

УДК 621.92

DOI: 10.25140/2411-5363-2021-1(23)-17-24

Віталій Кальченко, Сергій Цибуля, Євгеній Сахно, Андрій Єрошенко

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ БАЛАНСУВАННЯ ШЛІФУВАЛЬНИХ ТА ШВИДКІСНИХ ФРЕЗЕРУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ З УРАХУВАННЯМ НЕВРІВНОВАЖЕНОСТІ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ

У науковій роботі розглянуто процес балансування шліфувальних та швидкісних фрезерувальних верстатів з урахуванням невірності ризальної інструменту. Наведено схеми статичного балансування ризальної інструменту та атестації шліфувального круга за класом невірності. Розглянуто механізм створення бази даних за допомогою програмного забезпечення Microsoft Access, яке забезпечує інформаційну підтримку при зрівноважуванні шпинделів шліфувальних та швидкісних фрезерувальних верстатів.

Ключові слова: шліфування; фрезерування; невірність; інструмент; база даних.

Рис.: 2. Табл.: 1. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Відомо, що однією з причин, що вимагає проведення процесу балансування шпинделів шліфувальних та швидкісних фрезерувальних верстатів, є вібрація, яка викликана невірністю технологічної системи. Однією з найбільш поширених реакцій на вібрації є зменшення швидкості обертання шпинделя, що знижує ефективність високошвидкісної механічної обробки. Цей факт є вирішальним для багатьох виробників верстатних комплексів, які рекомендують балансувати інструмент як до встановлення на шпиндель верстата, так і в процесі механічної обробки. На заготовці основний ефект виражається в зниженні якості обробки поверхні й точності заданих розмірів, що зменшує термін служби шпиндельного вузла, інструменту і, в кінцевому підсумку, усього металорізного верстата.

Постановка проблеми. Сучасні виробничі операції вимагають використання високошвидкісної обробки на швидкостях шпинделя понад 10000 хв^{-1} . Тому для зменшення рівня вібрацій і збільшення терміну експлуатації металорізного верстата необхідно передбачати балансування ризальної інструменту та його оправок. Для досягнення оптимального результату, балансування повинно бути виконано при кожній заміні інструменту, що потребує наявності науково обґрунтованих методик зрівноважування та відповідного технологічного устаткування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1; 2] на підставі теоретичних і експериментальних досліджень обґрунтовано можливість отримання поверхневого шару деталі при високошвидкісному шліфуванні та фрезеруванні із заданими величинами залишкових напружень, шорсткості, мікротвердості та структурно-фазового складу. Визначено область допустимих режимів високошвидкісного торцевого фрезерування і знайдено її оптимальні значення. Аналітично встановлено, що високошвидкісне фрезерування має значні технологічні можливості з погляду зменшення шорсткості поверхні при одночасному збільшенні продуктивності обробки. У роботі [3] розглянуто проблеми, які виникають у разі наявності дисбалансів при обробці високошвидкісним обертовим інструментом металевих та неметалевих деталей. Визначено, що проблема посилюється відсутністю загальноновизнаного погляду на нормативні вимоги, які треба застосовувати при визначенні залишкового дисбалансу для конкретної інструментальної системи, задіяної у технологічному процесі. У роботах [4; 5] проведені теоретичні дослідження та обчислювальні експерименти автоматичного балансування роторів, що працюють з ударними навантаженнями. Також розглянуто проблему повного балансування багаточашкового абразивного інструменту, розроблено графічну модель процесу балансування.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Висока швидкість обробки використовується в багатьох механообробних виробництвах. Однією з очевидних переваг цієї тенденції є досягнення більшої ефективності та продуктивності процесу різання

за рахунок більш високих швидкостей обертання шпинделя. Однак збільшення швидкості обертання шпинделів призводить до появи побічних ефектів у машині й заготовці через збільшення вібрації, оскільки відцентрові сили збільшуються і відбувається руйнування технологічної системи. При цьому основним фактором, який формує вібрації машини, є дисбаланс технологічної системи. Оскільки шпинделі високошвидкісних шліфувальних та фрезерувальних верстатів збалансовані відповідно до стандартів ISO, то основним джерелом дисбалансу є інструмент і оправки для його закріплення.

Метою статті є проведення досліджень процесів балансування шліфувальних та високошвидкісних фрезерувальних верстатів з урахуванням невірноваженості різального інструменту, а також формування інформаційної підтримки процесу проектування шпиндельного вузла з корегуючими масами за допомогою програмного забезпечення Microsoft Access.

