження, прийнятна шорсткість поверхні та повторюваність результатів друку.

Покращення якості виготовлення габаритних деталей методом 3D-друку потребує комплексного підходу, оскільки дефекти формуються під впливом декількох взаємопов'язаних чинників: температури сопла, температури платформи, швидкості друку, висоти шару, типу матеріалу, заповнення, орієнтації деталі на платформі, наявності охолодження та умов навколишнього середовища.

Одним із найважливіших етапів є правильне формування першого шару. Саме перший шар забезпечує зв'язок між деталлю і робочою поверхнею, тому від його якості залежить стабільність усього подальшого процесу друку. Якщо перший шар недостатньо прогрітий або має слабе зчеплення з платформою, краї деталі можуть поступово підніматися, що призводить до короблення. Для невеликих деталей таке явище може бути незначним, однак для габаритних виробів навіть невелике підняття країв здатне спричинити значну похибку форми.

Традиційним способом зменшення короблення є використання підігрівної платформи. Проте під час друку великих деталей звичайного підігріву знизу може бути недостатньо. Це пояснюється тим, що тепло розподіляється нерівномірно, особливо на краях платформи, а верхні та бічні ділянки деталі інтенсивно охолоджуються повітрям. Тому доцільним є застосування додаткового підігріву гарячим повітрям, спрямованим у зону основи деталі.

Технологічно система підігріву гарячим повітрям (рис. 1) може складатися з нагрівального елемента, вентилятора, повітряного каналу, сопла або розподільного колектору, датчиків температури та блока керування. Гаряче повітря доцільно подавати не безпосередньо на сопло екструдера, а в зону нижніх шарів деталі або на ділянку контакту деталі з платформою. Це дає змогу підтримувати стабільніші умови формування основи виробу без надмірного перегріву свіжонанесенного матеріалу.

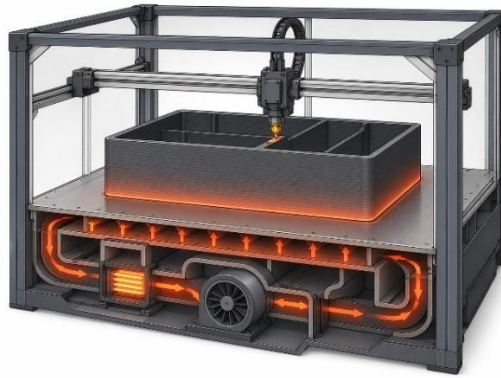


Рис. 1. Система підігріву гарячим повітрям зони основи деталі.

Особливо ефективним може бути зональний підігрів країв платформи, оскільки саме крайові ділянки найчастіше охолоджуються швидше й стають джерелом деформацій. Для довгих деталей доцільно застосовувати направлені потоки гарячого повітря вздовж периметра виробу. Для широких плоских деталей можна використовувати рівномірний розподіл потоку під платформою або вздовж нижньої частини камери друку.

Важливим є правильний вибір температурного режиму. Температура гарячого повітря має бути достатньою для зменшення температурного градієнта, але не повинна спричинити перегрів, розм'якшення або втрату форми нижніх шарів. Для PLA температура підігріву повинна бути нижчою, оскільки цей матеріал має відносно низьку температуру розм'якшення. Для ABS, PETG, PC або поліамідних матеріалів допустимий вищий температурний рівень, оскільки ці матеріали сильніше схильні до усадки та короблення. Слід враховувати, що надмірне або неконтрольоване нагрівання може мати й негативні наслідки: погіршення точності через локальне розм'якшення матеріалу, нерівномірну зміну розмірів, погіршення якості поверхні або виникнення внутрішніх дефектів. Тому система підігріву повинна працювати в керованому режимі з використанням температурного зворотного зв'язку. Доцільним є встановлення термодатчиків у кількох зонах платформи: у центрі, на краях і поблизу найбільш проблемних ділянок деталі. Застосування локального або загального підігріву нижньої частини деталі гарячим повітрям доцільно розглядати не як єдиний, а як один із елементів комплексної системи керування якістю. Найбільший ефект очікується тоді, коли такий підігрів поєднується з підігрівною платформою, закритою камерою, правильними параметрами друку та контролем температури в реальному часі.

Висновки. Під час виготовлення габаритних деталей методом 3D-друку однією з основних проблем є нерівномірне охолодження полімерного матеріалу, що призводить до короблення, усадки, відшарування від основи та зниження геометричної точності. Застосування підігріву основи гарячим повітрям є технічно доцільним методом покращення якості друку, оскільки дає змогу стабілізувати температурне поле в нижній частині виробу та зменшити внутрішні термічні напруження. Найкращі результати можуть бути отримані за умови поєднання цього методу з підігрівною платформою, закритою камерою друку, оптимальними параметрами екструзії та контролем температури. Запропонований підхід може бути використаний для підвищення надійності, точності та повторюваності виготовлення великогабаритних полімерних деталей методом FDM/FFF-друку.

Список використаної літератури:

1. Goh G. D., Wong K. K., Tan N., Seet H. L., Nai M. L. S. Large-format additive manufacturing of polymers: a review of fabrication processes, materials, and design. *Virtual and Physical Prototyping*. 2024. Vol. 19, № 1. Article e2336160. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2336160>.
2. Vanerio D., Guagliano M., Bagherifard S. Emerging trends in large format additive manufacturing processes and hybrid techniques. *Progress in Additive Manufacturing*. 2025. Vol. 10. P. 1945-1972. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-024-00771-1>.
3. Mittal Y. G., Patil Y., Kamble P. P., Gote G. D., Mehta A. K., Karunakaran K. Warpage control in thermoplastic ABS parts produced through material extrusion (MEX)-based fused deposition modeling (FDM). *Rapid Prototyping Journal*. 2024. Vol. 30, № 9. P. 1822-1835. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2024-0023>.
4. Chen G., Wang D., Hua W., Wu W., Zhou W., Jin Y., Zheng W. Simulating and Predicting the Part Warping in Fused Deposition Modeling by Thermal-Structural Coupling Analysis. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2023. Vol. 10, № 1. P. 70-82. DOI: <https://doi.org/10.1089/3dp.2021.0119>.
5. Equbal A., Murmu R., Kumar V., Equbal M. A. A recent review on advancements in dimensional accuracy in fused deposition modeling (FDM) 3D printing. *AIMS Materials Science*. 2024. Vol. 11, No. 5. P. 950-990. DOI: <https://doi.org/10.3934/materci.2024046>.

Левченко В.О., аспірант
 Отаманський В.В., ст. викладач кафедри механічної інженерії
 Державний університет «Житомирська політехніка»

Посвятенко Н.І., доц.
 Національний транспортний університет, м. Київ

ПЕРСПЕКТИВИ ОБРОБКИ ОТВОРІВ КОМБІНОВАНИМ ПРОТЯГУВАННЯМ

Деформуюче протягування є одним із найбільш продуктивних методів обробки внутрішніх циліндричних поверхонь деталей типу втулок і гільз. Широке застосування цього методу в трубній промисловості та машинобудуванні зумовлене його принциповими перевагами: можливістю здійснення значної пластичної формозміни заготовки у холодному стані, поверхневим зміцненням внутрішньої поверхні заготовки, формуванням сприятливих: мікрорельєфу, шорсткості, залишкових напружень стиску та суттєвим підвищенням точності форми отвору. У ряді галузей деформуюче протягування дозволяє замінити декілька операцій механічної обробки однією, значно скорочуючи трудомісткість і собівартість виготовлення [1]. Разом з тим продуктивність процесу нерідко обмежується міцністю інструмента та оброблюваністю матеріалу різанням після протягування, що стимулює пошук шляхів розширення технологічних можливостей цієї операції [2].

У сучасному машинобудуванні широко застосовуються заготовки у вигляді гарячекатаних і холоднотягнутих труб. Але заготовки для гарячедеформованих труб, що виготовляються за ДСТУ 8938:2019, мають значні коливання розмірів і форми отвору – допуск на товщину стінки труби може становити $\pm 14\%$. Для холоднотягнутих труб ці коливання трохи менші $\pm 12,5\%$. Для наочності: труба зовнішнім діаметром 100 мм із номінальною товщиною стінки 5 мм матиме фактичне відхилення товщини стінки $\pm 0,7$ мм, що призводить до коливання внутрішнього діаметра у межах 1,4 мм. Водночас поле допуску IT8 за системою ISO для діаметра 100 мм становить лише 0,054 мм, тобто вихідна похибка заготовки перевищує цей квалітет більш ніж у 25 разів – що є неприйнятним для більшості відповідальних з'єднань. Крім того, поверхневий шар таких заготовок містить безвуглецевий шар металу, раковини та інші дефекти товщиною від 0,05 до 0,8 мм [1], які неможливо усунути лише пластичним деформуванням.

Перспективним напрямком вирішення цих проблем є застосування комбінованого протягування, що поєднує в одному інструменті кілька функціональних груп елементів. Базова схема такого інструмента передбачає послідовне розташування деформуючої та різальної груп: перша здійснює чорнове пластичне деформування отвору, зменшуючи його похибки і трансформуючи їх на зовнішню поверхню заготовки; різальні елементи знімають тонкий шар попередньо зміцненого металу, забезпечуючи необхідну точність і якість поверхні [1, 2]. Якщо ж до готової деталі висуваються вимоги щодо значного зміцнення поверхні, після різальної групи розміщується додаткова група деформуючих елементів, що забезпечує фінішне зміцнення внутрішньої поверхні отвору. Таким чином, залежно від вимог до деталі, можливі дві основні схеми: деформуюча–різальна (для сталевих деталей) та деформуюча–різальна–деформуюча (для деталей із підвищеними вимогами до зміцнення поверхні або кольорових сплавів), що показано на рис. 1.

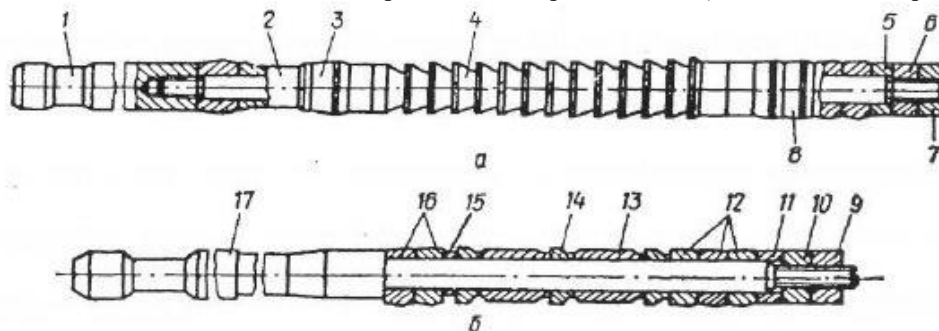


Рис. 1. Деформуюче–різальна–деформуюча протяжка для обробки сталевих деталей (а) і деталей з кольорових сплавів (б) [2]

Ефективність деформуючого протягування як чорнової операції підтверджується конкретними експериментальними даними. Проведені нами дослідження на трубах трьох типорозмірів (36×3,0; 48×3,0 і 77×4,0 мм) показали, що вихідна еліптичність внутрішнього діаметра становила 0,15–0,30 мм, після деформуючого протягування вона не перевищувала 0,02 мм – при допустимому значенні 0,06–0,10 мм. Тобто точність форми отвору покращилась у 10–15 разів і склала менше третини від допустимого рівня. При цьому шорсткість внутрішньої поверхні після деформуючого протягування становила $Ra = 0,1$ мкм при вимозі не більше $Ra = 1,25$ мкм. Принципово важливим є також те, що в процесі деформуючого

протягування похибки форми отвору трансформуються на зовнішню поверхню труби, де їх значно легше усунути механічною обробкою. Саме цей ефект є одним із ключових обґрунтувань доцільності застосування комбінованого протягування: деформуюча група «перерозподіляє» похибки, а різальна – їх остаточно усуває.

Важливою особливістю комбінованого протягування є те, що різальні елементи працюють по попередньо зміцненому металу. Дослідженнями встановлено [2], що попереднє холодне зміцнення суттєво змінює фізику процесу різання та поліпшує сам процес різання. Підвищення ступеня зміцнення призводить до значного звуження пластичної зони при різанні, збільшення кута зсуву ϕ , що зменшує усадку стружки та сили різання. При цьому зменшується довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструмента і знижується середній коефіцієнт тертя. Таким чином, попереднє деформування не лише формує геометрію отвору, а й покращує оброблюваність металу різанням, підвищуючи стійкість різального інструмента та показники якості обробленої поверхні.

При проектуванні групи деформуючих елементів комбінованої протяжки принципове значення має правильний розподіл ресурсу пластичності між елементами. Дослідження методом скінченних елементів [3] показали, що накопичена деформація і ресурс використаної пластичності на внутрішній поверхні суттєво залежать від загальної деформації та кількості деформуючих елементів: при обробці шістьма елементами з мінімальними натягами максимальна накопичена деформація $\epsilon_0 = 0,76$, тоді як при двох елементах з більшими натягами – лише $\epsilon_0 = 0,18$. Це дозволяє формулювати раціональну схему деформування: спочатку основна частина деформування здійснюється малою кількістю елементів зі значними натягами; потім група елементів з малими натягами забезпечує потрібне зміцнення і мінімальну шорсткість поверхні. Ключовим фактором для ефективного управління процесом деформування та забезпечення оброблюваності матеріалу після деформування являється ресурс пластичності заготовки. Він впливає на вирішення декількох виробничих задач:

- якщо після комбінованого протягування слідує операція хіміко-термічної обробки, то ресурс використаної пластичності не повинен перевищувати 25–30%;
- якщо комбіноване протягування являється фінішною операцією, то ресурс використаної пластичності не повинен перевищувати 80%, що забезпечує довговічність деталей при роботі в умовах циклічних напружень;
- якщо після деформуючого протягування слідує операція різання, то ресурс пластичності повинен бути вичерпаний повністю, що забезпечить максимальне поліпшення оброблюваності.

Використання третього пункту відкриває широкі технологічні перспективи для схеми комбінованого протягування. По-перше, чорнове деформування в десятки разів знижує вихідну некруглість і нециліндричність заготовки, що дозволяє зменшити припуск на різання і скоротити витрату металу на 10–30% [1]. По-друге, різальні елементи видаляють дефектний поверхневий шар металургійного походження і забезпечують задані параметри точності та шорсткості. По-третє, попереднє деформування повинно повністю вичерпати ресурс пластичності поверхневого шару, що максимально покращить умови різання. Нарешті, застосування додаткової деформуючої групи після різання дозволяє за одне протягування сформувати зміцнений поверхневий шар із заданими параметрами мікрорельєфу та залишковими напруженнями стиску, що особливо важливо для деталей, що працюють в умовах циклічних навантажень.

Список використаної літератури:

1. Posvyatenko, E. K., Nemyrovsky, Y. B., Sheikin, S. E., Shepelenko, I. V., Chernyavsky O. V. (2021). Engineering of parts processed by broaching. *Bakul Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Central Scientific and Technical University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lysenko V.F. Publisher, Kropyvnytskyi, Ukraine, 466 p.*
2. Rosenberg, A. M., Rosenberg O. A. (1991). *Mechanics of plastic deformation in the processes of cutting and deforming broaching. Nauk. Dumka, Kyiv, Ukraine, 320 p.*
3. Nemyrovskiy, Y. B.; Shepelenko, I. V.; Otamanskyi, V. V.; Melnyk, O. L.; Vasylyv T. I. Plasticity of workpieces processed by deforming broaching with through deformations. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine) 2025, 12, D9–D24. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).d2](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).d2)*

**Степанов М.С., д.т.н., проф., проф. кафедри
«Технологія машинобудування та металургійні верстати»
Літовченко П.І., к.т.н., доц., с.н.с. кафедри
«Інтегровані системи машинобудування» ім. М.Ф. Семка
НТУ «Харківський політехнічний інститут», Україна;
Іванова Л.П., доктор філософії, менеджер справ
зі стабільності життя Альянсу жінок-біженок
м. Сіетл, штат Вашингтон (США)
Мироненко С.Л., аспірант кафедри «Інтегровані
системи машинобудування» ім. М.Ф. Семка
НТУ «Харківський політехнічний інститут», Україна**

ЗНИЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ КРУГЛОМУ ШЛІФУВАННІ ШЛЯХОМ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛОВІДДАЧІ ЕЛЕМЕНТІВ ШЛІФУВАЛЬНОЇ БАБКИ

Високий технічний рівень та конкурентоспроможність сучасних машин на світовому ринку забезпечується підвищенням точності їх виготовлення, якістю функціональних поверхонь, покращенням технологічної культури виробництва. З цієї причини доля шліфувальних операцій у машинобудівному виробництві постійно і неухильно зростає.

При круглому зовнішньому шліфуванні значний вплив на точність оброблених деталей надають теплові деформації елементів технологічної системи. Величина похибок розмірів та форми шліфованих деталей значною мірою визначається погрішністю положення шпинделя приводу шліфувального круга. Опори шпинделя встановлені в корпусі шліфувальної бабки, тому погрішність просторового положення осі шпинделя визначається тепловими деформаціями шліфувальної бабки, що виникають під дією потоків теплоти та охолодження на її поверхні та опорах підшипників.

В основу дослідження, що пропонується, покладено експериментальні дані та результати їх аналізу, наведені в попередніх роботах авторів [1, 2], які були доопрацьовані та модернізовані, тобто: розраховані температури на поверхнях шліфувальної бабки при її попередньому статичному тепловому аналізі; виконана модернізація 3D-моделі шліфувальної бабки круглошліфувального верстата, в ході якої на частині передньої стінки створені ребра постійного прямокутного перерізу; розраховані параметри ребра передньої стінки та ефективність тепловіддачі з неї, отримана за рахунок модернізації; створено імітаційну модель модернізованої шліфувальної бабки та за допомогою автоматичного генератора сіток геометричних елементів AutoGEM програми Creo Simulate створено оптимізовану за розміром елементів кінцево-елементну сітку; для визначення ефективності запропонованої модернізації шліфувальної бабки виконали порівняльний динамічний аналіз температурних полів на передній стінці для двох варіантів її конструкції – з плоскою і оребреною передньою стінкою.

На початковому етапі дослідження було проаналізовано основні методи зниження температури на поверхнях та у вузлах шліфувальної бабки за рахунок збільшення їх тепловіддачі у навколишнє середовище. Були розглянуті, переважно, пасивні методи охолодження, і для дослідження було прийнято конструктивний метод підвищення тепловіддачі – оребрення найбільш теплонапруженої передньої стінки шліфувальної бабки. Цей метод, хоч і дає менше порівняно з іншими зниження температури, але має важливі переваги, як простота реалізації, висока надійність, відсутність додаткових витрат енергії.

Встановлено, що тепловий режим шліфувальної бабки характеризується не тільки потоками нагріву, а й потоками охолодження за рахунок обдуву її стінок потоками повітря від обертання шліфувального круга і шківа ремінної передачі його приводу [3]. Це дозволило використовувати комбінований метод охолодження – оребрення передньої стінки шліфувальної бабки і обдув її повітрям, що підвищує ефективність охолодження. Враховуючи це, для дослідження був прийнятий метод оснащення передньої стінки ребрами + обдув.

Для моделювання теплового режиму вважали, що найбільш значні джерела теплоти, що впливають на погрішність положення шпинделя, це опори підшипників шпинделя, передня і бічні (ліва і права) стінки шліфувальної бабки.

Були використані такі вихідні дані: корпус передньої бабки виконаний із сірого чавуну СЧ 20 ДСТУ 8833:2019 (теплопровідність $\lambda_w=45$ Вт/(м·К)), товщина стінки $\delta=0,005$ м; розміри передньої стінки: ширина $b=0,47$ м, висота $L=0,18$ м; метод охолодження – конвекція із примусовим обдувом; температура на внутрішній поверхні стінки передньої стінки $t_1=55$ °С; середня температура, якої передбачається досягти, приймалася з урахуванням досяжної величини зниження $\Delta T=25$ °С для методу оребрення з обдувом, тобто $t_2 = t_1 - \Delta T = 30$ °С; коефіцієнт тепловіддачі у стінку $\alpha_1=100$ Вт/(м²·К), а коефіцієнт

тепловіддачі з передньої стінки у повітря $\alpha^2 = \alpha_p = 18 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; потужність теплового потоку на передній стінці $Q = 43,6 \text{ Вт}$.

Розрахунок виконувався у такій послідовності.

Вважалось, що формоутворення поверхні деталі здійснюється прямою лінією – твірною поверхні шліфувального круга при її контакті із заготовкою. Враховуючи це, при аналізі визначали важливі закономірності зміни зміщення точок лінії контакту круга і деталі внаслідок теплових деформацій елементів шліфувальної бабки – початкової точки Point 0 і кінцевої точки цієї лінії Point 1 протягом робочої зміни, тобто у діапазоні часу 0-360 хв.

