

УДК 621.

Верба І.І., к.т.н., Даниленко О.В., к.т.н.

Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського“

**БАЛАНСУВАННЯ ОБЕРТОВИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СИСТЕМ:
БАГАТО ПИТАНЬ І ДЕЯКІ ВІДПОВІДІ**

Стаття присвячена проблемам, які виникають у разі наявності дисбалансів при обробці високошвидкісним обертовим інструментом металевих та неметалевих деталей. Необхідність балансування не потребує доказів. Але й не викликає сумнівів той факт, що повністю ліквідувати дисбаланс неможливо, а тому треба обґрунтовано обрати припустимий залишковий дисбаланс й забезпечити стабільність меж, в яких необхідно, можливо і доцільно його підтримувати. Проблема посилюється відсутністю загальновизнаної точки зору на нормативні вимоги, які слід застосовувати, на наслідки залишкового дисбалансу для конкретної інструментальної системи, задіяної у конкретному технологічному процесі.

Існують міжнародні стандарти з узагальненими рекомендаціями щодо точності й класу балансування, але вони не є однозначними. Аналіз інформаційних джерел показав, що не враховуються досить впливові фактори, наприклад, індивідуальні особливості як інструментів, так і технологічного обладнання. А це є рекомендації виробників інструментів та балансувальних машин. Тож застосовують експертні оцінки, які доцільно було б підтвердити дослідженнями наслідків порушення рекомендованого припустимого дисбалансу та моделюванням робочих процесів.

Ключові слова: високошвидкісна обробка, вплив дисбалансу, необхідність балансування, рекомендації стандартів, рекомендації виробників інструментів, експертні оцінки, дослідження припустимої величини дисбалансу.

Вступ. Високошвидкісна обробка металів та інших матеріалів на сьогодні є не просто тенденцією, вона стала нормою для таких галузей, як аерокосмічна чи виготовлення прес-форм. Вигода очевидна: підвищення продуктивності. Характерні частоти обертання токарних верстатів становлять 4000-8000 об/хв, фрезерних та багатоцільових – 8000-18000 об/хв із сталою тенденцією зростання до 40000 об/хв. Реалізація високошвидкісної обробки зумовила розробку нових інструментальних матеріалів і потребує певних конструкторських дій для виконання експлуатаційних вимог. Зокрема саме через впровадження високошвидкісної обробки різанням стало нагальним забезпечення високої точності балансування обертового інструменту. Вже в інтервалі 10000-20000 об/хв балансування у одній площині є необхідним, із збільшенням обертів – обов'язковим і в багатьох випадках – у двох площинах.

Постановка проблеми. В цілому процес балансування жорстких та гнучких роторів, а також і обертового інструменту, є відомим, але відсутня загальновизнана точка зору на нормативні вимоги, які слід застосовувати, на наслідки залишкового дисбалансу для конкретного інструменту, який задіяний у виконанні конкретного технологічного процесу тощо.

Аналіз стандартів та рекомендацій. За визначенням ISO балансування є процесом перевірки розподілу мас ротора і, за необхідністю, їхня корекція, метою якої є збереження граничних значень коливань за експлуатаційної частоти обертання шпинделя або опорних сил, які виникають при цьому. Згідно з цим визначенням балансування передбачає виконання двох операцій: вимірювання дисбалансу і його корекція

Так як балансування повинно забезпечити компроміс між технічною необхідністю й економічною доцільністю, то, наприклад, німецький Комітет з промислового виробництва запропонував при розробці вимог до балансування враховувати наступне:

– існування межі, зумовленої похибками запресовування оправки до патрона, при перевищенні якої збільшення якості балансування є недоцільним;

– існування межі, дотримання якої дозволяє виключити критичне вібромеханічне навантаження на систему інструмент-шпиндель і зберігати на постійному рівні динамічні навантаження на шпиндельні опори (граничні значення припустимих коливань опор згідно з рекомендаціями VDI 2056).

Ступінь балансування визначається стандартом ISO 1940/1:1986 Міжнародної організації стандартизації [10] та стандартом ANSI S2.19-1989 Американського національного Інституту Стандартів. В цих стандартах застосована так звана G-система точності балансування (номер у позначенні класу є припустимим дисбалансом на 1 кг маси, яка обертається з частотою 10000 об/хв.), подані рекомендації (рис. 1). Згідно з ISO 1940/1 – Вимоги до якості балансування роторів у постійному (жорсткому) стані – клас G як показник якості балансування обертового тіла – це тангенціальна швидкість у центрі тяжіння відносно до швидкості обертання, залежить від швидкості обертання, маси тіла та дисбалансу. Клас G не може бути ідентифікований без значення швидкості обертання.