Виклад основного матеріалу. На сьогодні дедалі більше виробників використовують високошвидкісну обробку у процесі технологічних операцій, що робить балансування інструменту та його оправок пріоритетним завданням. Головний ефект високошвидкісної обробки на шліфувальних та швидкісних фрезерувальних верстатах полягає в скороченні машинного часу за рахунок інтенсифікації режимів різання, а також у підвищенні точності та якості процесу різання. Основою високопродуктивної високошвидкісної обробки може стати правильний вибір параметрів режимів різання (верстат, система ЧПУ, різальний інструмент, допоміжний інструмент із системою його закріплення, система програмування, кваліфікація оператора верстата та інші фактори), і нехтування хоча б одним із цих може призвести до технологічного браку виробу.

Сучасний шліфувальні та фрезерувальні верстати для високошвидкісної механічної обробки мають швидкість обертання шпинделя $12\ 000\text{--}25\ 000\ \text{хв}^{-1}$, а деякі фірми пропонують верстати зі швидкістю обертання до $40\ 000\ \text{хв}^{-1}$. При цьому швидкості подачі в цьому випадку становить $40\text{--}60\ \text{м/хв}$, а швидкість переміщень робочих органів до $90\ \text{м/хв}$, і в цьому випадку верстати відпрацьовують малі переміщення (від 5 до $20\ \text{мкм}$) і мають підвищену жорсткість і температурну компенсацію [1; 2]. Тому у зв'язку зі зниженням сил різання в процесі високошвидкісної обробки на шліфувальних та фрезерувальних верстатах на перший план виходять такі чинники, як величина биття різального інструменту та вібрації. Так, наприклад, подвоєння швидкості різання збільшує відцентрові сили внаслідок дисбалансу інструменту більшу ніж у 4 рази, і ці сили стають порівнянними із силами різання. Таким чином, високошвидкісна обробка вимагає особливої уваги до балансування, що у свою чергу потребує відповідної науково обґрунтованої методики зрівноважування роторних систем [1; 2].

Відомо, що дисбаланс, викликаний нерівномірним розподілом маси навколо осі обертання тіла, є результатом дій постійних і змінних факторів. Постійні причини дисбалансу є результатом несиметрії механізмів. На деяких типах інструментальних оправок це може бути викликано похибками шпонкового паза або затискними гвинтами. А змінні причини включають до себе неоднорідність матеріалу (порожнечі і пористість в основному матеріалі, виробничі фактори, виробничі допуски). Дисбаланс в інструментальних оправках викликає зміщення головної осі інерції (центру мас) від осі обертання, і в цьому випадку статичне балансування обертових інструментів рекомендується проводити при співвідношенні що дорівнює $L/D \leq 0,2$, де L і D – відповідно довжина і діаметр різального інструменту.

Простий пристрій для статичного балансування включає дві призми 1 (рис. 1, а) з вуглецевої інструментальної сталі [3; 4], а опорні кромки призм виставляють чітко горизонтально на однаковій висоті. На призми встановлюються оправки 2 з балансувальним інструментом 3. При грубому балансуванні в початковому стані оправку встановлюють на призми. Під дією статичного моменту оправка повертається по призмам, і центр ваги інструменту переміщається в нижню точку траєкторії руху, і буде знаходитися поблизу точки

рівноваги. Далі за допомогою рисок на торцевій поверхні інструменту визначають положення зміщеного центра ваги. Потім оправку з інструментом повертають у будь-яку сторону на 90°, та її відпускають, і вона повертається по призмах. На зупиненому інструменті наносять по радіусу мітку, що вказує положення зміщеного центра ваги. Для «легкої» сторони інструменту в зручному місці прикріплюють корегуючі маси (КМ) такої величини, при якій на оправку з інструментом перестає діяти статичний момент. Величина зрівноваженого вантажу підбирається дослідним шляхом при багаторазовому повторенні досліджень. Точне балансування здійснюється з метою усунення прихованої невірноваженості оправки, яка через наявність сил опору не створює статичного моменту. При цьому сили опору виникають у разі похибок призматичних опор, недостатньої твердості і якості обробки робочих поверхонь, наявності дефектів та похибок базування опорних поверхонь.