У процесі дослідження виконували порівняльний аналіз двох варіантів конструкції шліфувальної бабки: з плоскою передньою стінкою і з оребреною. При цьому спостерігали дві характерні ділянки. Перша ділянка відповідає початковому періоду часу, на якому зміщення обох точок спрямоване у бік деталі, причому зміщення початкової точки Point 0 більше, ніж зміщення кінцевої точки Point 1. На другій ділянці, де обидві точки зміщуються в бік від заготовки, і зміщення точки Point 0 менше зміщення точки Point 1. Даний процес призводить до зміни напрямку схрещування осей шліфувального круга і заготовки. Це можна пояснити тим, що температура підшипників зростає швидше, ніж температура корпусу бабки в силу різниці об'ємів вузлів верстата. Крім того, для плоскої поверхні відбувається більш різке зростання температури, що можна пояснити нижчою інтенсивністю тепловіддачі від цієї стінки.

З течєю часу температура поступово вирівнювалася, і температурні поля ставали більш рівномірними, особливо у варіанті з оребреною стінкою. Як показали дослідження, перша ділянка закінчується на 60 хвилин раніше у конструкції з оребреною передньою стінкою.

Аналіз результатів дослідження показав, що зміщення кромки шліфувального круга призводить до утворення відхилення форми деталі, що шліфується, у вигляді конусності. Аналізуючи величину конусності, відзначили, що максимальне її значення для плоскої стінки становить 1:1180 (максимальне значення кута нахилу утворює конуса $0,0486^\circ$), а для оребреної 1:1644 (максимальне значення кута нахилу утворює конуса $0,00348^\circ$). Таким чином, зниження конусності при використанні оребреної передньої стінки становить 28,21%.

Таким чином, підсумком проведених досліджень є: виконано модернізацію 3D-моделі шліфувальної бабки круглошліфувального верстата для збільшення площі тепловіддачі від її передньої стінки за рахунок створення системи ребер прямокутного перерізу; розраховані параметри оребріння і визначена теоретична ефективність тепловіддачі з оребреної передньої стінки, що отримана за рахунок модернізації; досягнуто збільшення ефективного коефіцієнта тепловіддачі оребреної стінки $\alpha_{\text{еф}2} = 34,57 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, порівняно з неоребреною $\alpha_{\text{еф}1} = 18 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; розроблено імітаційну модель модернізованої шліфувальної бабки, на основі якої виконувався динамічний тепловий аналіз шліфувальної бабки і визначені температури на її передній поверхні, а також величини зміщень осі шпинделя шліфувального круга протягом робочої зміни.

В результаті проведеного динамічного аналізу здійснено оцінку ефективності запропонованої модернізації шліфувальної бабки для обох варіантів її конструкції – з плоскою і оребреною передньою стінкою. При цьому встановлено, що застосування оребріння передньої стінки дозволяє: знизити максимальну температуру на її поверхні на 18,5%, і середню температуру – на 17,4%. Крім того, встановлено, що найбільший вплив на збільшення тепловіддачі надає отримання рівномірних теплових полів на поверхнях шліфувальної бабки.

У роботі запропоновано найпростіший та найдешевший метод підвищення тепловіддачі передньої стінки. Для максимального зниження температури при шліфуванні в перспективі можна рекомендувати більш інтенсивні методи охолодження, наприклад, підвищення ефективності оребріння за рахунок поширення на всю площу передньої стінки або застосування трапецеїдальних ребер, що забезпечують більшу інтенсивність тепловіддачі.

Список використаної літератури:

1. Stepanov, M., Litovchenko, P., Ivanova, L., Ivanova, M., Gasanov, M. Heat Flows Affected on the Wheel head of a Cylindrical Grinding Machine. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manuf. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp 490-500. (2021). [https:// DOI: 10.1007/978-3-030-77719-7_49](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_49)
2. Stepanov, M., Ivanova, L., Polonsky, L., Tretyak, T., Ivanova, M. (2025). The effect of thermal deformations of the grinding head of a circular grinding machine on the accuracy of grinding parts. In: Machado, J., Troyanovska, J., Ottaviano, E., Xavior, M.A., Valashek., Basova, Yu. (eds.) Innovations in Machine Building IV. ICIENG 2025. Lecture notes on mechanical engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-93554-1_8
3. Stepanov, M., Ivanova, M., Litovchenko, P., Ivanova, L., Havryliuk, Y. Study of Heat Transfer Conditions in the Cutting Zone When Grinding. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manuf. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp 173-181. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-79165-0_17

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Якість обробленої поверхні є вагомим чинником, що безпосередньо впливає на надійність, довговічність та ефективність функціонування будь-яких машин та механізмів. Для деталей спеціальної техніки, що працюють в умовах підвищених навантажень, екстремальних температур, агресивних середовищ або високої точності, вимоги що до якості поверхневого шару деталей є особливо жорсткими. Недостатня увага до цього аспекту може привести до передчасного зношування, втомних руйнувань, порушення герметичності з'єднань та, як наслідок, до відмов і зниження експлуатаційного ресурсу.

Відмови та руйнування деталей відбуваються по одному з експлуатаційних показників (зносостійкість, корозійна стійкість, герметичність та щільність з'єднань, втомна міцність, контактна жорсткість та точність, а також антифрикційні властивості та стійкість до заїдання) та починаються, як правило, з поверхні деталі.

Отже важливим фактором для належного функціонування спеціальної техніки є якість поверхонь деталей, що входять до їх складу. Це обумовлено їхньою роботою в екстремальних умовах та високими вимогами до надійності та довговічності.

Одним із основних методів утворення поверхонь деталей є лезова обробка. Попри свою поширеність та економічність, цей вид утворення поверхонь деталей несе в собі потенційні ризики формування несприятливих характеристик поверхневого шару. Якість деталей після лезової обробки можливо оцінити за такими показниками:

1. жорсткість та хвилястість поверхні, яка в свою чергу значно впливає на зносостійкість, корозійну стійкість, витривалість, герметичність та щільність з'єднань;

2. точність форми та розмірів;

3. стан поверхневого шару, а саме твердість, залишкові напруги, мікротріщини та дефекти.

До основних факторів, що впливають на показники якості поверхонь деталей, при лезовій обробці, відносять:

1. точність та жорсткість технологічної системи (верстат – інструмент – деталь – пристосування);

2. режими різання (глибина, подача, швидкість обробки);

3. конструктивні та геометричні параметри різального інструменту;

4. теплові явища.

Для ефективного підвищення якості обробленої поверхні критично важливо точно визначити, які саме показники якості поверхонь є найбільш значущими для експлуатації деталей спеціальної техніки.

Провівши аналіз літературних джерел визначили наступну номенклатуру показників якості поверхонь деталей спеціальної техніки, що будуть визначати їх експлуатаційні властивості [1]:

R_a – середнє арифметичне відхилення профілю – найбільш поширений параметр, що являє собою середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини, мкм;

R_z – висота нерівностей профілю за десятьма точками – визначається як сума середніх значень висот п'яти найбільших виступів і глибин п'яти найбільших впадин профілю в межах базової довжини, мкм;

R_{max} – найбільша висота профілю – максимальна відстань між найвищою точкою профілю та найнижчою западиною в межах базової довжини, мкм;

S_m – середній крок нерівностей профілю – середня відстань між сусідніми виступами профілю в межах базової довжини, мм;

W_z – висота хвилястості – середнє арифметичне з п'яти її значень на ділянці вимірювання, мкм;

S_w – середній крок хвилястості – середнє арифметичне значення довжин відрізків середньої лінії між одноіменними сторонами хвиль, мм;

S – середній крок місцевих виступів профілю – середнє значення кроку місцевих виступів профілю в межах базової довжини, мм;

t_p – відносна опорна довжина профілю – відношення опорної довжини профілю до базової довжини, %;

$\pm\sigma_{зал.}$ – залишкові напруження – напруження, що залишаються в матеріалі після видалення зовнішнього навантаження. Виникають в наслідок нерівномірної пластичної деформації або структурних перетворень, МПа;

$h_{\sigma 0}$ – глибина залягання залишкових напружень – показує наскільки глибоко в матеріалі розподіляються залишкові напруження, мм;

$H_{\mu 0}$ – поверхнева мікротвердість – показує стійкість до пластичної деформації або проникнення іншого, більш твердого тіла у поверхневий шар під дією навантаження. Свідчить про наклеп, фазові перетворення або деградацію матеріалу;

h_d – товщина поверхневого шару – показує глибину на яку властивості матеріалу відрізняються від його основного об'єму (серцевини);

ϵ – пружна деформація кристалічної ґрати – є основою для розуміння поведінки матеріалів під навантаженням;

l_3 – розмір, форма та розподіл зерен по шару та їх кристалографічна орієнтація – ключові характеристики, що визначають мікроструктуру матеріалу та мають вирішальний вплив на механічні, хімічні та фізичні властивості матеріалу;

ρ_D – щільність дислокацій – визначає поведінку мікроструктури матеріалу під навантаженням.

Вибір оптимальної номенклатури показників якості поверхні для дослідження лезової обробки деталей спеціальної техніки ґрунтувався на таких критеріях як:

1. Функціональна значущість – обрані показники пов'язані з експлуатаційними властивостями (зносостійкість, втомна міцність, корозійна стійкість, герметичність) деталей спеціальної техніки;

2. Чутливість до технологічних параметрів – обрані показники реагують на зміну режимів різання, геометрії інструменту та інших параметрів обробки;

3. Відтворюваність вимірювань – обрані показники можливо точно виміряти за допомогою сучасних метрологічних засобів.

Список використаної літератури:

1. Харламов Ю.О., Романченко О.В., Міцик А.В. Класифікація деталей машин з обліком якості їх поверхневого шару. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. Київ, 2022. № 2 (272). С.91-98.

УДК 621.7.073(075.8)

Полонський Л.Г., проф. кафедри МІ та АТ, д.т.н., проф.
Яновський В.А., доц. кафедри МІ та АТ, доц.
Ночвай В.М., доц. кафедри МІ та АТ, к.т.н.
Коваленко Я.П., доц. кафедри МІ та АТ, доктор філософії з прикладної механіки
Державний університет «Житомирська політехніка»

ТЕХНОЛОГІЧНА ОСНАСТКА МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ПАЗІВ ГОРЛОВОГО КІЛЬЦЯ ДЛЯ ЙОГО ФІКСАЦІЇ У КІЛЬЦЕТРИМАЧІ

Горлові кільця є однією з основних складових формового інструменту, що, як правило, виготовляються підприємствами скляної промисловості власними силами у механічних цехах, яким властиві низький рівень технічного оснащення та відсутність сучасного металообробного обладнання. Вони служать для оформлення у тарних скловиробах горл різної форми, що повинні відповідати необхідним умовам їх закупорювання, зберігання, транспортування тощо. Конструктивно горлові кільця – це тіла обертання порожнистої форми з буртами на зовнішній поверхні, складені з двох півкільць, які найчастіше суміщуються за допомогою замка у вигляді зуба на одному півкільці та впадини на другому. На одному з буртів на-явні два протилежні пази, розташовані в обох півкільцях симетрично до площини роз'єму, завдяки яким фіксується положення кільця у кільцетримачі склоформуальної машини [1] (рис. 1).



Рис. 1. Горлові кільця: а) зі ступінчастою по зовнішньому контуру циліндричною порожнистою основою (в розібраному виді); б) з гладкою по зовнішньому контуру основою

Утворюють пази або ручною слюсарною обробкою (вирубання зубилом або крейцмейселем, вишліфовування кутовою машинкою, формування за допомогою штихеля тощо), або фрезеруванням. І той, і інший способи реалізуються з застосуванням універсальних технологічних пристосувань, – як слюсарних лещат із ручним приводом, так і машинних (верстатних [2]) лещат різних конструкцій. Причому, обробляти пази можна як на горловому кільці в зібраному виді, так і окремо на кожному з його півкільць.

Слюсарна обробка пазів може виконуватися з застосуванням лещат типу INTERTOOL НТ-0054 (рис. 2). Вони ж можуть застосовуватися і при обробці пазів фрезеруванням.



Рис. 2. Лещата слюсарні з ручним приводом [2]

В якості технологічної оснастки фрезерної операції механічної обробки пазів горлового кільця застосовують лещата машинні (верстатні) з ручним та іншими типами силового приводу (лещата з механізованим приводом [3, с. 371]) (рис. 3), проектуючи налагодження на основі відповідних губок.

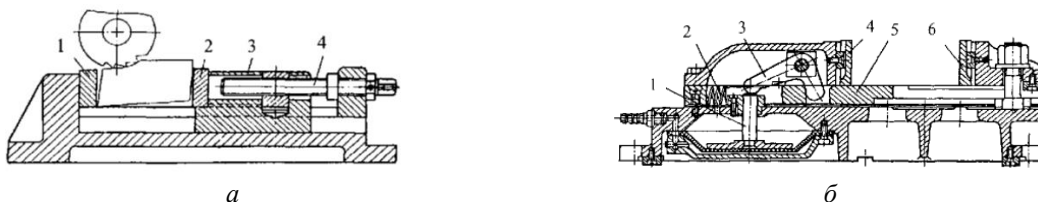


Рис. 3. Лещата машинні [3, с. 364]: а) з ручним приводом [3 (рис. 7.2, с. 365)]; б) з механізованим приводом (у даному випадку – пневматичним) [3 (с. 371; рис. 7.7, с. 372)]

Налагодження для обробки циліндричних виробів, зокрема, таких, як горлові кільця (а також і півциліндричних – горлові півкільця відносяться саме до них), у т. ч., й у вертикальному положенні [1 (фіг. 6, с. 8)], при фрезеруванні пазів кільця для його фіксації в основному монтують на самоцентруючих лещатах із гвинтовим затискачем [3 (рис. 7.6, с. 371)] (взявши за їх основу губки, зображені на рис. 4, 5) та на універсальних переналагоджуваних лещатах (рис. 6, 7).

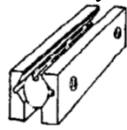


Рис. 4. Губки для обробки циліндричних виробів [3 (рис. 7.10, с. 376)]



Рис. 5. Загальний вигляд губки налагодження для обробки пазів у вертикальному положенні кільця [4]

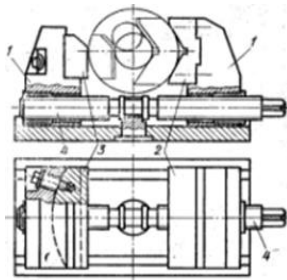


Рис. 6. Універсальні переналагоджувані лещата [5 (рис. 1, с. 231)]

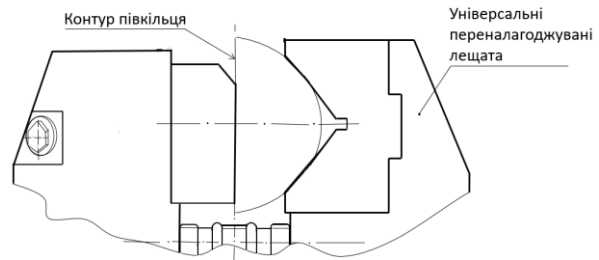


Рис. 7. Налагодження для обробки пазів в одному півкільці горлового кільця на універсальних переналагоджуваних лещатах

Застосування для механічної обробки пазів горлового кільця для його фіксації у склоформульній машині налагоджень, змонтованих на спеціальних, спеціалізованих (деякі з них наведені у [6 (рис. 2, с. 7; рис. 10, с. 19)]) та інших пристосуваннях, аналогічних налагодженням на лещата машинні з ручним приводом, які придатні для базування виробів циліндричної та півциліндричної форм, також цілком можливе. Саме такий підхід до забезпечення процесів виготовлення (відновлення) формового інструменту технологічною оснасткою в сучасних умовах виробництва має довготермінову перспективу.

Оскільки універсальні лещата з налагодженнями, основним елементом яких є губки різних типів, не забезпечують високої продуктивності, сьогодні актуальним, хоча й досить складним завданням для підприємств скляної промисловості є подолання консерватизму наявного домоміжного виробництва, зокрема, і шляхом впровадження такої технологічної оснастки, яка дозволяє поліпшувати ефективність обробки як формового інструменту (у т. ч., горлових кілець), так і інших пристосувань, необхідних для виготовлення тарних склоформів.

Список використаної літератури:

1. Патент на корисну модель 139115 України. МПК(2019.01) B23G 9/00, C03B 9/32(2006/01). Бондарчук О.В., Глушкова Д.Б., Козяр Я.А., Кравченко С.І., Полонський Л.Г., Прилипко В.В., Харламов Ю.О., Яновський В.А. Спосіб механічної обробки пазів горлового кільця для його фіксації у кільцетримачі скло-формульній машини. – № u 2019 05326; Заявл. 20.05.2019; Опубл. 26.12.2019; Бюл. № 24.
2. Лещата слюсарні, лещата верстатні, лещата ручні, лещата трубні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://instrumentservis.ua/c-osnastka/tiski.html?srsftid=AfmBOoqyWdtUIg8IQkvWmc-qmHfNZsM4hmiscf1fSp49m3IXGneqvIr>.
3. Боровик А.І. Технологічна оснастка механоскладального виробництва: Підручник. – К.: Кондор, 2008. – 726 с.
4. Змінні губки для лещат 150 мм YATO YT-65008 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://yato24.com.ua/ua/smennye-gubki-dlya-tiskov-125-mm-yato-yt65007/?gad_source=5&gclid=EAIAIqobChMI6ebwsDqkwMVP7KAB1hHhH7EAEYASABEgLOc_D_BwE.
5. Конспект лекцій для студентів денної та заочної форми навчання, спеціальність 131 Прикладна механіка [Електронний ресурс]. – Національний технічний університет „Дніпровська політехніка”, кафедра технологій машинобудування та матеріалознавства. – 2020. – 403 с. – (Технологічне оснащення). – Режим доступу: https://tgm.nmu.org.ua/ua/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82_%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%86%D1%96%D0%B9_%D0%A2%D0%9E.pdf.
6. Кузнецов Ю.І. Модернізація верстатних пристосувань. – К.: Держтехвидав УРСР, 1960. – 59 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ФОРМОЗМІНИ ЛАНКИ ВАНТАЖНОГО ЛАНЦЮГА ПРИ СИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Незважаючи на широке застосування вантажних ланцюгів в побуті, в такелажних і стропильних роботах при переміщенні вантажів, в якості тяглових елементів вантажно-підйомних механізмів, швартовних і рангоутних деталей в судноплавстві, для захоплення вантажів у будівництві, для буксирування вантажів тощо, їх експлуатаційна особливість відрізняється однією характерною ознакою [1]. Ця ознака визначається конструкцією ланки круглоланкового вантажного ланцюга і полягає у характерній взаємодії поміж окремими ланками ланцюга, які працюють винятково на розрив. Відповідно, навантажувальні характеристики круглоланкових ланцюгів визначаються лише випробуваннями на розрив.

Окрім наведених вище традиційних застосувань, вантажні круглоланкові ланцюги застосовуються для реалізації нехарактерних для них функцій, зокрема в приводах різних конвеєрів та технічних системах неперервної дії, при моделюванні контурів арочних склепінь, як конформного відображення ланцюгової лінії, в підвісних і вантових конструкціях мостових переправ, в якості гнучких робочих органів ґрунтообробних знарядь, зокрема ґрунтопоглиблювача, оснащеного гнучким ланцюговим робочим органом [2].

Переважає більшість досліджень експлуатаційних властивостей вантажних круглоланкових ланцюгів спрямована на аналіз реакції ланок ланцюга на зовнішні сили і, як наслідок, на аналіз напруженого стану в поперечних перерізах ланок. Зокрема, ланки розглядаються, як фрагменти кривих брусів, в поперечних перерізах яких діють окрім внутрішніх осьових сил, спрямованих вздовж поздовжніх "шпильок" ланки, ще й згинаючі моменти, величина яких визначається калібром і геометрією ланки (рис. 1). При цьому, нейтральна вісь кривого бруса, окреслена радіусом R_0 завжди зміщується від центра ваги перерізу до центра кривини бруса R на величину e .

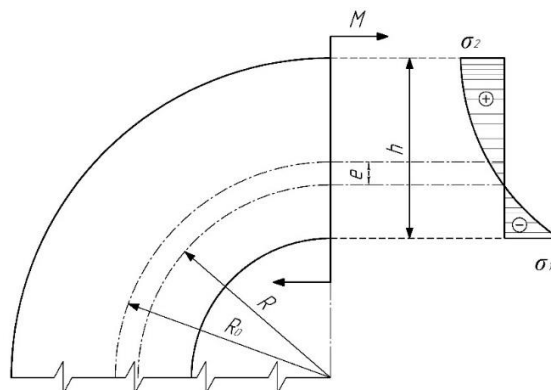


Рис. 1. Розрахункова схема та епюра нормальних напружень в поперечних перерізах кривого бруса: M – згинаючий момент, R_0 – радіус осі центрів ваги перерізів бруса, R – радіус нейтральної осі бруса, e – зміщення нейтрального шару бруса відносно центрів ваги його перерізів, h – розрахунковий габарит бруса, σ_1 та σ_2 – нормальні напруження в перерізах кривого бруса

Для механічних випробувань використано спеціально підготовлені 5ти-ланкові зразки вантажних ланцюгів з короткою та довгою ланками класу G80 (рис.2) за стандартом ASTM A391 калібру 3, 4, 5, 6, та 8 мм, виготовлених з сталі 20MnNiCrMo5-2. Механічні випробування було реалізовано на розривній машині P-50M1 (рис.3). Вимірювання геометричних параметрів здеформованих ланок та абсолютних значень поздовжньої та поперечної деформацій ланок ланцюга та поперечної деформації прутка ланки виконувалось за допомогою мірної лінійки та штангенциркуля ІАСА0150.