Спрощено визначити припустимий дисбаланс або, навпаки, клас G якості балансування можна наступним чином[2]:

$$U = (9.5 \times W \times G) / n, \quad (1)$$

де U – припустимий дисбаланс, г*мм; W – вага інструмента чи інструментальної головки, кг; G – клас якості балансування (ISO 1940/1); n – робоча частота обертання, об/хв.

З 2011 діє стандарт DIN 69888 [9], що стосується саме балансування обертового інструменту і рекомендує визначити припустимий залишковий дисбаланс залежно від швидкості обертання шпинделя (подано відповідні діаграми, рис. 2). У цьому стандарті всі припустимі залишкові дисбаланси вказані у [г*мм], але не віднесені до рівню якості (клас G), як це передбачено ISO 1940-1.

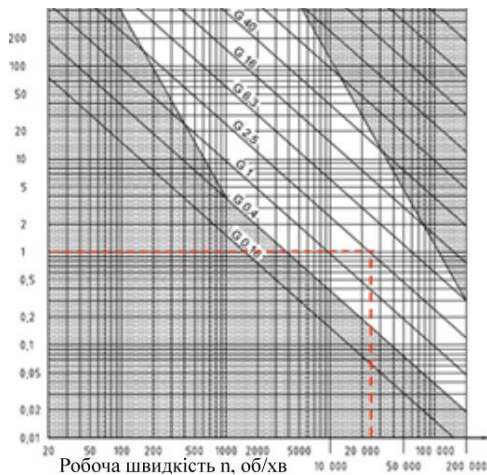


Рис. 1. Припустимий залишковий питомий дисбаланс для різних класів (G) за ISO 1940-1 [11].

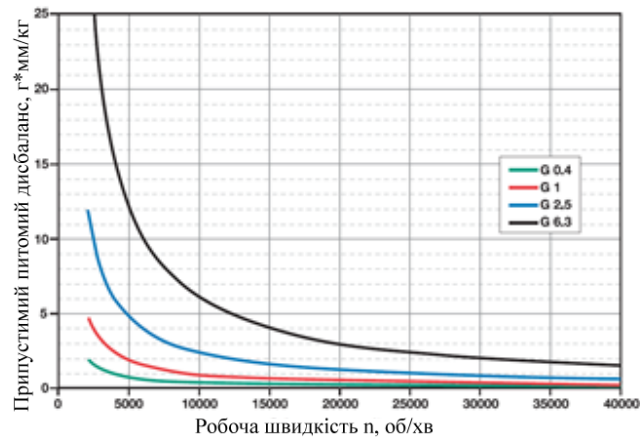


Рис. 2. Залежність припустимого питомого дисбалансу від швидкості обертання і класу балансування «G» [12]

Нові вимоги до умов балансування системи шпиндель верстату-затискний пристрій-інструмент виникли через зростання швидкостей різання, якого вимагають нові інструменти та матеріали. Стандарт ISO 1940/1, який взагалі-то був призначений регламентувати якість балансування жорстких роторів і не зовсім був придатним для інструментальних оправок, бо елементи системи мають зовсім інші базові характеристики на відміну від, наприклад, роторів електродвигунів, передбачав жорсткіші вимоги, ніж стандарт DIN 69888.

Придатність вимог стандарту DIN 69888 для застосування підтверджена експериментальними дослідженнями, які показали, що балансування інструментальних наладок не має вирішального впливу на вихідні параметри фрезерування (якість обробки, середні амплітуди сил різання, вібраційний стан шпинделя).

Аналіз інформаційних джерел дозволяє назвати певні рекомендації щодо точності й класу балансування [4]:

- G16 – при обробці з великою кількістю стружки (наприклад, виготовлення з алюмінію суцільних авіаційних деталей великого розміру), обробка корпусних деталей з легких сплавів, чорнова обробка інструментів та штампів (за умови врахування навантажень на шпиндельні опори від значних сил різання та дисбалансів, які ними зумовлені), рекомендація є компромісною й дозволяє зберігати на постійному рівні динамічні

навантаження на шпindelні опори з обмеженням граничних значень припустимих коливань, а з врахуванням маси інструменту визначає припустимий залишковий ексцентриситет ;

- G6,3 – G8,0 – за частот обертання шпинделя 15000-24000 об/хв, за високих вимог до якості обробленої поверхні необхідна умова: мінімізувати зміщення вершини інструменту, зумовлені дисбалансами);
- G2.5 та вище – для багатоцільових верстатів, які працюють у традиційному діапазоні швидкостей (за стандартом ISO 1940/1:1986);
- G1 – G0.4 – для високошвидкісних верстатів;

При фінішній обробці може виникнути потреба й у підвищенні класу точності балансування. Один з шляхів – балансування інструментів та інструментальних оправок разом із шпинделем у складеному стані.