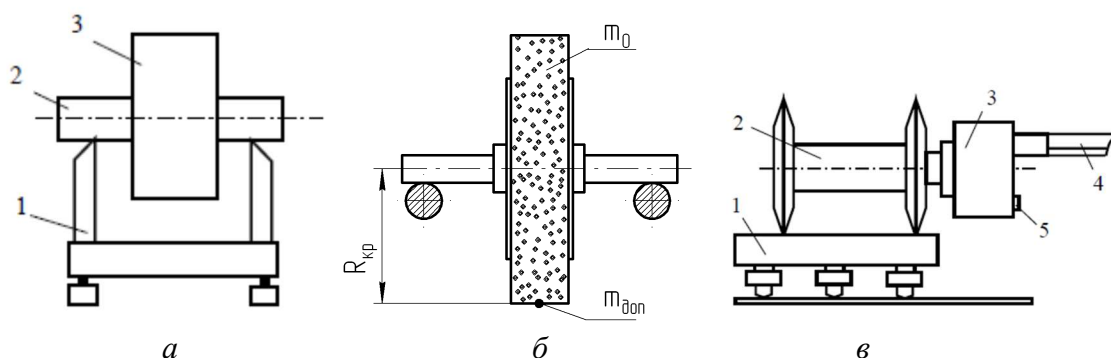


Рис. 1. Статичне балансування різального інструменту:
 а – балансуєчий пристрій; б – атестація шліфувальних кругів за класом невірноваженості; в – балансування кінцевих фрез

Запропоновані методики можна також використовувати при врівноважуванні шліфувальних кругів металорізального верстата. При цьому для балансування шліфувальних кругів необхідно встановити ємність D_E КМ, вибір яких здійснюється на основі визначення очікуваних значень дисбалансів (невірноваженостей) шліфувальних кругів \vec{D}_{cm} . Тому при виборі D_E виконують спеціальні дослідження [6], де залежно від допустимих невірноважених мас $m_{дон}$ встановлюється 4 класи невірноваженості шліфувальних кругів у стані поставки: 1, 2, 3 та 4. Дія [6] поширюється на шліфувальні круги на керамічних, бакелітових, вулканітових та спеціальних органічних зв'язках масою m_o від 0,2 до 300 кг та зовнішнім діаметром $D = 100$ мм.

Стандарт не поширюється на круги для ручних машин. Методики врівноважування, регламентовані $m_{дон}$ та допустимі похибки вимірів σ залежно від m_o більше 2 і до 100 кг, та класу невірноваженості, наведені в [6]. Оскільки до споживача надходять шліфувальні круги, які пройшли операцію перевірки невірноваженості, то в маркуванні круга вказано клас його невірноваженості, наприклад, 2 кл. Найбільш можливе значення дисбалансу круга у стані поставки визначається за такою формулою (рис. 1, б):

$$D_{сткрmax} = m_{дон} \cdot R_{кр}, \text{ [Г}\cdot\text{мм]}. \tag{1}$$

Відомості про масу m_o , необхідну для визначення $m_{дон}$, залежно від типорозміру круга та його характеристики, наведено в [6]. У разі потреби m_o можна також визначити за формулою:

$$m_o = \frac{\rho_{кр} \pi H (D^2 - d^2)}{4000}, \text{ [кг]} \tag{2}$$

де $\rho_{кр}$ – середня щільність абразивного круга $\rho = (2-3) \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$;

D, d, H – відповідно зовнішній, внутрішній діаметри та висота круга, мм.

При цьому ємність для статичного балансування D_E становить:

$$D_E = K_B D_{сткр\max}, \text{ [Г·мм]}, \quad (3)$$

де K_B – коефіцієнт, який враховує зростання дисбалансу при встановленні та експлуатації круга на верстаті [6], який для класів точності кола AA, A, B дорівнює 1,1; 1; 14; 1,2 відповідно.

Наприклад, для круга типу ПП 600×75×305 на керамічній зв'язці при класі точності круга AA для першого класу неврівноваженості $m_o = 39$ кг; $m_{дон} = 30$ г; $R_{кр} = 300$ мм; $K_B = 1,1$. Величина $D_E = 9900$ г·мм. На основі конструктивних даних, залежно від класу точності балансування, складено типові розміри шліфувальних кругів залежно від діаметра шпинделя (див. табл.). Там само наведено значення максимально можливого дисбалансу круга та ємності балансуєчих пристроїв D_E .