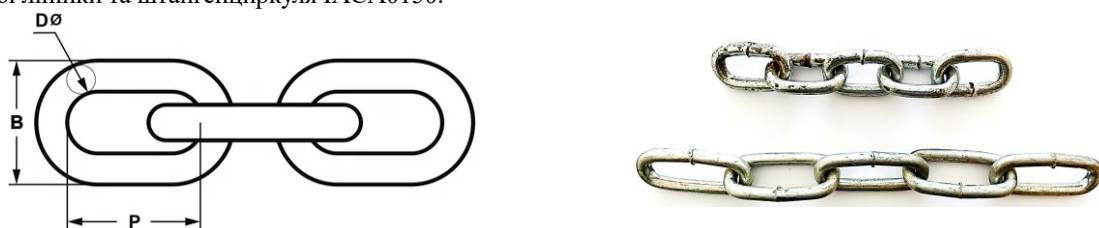


Рис. 2. Зразки ланцюгів для випробування:
 D – калібр; P – крок, який визначає довжину ланки; B – поперечний габарит ланки



Рис. 3. Розривна машина P-50M1

На відміну від показників деформування калібру, значно інформативнішими є геометричні ознаки зміни форми ланки ланцюга. Зокрема, простий візуальний аналіз форми zdeформованої (зруйнованої) ланки ланцюга свідчить про трансформацію початкової форми ланки, яка може бути описана алгебраїчною кривою четвертого порядку з трьома точками перегину на кожній з бічних ділянок ланки (рис. 4).



Рис. 4. Здеформована (зруйнована) ланка ланцюга

За результатами механічних випробувань круглоланкових вантажних ланцюгів з короткою та довгою ланкою калібрів 3, 4, 5, 6 та 8 визначено основні ознаки деформування та формозміни ланок ланцюгів, встановлено, що найінформативнішими ознаками формозміни є збільшення кроку та зміна контуру ланки ланцюга.

Список використаної літератури:

1. Шевченко В. Д., Піскунов В. Г., Федоренко Ю. М. та ін. Будівельна механіка металевих конструкцій дорожньо-будівельних, підйомних і транспортних машин: підручник / за ред. В. Г. Піскунова, В. Д. Шевченка. Київ : Вища школа, 2004. 438 с.
2. Безклубенко І., Гетун Г. Ланцюгова лінія як оптимальна форма для стійких конструкцій. *Містобудування та територіальне планування*. Київ: КНУБА, 2025. № 90. С. 285-315. URL: <http://mtp.knuba.edu.ua/issue/archive> (дата звернення: 19.03.2026).

Виговський Г.М., к.т.н., доц., проф. каф. механічної
інженерії та автомобільного транспорту
Поліщук В.О., студент групи ПМК-30
Державний університет «Житомирська політехніка»

ПРОЦЕСИ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

У сучасному машинобудуванні надійність і термін експлуатації складних механізмів безпосередньо залежать від конструктивної міцності та корозійної стійкості матеріалів. Традиційні методи захисту поверхонь, такі як нанесення лакофарбових покриттів чи хіміко-термічне оброблення, мають суттєві обмеження через низьку дифузійну проникність елементів та обмежену розчинність речовин у твердому стані. Через недосконалість існуючих антикорозійних технологій країна щорічно зазнає колосальних збитків, оскільки безповоротно втрачається від 10 до 12 % загальної маси чорних металів. Постійний вплив агресивних середовищ на об'єкти інфраструктури, мости, опори ліній електропередачі та морські споруди, призводить до стрімкого зниження надійності металоконструкцій та передчасного виходу з ладу відповідальних вузлів. Традиційне очищення поверхонь від іржі та окалини механічними або хімічними способами часто не забезпечує необхідної чистоти, що лише прискорює деструктивні процеси під захисними шарами. Окрему складність становить обробка важкооброблюваних сталей, де низька продуктивність класичних інструментів робить боротьбу з корозією економічно не вигідною [1].

Для радикального розв'язання проблем корозійного руйнування в промислову практику впроваджують методи лазерного очищення, які базуються на вибіркового поглинанні теплової енергії оксидними шарами без пошкодження основного металу. Випромінювання лазера діє як унікальне теплове джерело, здатне за наносекундні імпульси випаровувати забруднення та оксидні плівки навіть у важкодоступних місцях складних конструкцій. Найбільш доцільним для видалення іржі (Fe_2O_3) визнано використання CO_2 -лазерів, оскільки їхня довжина хвилі 10,6 мкм ідеально поглинається продуктами корозії, але ефективно відбивається від чистої металеві поверхні. Це створює унікальний ефект саморегулювання процесу: енергія променя витрачається лише на видалення забруднень і практично не впливає на підкладку. Висока концентрація енергії в зоні впливу забезпечує повне видалення органічних та неорганічних речовин, що гарантує ідеальну чистоту поверхні перед нанесенням антикорозійних шарів або зварюванням. Такий безконтактний підхід повністю виключає використання токсичних хімічних реагентів, що робить процес екологічно безпечним та високопродуктивним [2].

Головною особливістю променевих технологій є їхня універсальність: на відміну від механічного різання, оброблюваність матеріалу лазером визначається виключно його теплофізичними характеристиками. Лазерний промінь дозволяє локально створювати захисні шари з тугоплавких металів (титану, вольфраму, кобальту) на деталях із порівняно недорогих конструкційних матеріалів, наділяючи їх винятковою корозійною стійкістю. Завдяки можливості передачі випромінювання через оптичне волокно, стає реальною обробка та захист від корозії внутрішніх поверхонь труб, лопаток турбін та інших виробів зі складною геометрією. Відсутність механічного контакту між інструментом та деталлю усуває ризик появи деформацій, що дозволяє працювати з тонкостінними елементами без втрати точності їхніх геометричних розмірів. Використання лазера забезпечує отримання граничних значень щільності потужності, що веде до формування на поверхні ультра дисперсних структур із високою втомною міцністю [3].

Експериментальні дослідження підтверджують, що метод лазерної обробки у два проходи забезпечує найкращі результати: ступінь видалення забруднень становить понад 90 % при формуванні оптимальної шорсткості поверхні Rz 33–45 мкм, що гарантує максимальну адгезію захисних покриттів. Застосування лазерного «шокового» зміцнення з використанням ударних хвиль дозволяє створити в поверхневому шарі глибокі стискальні напруження, що радикально підвищує опірність деталей корозійно-втомному розтріскуванню. Також встановлено, що попереднє лазерне гартування виступає потужним каталізатором для хіміко-термічних процесів, збільшуючи глибину дифузійного шару при подальшому азотуванні сталі в 3–4 рази. Впровадження цих технологій у польових умовах для ремонту опор ЛЕП та мостових конструкцій дозволяє значно подовжити термін служби об'єктів інфраструктури та мінімізувати економічні втрати. Одержані лазерним наплавленням поверхневі сплави характеризуються унікальною зносостійкістю та жаростійкістю, що робить їх незамінними для роботи в екстремальних умовах. Таким чином, лазерна інженерія поверхні є найбільш перспективним засобом забезпечення довговічності металевих конструкцій.

Список використаної літератури:

1. Гапонова О. П. Променеві методи поверхневого оброблення матеріалів: навч. посібник / О.П. Гапонова. – Суми : Сумський державний університет, 2025. – 143 с. – ISBN 978-966-446-003-0
2. Афанасьєва О. В. Лазерна поверхнева обробка матеріалів : монографія / О. В. Афанасьєва, Н. О. Лалазарова, Є. П. Федоренко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2020. – 100 с.
3. Пупань Л. І. Лазерні технології у машинобудуванні : навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» / Л. І. Пупань. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – 109 с.

ОБРОБКА ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ ІНСТРУМЕНТАМИ З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Сучасна прецизійна обробка вимагає надзвичайно високої точності, стабільності та чистоти поверхні деталей, особливо у випадках роботи із загартованими сталями та матеріалами високої твердості. Використання традиційних абразивних методів (наприклад, шліфування) є трудомістким і не завжди забезпечує бажану структуру поверхневого шару. Головним недоліком шліфування є критичний температурний вплив на деталь: під час абразивної обробки від 69 % до 80 % виділеного тепла поглинається саме оброблюваною деталлю. Це неминуче призводить до місцевих фазових і структурних перетворень, появи термічних припалів, поверхневих мікротріщин та небажаного зменшення твердості металу. Крім того, відбувається шаржування поверхні відпрацьованим абразивом, що прискорює зношування деталей під час їх експлуатації. Впровадження інструментів із надтвердих матеріалів (НТМ), таких як кубічний нітрид бору (КНБ) та синтетичні алмази, дозволяє кардинально змінити технологічний процес. Зокрема, перехід на схему «прецизійні заготівельні операції – термообробка – фінішна лезова обробка» дозволяє підвищити продуктивність обробки у 2–5 разів порівняно зі шліфуванням та повністю виключити небажані структурні зміни в поверхневому шарі. Саме тому дослідження методів обробки плоских поверхонь за допомогою НТМ є одним із найактуальніших напрямків сучасного машинобудування.

Чистове торцеве фрезерування: при фінішній обробці матеріалів високої твердості все ширше застосовуються торцеві фрези, оснащені композитами на основі КНБ (ельбор, гексаніт). Цей метод повністю розкриває потенціал надтвердих матеріалів при обробці плоских поверхонь. Важливим технологічним рішенням у цьому напрямку є безвершинне косокутне фрезерування, яке значно знижує силове навантаження на різальні кромки. Застосування таких фрез із раціональним (наприклад, спірально-східчастим) розташуванням різальних пластин зменшує зношування інструменту та гарантує стабільність геометричних параметрів оброблюваної площини. Крім того, застосування торцевих фрез із НТМ дозволяє ефективно контролювати процес стружкоутворення і тепловиділення, що є критичним для уникнення термічних дефектів та забезпечення заданої шорсткості. Завдяки таким технологічним підходам досягається зниження середньоарифметичної висоти мікронерівностей обробленої поверхні до $Ra = 0,08$ мкм та гарантується точність обробки за 5–6 квалітетами. Разом з тим, під час фрезерування деталей малої ширини доведено високу ефективність несиметричного зміщення заготовки відносно осі фрези, що дозволяє застосовувати значно більші подачі та суттєво підвищувати продуктивність обробки.

Фінішне точіння плоских поверхонь є перспективним методом використання різальних пластин із нітриду бору та синтетичних алмазів. Застосування КНБ дозволяє успішно замінити дефіцитні тверді сплави, що містять вольфрам, на операціях чистового та напівчистового точіння площин. Особливо ефективним є застосування таких різців для обробки чавунів на швидкостях до 900–1000 м/хв, що дозволяє збільшити швидкість різання майже на порядок порівняно з твердими сплавами та багаторазово підвищити ресурс інструмента. У свою чергу, синтетичні алмази є незамінними при обробці кольорових металів, сплавів та неметалевих композитів. Вони демонструють феноменальну зносостійкість (якщо середній період стійкості T для звичайних інструментів традиційно становить 30–60 хв, то для алмазів час роботи між переточуваннями зростає багаторазово), зберігаючи мікротвердість на рівні 85 000–100 000 МПа, та забезпечують дзеркальну чистоту обробленої площини.

Застосування інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів для обробки плоских поверхонь є не просто швидкісною альтернативою традиційному шліфуванню, а якісно новим етапом розвитку машинобудівних технологій. Такий підхід докорінно трансформує структуру виробничого циклу виготовлення деталей із загартованих сплавів. Головним здобутком цього переходу є формування бездоганної технологічної спадковості: лезова обробка гарантовано зберігає цілісність структури металу, унеможливаючи будь-яке приховане дефектоутворення. У підсумку це формує необхідні характеристики контактної жорсткості та забезпечує багаторічну експлуатаційну надійність найвідповідальніших вузлів машин.

Застосування інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів для обробки плоских поверхонь є не просто швидкісною альтернативою традиційному шліфуванню, а якісно новим етапом розвитку машинобудівних технологій. Такий підхід докорінно трансформує структуру виробничого циклу виготовлення деталей із загартованих сплавів. Головним здобутком цього переходу є формування бездоганної технологічної спадковості: лезова обробка гарантовано зберігає цілісність структури металу, унеможливаючи будь-яке приховане дефектоутворення. У підсумку це формує

необхідні характеристики контактної жорсткості та забезпечує багаторічну експлуатаційну надійність найвідповідальніших вузлів машин.

Список використаної літератури:

1. Особливості процесів високошвидкісного різання лезовими інструментами // Вісник ЖДТУ: Технічна інженерія. – 2024. – № 1 (93). – С. 41.
2. Виговський Г.М., Громовий О.А., Балицька Н.О., Глембоцька Л.Є. Удосконалення процесу чистового торцевого фрезерування плоских поверхонь деталей малої ширини // Технічна інженерія. – 2021. – № 1 (87). – С. 13–20.
3. Середюк В.С. Основи обробки матеріалів різанням та різальні інструменти: підручник / В.С. Середюк. – К.: Основа, 2016. – 322 с.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНОГО ШЛІФУВАННЯ З АДАПТИВНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ

Процеси прецизійного шліфування відіграють критичну роль у виробництві високоточних деталей машинобудування, де вимоги до якості поверхні сягають Ra 0.02-0.1 мкм, а допуски на розміри не перевищують 2-5 мкм [1]. Проте досягнення таких параметрів ускладнюється множинними взаємопов'язаними факторами, серед яких температурні деформації технологічної системи займають особливе місце. Нагрівання абразивного круга, деталі та елементів верстата призводить до лінійних та кутових зміщень, що безпосередньо впливають на точність обробки [2]. За даними досліджень, температурні похибки становлять до 40-70% від загальної похибки обробки при шліфуванні, особливо при багатопрохідних циклах та роботі з важкооброблюваними матеріалами [3]. Традиційні підходи до компенсації температурних деформацій базуються на емпіричних залежностях або спрощених теплових моделях, які не враховують динаміку процесу в реальному часі. Системи числового програмного керування сучасних шліфувальних верстатів використовують попередньо розраховані корекції, що є ефективним лише для стабільних умов обробки [4]. При зміні режимів різання, властивостей абразивного інструменту або характеристик оброблюваного матеріалу точність таких корекцій суттєво знижується. Крім того, існуючі рішення не інтегрують інформацію про стан процесу з різних джерел, працюючи в режимі ізольованих підсистем [5].

Ключовою проблемою є відсутність комплексного підходу, який би поєднував високоточне моделювання теплових процесів з можливостями машинного навчання для адаптації до змінних умов обробки. Фізичні моделі на основі методу скінченних елементів забезпечують високу точність прогнозування температурних полів, однак вимагають значних обчислювальних ресурсів і не можуть працювати в режимі реального часу [6]. З іншого боку, моделі на основі нейронних мереж здатні швидко адаптуватися до нових умов, але потребують великих обсягів навчальних даних і не гарантують фізичної коректності результатів [7].

Інноваційна пропозиція полягає у створенні інтелектуальної системи цифрового двійника (ЦД) для прецизійного шліфування, що реалізує гібридну архітектуру Grey-box з адаптивною компенсацією температурних деформацій у замкненому контурі керування. Система інтегрує чотири взаємопов'язані модулі, кожен з яких відповідає за специфічний аспект процесу. Перший модуль – тепла фізико-математична модель технологічної системи, що описує розподіл температур у абразивному крузі, деталі, шпиндельному вузлі та елементах верстата на основі рівнянь теплопровідності з урахуванням джерел тепловиділення в зоні контакту [8]. Модель реалізована методом скінченних різниць з динамічною адаптацією сітки для забезпечення балансу між точністю та швидкістю розрахунків. Другий модуль – нейромережовий предиктор температурних деформацій на основі архітектури LSTM (Long Short-Term Memory), що прогнозує зміщення координат шліфувального круга відносно деталі з урахуванням історії процесу [9]. Навчання мережі здійснюється на основі даних, отриманих з теплової моделі та реальних вимірювань температури в ключових точках технологічної системи. Третій модуль – система моніторингу стану абразивного інструменту, що використовує аналіз акустичної емісії та вібраційних сигналів для визначення ступеня затуплення круга та прогнозування моменту правки [10]. Четвертий модуль – LLM-інтерфейс для взаємодії оператора з системою, автоматизованої генерації керуючих програм та формування звітів про якість обробки [11].

Запропонована архітектура реалізує замкнений контур адаптивного керування за наступним алгоритмом. На етапі підготовки обробки тепла модель розраховує прогнозований розподіл температур для заданих режимів шліфування і визначає очікувані температурні деформації. Ці дані використовуються для попередньої корекції траєкторії руху інструменту в керуючій програмі. Під час процесу обробки система в режимі реального часу отримує дані з термопар, встановлених на шпиндельному вузлі, столі верстата та в зоні різання, а також сигнали віброакустичних датчиків. LSTM-модуль аналізує поточні дані та прогнозує температурні деформації на наступний цикл обробки з горизонтом прогнозування 10-30 секунд. При виявленні відхилень фактичних температурних деформацій від прогнозованих значень система автоматично коригує позицію інструменту через компенсаційні переміщення координатних осей верстата. Коригуючі сигнали передаються безпосередньо в систему ЧПК через протокол STEP-NC, що забезпечує високу швидкість реакції системи. Модуль моніторингу стану круга паралельно відстежує зміни в спектрі акустичної емісії, які свідчать про затуплення абразивних зерен. При досягненні

критичного рівня зносу система ініціює процедуру правки або сповіщає оператора про необхідність заміни круга. LLM-компонент забезпечує природномовне спілкування з оператором, дозволяючи запитувати стан процесу, змінювати параметри обробки та отримувати рекомендації щодо оптимізації режимів.

Ключові переваги запропонованого підходу включають суттєве підвищення точності обробки через безперервну компенсацію температурних деформацій, що дозволяє зменшити відхилення розмірів з 8-12 мкм до 2-3 мкм при багатопрохідному шліфуванні загартованих сталей [12]. Покращення якості поверхні досягається за рахунок підтримання оптимального стану абразивного круга, що забезпечує зниження параметра шорсткості Ra з 0.32 мкм до 0.08 мкм. Продуктивність обробки зростає на 25-35% завдяки можливості роботи з підвищеними режимами різання без втрати точності, оскільки система автоматично компенсує збільшені температурні деформації. Стійкість абразивного інструменту підвищується на 40-50% через оптимізацію моментів правки на основі реального стану круга, а не за заданим часовим інтервалом.

Експериментальна валідація проводилася на прикладі круглого врізного шліфування валів з сталі ШХ15 (HRC 60-62) на верстаті з ЧПК моделі 3M151Ф2. Використовувався абразивний круг 25A40HC25K5 з швидкістю різання 35 м/с, глибиною шліфування 0.015 мм на прохід та поздовжньою подачею 0.4 м/хв. Вимірювання температури здійснювалися за допомогою інфрачервоного пірметра Fluke Ti400 та термопар типу К, встановлених на відстані 5 мм від зони контакту. Відхилення розмірів контролювалися індуктивним датчиком Heidenhain MT25 з роздільною здатністю 0.1 мкм. Результати показали, що без компенсації температурних деформацій відхилення діаметра валу після 15 хвилин безперервного шліфування досягло 11.2 мкм при номінальному значенні 50h6 мм. Застосування традиційної системи з фіксованими корекціями знизило відхилення до 6.8 мкм. Запропонована система адаптивної компенсації забезпечила відхилення лише 2.1 мкм, що відповідає вимогам допуску IT5. Параметр шорсткості поверхні покращився з Ra 0.28 мкм до Ra 0.09 мкм, що дозволяє класифікувати обробку як тонке шліфування. Час обробки однієї деталі скоротився з 8.5 хвилин до 6.2 хвилин завдяки можливості збільшення глибини шліфування без втрати точності.

Впровадження інтелектуальної системи цифрового двійника відкриває нові можливості для реалізації концепції Industry 5.0 у сфері прецизійної обробки, де критично важливою є синергія між автоматизацією та людською експертизою. Система не замінює кваліфікованого оператора, а розширює його можливості, надаючи інструменти для прийняття обґрунтованих рішень на основі комплексного аналізу стану процесу.

Список використаної літератури:

1. Marinescu I. D. et al. Handbook of Machining with Grinding Wheels. CRC Press, 2020. 632 p. DOI:10.1201/9781003052166
2. Aurich J. C. et al. Digital twins in manufacturing: a taxonomy for manufacturing applications. Digital Twin. 2025. Vol. 2, Iss. 1. Art. 2496645. DOI: 10.1080/27525783.2025.2496645
3. Chen C. et al. Integrating large language model and digital twins in the context of industry 5.0. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2025. Vol. 94. Art. 102982. DOI: 10.1016/j.rcim.2025.102982
4. Zhao Y. et al. Thermal error modeling and compensation for a high-speed motorized spindle. Int J Adv Manuf Technol. 2019. Vol. 104. P. 3359–3373. DOI: 10.1007/s00170-019-04141-w
5. Keskar A. Advancing IIoT & Industry 4.0 through Digital Twin Technologies. World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. 2025. Vol. 14, Iss. 1. P. 228–240. DOI: 10.30574/wjaets.2025.14.1.0028
6. Li B., Tian X. Temperature field prediction in surface grinding using a hybrid method of FEM and ANN. Int J Adv Manuf Technol. 2018. Vol. 95. P. 3841–3851. DOI: 10.1007/s00170-017-1473-5
7. Sun C., Shi V. G. PhysiNet: Physics+NN for Digital Twins. arXiv. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2104.14447. DOI: 10.48550/arXiv.2104.14447
8. Сидоренко В. К., Підгаєцький М. М. Моделювання теплових процесів при шліфуванні. Прогресивні технології і системи машинобудування. 2023. Вип. 65. С. 143–151. DOI: 10.20998/2079-004X.2023.1(65).15
9. Zhang Y. et al. LSTM-based thermal error prediction for CNC machine tools. Procedia CIRP. 2020. Vol. 93. P. 1424–1429. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.056
10. Fernández-Robles L. et al. Machine-tool condition monitoring with Gaussian mixture models-based acoustic emission analysis. Applied Soft Computing. 2022. Vol. 123. Art. 108938. DOI: 10.1016/j.asoc.2022.108938
11. Liu C. et al. Large Language Models for manufacturing process optimization: A review. Journal of Manufacturing Systems. 2024. Vol. 72. P. 156–174. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.01.006
12. Сапон С. П., Дзюба Д. І. Цифрові двійники шпиндельних вузлів. Огляд. Вісник ХНТУ. 2023. № 4(87). С. 148–158. DOI: 10.36910/6775-2409-2316-2023-87-4-19

Колесник М.О., студент
Виговський Г.М., к.т.н., доц.
Коваленко Я.П., доктор філософії з прикладної механіки
Державний університет «Житомирська політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

Сучасне машинобудування висуває високі вимоги не лише до точності виготовлення, але й до експлуатаційних властивостей поверхневого шару деталей і традиційні методи обробки різанням або шліфуванням часто не забезпечують необхідні експлуатаційні властивості. Досягнення таких характеристик стало можливим завдяки широкому впровадженню методів поверхневого пластичного деформування (ППД), які ефективно поєднують обробку та зміцнення без зняття матеріалу. Їх застосування дозволяє зменшити шорсткість поверхні, підвищити твердість і зносостійкість, а також сформувати сприятливі залишкові напруження стиску. У результаті забезпечується стабільність геометричних параметрів деталей, зростає їх довговічність і надійність в умовах експлуатації.

Методи поверхневого пластичного деформування ППД, що застосовуються для підвищення якості та довговічності деталей, поділяються на статичні, динамічні та комбіновані. До статичних методів належать обкатування роликками або кулями, розкатування внутрішніх отворів, алмазне вигладжування та дорнування, які забезпечують інтенсивне згладжування мікронерівностей і зміцнення поверхневого шару за рахунок безперервного тиску інструменту. Динамічні (ударні) методи, такі як відцентрове обкатування, віброобкатування та ударна обробка шариковими головками, характеризуються імпульсним впливом, що сприяє формуванню глибших зміцнених шарів і підвищенню втомної міцності. Комбіновані методи, зокрема електромеханічна обробка та ультразвукове вигладжування, поєднують механічну дію з додатковими фізичними факторами — електричним струмом або ультразвуковими коливаннями, що дозволяє досягти високої якості поверхні, зниження шорсткості та значного підвищення експлуатаційних властивостей деталей.

Методи обробки деталей ППД відрізняються простотою реалізації і високою ефективністю, та відносяться до деформаційних методів. ППД застосовують на фінішних операціях технологічного процесу, замість або після термообробки, і часто замість абразивної або оздоблювальної обробки.

Обробка ППД заснована на пластичній деформації тонкого поверхневого шару в холодному стані під дією твердого деформуючого інструмента. На відміну від різання, цей процес зберігає цілісність волокон металу та забезпечує утворення дрібнозернистої структури в поверхневому шарі, при цьому відсутнє шаржування оброблюваної поверхні частинками шліфувальних кругів і полірувальних паст, а також не виникають термічні дефекти. Процеси обробки відзначаються високою стабільністю, що забезпечує сталі показники якості поверхні, при цьому можливо досягати мінімальних значень шорсткості ($R_a = 0,1 \dots 0,05$ мкм і менше), як для термічно необроблених сталей і кольорових сплавів, так і для високоміцних матеріалів без порушення початкової форми заготовок. За один робочий хід шорсткість поверхні може зменшуватися у кілька разів, формується сприятливий мікрорельєф із підвищеною опорною площею, а також можуть створюватися регулярні мікрорельєфи із заданими заглибленнями для утримання мастильного матеріалу. Одночасно в поверхневому шарі виникають стискаючі залишкові напруження та відбувається поступове підвищення мікротвердості. Головною перевагою є можливість створення сприятливих стискаючих залишкових напружень та підвищення мікротвердості поверхні на 20–150% і більше [1].

Важливою технологічною особливістю алмазного вигладжування є те, що цей метод не підвищує геометричну точність оброблених деталей, а лише зберігає рівень точності, досягнутий на попередніх технологічних операціях на відміну від обкатування яке змінює геометрію за рахунок значних прикладених сил. Водночас їх застосування є економічно доцільним, оскільки забезпечує отримання аналогічних показників шорсткості поверхні порівняно з такими операціями, як хонінгування або притирання, але при цьому вартість процесу може бути в середньому у 4 рази нижчою. Окрему увагу серед методів ППД привертає вібронакатування, яке завдяки специфіці вібраційного впливу формує у 5–25 разів більші радіуси закруглення вершин мікронерівностей у порівнянні зі шліфуванням. Це, у свою чергу, сприяє зменшенню інтенсивності зношування, скороченню часу припрацювання спряжених поверхонь та підвищенню експлуатаційної довговічності деталей [2].

Методи поверхневого пластичного деформування ППД є ефективним напрямом підвищення експлуатаційних властивостей деталей у сучасному машинобудуванні, оскільки дозволяють одночасно покращувати якість поверхні, зміцнювати поверхневий шар без зняття матеріалу та підвищувати продуктивність обробки. Простота реалізації цих методів дозволяє з мінімальними витратами забезпечити стабільність геометричних параметрів деталей, підвищити їх довговічність і надійність в

умовах експлуатації. Крім того, технології ППД є економічно вигідними порівняно з традиційними фінішними операціями, такими як хонінгування чи притирання, та можуть забезпечувати високі показники якості поверхні при нижчих витратах.

Список використаної літератури:

1. В.О. Дзюра, П.О. Марущак Технологічні методи забезпечення параметрів якості поверхонь тіл обертання та їх профілометричний контроль. Тернопіль 2021
2. В.А. Кирилович, П.П. Мельничук, В.А. Яновський Основи технологій обробки поверхонь деталей машин Житомир Вид. О.О. Євенок 2017

розширення. Перегрів інструмента призводить до втрати твердості, появи мікротріщин і прискороного зношування.

Для зниження температури застосовують мастильно-охолоджувальні рідини (МОР). Особливо ефективним є внутрішнє підведення МОР через канали всередині інструмента безпосередньо в зону різання. Це не тільки охолоджує інструмент, а й полегшує видалення стружки. При обробці глибоких отворів це є критично важливим фактором забезпечення стабільної роботи [2].

Ще одним напрямом підвищення працездатності є застосування сучасних інструментальних матеріалів. Традиційно свердла-розвертки виготовляють із швидкорізальної сталі або твердого сплаву. Швидкорізальна сталь має високу в'язкість і добре витримує ударні навантаження, але поступається твердим сплавам за теплостійкістю. Твердосплавні інструменти забезпечують вищу продуктивність і стійкість, однак є більш крихкими та чутливими до вібрацій.

Ефективним способом підвищення стійкості є нанесення зносостійких покриттів. Найпоширенішими є TiN, TiCN, TiAlN, AlCrN. Вони зменшують коефіцієнт тертя, підвищують твердість поверхні та покращують теплостійкість інструмента. Наприклад, покриття TiAlN ефективно працює при високих температурах і використовується при обробці високоміцних сталей.

Подальше підвищення ефективності комбінованих осьових різальних інструментів доцільно здійснювати шляхом комплексного моделювання напружено-деформованого стану робочої частини інструмента з урахуванням реальних умов різання. Перспективним напрямом є також оптимізація геометричних параметрів свердлильної та розвертальної ділянок із використанням сучасних методів комп'ютерного проектування. Важливу роль відіграє раціональний вибір режимів різання та способів підведення мастильно-охолоджувальних рідин, що забезпечує стабільність процесу обробки отворів. Застосування сучасних зносостійких покриттів і прогресивних інструментальних матеріалів сприяє підвищенню довговічності інструмента та якості обробленої поверхні.

Реалізація зазначених підходів дозволить підвищити техніко-економічні показники процесу обробки отворів і розширити можливості використання комбінованих інструментів у сучасному машинобудуванні.

Список використаної літератури:

1. Швець С.В. Металорізальні інструменти: Навчальний посібник. - Суми: Вид-во СумДУ, 2007. - 185 с.
2. Родін П.Р. Металорізальні інструменти. - Київ: Вища школа, 1986. - 455 с.

ВПЛИВ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНІВ ПІСЛЯ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

У сучасному машинобудуванні одним з ключових пріоритетів є підвищення довговічності деталей, так як надійність машин, механізмів та виробничого обладнання в цілому залежить від терміну служби окремих деталей. Особливу увагу слід приділяти деталям, які працюють під дією статичних, динамічних та змінних навантажень. Вони характеризуються поступовим накопиченням пошкоджень у поверхневому шарі.

Важливим фактором, від якого багато в чому залежить експлуатаційна надійність таких деталей, є матеріал, з якого вони виготовлені. Поширеним матеріалом є чавуни, оскільки вони поєднують в собі хороші ливарні властивості, достатню міцність, зносостійкість та відносно низьку вартість виготовлення деталей складної форми. Особливе місце серед них займають високоміцні чавуни із кулястим графітом, які використовуються для виготовлення відповідальних деталей: колінчастих валів, елементів корпусів, маточин, кронштейнів, деталей трансмісії та інших виробів.

Експлуатаційні характеристики деталей з високоміцних чавунів після механічної обробки визначаються не лише точністю розмірів і шорсткістю поверхні, а й станом поверхневого шару. Серед основних характеристик якості оброблених поверхонь є мікрогеометрія поверхні, мікротвердість, структура, деформаційне зміцнення та залишкові напруження. Залишкові напруження є одним із ключових факторів, що впливають на втомну міцність, зносостійкість та довговічність деталей після механічної обробки [2, 3].

В процесі механічної обробки поверхневий шар деталей піддається одночасному впливу механічних та термічних навантажень, тертя та пластичної деформації. Як наслідок, утворюються залишкові напруження, які можуть бути стискаючими або розтягуючими. Стискаючі залишкові напруження є корисними, оскільки вони послаблюють дію розтягуючих робочих навантажень, уповільнюють поширення мікротріщин та підвищують стійкість до руйнування від втоми. З іншого боку, залишкові розтягуючі напруження можуть сприяти виникненню та поширенню тріщин, що призводить до скорочення терміну служби деталей.

У роботі Ілорі та ін. [1] було досліджено взаємозв'язок між шорсткістю поверхні та залишковими напруженнями після торцевого фрезерування перлітного високоміцного чавуну. Під час експерименту швидкість різання змінювали в діапазоні 200–1800 об/хв, глибину різання — в межах 0,2–1,0 мм, витрату охолоджувальної рідини — в межах 0–4 л/хв, а швидкість подачі — в межах 10–50 мм/об. Встановлені значення поверхневих залишкових напружень коливалися в межах від 127,01 МПа до 2586,25 МПа, а шорсткості поверхні — від 18,98 нм до 154,7 нм. Ці результати підтверджують значний вплив параметрів різання та умов охолодження на формування напруженого стану в поверхневому шарі. Важливим результатом дослідження [1] є встановлення залежності між шорсткістю поверхні та залишковими напруженнями. Коефіцієнт кореляції між цими параметрами становив $R = 0,938$ при рівні значущості $p \leq 0,01$. Таким чином, погіршення мікрогеометрії поверхні супроводжується збільшенням залишкових напружень.

Взаємозв'язок між залишковими напруженнями та довговічністю пояснюється тим, що втомні тріщини найчастіше виникають на поверхні або в приповерхневому шарі.

У роботі Javidі та ін. [2] показано, що механічна обробка суттєво впливає на цілісність поверхні та втомну довговічність виробів, причому вплив залишкових напружень може бути більш значним, ніж вплив шорсткості поверхні. Тому оцінка якості механічної обробки виключно на основі параметра шорсткості є недостатньою.

У дослідженні Liu та ін. [3] також підкреслюється, що втомна поведінка металевих деталей тісно пов'язана зі станом поверхневого шару. Поверхневі дефекти, підвищена шорсткість та розтягуючі залишкові напруження можуть прискорити виникнення втомних тріщин. Навпаки, стискаючі залишкові напруження зменшують ефективну дію розтягуючих робочих навантажень та уповільнюють поширення тріщин [3].

Таким чином, залишкові напруження слугують важливою проміжною ланкою між умовами механічної обробки та експлуатаційною надійністю деталей. Тут можна виділити наступний зв'язок: умови обробки → стан поверхневого шару → залишкові напруження → виникнення та поширення тріщин → довговічність деталі.

Отже, під час механічної обробки деталей із високоміцних чавунів необхідно враховувати не лише продуктивність процесу та шорсткість поверхні, а й знак та величину залишкових напружень. Для підвищення довговічності деталей доцільно забезпечити умови механічної обробки, що сприяють зменшенню розтягувальних залишкових напружень або утворенню стискаючих залишкових напружень.

Список літератури:

1. Ilori O. O., Ogunranti G. A., Oyewusi T. F., Sole-Adeoye O. D., Fadare O. A., Adeyemi F. F. Investigation of Relationship between the Surface Roughness and Residual Stress on Pearlitic Ductile Iron Face Machined. *ABUAD Journal of Engineering Research and Development*. 2025. Vol. 8, Issue 2. P. 170–175.
2. Javidi A., Rieger U., Eichlseder W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International Journal of Fatigue*. 2008. Vol. 30. P. 2050–2055.
3. Liu G., Huang C., Zhao B., Wang W., Sun S. Effect of Machined Surface Integrity on Fatigue Performance of Metal Workpiece: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 34. Article 118.

Орел В.М., к.т.н., докторант

Державний університет «Житомирська політехніка»

Нетесаний А.П., викладач

Вище професійне училище №7 м. Кременчука – ВПУ №7

Нетесанна А.Р., аспірант

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС 3D ДРУКУ СТІЛЬНИКОВИХ СИСТЕМ

Стільникові системи наразі знаходять широке застосування в інженерній практиці. Сендвіч-панелі, що складаються зі зовнішньої та внутрішньої оболонок із стільниковим заповнювачем між ними, використовуються у літальних та космічних апаратах як елементи силових або функціональних структур, у дронах різного функціонального призначення, в засобах бронетехніки, в оболонках маломірних суден та мають багато інших прикладних застосувань [1]. Висока жорсткість, поєднана із достатньою міцністю, легкість конструкцій робить такі панелі практично безальтернативними у випадках, коли використання інших матеріалів, у тому числі спінених поліуретанових сполук, поліпропілену або полістиролу неможливе внаслідок певних обмежень щодо силового та температурного впливу, дії вібрацій, впливу ультрафіолету та інших шкідливих факторів.

Динамічна системи принтера може бути представлена у вигляді багатомасової пружної системи із пружно-в'язким сполученням зосереджених мас m_e , m_d , m_c між собою (зокрема, за допомогою пружних ланок $c_{прх}$, $c_{пру}$), рис. 1а. Тоді при багатопрхідному викладанні філаменту в режимі реверсу в межах товщини стільника заготовка масою m_d сприймала ряд динамічних навантажень внаслідок власної інерційності F_i (набагато менші навантаження від дії сил в'язкого опору вичавленого філаменту F_b), рис. 1б. Розрахункові моделі компонентів приводу представлені на рис. 1в. Зосереджені маси підводяться до екструдера m_1 та рами горизонтального переміщення m_2 , яка з'єднана з вертикальною балкою основи (у блоці руху осей x , z екструдера) на вертикальній осі принтера).

Для другого модуля – до елементів горизонтального опорного столу m_3 та готового виробу в процесі його друку m_4 , з'єднання між сполученими масами є з'єднаннями із обмеженою жорсткістю, маса друкованого об'єкта уявляється зосередженою у точці.

У випадку, коли використовується принтер із кінематикою X-Y core відповідні зосереджені маси будуть віднесені до інших елементів: тепер вертикальний рух координатою z здійснюватиме не маса m_1 та m_2 , а маси m_3 , m_4 . Натомість маси m_1 та m_2 будуть здійснювати горизонтальне переміщення.

Оскільки метод пошарового викладання філаменту передбачає екструзію у стані, коли соплом задовільно формується високо еластична нитка пластику, температура якої в момент виходу становить $T_c=220-235$ °С, та яка завдяки дії сил підтиснення, сил пружно-пластичного опору, гравітаційних сил та сил тертя притискається до поверхні викладання, то внаслідок силової дії нитка с перерізом у вигляді кола діаметром D_s , змінює переріз на умовно еліптичний із півсями $A/2$ та $B/2$, а на опорній площині утворюється смуга контакту шириною p_2 , яка залежить від певних факторів (температури екструзії, в'язкості матеріалу, швидкості викладання чистоти середовища, температури основ та ін.). Зміщення положення екструдера на крок T_k та рух на еквідистанті до попередньої траєкторії дозволяє отримати бічну смугу контакту шириною p_1 , яка формується внаслідок «втиснення» екструдованого матеріалу до кута між поверхнею попередньої нитки та поверхнею основи для викладання.

Тоді порожнистість визначиться за співвідношенням площі теоретичного заповнення проміжку шару $h_s k D_c$ та площею перетину екструдованого філаменту $\pi AB/4$:

$$\rho = \frac{\pi AB}{4h_s k D_c} \quad (1)$$

h_s – товщина шару, мм; D_c – діаметр сопла екструдера, мм; k – коефіцієнт, що враховує відмінність ширини екструдованої смужки від діаметра сопла D_c .

Параметри надійності процесу, пов'язані із явищами розплаву філаменту та його витіканні із сопла, визначаються із реологічного рівняння для розплаву філаменту (полімерної нитки), яка за [2] виглядає наступним чином:

$$\tau = K_1 e^{-\beta \frac{T-T_1}{T_1-273}} \cdot \gamma^n \quad (2)$$

де β – температурний коефіцієнт, K_1 – коефіцієнт консистенції (ефективної в'язкості), τ – дотичні напруження. Крива плинності для розплаву полімеру $\tau = K\gamma^n$, де n – показник степені, яка характеризує ступінь неньютонівської поведінки розплаву і є індексом течії. Коефіцієнт K є функцією температури,

$Ke^{-\beta}$, тож $\beta = -T_1 / (T_2 - T) \ln(K_2 / K_1)$. Реологічні параметри K та n визначені методом найменших квадратів за експериментальними даними відповідно до [3].

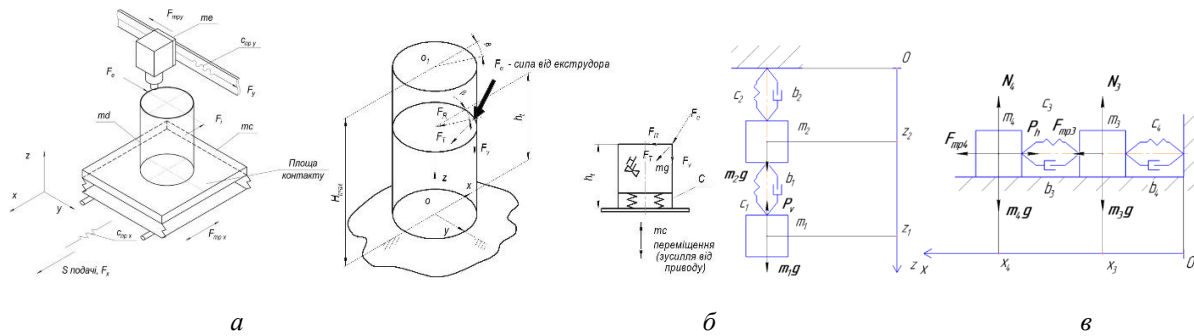


Рис. 1. Схема викладання філаменту при вертикальному розташуванні створюваного стільника (а), діючі на модель сили (б) та пружні динамічні моделі компонентів приводу принтера (в) для вертикальної та горизонтальної осей

З метою перевірки висунутих тверджень було проведено комп'ютерне моделювання динамічних процесів під час друку у середовищі SolidWorks, базуючись на розрахунковій схемі рис. 1а, рис.1б. Модель жорстко закріплювали на робочому столі, виходячи з умови, що сама модель володіє кінцевою жорсткістю та розподіленою масою.

В результаті розрахунків отримували картини розподілу напружень в елементах стільника, рис. 2а деформацій, рис. 2б та переміщень, рис. 2в. обчислення виконані для принтерів компонування Core XY.

Результати моделювання свідчать про те, похибки викладання філаменту можуть локалізуватися в досить обмеженій області, яка охоплює приблизно ділянку елемента стільника.