Таблиця. Визначення дисбалансу шліфувального круга

Потужність	Діаметр шпинделя	Типорозмір круга	$D_{сткр\max}$, г мм			D_E , г мм		
			2 кл	3 кл	4 кл	2 кл	3 кл	4 кл
кВт	мм	$D \times d \times H$, мм						
1,1	до 50	до 250×40×76	3135	4375	7500	3448	4812	8250
3	60	до 400×40×127	8000	13000	18000	8800	14300	19800
5,5	70	до 600×500×305	13500	22500	36000	14850	24750	33600
10	90	до 600×63×305	15000	24000	37500	16500	26400	41250
17	100	до 750×75×305	26250	41250	65625	28825	45375	72187
понад 17	понад 100	до 900×80×305	72000	45000	117000	792000	49500	128700

Балансування кінцевих фрез відбувається разом із патроном. Прилад для балансування кінцевих фрез включає плиту 1 (рис. 1, в) з регульованими опорами, втулку 2 з дисками, патрон 3 з фрезою 4 і балансувальними гвинтами 5. Для врівноваження патрон з фрезою кріплять у втулці. Втулку кладуть на стіл і злегка підштовхують її. Під час перекошування втулка зупиниться важкою частиною вниз. Закручуючи балансувальні гвинти з боку легкої частини, досягають врівноваження патрона з фрезою. Кінцеві фрези балансують при кожній установці їх у патрон або через кожні 5-6 переточувань фрези. Точність статичного балансування визначається залишковим моментом (залишковим дисбалансом), що дорівнює моменту тертя кочення:

$$M_{зал} = K \cdot m_g = D_{зал}, \quad (4)$$

де K – коефіцієнт тертя кочення;

m_g – маса інструменту з оправкою;

$D_{зал}$ – залишковий дисбаланс.

Відомо, що основними споживачами оснащення для балансування є верстатобудівні заводи, які випускають круглошліфувальні, безцентрово-шліфувальні, плоско-шліфувальні, алмазно-розточувальні, прецизійні токарні та токарно-гвинторізні верстати. Однак галузь використання балансувальних систем може бути розширена за рахунок оснащення пристроями центрифуг, роторних змішувачів, сепараторів, дробильних машин, роторних автоматичних ліній та іншого технологічного обладнання. До основних параметрів зрівноважування шпиндельних вузлів відносяться: а) ємність, під якою розуміють максимальне (не залежить від напрямку) значення вектора дисбалансів коригувальних мас; б) остаточний дисбаланс, який обумовлено не чуттєвістю дії коригувальних мас; в) максимальною частотою обертання КМ у зрівноваженому стані.

Розглянемо механізм створення БД за допомогою програмного забезпечення Microsoft Access, яке буде забезпечувати інформаційну підтримку при зрівноважуванні шпинделів шліфувальних та швидкісних фрезерувальних верстатів. Послідовність створення бази даних така:

Була вивчена та систематизована гама токарних та шліфувальних верстатів вітчизняного та закордонного виробництва. На основі отриманих даних був прийнятий ряд діаметрів шпинделів та діапазон частот обертання, якій необхідний для подальшої розробки.

Відповідно до прийнятого ряду діаметрів шпинделів та мінімальних розмірів підшипників приймаємо кулькові підшипники легкої серії: 9000000 за ГОСТ 9942-80.

Обираємо параметри коригувальних мас, використовуючи програму «Баланс».

Відповідно до теоретичних та експериментальних досліджень розраховуємо розміри механізму фіксації коригувальних мас [7].

Проводиться розрахунок конструктивних параметрів вузла коригування для 19 типорозмірів коригувальних мас (залежно від конструктивних параметрів шпинделів та діаметрів d радіально-упорних підшипників).

Результати виконаних досліджень заносяться до відповідних вікон програми Microsoft Access (рис. 2, а, б).