У даному випадку, рис. 2,г напруження поширюються не далі від одного шару стільників (на глибину 12...15 мм); незначна сила F_e , яка визначається параметрами екструзії (за (2)) за швидкістю екструзії філаменту, пов'язаною з швидкістю обходу контуру, на малих перетинах може створювати істотні напруження (до 18 МПа), що для матеріалу нижніх шарів при температурі склування ($T=80$ °С) на відповідних площадках контакту (які існують і становлять $f_a \approx 0,2 \dots 0,25 f_{a1}$, де f_{a1} – перетин стінки стільника) є критичними, оскільки за [4] такі значення відповідають умовам руйнування зразків при навантаженні уперек площин викладання.

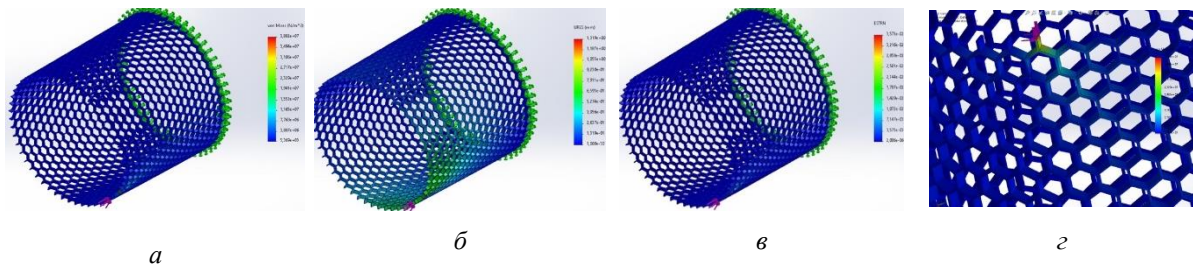


Рис. 2. Розподіл еквівалентних напружень в елементах стільника за Мізесом (а), деформацій (б) та переміщень (в) при нерухомому столі та силової дії від екструдера (г)

Тож можна констатувати, що динамічні властивості принтерів та обмежена жорсткість заготовки ведуть до двох можливих порушень нормального ходу процесу друку: для високошвидкісних принтерів типу Core XY із столом, рухомих по вертикальній координаті – можливість утворення локальних дефектів, пов'язаних із зміною траси проходження контуру, відповідно, з умовами, що ведуть до локальних короткочасних збурень у системі; при цьому швидкість обходу контуру може сягати 200-300 мм/с зі збереженням сумарної похибки не більшої за 0,5 мм на висоті $H=200$ мм; для принтерів Bed Slinger такі дефекти можуть виникати максимально на верхніх шарах контуру, а швидкість не перевищує 35...50 мм/с; більш істотним є проблема деформації виробу під час руху столу, що викликає істотне зміщення точок викладання філаменту, яке може привести до унеможливлення процесу сполучення шарів внаслідок різкого погіршення щільності викладеного матеріалу, а деформація виробу в цілому – до відриву його від столу.

Список використаної літератури:

1. Br. Castanie, Chr. Bouvet, Ma. Gino. (2020) Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. Composites Part C: Volume 1, ISSN 2666-6820, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100004>.
2. Chen, Y., Li, T., Jia, Z., Scarpa, F., Yao, C., Wang, L.: 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations. Mater. Des. 137, 226–234 (2018)
3. Uspensky, B., Derevianko, I., Avramov, K. et al. Experimental and Numerical Study on Fatigue of Sandwich Plates with Honeycomb Core Manufactured by Fused Deposition Modelling. Appl Compos Mater 29, 2033–2061(2022). <https://doi.org/10.1007/s10443-022-10057-w>
4. Experimental analysis of the mechanical characteristics of launch vehicle parts manufactured by FDM additive technologies. - I Derevianko, K Avramov, B Uspensky, A Salenko. - Composite Structures 223, 110656

Іваненко Р.О., с.н.с.

*Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки
та судових експертиз, Київ*

Волошко О.В., ст. викладач

Діордіца І.М., зав. лаб.

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ*

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

Розглянуто сутність методу комплексної оптимізації. Експериментальне підтвердження коректності математичної моделі. Створенню методики автоматизованого розрахунку оптимальних режимів фрезерування криволінійних поверхонь на верстатах з ЧПК з урахуванням різних умов різання, що забезпечують максимальну продуктивність або мінімальну собівартість обробки. Розроблена методика використовується в промисловості у вигляді системи автоматизованого розрахунку оптимальних режимів фрезерування поверхонь кінцевими фрезами. Метод комплексної оптимізації є оптимальним з точки зору витрат часу на обчислення, він дозволяє знайти глобальний екстремум функції на базі спільного використання методів структурної і параметричної оптимізації при вирішенні задачі нелінійного програмування.

Для вирішення задачі оптимізації процесу кінцевого фрезерування поставлена така основна мета: розробити метод комплексної багатовимірної оптимізації процесу кінцевого фрезерування, як в детермінованій так і в ймовірнісній постановці. При вирішенні завдання комплексної оптимізації обчислювальні процеси оптимізації протікають на двох рівнях, що взаємодіють в ітераційному режимі, де зовнішнім циклом ітерації є перший етап оптимізації, а внутрішнім циклом - другий. Метод комплексної оптимізації має гарну збіжність і, стосовно завдань оптимізації процесу кінцевого фрезерування, показує високу ефективність.

Метод комплексної оптимізації ґрунтується на простих методах вирішення оптимізаційних задач нелінійного програмування при наявності обмежень, його застосування та є більш ефективним. Застосування запропонованого методу комплексної оптимізації процесу кінцевого фрезерування дозволяє отримати оптимальні режими різання з наявних значень на верстаті, побудувати оптимальну траєкторію руху різального інструменту в складному геометричному контурі, вибрати оптимальну чорнову і чистову фрезу і їх радіуси заточки. Застосування запропонованого методу комплексної оптимізації процесу кінцевого фрезерування дозволяє отримати оптимальні режими різання з наявних значень на металорізальному верстаті, побудувати оптимальну траєкторію руху різального інструменту в складному геометричному контурі, вибрати оптимальну чорнову і чистову фрезу і їх радіуси заточки. Вибір різального інструмента і визначення оптимального варіанту обробки на основі мінімізації тривалості процесу обробки за допомогою запропонованого алгоритму, реалізованого на верстатах з ЧПК, дозволяє підвищити загальну продуктивність виготовлення деталі в середньому до 10-15%.

Можна зробити висновок, що вибір різального інструменту і визначення оптимального варіанту обробки на основі мінімізації тривалості процесу обробки за допомогою запропонованого алгоритму, реалізованого на верстатах з ЧПК дозволяє підвищити загальну продуктивність виготовлення деталі в середньому до 10-15%.

Список використаної літератури:

1. Комп'ютерне моделювання процесів та систем. Чисельні методи : підручник / С. П. Вислоух, О. В. Волошко, Г. С. Тимчик, М. В. Філіппова. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 228 с.
2. Вислоух С.П. Інформаційні технології в задачах технологічної підготовки приладо- та машинобудівного виробництва: Монографія / С.П. Вислоух. – К.: НТУУ „КПІ”, 2011. – 480 с.

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ МОНОКОЛЕСО

Виготовлення моноколес (блісків) для сучасних авіаційних двигунів є одним із найскладніших завдань в аерокосмічній інженерії, що вимагає забезпечення високої геометричної точності та цілісності поверхневого шару. Через специфіку конструкції – тонкостінність елементів у поєднанні з використанням високоміцних титанових сплавів – процес механічної токарної обробки супроводжується значними пружними деформаціями та високим термічним навантаженням. Вирішення цих технологічних питань є фундаментальною задачею для забезпечення тривалої експлуатаційної надійності та втомної міцності авіаційних компонентів, що працюють в умовах інтенсивних динамічних навантажень.

Виникнення похибки форми через пружні деформації, спричинені силами різання, суттєво ускладнює виготовлення деталей. Для подолання цієї проблеми авторами [1] запропоновано стратегію компенсації траєкторії руху інструменту. Суть цього методу полягає у поєднанні моделювання деформацій деталі під дією сил різання з коригуванням глибини різання. Спочатку проводиться розрахунок для недеформованої моделі, а потім – для деформованої; порівняння отриманих поверхонь дозволяє визначити величину похибки та розрахувати траєкторію руху інструменту, де глибина різання коригується на величину передбаченого відхилення, і цей ітеративний цикл повторюється до досягнення збіжності, коли похибка мінімізується. Результати дослідження продемонстрували високу ефективність запропонованого підходу, а прогнозована похибка була зменшена з 75 мкм до 7 мкм, що підтвердилося під час натурних випробувань, де фактична похибка була майже непомітною – для деформованої; порівняння отриманих поверхонь дозволяє визначити величину похибки та близько 5 мкм.

Для тонкостінних авіаційних деталей, таких як диски та моноколеса, стан залишкових напружень нерозривно пов'язаний із геометричною точністю виробів і виступає як фундаментальний критерій оцінки якості виготовлення деталей, що піддаються високим динамічним навантаженням. Традиційні моделі прогнозування, що спираються виключно на параметри різання, виявляються обмеженими через свою чутливість до конкретного типу інструменту та умов обробки.

Проведений аналіз впливу восьми змінних факторів при обробці дозволив встановити, що найбільш вагомий вплив на формування напружень мають коефіцієнт тертя, радіус вершини інструменту та швидкість різання [2]. Коефіцієнт тертя та геометрія вершини інструменту безпосередньо визначають глибину залягання напруженого шару, тоді як зростання швидкості різання зумовлює трансформацію залишкових напружень у бік несприятливих розтягувальних.

Механізм формування напруженого стану пояснюється складною взаємодією механічних та термічних чинників. Механічний вплив проявляється через два типи пластичної деформації: стискання матеріалу передньою поверхнею інструменту, що породжує розтягувальні напруження на поверхні, тоді як екструзія та тертя по задній поверхні інструменту сприяють формуванню корисних напружень стиску. Паралельно із цим виникає термічний ефект, зумовлений нерівномірним розподілом тепла; поверхневий шар, намагаючись розширитися, стримується холоднішою основою заготовки, що після остаточного охолодження призводить до появи розтягувальних напружень.

Експериментальні дослідження підтвердили, що для авіаційного виробництва найбільш раціональним є використання інструменту із середнім радіусом вершини в межах 20–40 мкм. Такий вибір дозволяє підтримувати сили різання та температурний режим на низькому рівні, що не лише подовжує термін служби інструменту, а й забезпечує формування стабільних напружень стиску на обробленій поверхні. Натомість надмірне нарощування швидкості різання веде до лінійного зменшення абсолютного значення напружень стиску через інтенсифікацію теплового впливу.

Дослідження фінішної токарної обробки авіаційних титанових сплавів Ti-6Al-4V та Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo продемонструвало [3], що за всіх досліджених режимів у поверхневому шарі формуються виключно залишкові напруження стиску. Найвищі рівні напружень стиску формуються за умов високої швидкості видалення металу в поєднанні з використанням інструмента з малим радіусом вершини. Експериментально встановлено, що у сплаві Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo залишкові напруження в середньому на 45% вищі, ніж у Ti-6Al-4V, що пояснюється його вищою міцністю та меншою чутливістю до термічного розм'якшення. Процес формування напруженого стану суттєво залежить від швидкості подачі та геометрії інструмента. Зокрема, збільшення швидкості подачі на 150% дозволяє підвищити рівень напружень стиску для сплаву Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo приблизно на 50%. Однак аналогічне зростання подачі призводить до погіршення шорсткості поверхні Ra на 100%.

Аналіз цілісності поверхні підтвердив відсутність несприятливих металургійних змін, таких як мікротріщини, деформація зерен або формування «білого шару», що свідчить про дотримання

температурного режиму нижче порогу β -перетворення, який для Ti-6Al-4V становить 970-990 °C.

Дослідження, проведене Магнусом Юханссоном на базі компанії Sandvik Coromant [4], зосереджене на глибокому аналізі зносу та терміну служби інструментів із нелегованого твердого сплаву (WC/Co) при поздовжньому точінні титанового сплаву Ti-6Al-4V. Основною причиною інтенсивної деградації інструмента в цьому процесі є унікальне поєднання низької теплопровідності титану та його надзвичайно високої хімічної активності до більшості металів при підвищених температурах. Через те, що тепло не встигає ефективно відводитися зі стружкою, у зоні контакту між інструментом та заготовкою досягаються критичні температури, які стають каталізатором руйнівних процесів.

Утворення лунок зносу на передній поверхні, ініційованих дифузійними процесами та хімічною взаємодією, призводить до поступового «вимивання» матеріалу інструменту стружкою. Утворення такої лунки з часом призводить до критичного ослаблення геометрії різальної кромки, її деформації або руйнування. Крім цього, на задній поверхні інструменту розвивається фасочний знос, зумовлений абразивною дією матеріалу та високим механічним тиском.

У роботі [4] детально розглянуто характеристики твердого сплаву марки H13A, яка складається з кобальтової зв'язки (близько 6%) та зерен карбіду вольфраму середнім розміром близько 1 мкм. Попри те, що ця марка тривалий час вважалася «сталонною», її стійкість до дифузійного зносу при інтенсивному нагріванні виявляється недостатньою. Для боротьби з цим явищем було розроблено експериментальні марки твердого сплаву, у яких акцент зроблено на створенні дрібнозернистої структури та оптимізації вмісту кобальту шляхом його зниження до 5-5,5 %.

Шлях до підвищення ефективності обробки полягає у використанні таких вдосконалених матеріалів, до складу яких додаються такі інгібітори росту зерен, як карбід хрому або карбід ванадію. Ці добавки дозволяють зберегти стабільність структури під час виготовлення інструмента та підвищити його опір термічному розм'якшенню під час експлуатації. Результати випробувань продемонстрували, що такі технологічні рішення дозволяють збільшити термін служби інструменту на 45% при швидкості різання 70 м/хв та на 50% при швидкості 115 м/хв порівняно з базовою маркою H13A.

Формування «білих шарів» у титанових сплавах, що отримали свою назву через характерний вигляд під оптичним мікроскопом: після травлення вони виглядають як світлі, безструктурні зони на самій поверхні обробленої деталі, є одним із найбільш критичних аспектів цілісності поверхні [5]. Основною особливістю білих шарів є їхня надзвичайно висока твердість порівняно з основним металом, що супроводжується суттєвими змінами в мікроструктурі та механічних властивостях приповерхневого шару.

Виникнення білих шарів зумовлене екстремальними термомеханічними навантаженнями, які виникають у зоні різання під час точіння або фрезерування. Механізм їхнього формування базується на швидкому нагріванні матеріалу (часто вище температури фазового перетворення) з наступним миттєвим охолодженням, що призводить до фазових змін та перерозподілу хімічних елементів. Такий термічний цикл у поєднанні з інтенсивною пластичною деформацією створює специфічну зону з видозміненою кристалічною решіткою, яка за своїми характеристиками відрізняється від основного матеріалу.

Вплив білих шарів на виріб оцінюється переважно як негативний, оскільки їхня крихкість та різкий градієнт властивостей на межі з основним металом можуть стати осередками зародження втомних тріщин, що знижує втомну довговічність деталей, які працюють в умовах високих динамічних навантажень, характерних для авіаційних двигунів. Виявлення білих шарів потребує руйнівних методів контролю, зокрема виготовлення та аналізу поперечних шліфів, що є надзвичайно витратним процесом.

Забезпечення високої якості обробки моноколіс можливе при комплексному підході, який поєднує методи предиктивної корекції деформацій заготовки з жорстким контролем фізико-механічних параметрів у зоні різання. Важливим аспектом є дотримання режиму обробки, який виключає ризики структурних змін матеріалу, а також впровадження інноваційних інструментальних матеріалів, стійких до дифузійного зносу. Такий системний підхід не лише мінімізує похибки форми та забезпечує сприятливий напружений стан поверхні, але й створює основу для виробництва відповідальних деталей авіаційної техніки.

Список використаної літератури:

1. Lorong P., Troisgros J., Guskova M., Chatain R., Dorlin T., Karaoui H. Undercut error and compensating trajectory simulation versus experiments comparison when contour turning of Inconel 718 thin-walled parts. *Procedia CIRP*. 2025. Vol. 133. P. 734–739. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2025.02.125>.
2. Abboud E., Attia H., Shi B., Damir A., Thomson V., Mebrahtu Y. Residual stresses and surface integrity of Ti-alloys during finish turning guidelines for compressive residual stresses. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 45. P. 55–58. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.069>.
3. Li, G., Lu, W., Huang, S., Zhang, X., & Ding, S. Analysis and prediction of residual stresses based on cutting temperature and cutting force in rough turning of Ti-6Al-4V. *Heliyon*. 2022, Vol. 8(11), P.1-16. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11661>.
4. Johansson M. Tool wear in turning titanium alloys : Master's thesis. Uppsala University, 2015. 70 p.
5. Brown M. W., et al. Quantitative characterization of the white layer in machined titanium alloy Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019. Vol. 273. P. 1-41.

Василинич М.В., студ.
Березюк О.В., проф. каф. БЖДПБ, д.т.н., доц.
Вінницький національний технічний університет

ПРОГРАМНЕ КЕРУВАННЯ ВИКОНАВЧИМИ МЕХАНІЗМАМИ СМІТТЄВОЗІВ

У сучасних умовах урбанізації та збільшення кількості твердих побутових відходів особливої актуальності набуває підвищення ефективності й безпечності функціонування комунальної техніки. Сміттєвози є одним із ключових елементів системи поводження з відходами, оскільки саме вони забезпечують регулярний та безперебійний збір і транспортування відходів [1-5]. Від надійності та швидкодії їх робочих органів безпосередньо залежать продуктивність комунальних служб, витрати ресурсів і рівень безпеки персоналу. Традиційні системи управління сміттєвозами значною мірою залежать від дій оператора, що підвищує ймовірність помилок, аварійних ситуацій та нерационального використання техніки. У зв'язку з цим актуальним є впровадження програмного забезпечення для автоматизованого управління робочими органами сміттєвозів [6-8], яке дозволяє реалізувати складні алгоритми керування, контролювати стан гідравлічних і механічних систем та забезпечувати інтеграцію з сучасними інформаційними й телеметричними платформами. Метою дослідження є вивчення ролі та функціональних можливостей програмного забезпечення у системах керування виконавчими механізмами сміттєвозів, а також його впливу на підвищення їхньої ефективності та надійності.

Спецавтомобілі – сміттєвози на сучасному етапі є складними технічними системами, що поєднують механічні, гідравлічні та електронні компоненти. До основних робочих органів сміттєвоза належать підйомні механізми контейнерів, пресувальні плити, штовхачі, люки, а також допоміжні гідравлічні приводи [9-11]. Ефективність, надійність і безпека функціонування цих механізмів значною мірою визначаються якістю системи управління та ступенем її автоматизації.

Програмне забезпечення управління робочими органами сміттєвозів виконує функції координації дій усіх виконавчих механізмів відповідно до заданих алгоритмів. Основою таких систем є вбудовані контролери або промислові мікропроцесорні модулі, які забезпечують обробку сигналів з датчиків положення, тиску, швидкості та навантаження. Отримана інформація використовується для формування керуючих сигналів, що подаються на електрогідравлічні клапани [12] та виконавчі приводи.

Однією із ключових функцій програмного забезпечення є реалізація логіки автоматизованого робочого циклу сміттєвоза [13-15]. Типовий цикл включає під'їзд до контейнера, його захоплення, підйом, перекидання, пресування відходів та повернення механізмів у початкове положення. Завдяки застосуванню програмного управління ці операції можуть виконуватися у напівавтоматичному або повністю автоматичному режимі, що дозволяє зменшити фізичне навантаження на оператора, підвищити повторюваність операцій і скоротити час обслуговування одного контейнера.

Основна увага у програмному забезпеченні приділяється питанням безпеки експлуатації. Система управління реалізує захисні алгоритми, які запобігають виникненню аварійних ситуацій, зокрема перевищенню допустимого тиску в гідравлічній системі, некоректному положенню контейнера або несанкціонованому запуску робочих органів [16-19]. Такі підходи відповідають вимогам міжнародних стандартів функціональної безпеки транспортних засобів та машин [20].

Відомі системи управління сміттєвозами сучасності все частіше інтегруються з телеметричними та інформаційними платформами. Завдяки цьому забезпечується дистанційний моніторинг технічного стану машини в реальному часі, збір статистичних даних про кількість робочих циклів, тривалість операцій, витрати пального та ступінь зношення обладнання [21-27]. Такі дані можуть використовуватися для оптимізації маршрутів, планування технічного обслуговування та підвищення загальної ефективності експлуатації парку комунальної техніки.

Подальший розвиток програмного забезпечення управління робочими органами сміттєвозів пов'язаний із підвищенням рівня автоматизації та інтелектуалізації систем керування. Сучасні програмні комплекси все частіше реалізуються на основі ієрархічної структури, де нижній рівень відповідає за безпосереднє керування виконавчими механізмами, середній – за координацію робочих циклів, а верхній – за обробку даних, діагностику та взаємодію з оператором і зовнішніми інформаційними системами. Такий підхід забезпечує високу гнучкість, масштабованість і надійність системи управління.

Окрему роль у системі управління відіграє людино-машинний інтерфейс. Застосування сучасних панелей керування, сенсорних дисплеїв та індикаторів стану, реалізованих за допомогою програмного забезпечення, забезпечує інтуїтивно зрозуміле та зручне управління сміттєвозом. Це зменшує ймовірність помилок оператора, скорочує час навчання персоналу та підвищує загальний рівень безпеки експлуатації.

Отже, програмне забезпечення для керування робочими органами сміттєвозів є визначальним чинником підвищення продуктивності та надійності комунальної техніки. Його застосування забезпечує автоматизацію основних технологічних операцій, мінімізує вплив людського фактора та підвищує рівень експлуатаційної

безпеки. Поєднання програмних рішень із датчиками, гідравлічними системами й телеметрією формує основу для розвитку інтелектуальних систем керування. У подальшому вдосконалення таких технологій сприятиме зростанню ефективності процесів збору твердих побутових відходів.

Список використаної літератури:

1. Azarenkov V. et al. Modern teaching methods in pedagogy and philology. Primedia eLaunch, 2023. 580 p.
2. Березюк О.В. Дослідження динаміки гідроприводу вивантаження твердих побутових відходів із сміттєвозів. *Машинознавство*. 2008. № 10 (136). С. 25-28.
3. Савицький М.В. та ін. Педагогічні студії з підготовки будівельно-архітектурних фахівців: дидактичний та виховний аспекти. Дніпро: ПДАБА, 2022. 483 p.
4. Березюк О.В. Планування багатофакторного експерименту для дослідження вібраційного гідроприводу ущільнення твердих побутових відходів. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2009. № 3 (55). С. 92-97.
5. Березюк О.В. Математичне моделювання динаміки гідроприводу робочих органів завантаження твердих побутових відходів у сміттєвози. *Вісник ВПІ*. 2009. №4. С. 81-86.
6. Піонткевич О.В. Підвищення ефективності багаторежимного гідроприводу фронтального навантажувача: дис. к.т.н.: 05.02.02. Київ, НТТУ «КПІ», 2019. 249 с.
7. Козлов Л.Г. та ін. Характеристики мехатронного приводу під час просторового руху маніпулятора. *Наукові праці ВНТУ*. 2017. № 2. 9 с.
8. Березюк О.В. Дослідження кінематики пристрою для сортування твердих побутових відходів. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2010. № 65. С. 49-55.
9. Поліщук Л.К. та ін. Аналіз впливу параметрів системи керування на динамічні процеси гідропривода стрічкового конвеєра. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2016. № 2(52). С. 37-47.
10. Коц І.В., Березюк О.В. Вібраційний гідропривод для пресування промислових відходів. *Вісник ВПІ*. 2006. № 5. С. 146-149.
11. Піонткевич О.В. Вплив параметрів системи керування гідроприводом мобільної робочої машини на динамічні характеристики. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2016. № 2. С. 68-76.
12. Піонткевич О.В. та ін. Розрахунок гідродинамічної сили на золотнику врівноважувального клапана на основі імітаційного моделювання течії робочої рідини в його каналах. *Вісник ВПІ*. 2024. № 5. С. 77-83.
13. Березюк О.В. Дослідження динаміки гідроприводу робочих органів завантаження твердих побутових відходів у сміттєвози. *Вісник ОДАБА*. 2009. № 33. С. 403-406.
14. Березюк О.В. Визначення параметрів впливу на частку диференційовано зібраних твердих побутових відходів. *Вісник ВПІ*. 2011. № 5. С. 154-156.
15. Petrov O. et al. Improvement of the hydraulic units design based on CFD modeling. *Lecture Notes in Mechanical Engineering XXII*. 2019. P. 653-660.
16. Козлов Л.Г. Вплив параметрів системи керування на стійкість гідропривода інваріантного до знакозмінного навантаження. *Наукові нотатки*. 2013. № 40. С. 118-123.
17. Піонткевич О.В. Математична модель гідроприводу фронтального навантажувача з гальмівним клапаном. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2015. № 2. С. 83-90.
18. Wójcik W. et al. *Mechatronic Systems 1: Applications in Transport, Logistics, Diagnostics and Control*. London, New York: Taylor & Francis Group, 2021. 306 p.
19. Kazachiner O., Boychuk Y. *Theoretical and scientific foundations of pedagogy and education*. International Science Group, 2022. 476 p.
20. Березюк О.В. Оптимізація завантаження твердих побутових відходів у сміттєвози. Системи прийняття рішень в економіці, техніці та організаційних сферах: від теорії до практики: кол. мон.: у 2 т. Павлоград: АРТ Синтез-Т. 2014. Т. 2. С. 75-83.
21. Березюк О.В. Аналітичне дослідження математичної моделі гідроприводу повороту важеля маніпулятора на операції завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз. *Вісник ВПІ*. 2010. № 3. С. 93-98.
22. Khrebtii H. et al. Innovative ways of improving medicine, psychology and biology. *Khrebtii Primedia eLaunch*, 2023. 305 p.
23. Bereziuk O.V. et al. Analytical study of a hydraulic drive model for a municipal waste container overturning mechanism in a garbage truck considering the wear of friction pairs. *Problems of Tribology*. 2025. No. 30(3/117). P. 30-40.
24. Kazachiner O., Boychuk Y., Halii A. *Theoretical foundations of pedagogy and education*. International Science Group, 2022. 602 p.
25. Березюк О.В., Березюк Л.Л. Побудова моделей залежності концентрацій сапрофітних бактерій у ґрунті від відстані до полігону захоронення твердих побутових відходів. *Вісник ВПІ*. 2017. № 1. С. 36-39.
26. Rusnak I. et al. Conceptual options for the development and improvement of medical science and psychology. *International Science Group*, 2023. 117 p.
27. Березюк О.В., Яворський В.Є. Удосконалена математична модель роботи гідроприводу механізму завантаження твердих побутових відходів у сміттєвоз із урахуванням зносу пар тертя. *Наукові праці ВНТУ*. 2025. № 1. С. 154-164.

Шишкова О.А., здобувач ступеня доктора філософії (PhD)
Державний університет «Житомирська політехніка»

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ЛЕЗОВОЇ ОБРОБКИ З УРАХУВАННЯМ МОДЕЛЕЙ ТЕРТЯ

Успішне застосування процесів різання лезовими інструментами забезпечується завдяки раціональному вибору умов зазначених процесів, що гарантують необхідні характеристики процесу та вимоги до якості й точності обробки. Вибір таких умов ґрунтується, як правило, на проведенні значної кількості експериментальних досліджень, що, природно, передбачає значні витрати. Істотне зниження витрат на проведення робіт з оптимізації умов процесу обробки пропонують різні методи моделювання, серед яких чисельне моделювання процесу різання шляхом застосування методу скінченних елементів ефективно використовується як успішна альтернатива експериментальним дослідженням. Двовимірні та просторові кінцево-елементні моделі процесу різання плідно застосовуються для оцінки впливу умов і параметрів процесу обробки та використовуваного інструменту на кінетичні та термічні характеристики контакту інструменту з оброблюваним матеріалом, а також продуктивність і якість обробки, стійкість інструменту. Прогнозовані характеристики, до яких, зокрема, належать складові сили різання, потужність різання, розподіл температурних полів у зонах різання та в місцях контакту інструмента з оброблюваним матеріалом, залишкові напруження в приповерхневих шарах заготовки тощо, визначені за допомогою чисельної симуляції процесу різання, успішно використовуються для оптимізації умов обробки.

Дослідження процесу ортогонального різання виконувалось методом скінченних елементів (МСЕ) у програмному середовищі DEFORM. Було побудовано геометричну модель процесу різання, задано фізико-механічні властивості матеріалу, а також основні кінематичні параметри процесу (швидкість різання, подача). Розроблена двовимірна модель забезпечує проведення аналізу напружено-деформованого стан обробляемого матеріалу в зонах різання, процесу формування стружки та визначення розподілу температур різання.

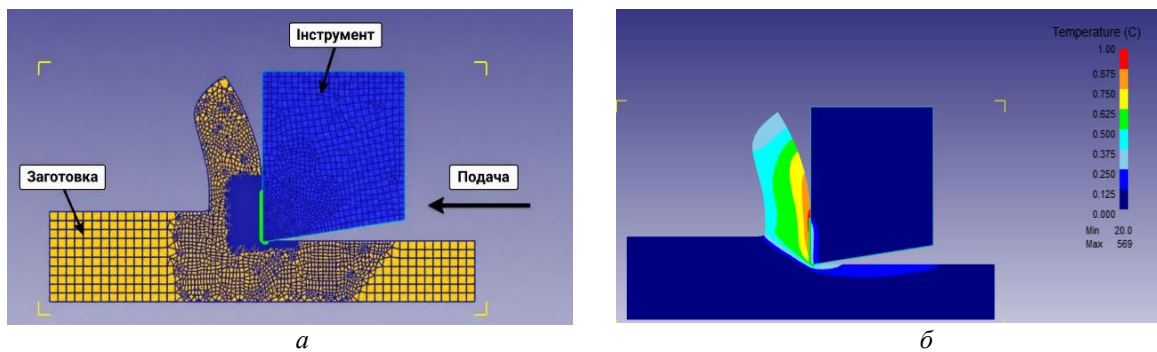


Рис. 1. Двовимірні модель різання та результати симуляції процесу обробки

На рис. 1 (а) представлена модель процесу різання з дискретизацією заготовки, що дозволяє відстежувати пластичні деформації та формування стружки. Рисунок (б) демонструє розподіл температурних полів, де видно локалізацію максимального нагріву в зоні контакту, що є критично важливим для оцінки стійкості інструменту. Порівняльний аналіз результатів моделювання показує пряму залежність між зонами інтенсивної пластичної деформації, відображеними сіткою, та областями підвищеного тепловиділення. Максимальна температура зосереджена в точці, де спостерігається найвища щільність деформації, що підтверджує фізичну адекватність побудованої моделі. Аналіз отриманих результатів підтверджують необхідність коректного вибору моделі тертя для підвищення точності чисельного моделювання процесів лезової обробки.

Разом з тим, отримані результати свідчать про необхідність подальших досліджень, спрямованих на уточнення параметрів моделей тертя та їх адаптацію до конкретних умов обробки. Особливої уваги потребує перевірка чисельних результатів шляхом проведення експериментальних досліджень, а також вдосконалення моделі матеріалу, моделі тертя та моделі руйнування оброблюваного матеріалу.

Список використаної літератури:

1. Weng J., Zhuang K., Zhou J. et al. A hybrid model for force prediction in orthogonal cutting with chamfered tools considering size and edge effect Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2020. Vol. 110. pp. 1367–1384. DOI: 10.1007/s00170-020-05943-1
2. Zhang N., Kneubühler F., Klippel H., Wegener K. Simulation-based analysis of tool wear progression and mechanisms in titanium alloy machining MM Science Journal. 2025. DOI: 10.17973/MMSJ.2025_11_2025146
3. Liang X., Liu Z., Wang B., Wang C. Friction behaviors in the metal cutting process: state of the art and future perspectives Int. J. Extreme Manufacturing. 2022. Vol. 5. DOI: 10.1088/2631-7990/ac9e27

КОРДИНАТНО ВИМІРЮВАЛЬНІ МАШИНИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ РОТОРНИХ ТАБЛЕТКОВИХ ПРЕСІВ

В фармацевтичній промисловості виробництво таблетки часто виготовляють за допомогою ротаційних таблеткових пресів. Ці машини мають кілька станцій (або наборів пуансонів), розташованих на обертовій турелі.

Геометрична точність робочих органів визначає не лише якість продукції, а й тривалість безвідмовної роботи обладнання, висуває екстремальні вимоги до точності пресового інструменту. Пара «пуансон-матриця» є критичним елементом, що безпосередньо формує якісні характеристики кінцевого продукту. Будь-яке відхилення від номінальних значень – наприклад, зміна робочої довжини пуансона (L), знос робочої поверхні головки або збільшення зазору між пуансоном і матрицею – призводить до виникнення дефектів (кепінг, ламінування) та підвищеного механічного напруження в вузлах преса.

Метою даної роботи є проведення комплексного порівняльного аналізу сучасних високоточних засобів вимірювання геометричних параметрів пресового інструменту (пуансона) та обґрунтування вибору оптимальної контрольно-вимірювальної машини (КВМ).

Серед сучасних методів контролю геометричних параметрів можна виділити три основні категорії: 3D координатно-вимірювальні машини, оптичні вимірювальні системи та сканери. Кожен з цих методів має свої переваги в залежності від типу виробу та вимог до точності вимірювань.

В результаті тестування систем найкращі результати показала прецизійна машина третього покоління **TOOL INSPECTOR TI-3**, яка призначена для автоматизованого контролю геометрії та стану інструментів для виготовлення таблеток (пуансонів і матриць) (рис. 1).



Рис. 1. Вимірювальний пристрій Tool inspector TI-3 Adamus

На відміну від універсальних контрольно-вимірювальні машини, програмне забезпечення TI-3 розроблене спеціально під геометрію пуансонів (типи EURO, TSM), що виключає необхідність складного програмування траєкторій вручну.

Вимірювання виконуються за допомогою вимірювальної голівки, яка представляє собою датчик конфокального типу та оптичного мікрометра (рис.2). Це дозволяє виконувати процедури вимірювання пристроєм без додаткових спеціальних знань. Переважна більшість контрольно-вимірювальні машини, що пропонуються на ринку, вимагають, щоб вимірювані елементи мали певну кількість так званих фіксованих механічних точок, це обмежує доступ до вимірювальних поверхонь.



Рис. 2. Вимірювальна система TOOL INSPECTOR TI-3 (Adamus S.A.)

Основні переваги та можливості система TOOL INSPECTOR TI-3 (Adamus S.A.):

- одночасне вимірювання синхронного руху в площині XY, що дозволяє визначати параметри навіть найскладніших форм інструменту;
- оптичний контроль, оснащений відеосистемою з роздільною здатністю 5Мп для візуальної оцінки поверхонь і збереження зображень для порівняння протягом усього терміну служби інструменту;
- повна автоматизація процесу вимірювання, яка мінімізує ризик пошкодження головки пуансона або поверхні матриці, оскільки виконується без механічних ризиків, характерних для ручного вимірювання;
- отримані результати дозволяють автоматично підбирати (парувати) комплект пуансон-матриця дотримуючи регламентні зазори комплекту, що допомагає зменшити кількість бракованих таблеток.

Висновки

1. Встановлено, що традиційні ручні методи метрологічного контролю не здатні забезпечити необхідну точність для сучасних високошвидкісних ротаційних пресів, що призводить до прихованого браку продукції.
2. Спеціалізована КВМ TOOL INSPECTOR TI-3 визначена як оптимальне рішення для фармацевтичного виробництва завдяки високій точності (до 1 мкм), наявності спеціалізованого програмного забезпечення та можливості повної автоматизації звітності.
3. Обґрунтовано доцільність впровадження комбінованого методу контролю, де контрольно-вимірювальна машина вимірює граничний знос інструменту.

Список використаної літератури:

1. Обладнання технологічних процесів фармацевтичних та біотехнологічних виробництв : навчальний посібник / М.В. Стасевич, А.О. Милянч, І.О. Гузьова та ін.; за ред. В.П. Новікова. – Вінниця: Нова книга, 2012.
2. Kolomiets L.V. Measuring systems of coordinate moving of measuring robots / L.V. Kolomiets, Y.P. Leschenko // Safety in Aviation and Space Technologies: proceedings V world congress – Aviation in the XXI-st century. – Kyiv, NAU, 2012. – P. 1.9.22-1.9.25.
3. Blunt, L., Jiang, X., & Scott, P. (2007). A new approach to surface metrology: Structured surfaces. In *Proceedings of the 7th International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology (EUSPEN 2007)* (Vol. 1, pp. 254–257).

Юхимчук Є.О., студент 3 курсу
Григорчик А.Р., студентка 2 курсу
Коваленко Я.П., доктор філософії з прикладної механіки
Пуховський Є.С., д.т.н., проф. кафедри робототехніки,
електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна
Державний університет «Житомирська політехніка»

МЕТОДИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ 3D-ПРИНТЕРА В СИСТЕМІ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДІВНОГО ВИРОБНИЦТВА

Сучасне машинобудування переживає етап цифрової трансформації, де адитивні технології стають невід'ємною частиною основного виробничого циклу. На відміну від традиційних методів прототипування, промисловий 3D-друк висуває підвищені вимоги до надійності та стабільності роботи обладнання. Технічний стан 3D-принтера безпосередньо корелює з якістю виготовлених виробів: будь-яке відхилення в роботі механічних або термічних вузлів призводить до появи внутрішніх дефектів, зниження адгезії шарів та порушення геометричної точності. Як зазначають дослідники, стабільність параметрів адитивної установки є критичним фактором для забезпечення повторюваності результатів у промислових масштабах [1].

У межах переходу до концепції «Індустрії 4.0» актуальним є впровадження методів предиктивного обслуговування. Основними методами оцінки стану обладнання в цій системі є:

- **Геометричний метод.** Полягає у систематичному аналізі відхилень надрукованих тестових артефактів. Згідно зі стандартами ISO/ASTM, використання спеціалізованих «бенчмарків» дозволяє кількісно оцінити похибку позиціонування по осях X/Y/Z, виявити люфти ремінних передач та знос лінійних напрямних [2].
- **Вібраційний аналіз.** Передбачає використання акселерометрів для моніторингу частотного спектра роботи крокових двигунів. Дослідження показують, що зміна амплітудно-частотних характеристик дозволяє ідентифікувати деградацію підшипників кочення на ранніх стадіях [3].
- **Термографічний контроль.** Оцінка стабільності нагріву екструдера та робочої поверхні. Використання ІЧ-датчиків дозволяє фіксувати флуктуації температури, що можуть свідчити про несправність термісторів або критичне окислення контактів нагрівальних елементів.
- **Аналіз програмних логів.** Моніторинг швидкості відгуку контролера на команди G-коду та аналіз помилок передачі даних по шині зв'язку, що дозволяє виявляти проблеми в електроніці принтера.

Впровадження комплексної системи моніторингу на базі вищеприказаних методів дозволяє значно знизити відсоток браку в машинобудівному виробництві та оптимізувати графіки сервісного обслуговування адитивного обладнання [4].

Перспективним напрямом розвитку адитивних ділянок є інтеграція засобів діагностики у загальну цифрову екосистему підприємства на засадах концепції «цифрових двійників». Побудова адекватної віртуальної моделі 3D-принтера, що функціонує у режимі реального часу на основі даних від масиву фізичних сенсорів, забезпечує можливість імітаційного моделювання процесів зношування ключових вузлів. Такий підхід дозволяє з високою точністю прогнозувати залишковий ресурс компонентів та нівелювати ризики аварійної зупинки обладнання під час тривалих циклів друку, що є критично важливим для безперервного машинобудівного виробництва.

Додаткового ефекту можливо досягти шляхом імплементації алгоритмів інтелектуального аналізу даних для обробки термографічних та вібраційних сигналів. Автоматизація дефектоскопії на основі навчених нейронних мереж дозволяє ідентифікувати латентні аномалії, які не піддаються візуальному або регламентному контролю, зокрема мікроскопічні дефекти елементів кінематичних пар або нерівномірну деградацію нагрівальних контурів.

Результати аналізу свідчать, що розробка та впровадження комплексної системи моніторингу технічного стану 3D-принтерів є обов'язковою умовою їх експлуатації у складі гнучких виробничих систем. Поєднання методів предиктивної діагностики не лише гарантує стабільність якісних показників продукції, але й забезпечує оптимізацію експлуатаційних витрат, що повністю корелює з пріоритетами цифрової модернізації промислового сектору

Список використаної літератури:

1. Грабченко А. І. Адитивні технології: стан і перспективи розвитку : навч. посібник / А. І. Грабченко, Ю. М. Внуков, Н. М. Куц. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. – 232 с.
2. ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing – General principles – Terminology. Geneva: International Organization for Standardization, 2021.
3. Tofail S. A. M. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market, and applications / S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay et al. // *Nanomaterials and Energy*. – 2018. – Vol. 12. – P. 22–37.
4. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. New York: Springer, 2021. 675 p.

ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ПАЗІВ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ СПЛАВІВ NITi

Мікрофрезерування є одним із ефективних методів формування мікророзмірних елементів у виробках із функціональних матеріалів [1], зокрема сплавів нікеліду титану (NiTi), які широко застосовуються у медичній техніці та приладобудуванні. Водночас забезпечення високої якості поверхні ускладнюється проявом масштабного ефекту, нестабільністю процесу стружкоутворення та динамічними явищами при мікрофрезеруванні.

При оцінюванні результатів оброблення доцільно розмежовувати поняття точності та якості поверхні. Точність визначає відповідність геометричних параметрів паза заданим розмірам і допускам (ширина, глибина, положення та форма), тоді як якість є ширшим поняттям і включає також параметри мікрорельєфу, стан кромки і наявність дефектів поверхні. Таким чином, точність є складовою якості, але не визначає її повністю.

До основних показників якості поверхні, окрім параметрів точності, належать параметри шорсткості, хвилястості, а також характеристики кромки - розміри заусенців, сколів і налипань матеріалу. Зокрема, для пазів важливо окремо враховувати стан дна та бокових стінок, а також стабільність формування поверхні вздовж довжини паза.

На рис. 1 показано характер формування заусенців та типовий профіль поверхні паза при мікрофрезеруванні NiTi, що відображає нерівномірність мікрорельєфу та локальні дефекти.