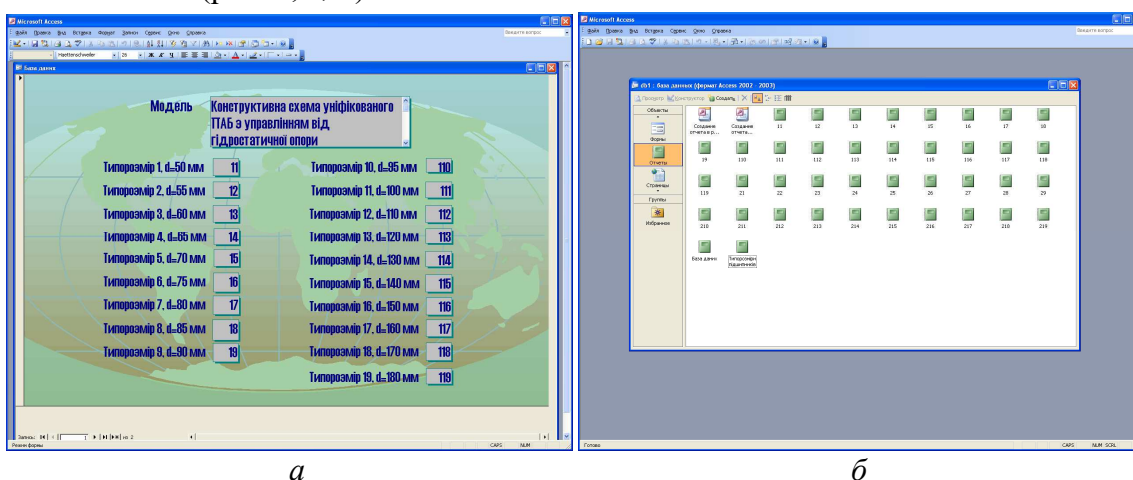


Рис. 2. Діалогове вікно бази даних:

а – ряд підшипників під коригувальні маси; б – ряд типорозмірів корегуючи мас

При цьому міжнародна організація зі стандартизації (ISO) розробила найчастіше використовувані керівні принципи для визначення допустимого дисбалансу. Нині для балансування використовуються два стандарти якості ISO. У стандарті якості ISO США, клас балансування G2.5 є найбільш поширеним. Однак останнім часом, німецька група промислових стандартів представила рекомендації, в яких рекомендується використовуватися ISO G6.3 [3]. У будь-якому випадку величину залишкового дисбалансу U можливо визначити за такою формулою:

$$U = \frac{9,5 \cdot W \cdot G}{n}, \text{ гр} \cdot \text{мм} \quad (5)$$

де W – вага інструменту (інструментальної головки), кг;

G – клас точності балансування за ISO;

n – робоча частота, хв^{-1} .

Нові вимоги до умов балансування системи «шпиндель верстата – затискний пристрій – інструмент» виникли через зростання швидкостей різання, що вимагають нові інструменти та матеріали [3]. Стандарт ISO 1940/1 призначений регламентувати якість балансування жорстких роторів є не зовсім придатним для інструментальних оправок, бо елементи системи мають зовсім інші базові характеристики, ніж стандарт DIN 69888. Тому проведений аналіз інформаційних джерел дозволяє надати певні рекомендації щодо точності і класу балансування [3]:

G16 – при обробці з великою кількістю стружки (наприклад, виготовлення з алюмінію суцільних авіаційних деталей великого розміру), обробка корпусних деталей із легких сплавів, чорнова обробка інструментів та штамтів. Рекомендація є компромісною й дозволяє зберігати на постійному рівні динамічні навантаження на шпиндельні опори з обмеженням граничних значень припустимих коливань, а з врахуванням маси інструменту визначає припустимий залишковий ексцентриситет;

G6,3 – G8,0 – для частот обертання шпинделя 15000-24000 хв⁻¹, і високих вимог до якості обробленої поверхні;

G2.5 та вище – для багатоцільових верстатів, які працюють у традиційному діапазоні швидкостей (за стандартом ISO 194-1: 2003);

G1 – G0.4 – для високошвидкісних верстатів.

При цьому як правило оправки різального інструменту збалансовані на заводі шляхом видалення матеріалу. Після того як різальний інструмент буде встановлений в оправку, зміниться величина дисбалансу, і залежно від швидкості та точності балансування, весь вузол у зборі направляється на повторне балансування.

Висновки. Проведені дослідження показали, що різними нормативними документами здійснено нормування величини залишкового дисбалансу. Це дає можливість теоретично оцінити значення неврівноваженості шліфувальних кругів і фрез у стані поставки та його зміну в процесі експлуатації. Однак при цьому в розрахунках при проведенні балансування шліфувальних та високошвидкісних фрезерувальних верстатів, як правило, роблять певні припущення, що ускладнює визначення остаточного дисбалансу і класу точності балансування. Експериментальні дослідження зміни залишкового дисбалансу малочисельні та носять специфічний характер. Також у роботі представлена інформаційна підтримка процесу проектування шпиндельного вузла з корегувальними масами. На підставі ряду діаметрів шпинделів і діаметрів радіально-упорних підшипників створена база даних для ряду типорозмірів корегуючих мас за допомогою програмного забезпечення Microsoft Access.