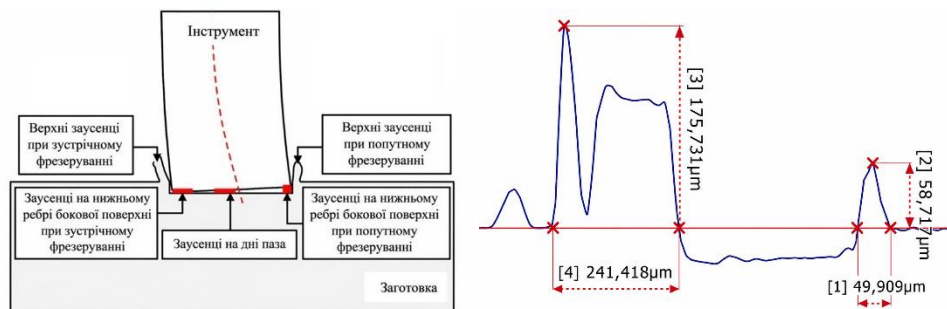


Рис. 1. Формування заусенців та профіль поверхні паза при мікрофрезеруванні

Якість поверхні формується під впливом режимів різання. Зі збільшенням подачі на зуб зростає товщина зрізаного шару, що призводить до підвищення шорсткості. Водночас при малих подачах, характерних для мікрофрезерування, товщина шару стає співрозмірною з радіусом ріжучої кромки, що викликає масштабний ефект [2]. У цих умовах процес частково переходить у режим оранки, що супроводжується зростанням питомих сил різання, температури та погіршенням якості поверхні.

Суттєвий вплив має геометрія інструмента. Радіус заокруглення ріжучої кромки визначає мінімальну товщину зрізаного шару і механізм стружкоутворення. Для сплавів NiTi це має особливе значення через їх високу пластичність, що сприяє налипанню матеріалу на інструмент і утворенню дефектів поверхні.

Вібрації системи «верстат–інструмент–заготовка» призводять до появи хвилястості, локальних відхилень форми та нестабільності параметрів шорсткості. Це особливо характерно для мікрофрез малого діаметра, які мають знижену жорсткість.

Крім того, фізико-механічні властивості сплаву NiTi [3], зокрема висока пластичність і низька теплопровідність, сприяють локальному перегріву зони різання, утворенню заусенців і налипанню матеріалу, що негативно впливає на якість поверхні.

Таким чином, якість поверхні при мікрофрезеруванні сплавів NiTi визначається сукупною дією режимів різання, геометрії інструмента, динамічної стабільності процесу та властивостей матеріалу. Забезпечення необхідного рівня якості можливе за умови комплексного врахування цих факторів при призначенні режимів оброблення.

Список використаної літератури:

1. Томашевський О.О., Балицька Н.О. (2023). Процес мікрофрезерування металів і сплавів: аналітичний огляд. *Технічна інженерія*, (2(92)), 74–8, doi: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-74-88](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-74-88).
2. Balytska N. O., Tomashevskiy O. O., Shadura V. A. (2025). Evaluation of cutting forces and temperatures in micro-milling of NiTi alloys using finite element modeling. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, 12(1), A20–A27, doi: [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).a3](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).a3).
3. Балицька Н.О., Томашевський О.О. (2025) Порівняльний аналіз сил і температур різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi в аустенітному та мартенситному фазових станах на основі скінченно-елементного моделювання. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, Вип. 351(3.1). 35-43, doi: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-4>.

ОСОБЛИВОСТІ ДИНАМІКИ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

Продуктивність та точність виготовлення деталей машин на металорізальних верстатах в значній мірі залежить від динамічних процесів, що виникають у технологічній обробній системі (ТОС) під час процесу різання. Одним з найбільш складних для врахування з цілої низки факторів є динамічний вплив на ТОС швидкоплинних робочих процесів, особливо в умовах високошвидкісної прецизійної обробки.

Точність обробки на металорізальному верстаті визначається, в першу чергу, точністю роботи його шпиндельного вузла, який є складною механічною системою, опис поведінки якої в динаміці лінійними моделями обмежує врахування її нелінійності [1, 3], що вимагає глибокого аналізу конструкцій найбільш відповідальних вузлів металорізальних верстатів та точної оцінки усталеності роботи ТОС в умовах впливу цілої низки зовнішніх та внутрішніх чинників. Зокрема, доволі рідко у дослідженнях розглядається вплив анізотропії властивостей шпиндельного вузла на усталеність процесу обробки різанням.

Тому, питання докладного розгляду динамічних процесів у високошвидкісних ТОС, зокрема, у точних шпиндельних вузлах, є важливою науково-технічною проблемою.

Переважає за частотою використання видом опор шпинделів металорізальних верстатів є підшипники кочення, завдяки їх більшій універсальності, меншій вартості виготовлення та експлуатації ніж у підшипників ковзання рідинного та газового тертя [2].

Серед множини додаткових факторів впливу на шпиндельний вузол верстата, обумовлених нелінійністю характеристик його складових можна виділити анізотропію властивостей шпиндельного вузла реального верстата – рухому [1] та нерухому, яку можуть мати підшипники кочення опор шпиндельного валу.

У випадку розгляду коливальних шпиндельного валу непостійної жорсткості (c_1 та c_2 – жорсткість валу на згин по осям прямокутної системи координат) на анізотропних опорах у рухомій системі координат, система рівнянь його руху матиме вигляд:

$$\left. \begin{aligned} m(\ddot{u}_1 + 2\omega\dot{u}_2 - \omega^2 u_1) + K(\dot{u}_1 - \omega u_2) + c_1 u_1 &= m e_1 \omega^2 c - mg \cdot \sin \omega t \\ m(\ddot{u}_2 + 2\omega\dot{u}_1 - \omega^2 u_2) + K(\dot{u}_2 - \omega u_1) + c_2 u_2 &= m e_2 \omega^2 c - mg \cdot \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

З аналізу (1) слідує умова усталеності коливальної системи шпиндельного валу, що визначає множину його нестійких швидкостей обертання, яка розташована в межах діапазону власних частот ω :

$$(c_1 - m\omega^2)(c_2 - m\omega^2) + K^2\omega^2 > 0 \quad (2)$$

Рішення системи рівнянь (1), приведені до нерухомої системи координат, матиме загальний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} u_y &= A_1 \cos 2\omega t - A_2 \sin 2\omega t + D_1 \\ u_z &= A_1 \cos 2\omega t + A_2 \sin 2\omega t + D_2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Воно визначає рух валу по круговій траєкторії в напрямку його обертання з частотою 2ω навколо центру, зміщення якого відносно лінії опор залежить від величини сил демпфування, статичного навантаження та швидкості ω .

Список використаної літератури:

1. Степчин Я.А., Отаманський В.В., Малишев І.П. Аналіз динамічних процесів у високошвидкісних шпиндельних вузлах металорізальних верстатів з врахуванням різних видів нелінійності. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2022. №1 (305). С. 130-135
2. Данильченко Ю.М. Наукові основи створення швидкохідних прецизійних шпиндельних вузлів металорізальних верстатів : Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01 / Ю.М. Данильченко ; Нац. техн. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». К., 2003. 36 с.
3. Струтинський В.Б., Мельничук П.П. Математичне моделювання металорізальних верстатів: Монографія. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 570 с.

Гайовий Д.І., магістрант
Кирилович В.А., д.т.н., проф. кафедри РЕ та А ім. проф. Б.Б. Самотокіна
Державний університет «Житомирська політехніка»

КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ЩОДО КОЛАБОРАТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ДЕКОМПОЗИЦІЇ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ КОЛОБОРАТИВНИХ РОБОТИЗОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Сучасні колаборативні роботизовані системи все активніше впроваджуються у виробничі процеси, де людина (Л) і колаборативний промисловий робот (КПР) виконують спільні технологічні операції в одному робочому просторі. Ефективність таких систем значною мірою залежить від правильного розподілу завдань між Л та КПР, тобто від колаборативної декомпозиції технологічного процесу. У наявних дослідженнях колаборативні системи розглядаються як складні комплекси, у яких необхідно враховувати продуктивність, безпеку, ергономіку тощо при адаптації поведінки КПР за участі Л, що в даному випадку Л+КПР комплексно розглядається як обов'язкові складові колаборативної технологічної системи.

Метою роботи є стислий критичний аналіз існуючих підходів щодо колаборативної технологічної декомпозиції (КТД) з урахуванням їх переваг, обмежень та практичної придатності для застосування у людино-роботизованих виробничих системах.

Одним із поширених є алгоритмічний симуляційний підхід з оптимізацією ергономічних підходів. Він передбачає моделювання виробничого процесу та розподіл технологічних операцій таким чином, щоб КПР виконував фізично важкі або монотонні дії, а Л — точні, складні або контрольні операції. Перевагою такого підходу є можливість зменшення фізичного навантаження на Л, однак його недоліком є залежність від якості початкової моделі та складність врахування реальних відхилень у процесі роботи.

Іншим підходом є метод розподілу задач на основі штучної довіри. При цьому система оцінює рівень довіри до Л або КПР та поступово навчається на основі результатів виконання операцій. Цей підхід є перспективним, оскільки дозволяє адаптувати розподіл завдань до змін у роботі системи, тобто є гнучким. Водночас його обмеженням є складність формалізації поняття довіри, оскільки воно залежить не лише від технічних параметрів, а й від поведінки Л з врахуванням досвіду умов виконання технологічних завдань.

Важливе місце займають оптимізаційні моделі з урахуванням безпеки та швидкості КПР. Такі підходи дозволяють мінімізувати загальний час виконання операцій, одночасно враховуючи відстань між Л і КПР, швидкість руху ланок маніпуляційної системи КПР та можливі ризики колізії Л та КПР. Їх перевагою є чітка математична основа. Однак недоліком є те, що надмірна орієнтація на продуктивність може призводити до спрощеного врахування ергономічних або психологічних чинників. При цьому питання безпеки залишаються ключовими, адже у колаборативних системах необхідно контролювати небезпечні зони, рухомі частини та робочий простір за допомогою сенсорів і систем моніторингу. Симуляційні підходи, що спрямовані на підвищення продуктивності та зменшення втоми Л, дають змогу оцінити різні сценарії взаємодії Л і КПР ще до впровадження системи у виробництво. Їх доцільно застосовувати на етапі проєктування, однак вони не завжди повністю відображають реальні умови експлуатації, зокрема непередбачувані дії Л, зміну темпу роботи або виникнення позаштатних ситуацій.

Перспективним є підхід підкріпленого навчання з урахуванням людських уподобань. Він дозволяє системі обирати політику розподілу завдань не лише за критеріями продуктивності, а й з урахуванням зворотного зв'язку від Л. Такий підхід краще відповідає реальним умовам колаборативної співпраці з КПР, проте потребує значного обсягу початкових та проміжних даних і може бути складним для промислового впровадження через необхідність контролю безпечності введення нових розрахунків. Також застосовуються підходи, що базуються на багатокритеріальній класифікації задач на основі нечіткої логіки. Нечітка логіка дає змогу враховувати такі параметри, як точність, сила, мобільність, складність операції. Перевагою цього підходу є гнучкість і можливість роботи з нечіткими вхідними даними. Недоліком є суб'єктивність вибору критеріїв та правил класифікації, що може впливати на об'єктивність кінцевого рішення.

Окремо слід розглядати підхід, що враховує статичний і динамічний розподіл завдань Л та КПР. Статичний підхід передбачає попереднє планування операцій до початку роботи, що спрощує організацію процесу, але погано реагує на зміни. Динамічний розподіл є більш гнучким, оскільки дозволяє змінювати декомпозицію під час виконання завдання, однак потребує надійних сенсорних систем, швидкої обробки даних і стабільних алгоритмів прийняття рішень.

Проведений стислий критичний аналіз показує, що жоден із підходів до КТД не є універсальним. Найбільш доцільним є комбінування декількох методів: оптимізаційних моделей для планування, симуляційних підходів для попередньої перевірки комбінації методів, нечіткої логіки для класифікації задач та адаптивних алгоритмів для коригування КТД в реальному часі. Перспективним напрямком дослідження з цієї теми є розвиток КТД, що пов'язаний зі створенням інтегрованих систем, які одночасно враховують продуктивність, безпеку, ергономіку, втому Л та зміну умов виробничого середовища.

Кулеша І.В., магістрант
Кирилович В.А., д.т.н., проф. кафедри РЕ та А ім. проф. Б.Б. Самотокіна
Державний університет «Житомирська політехніка»

ОСОБЛИВІСТЬ ПІДХОДУ ЩОДО ВИБОРУ ЗАХВАТНИХ ПРИСТРОЇВ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ

Специфіка проектування та впровадження автоматизованих комплексів вимагає переосмислення ролі кінцевих робочих органів промислових роботів (ПР), оскільки їх захватні пристрої (ЗП) безпосередньо формують функціональність та технологічну надійність усієї системи. Особливості підходу до вибору ЗП полягають у глибокій інтеграції параметрів виробничого середовища, характеристик та фізичної природи об'єкта маніпулювання (ОМ) у єдиний системний процес вибору.

Фундаментальною рисою існуючий щодо вибору ЗП підходів є визнання первинності властивостей ОМ над механікою ПР. Конструкція та принцип дії ЗП – чи то вакуумне та/або електромагнітне утримання, чи механічне стискання – повністю диктуються матеріалом, масою та конструктивно-технологічною складністю ОМ, тобто масо-габаритними характеристиками ОМ, зокрема, при роботі з нерегулярними формами або делікатними поверхнями пріоритет зміщується від жорстких металевих губок до адаптивних «софт»-систем, що здатні змінювати свою форму під дією тиску, забезпечуючи безпечне захоплення без пошкоджень. Силевий розрахунок при цьому враховує критичні інерційні навантаження, які виникають під час інтенсивних маніпуляцій ЗП, що зумовлює необхідність багаторазового запасу міцності фіксації.

Методологічна особливість вибору ЗП ПР полягає в поетапній сепарації чинників на функціональні обмеження та критерії якості. На початковій стадії проводиться аналіз технічної сумісності, де відсіюються варіанти, що не відповідають жорстким вимогам вибору а саме вантажопідйомності або специфіці середовища, наприклад, сумісність аналізованої попередньо кінцевої множини ЗП, неможливість роботи електромагнітів з полімерами. Подальша оптимізація фокусується на показниках гнучкості: здатності ЗП працювати з різною номенклатурою ОМ без заміни базового модуля та мінімізації часу на переналадження через використання змінних компонентів ЗП.

Окремим аспектом є врахування «паразитного» впливу маси самого ЗП на динаміку маніпуляційної системи ПР та забезпечення автономності функціонування ПР з/без ОМ в ЗП. Запропонований підхід передбачає впровадження засобів пасивної безпеки, як-от самогальмівні передачі, що гарантують утримання ОМ навіть за умови критичного збою в енергопостачанні.

Розроблена методика вибору ЗП ґрунтується на трансформації вихідних характеристик ОМ у систему аналітичних та/або формальних обмежень, що шляхом комбінованого аналізу множини існуючих рішень дозволяє здійснити обґрунтовану сепарацію невідповідних варіантів та обрати оптимальний конструктив ЗП, який гарантує технологічну функціональність, надійність і адаптивність роботизованого циклу.

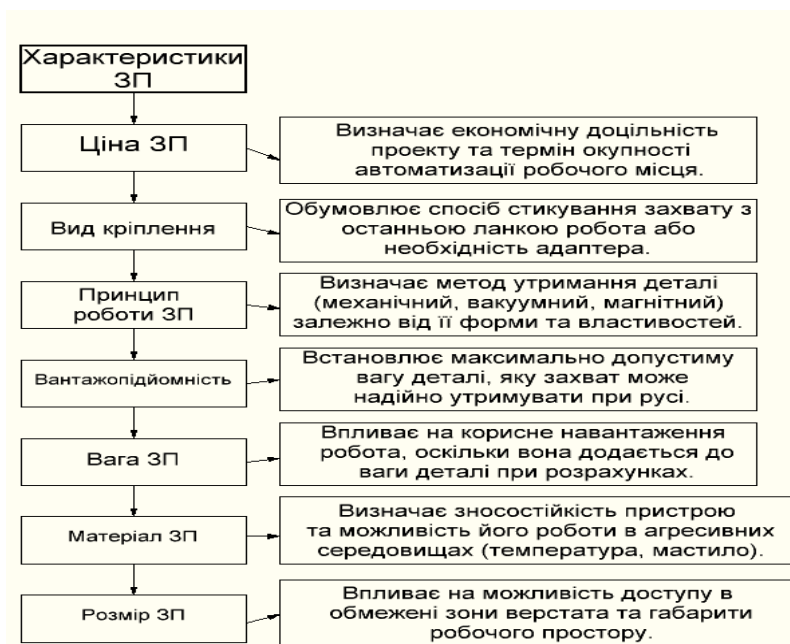


Рис. 1. Характеристики ЗП, що визначають їх (ЗП) вибір

Таким чином, запропонована концепція вибору базується не на пошуку універсального рішення, а на досягненні балансу між функціональною надійністю, швидкістю адаптації до нових задач та економічною життєздатністю проєкту в довгостроковій перспективі.

Застосування такого багатоетапного підходу дозволяє нівелювати ризики технічних помилок на етапі можливого проектування колаборативних роботизованих механоскладальних технологій. Це перетворює ЗП на інтелектуальний вузол, який не просто переміщує ОМ, а забезпечує високу точність базування та стабільність роботизованого циклу в умовах високої динаміки сучасного виробництва.

Кутерга Д.А., здобувач освіти
Глембоцька Л.Є., к.т.н., доц. кафедри механічної інженерії
та автомобільного транспорту
Державний університет «Житомирська політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛООБМІННИКА УСТАНОВКИ ВИРОБНИЦТВА АМІАЧНОЇ СЕЛІТРИ БЕЗВИПАРНИМ МЕТОДОМ ШЛЯХОМ КОНСТРУКТИВНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ

У сучасних умовах розвитку хімічної промисловості важливого значення набуває підвищення енергоефективності технологічного обладнання та зменшення експлуатаційних витрат виробництва. Одним із ключових напрямів удосконалення технологічних процесів є модернізація теплообмінних апаратів, які забезпечують необхідний тепловий режим у процесі виробництва аміачної селітри. Особливо актуальним це питання є для установок, що працюють за безвипарним методом, оскільки стабільність теплопередачі безпосередньо впливає на якість готової продукції, продуктивність установки та рівень енергоспоживання.

Аміачна селітра є одним із найбільш поширених мінеральних добрив, що широко використовується в сільському господарстві. Технологія її виробництва включає процес нейтралізації азотної кислоти аміаком з подальшим концентруванням та гранулюванням розчину. Значна кількість теплової енергії, яка виділяється під час реакції нейтралізації, потребує ефективного відведення та повторного використання. Саме тому теплообмінники є важливими елементами технологічної схеми виробництва аміачної селітри [1].

У процесі тривалої експлуатації теплообмінного обладнання виникають проблеми, пов'язані зі зниженням коефіцієнта теплопередачі, утворенням відкладень на поверхнях теплообміну, підвищенням гідравлічного опору та нерівномірністю розподілу температурних потоків. Це призводить до збільшення витрат енергії, зниження продуктивності установки та підвищення витрат на обслуговування обладнання. У зв'язку з цим, модернізація теплообмінника є важливим заходом для забезпечення ефективної та безперервної роботи виробництва.

Одним із перспективних напрямів модернізації є вдосконалення конструкції теплообмінної поверхні та оптимізація руху теплоносіїв усередині апарата. Використання сучасних конструктивних рішень дозволяє інтенсифікувати процес теплопередачі, зменшити утворення застійних зон та підвищити загальну ефективність роботи теплообмінника. Також важливим фактором є застосування матеріалів із підвищеною корозійною стійкістю, що забезпечує довговічність обладнання в умовах агресивного хімічного середовища [2].

На рис. 1 представлено кожухотрубний теплообмінник, який використовується в установках виробництва аміачної селітри безвипарним методом. Конструкція апарата складається з циліндричного кожуха, трубного пучка, трубних решіток, перегородок та патрубків для подачі й відведення теплоносіїв.

Принцип роботи теплообмінника полягає у передачі теплової енергії від гарячого теплоносія до холодного через стінки труб без безпосереднього змішування потоків. Один теплоносіїв рухається всередині трубного пучка, а інший – у міжтрубному просторі кожуха. Для підвищення інтенсивності теплообміну в конструкції передбачені перегородки, які забезпечують турбулізацію потоку та рівномірний розподіл температури по всій довжині апарата.

У процесі модернізації особливу увагу приділено вдосконаленню конструкції перегородок та оптимізації руху теплоносіїв, що дозволяє зменшити гідравлічні втрати, підвищити коефіцієнт теплопередачі та знизити енергоспоживання установки. Використання модернізованого теплообмінника сприяє стабілізації технологічного процесу виробництва аміачної селітри та підвищенню ефективності роботи обладнання.