Список використаних джерел

1. Зінов'єв Г. С., Попов С. В., Неділько М. В. Оптимізація високошвидкісної обробки різанням загартованих сталей. *Збірник наукових праць ПолтНТУ (галузеве машинобудування, будівництво)*. 2012. Вип. 5 (35). С. 11-15.
2. Полянский В. И. Теоретическое определение шероховатости поверхности при высокоскоростном фрезеровании и шлифовании. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. 2018. № 30(1306). С. 58-62.
3. Верба І. І., Даниленко О. В. Балансування обертових інструментальних систем: багато питань і деякі відповіді. *Перспективні технології та прилади*. 2018. Вип. 12. С. 30-38.
4. Кравченко В. І. Автоматичне балансування роторів, робота яких супроводжується ударом. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2009. № 4(56). С. 26-29.
5. Озимок Ю. І., Рудницький Р. Б. Методика балансування багаточашкового абразивного інструменту. *Науковий вісник УДЛУ*. 2014. № 14.4. С. 104-108.
6. ГОСТ 3060-86. Круги шлифовальные. Допустимые неуравновешенные массы и методы их измерения. [Введен 1988-01-01]. Москва : Издательство стандартов, 1986. 10 с.
7. Струтинський В. Б., Сахно Є. Ю. Дослідження системи шпиндельного вузла з неврівноваженою заготовкою. *Промислова гідравліка і пневматика*. 2006. № 1. С. 59-63.

References

1. Zinoviev, G. S., Popov, S. V., Nedilko, M. V. (2012). Optymizatsiia vysokoshvydkisnoi obrobky rizanniam zahartovanykh staley [Optimization of high-speed processing by cutting hardened steels]. *Zbirnyk naukovykh prats PoltNTU (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo) – Collection of scientific works of PoltNTU (branch mechanical engineering, construction)*, 5(35), pp. 11-15.

2. Polyansky, V. I. (2018). Teoretychskoe opredelenye sherokhovatosty poverkhnosty pry vysokoskorostnom frezerovanny y shlyfovanny [Theoretical determination of surface roughness during high-speed milling and grinding]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Innovatsiini tekhnologii ta obladnannia obrobky materialiv u mashynobudevanni ta metalurhii- Bulletin of NTU «KhPI». Series: innovative technologies and equipment for material processing in Mechanical Engineering and Metallurgy*, 30(1306), pp. 58-62.

3. Verba, I. I., Danilenko, O.V. (2018). Balansuvannia obertovykh instrumentalnykh system: bahato pytan i deiaki vidpovidi [Balancing of rotating tool systems: many questions and some answers]. *Perspektyvni tekhnologii ta prylady – Advanced technologies and devices*, 12, pp. 30-38.

4. Kravchenko V. I. (2009) Avtomatychno balansuvannia rotoriv, robota yakykh suprovodzhuietsia udarom [Automatic balancing of rotors, the work of which is accompanied by a blow]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiiakh – Vibrations in engineering and technologies*, 4(56), pp. 26-29.

5. Ozimok, Yu. I., Rudnitsky, R. B. (2014). Metodyka balansuvannia bahatochashkovoho abrazyvnoho instrumentu [Method of balancing a multi-cup abrasive tool]. *Naukovyi visnyk UDLU – Scientific Bulletin of UDLU*, 14.4, pp. 104-108.

6. GOST 3060-86 (1986). GOST 3060-86. Krugi shlifovalnye. Dopustimy enuravnoveshennye massy i metody ikh izmereniia [GOST 3060-86. Grinding wheels. Unbalanced masses and methods of their measurement are permissible]. Publishing house of standards.

7. Strutinsky, V. B., Sakhno, E. Yu. (2006). Doslidzhennia systemy shpyndelnogo vuzla z nevrivnovazhenoiu zahotovkoiu [Investigation of the spindle assembly system with an unbalanced billet]. *Promyslova hidravlika i pnevmatyka – Industrial hydraulics and pneumatics*, 1, pp. 59-63.

UDC 621.92

Vitalii Kalchenko, Sergii Tsybulia, Evgeny Sakhno, Andrii Yeroshenko

INVESTIGATION OF BALANCING PROCESSES OF GRINDING AND HIGH-SPEED MILLING MACHINES CONSIDERING UNBALANCE OF CUTTING TOOL

It is known that one of the reasons that causes the need for the process of balancing the spindles of grinding and high-speed milling machines is vibration, which is caused by the unbalance of the technological system. One of the most common reactions to vibrations is a decrease in the speed of rotation of the spindle, which reduces the efficiency of high-speed machining. This fact is crucial for many machine tool manufacturers, who recommend balancing the tool, both before installation on the machine spindle, and during machining. On the workpiece the main effect is expressed in decrease of surface quality and precision of required dimensions, which reduces the service life of the spindle unit, tool, and, in the end all cutting machine.

Modern manufacturing operations require the use of high-speed machining at spindle speeds of more than 10,000 revolutions per minute. Therefore, to reduce the level of vibrations and increase the service life of the metal-cutting machine, it is necessary to provide for balancing the cutting tool and its mandrels. To achieve optimal results, balancing should be performed at each tool change, which requires the availability of scientifically-based balancing techniques and appropriate technological equipment.

The work considered the latest publications on this topic, which are presented in the public domain, including the Internet. High processing speed is used in many machining industries. One of the obvious benefits of this trend is to achieve greater efficiency and productivity of the cutting process due to higher spindle speeds. However, increasing the speed of rotation of the spindles leads to side effects in the machine and the workpiece due to increased vibration, as the centrifugal forces increase, and the process system is destroyed. At the same time, the main factor that generates machine vibrations is the imbalance of the technological system, since the spindles of high-speed grinding and milling machines are balanced in accordance with ISO standards, the main source of imbalance is the tool and its mandrels.

The purpose of this scientific work is to conduct research on the balancing processes of high-speed grinding and milling machines, taking into account the unbalance of the cutting tool, as well as the formation of information support for the design process of a spindle assembly with corrective masses using Microsoft Access software.

Today, more and more manufacturers are using high-speed processing during technological operations, which makes balancing the tool and its mandrels a priority. The main effect of high-speed processing on grinding and high-speed milling machines is to reduce machine time due to the intensification of cutting modes, as well as to increase the accuracy and quality of the cutting process. The basis of high-performance high-speed processing can be the correct choice of parameters of cutting modes (machine, NPC system, cutting tool, auxiliary tool with its fixing system, programming system, qualification of the machine operator and other factors), and neglect of at least one of these factors can lead to a technological defect of the product.

The conducted studies have shown that various regulatory documents normalize the value of the residual imbalance, which makes it possible to theoretically assess the value of unbalance of grinding wheels and milling cutters in the state of delivery, and its change during operation. However, in the calculations for balancing grinding and high-speed milling machines, as a rule, a number of assumptions are made, which makes it difficult to determine the residual imbalance and the accuracy class

of balancing. Experimental studies of changes in the residual imbalance are few and specific. The paper also provides information support for the design process of a spindle assembly with corrective masses. On the basis of a number of diameters of spindles and diameters of angular contact bearings, a database has been created for a number of standard sizes of correcting masses using Microsoft Access software.

Keywords: grinding; milling; unbalance; tool; database.

Fig.: 2. **Table:** 1. **References:** 7.

Кальченко Віталій Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Kalchenko Vitalii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head road Transport Industry and Mechanical Engineering Department, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: kalchenkovi@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9850-7875>

ResearcherID: G-9477-2014

Цибуля Сергій Дмитрович – доктор технічних наук, професор, директор навчально-наукового інституту механічної інженерії, технологій та транспорту, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Tsybulia Sergii – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Mechanical Engineering, Technology and Transport, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: stcibula@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7843-6061>

Researcher ID: H-1391-2016

Сахно Євгеній Юрійович – доктор технічних наук, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Sakhno Evgeny – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: evsakhno@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>

ResearcherID: M-3987-2016

Єрошенко Андрій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри технологій машинобудування та деревообробки, Національний університет «Чернігівська політехніка» (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14035, Україна).

Yeroshenko Andrii – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Wood technology, Chernihiv Polytechnic National University (95 Shevchenka Str., 14035 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: yeroshenkoam@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1629-9516>

Researcher ID: G-6757-2014

Scopus Author ID: 57193700687