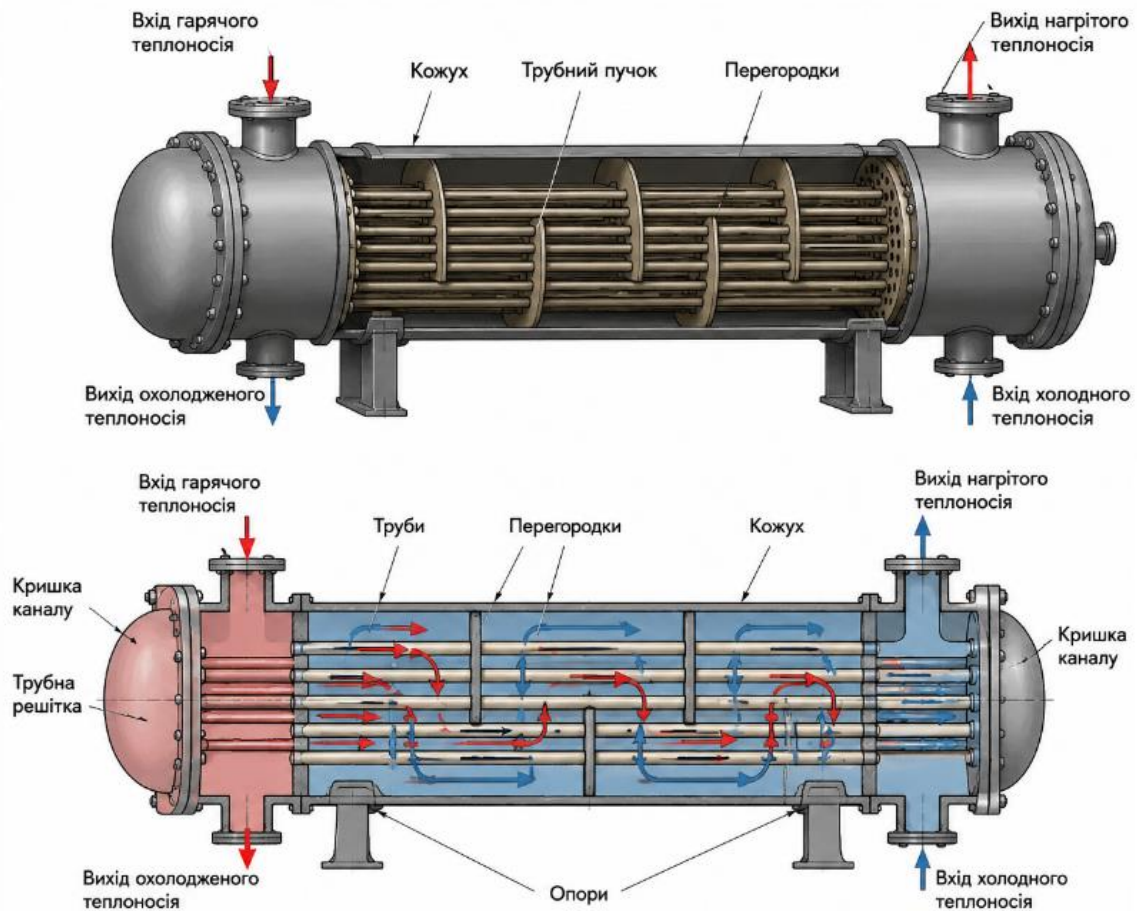


Рис. 1. Кожухотрубний теплообмінник установки виробництва аміачної селітри

У результаті модернізації теплообмінника можливо досягти зниження енергетичних витрат, підвищення стабільності технологічного процесу та покращення техніко-економічних показників виробництва аміачної селітри. Крім того, удосконалення теплообмінного обладнання сприяє зменшенню аварійності та підвищенню рівня екологічної безпеки виробництва.

Отже, модернізація теплообмінника установки виробництва аміачної селітри безвипарним методом є актуальним і перспективним напрямом удосконалення хімічного виробництва. Реалізація сучасних конструктивних рішень дозволяє забезпечити ефективне використання теплової енергії, підвищити надійність роботи обладнання та покращити економічні показники підприємства.

Список використаної літератури:

1. Товажнянский Л. Л., Капустенко П. О., Хавін Г. Л. Процеси та апарати хімічних виробництв: підручник. - Харків: НТУ «ХП», 2014. - 540 с.
2. Бесков В. С. Загальна хімічна технологія та основи промислової екології. - Київ: Вища школа, 2004. - 471 с.

ВИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩІ ЗРІЗУВАНОГО ШАРУ ПІД ЧАС ЧИСТОВОГО ТОРЦЕВОГО СТУПІНЧАТОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ

Зростаючі вимоги до надійності машин викликають необхідність удосконалення технологічних процесів виготовлення виробів із застосуванням нових фінішних методів обробки. Забезпечення високої якості поверхонь деталей машин технологічними способами є одним із актуальних завдань сучасного машинобудівного виробництва [1-3]. Разом з тим у процесі торцевого фрезерування взаємодія різальних елементів (РЕ) із заготовкою визначається параметрами зони контакту, яка змінюється у часі внаслідок переривчастого характеру процесу різання. Зміна площі зрізаного шару у процесі різання, обумовлює нелінійний характер навантаження на РЕ фрези, що суттєво впливає на стабільність процесу обробки і мікро- та макрогеометрію сформованої поверхні [4-7]. Таким чином, процес торцевого фрезерування визначається сукупністю кінематичних і динамічних факторів, зокрема траєкторією переміщення різального інструмента, орієнтацією його осі відносно поверхні заготовки, глибиною різання, подачею та умовами контакту в зоні різання. Комплексний аналіз зазначених факторів є необхідною умовою для підвищення ефективності процесу торцевого фрезерування.

Для дослідження площі зрізаного шару використано математичний метод, який ґрунтується на імітації обертання фрези шляхом повертанням поверхні заготовки ($y = 0, z = t$) на значення відповідних кутів з подальшим переміщенням відносно нерухомих РЕ [8]. Схему побудови математичної моделі, розташування торцевої ступінчастої фрези відносно заготовки та схему різання при торцевому ступінчастому фрезеруванні зображено на (рис. 1).

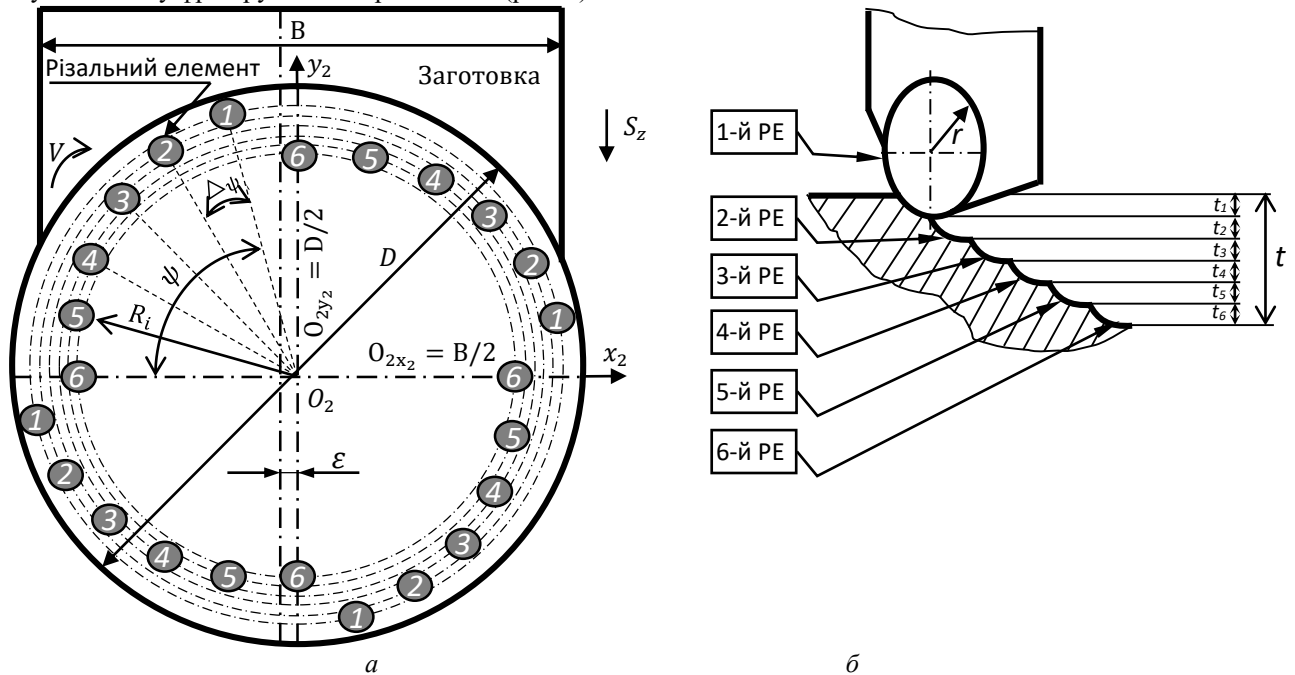


Рис. 1. Схема побудови математичної моделі: а) розташування торцевої ступінчастої фрези відносно заготовки; б) схема різання

На схемі (рис. 1) зображено торцеву ступінчасту фрезу діаметром $D = 315$ мм з особливим розташуванням РЕ в радіальному напрямку відносно центра фрези $R_1 = R_1 - 142$ мм; $R_2 - 141,6$ мм; $R_3 - 141,2$ мм; $R_4 - 140,8$ мм; $R_5 - 140,4$ мм; $R_6 - 140$ мм та з різним осьовим вильотом відносно корпусу фрези проте з однаковим кутовим кроком між РЕ $\Delta\psi = 15^\circ$. Глибина різання $t = 0,75$ мм була рівномірно розподілена по $0,125$ мм на РЕ, подача на зуб $S_z = 0,25$ мм/зуб була постійною, зміщення фрези відносно осі заготовки $\epsilon = 0$ мм. Форма РЕ приймалася радіусною $r = 3,5$ мм, тобто в момент повного вривання буде задіяною частина РЕ, яка формується при перетині бічної площини заготовки та двох еліпсів, які утворюються після надання нахилу головної різальної кромки $\lambda = -35^\circ$; переднього кута $\gamma = -10^\circ$ та заднього кута $\alpha = 8^\circ$.

Отримані результати залежність площі зрізаного шару S_i за довжиною дуги контакту σ (рис. 2):

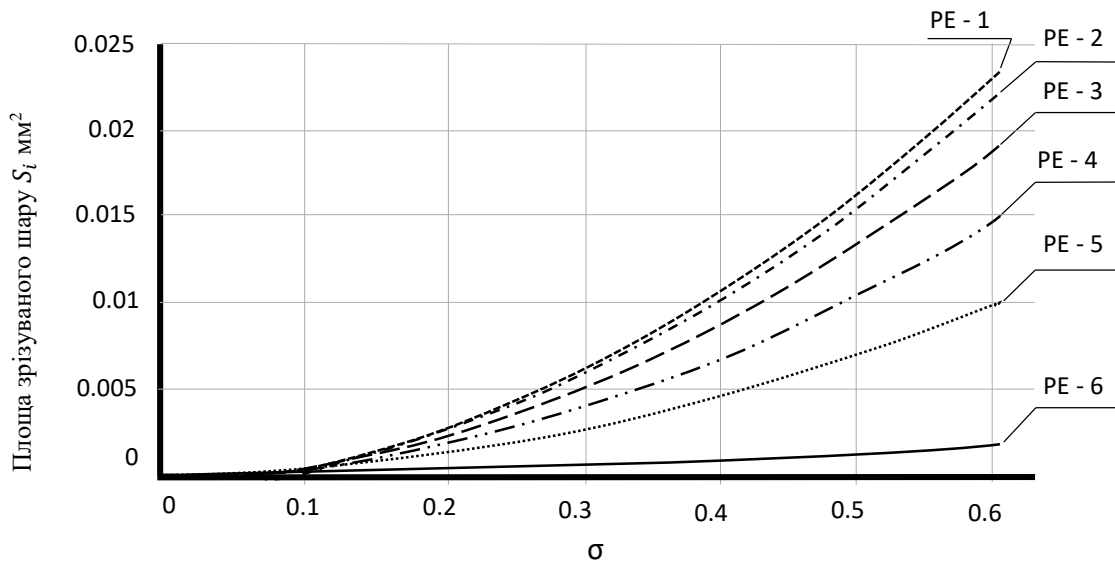


Рис. 2. Зміна площі зрізаного шару за довжиною дуги контакту σ

Аналіз графіку (рис. 2) показує, що зі збільшенням довжини дуги контакту σ відбувається поступове зростання площі зрізаного шару S_i на всіх РЕ. Найбільше зростання виникає на першому РЕ досягаючи максимального значення $S_1 = 0,0234$ мм² та поступово зменшуючись на другому $S_2 = 0,022$ мм². Таке зростання відбувається через відсутність попереднього зрізу, оскільки першими в процес різання вступають перший і другий РЕ. Починаючи з третього до п'ятого РЕ відбувається стабільне зняття припуску з поступовим зменшенням площі зрізаного шару від $S_3 = 0,019$ мм² до $S_5 = 0,01$ мм². На шостому чистовому РЕ спостерігається зменшення площі зрізаного шару до $S_6 = 0,0042$ мм² за рахунок радіального розташування відносно центра фрези та осевого вильоту відносно корпусу фрези, можна забезпечити стабільний припуск та стабільну траєкторію різання чистового РЕ під час остаточного формоутворення плоскої поверхні.

Такий спосіб розташування РЕ дає змогу розподілити припуск між РЕ забезпечивши поступове зменшення площі зрізаного шару в напрямку чистового РЕ, а отже зменшення сил різання які виникають на попередніх чорнових РЕ та впливають на положення чистового РЕ. Зменшення площі зрізаного шару в напрямку чистового РЕ сприяє стабілізації процесу різання та забезпечує стійку траєкторію чистового РЕ.

Список використаної літератури:

1. Виговський Г.М. Підвищення працездатності торцевих фрез для чистової обробки плоских поверхонь: автореф. дис. ... к.т.н. : 05.03.01 Процеси механічної обробки, верстати та інструменти / Г.М. Виговський. – К., 2000. – 16 с.
2. Мельничук П.П. Теоретико-технологічне обґрунтування можливостей обробки плоских поверхонь деталей торцевим лезовим інструментом, оснащеним надтвердими матеріалами, замість шліфування / П.П. Мельничук, В.Ю. Лоев // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 3. – С. 164–172.
3. Кушніров П.В. Обробка площин торцевою фрезою: нові варіанти / П.В. Кушніров // Обладнання та інструмент для професіоналів. – 2004. – № 4 (51). – С. 4–5.
4. Zhang, X., Wang, X., Zhang, P., Chen, K., & Cao, F. (2024). Fast extraction of cutter-workpiece engagement for milling force prediction in multi-axis machining. *Measurement*, 231, 114490.
5. Zhang, X., Wang, X., Cao, F., & Zhang, P. (2024). Quasi-real-time monitoring of variable milling parameters during multi-axis machining. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 211, 111196.
6. Sai, L., Belguith, R., Baili, M., Dessein, G., & Bouzid, W. (2018). An approach to modeling the chip thickness and cutter workpiece engagement region in 3 and 5 axis ball end milling. *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 7-17.
7. Sadílek, M., Poruba, Z., Cepová, L., & Šajgalík, M. (2021). Increasing the Accuracy of Free-Form Surface Multiaxis Milling. *Materials*, 14 (1): 25.
8. Бушля В.М. Підвищення продуктивності чорнової обробки плоских поверхонь чавунних деталей торцевими фрезами з надтвердих матеріалів: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.М. Бушля; Нац. техн. ун-т України "КПІ". – К., 2007. – 20 с.

Мельник О.Л., к.т.н., доц.
 Радкевич С.І., доктор філософії з прикладної механіки
 Данюк О.О., студент
 Обурко Н.В., студент
 Державний університет «Житомирська політехніка»

КОНТАКТНІ УМОВИ ЗБІРОК ДЕТАЛЕЙ В FEA ДОСЛІДЖЕННЯХ

У сучасному машинобудуванні зниження металоємності, підвищення надійності, довговічності та експлуатаційних характеристик приводних механізмів технологічного обладнання є важливим науково-практичним завданням. Приводні вузли технологічного обладнання забезпечують передавання крутного моменту від джерела енергії до робочих органів, що визначає вплив їх характеристик на забезпечення ефективності, безпечності і ресурсу технологічного обладнання в цілому.

У процесі експлуатації на елементи приводів діють як складові експлуатаційного навантаження, так і локальні контактні навантаження в місцях спряження деталей, що в значній мірі залежить і від топологічних характеристик конструкції. Останнє визначається інженерними рішеннями на всіх етапах проектування та виготовлення, зокрема на етапі компоновання, серед іншого, забезпеченням принципу відсутності різких змін силових ліній потоку навантаження (згідно Pahl & Beitz – «flowlines of force»), а на етапі деталізованого проектування - визначенням раціональних значень локальних параметрів конструкції.

Обидва вищезазначені етапи проектування (компоновка та деталізація елементів конструкції на параметричному рівні) на сучасному етапі розвитку науки і техніки можуть відбуватися з використанням симуляції FEA моделей. Водночас слід наголосити, що для зазначених етапів FEA модель вимагає різних рівнів деталізації, зокрема для визначення раціональних значень параметрів конструктивних елементів приводів технологічного обладнання одним з визначальних факторів є обґрунтоване формування контактних умов досліджуваного об'єкту, що являє собою збірку деталей.

В джерелі [1] визначено, що у FEA точність результатів залежить від багатьох рішень інженера під час створення моделі та її симуляції. Зазначено (рис.1.), що контактні умови взаємодії додають чи не найбільше невизначеностей у FEA модель.

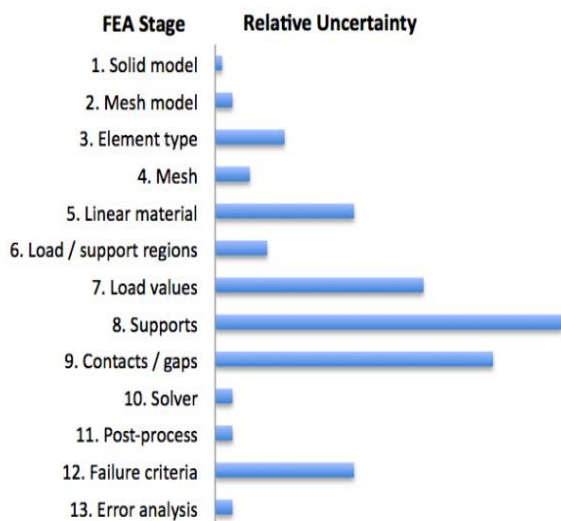


Рис. 1. Відносна невизначеність FEA моделі в контексті етапів її формування [1]

моделюванням (інструментами листового металу).

У зонах спряження валів із зірочками, шківками, шестернями, втулками, кріпильними елементами тощо можуть виникати локальні контактні тиски, концентрації напружень, мікропереміщення, часткове ковзання, вибирання зазорів за рахунок деформації, або навпаки – розмикання поверхонь через деформацію. Якщо ці явища не врахувати та не визначити належним чином через силові та кінематичні граничні умови – симуляція розрахункової FEA моделі може показати нереалістичні переміщення, завищені або занижені напруження та в цілому призвести до погіршення збіжності чисельного розв'язку.

Таким чином, у даній роботі на основі аналізу літературних джерел встановлено, що обґрунтованість умов взаємодії при дослідженні збірок деталей відіграє одну з важливих ролей для достовірності отриманих результатів. Останнє полягає у правильному виборі контактних поверхонь, типів контактної взаємодії,

На відміну від FEA розрахунку окремої деталі, симуляція моделі збірки потребує коректного задання контактних умов взаємодії компонентів, оскільки передавання навантаження між деталями відбувається через обмежені контактні поверхні. У документації низки CAD/CAE систем для FEA (ANSYS Mechanical APDL [2]) зазначено, що контактна взаємодія може задаватися через окремі контактні пари, або за допомогою загального контакту для групи тіл. Схожий підхід застосовується і в SolidWorks [3] – умови взаємодії компонентів можуть задаватися на 3-х ієрархічних рівнях: глобальному (для всієї збірки), покомпонентному (для окремих деталей збірки) та локальному (для окремих граней або інших геометричних елементів деталей).

Особливої уваги набувають контактні умови FEA моделей з гібридними сітками, характерні для приводних станцій загальномашинобудівного призначення, до яких входять деталі, що сформовані твердотілим, каркасним або поверхневим

густини сітки, а також у реалістичному формування навантажень і закріплень. В свою чергу встановлено, що застосування гібридних скінченно-елементних сіток дає змогу поєднати точність розрахунку в контактних зонах із раціональною складністю всієї моделі, що відображається в кількості елементів, вузлів та степенів свободи FEA моделі. Однак застосування FEA моделей на різних етапах проектування є доцільним для їх прискорення, але в той же час кінцеві рішення щодо достатньої (чи недостатньої) жорсткості та міцності повинні прийматися на основі результатів експериментальних досліджень, а не на основі виключно результатів FEA.

Список використаної літератури:

1. Akin J. Ed. Finite Element Analysis Concepts via SolidWorks. – New Jersey : World Scientific, 2009. – 313 p.
2. ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide. Release 25.1. ANSYS, Inc., 2025. URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v251/en/pdf/ANSYS_Mechanical_APDL_Contact_Technology_Guide.pdf
3. Contact Analysis. SolidWorks Simulation Help. Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, 2025. URL: https://help.solidworks.com/2025/english/SolidWorks/cworks/c_contact_analysis.htm