Дослідження [2, 4, 5, 8, 15] довели, що для різних балансувальних верстатів вимірювання різняться значним чином, а заданий у технічних вимогах на інструмент клас точності балансування не відтворюється надійно при вимірюваннях: принаймні клас G2,5 і навіть G6,3 відтворюється не для всіх частот. Питання про достатність класу точності G1,6, який рекомендується для високошвидкісної обробки, повинно вирішуватися у кожному окремому випадку.

До допоміжного інструменту для закріплення фрез (оправки, патрони) ставлять вимогу – 3 клас точності балансування у складеному вигляді, точність з'єднання шпindel-оправка, відхилення форми й розташування посадкової поверхні – 2 та 3 ступінь точності. Рекомендовані класи точності балансування для верстатних роторів визначають граничні радіальні навантаження в опорах та рівні вібрацій за холостого ходу.

При обробці з високими частотами обертання (> 6000) або швидкістю різання > 1000 м/хв необхідно виконувати 2-ступеневе балансування: основне балансування корпусу інструменту разом із пластинами з використанням заздалегідь збалансованих базових тримачів (може виконуватись фірмою-виробником на замовлення) та точне балансування інструменту разом з оснащенням у складеному вигляді, яке є обов'язковим, бо навіть незначне радіальне биття може значним чином вплинути на клас балансування.

DIN 69888 вимагає здійснювати балансування інструментальної системи таким чином, щоб враховувалось фактичне навантаження на підшипники шпинделя від неврівноваженості інструменту, яке не повинно перевищувати 1 % динамічної несучої здатності підшипників. Орієнтовне значення вимог до балансування можна отримати порівнянням із зусиллям різання: у більшості випадків зусилля дисбалансу не повинно становити більш за 5-10 % [8].

Слід відзначити наступне: суттєва різниця у масі оправки та ротора-шпинделя; посадка оправки HSK за двома поверхнями проблематична; отвір у шпинделі виконано на верстатобудівному підприємстві, а оправку виготовлено на інструментальному заводі, тобто ці розміри узгоджено лише у певних межах й необхідно забезпечити однакові встановлювальні бази. Додаткової уваги вимагають системи допоміжного інструменту та їхня придатність до балансування.

Разом з тим не все так просто й ясно, навіть стосовно стандартів.

Викладення основного матеріалу. При балансуванні обертового інструменту згідно ISO 1940/1:1986 точність балансування для багатоцільових верстатів, які працюють у традиційному діапазоні швидкостей, повинна бути не нижче за G2.5, для високошвидкісних верстатів – в межах класів G1-G0,4. При цьому стандарт

- припускає за тої самої частоти обертання різний залишковий дисбаланс для важкого інструменту й для легкого, тобто й різне навантаження на підшипники шпинделя;
- не враховує той факт, що динамічний дисбаланс не залежить від маси інструменту, а визначається неврівноваженістю інструментальної системи й зусиллями при обробці;
- призводить до перевищення меж можливих вимірювань для звичайних балансувальних машин.

Наприклад, клас G 2,5 при 25000 об/хв визначає дисбаланс 1 г·мм для інструменту масою 1 кг, тобто припустимий ексцентриситет центру ваги становить 1 мкм, а для інструментів меншої ваги чи для більших швидкостей вимоги зростають: інструмент вагою 0,35 кг при 40000 об/хв для класу G 2.5 повинен мати ексцентриситет центру ваги 0,6 мкм. Навіть якщо залишковий дисбаланс системи, що містить дуже якісно врівноважений інструмент,

визначається лише відхиленнями, зумовленими складанням, після встановлення у шпindel, наприклад, інструмента HSK, може бути досягнута точність з'єднання 2-4 мкм (ISO 12164), тобто неможливо виконати умову врівноваженості. Зношення й биття шпинделя додатково погіршують точність з'єднання [13]. Отже чим вище швидкість, тим вимоги до залишкового дисбалансу стають жорсткіші, а балансування потребує значного часу й надточного обладнання.

Таким чином, виникає як мінімум кілька питань. Як визначити припустимий дисбаланс для інструментальної системи, що призначена для високошвидкісної обробки? Використовувати рекомендації стандартів або виробників інструменту? Сподіватись на якість балансування виробниками або придбати балансувальну техніку й виконувати балансування самостійно? З цієї точки зору доцільно проаналізувати умови виникнення дисбалансів та шляхи впливу й конкретні конструктивні особливості сучасних інструментів для високошвидкісної обробки, рекомендації виробників інструментальних систем та можливості балансувального обладнання.

Отож розглянемо докладніше специфічні причини виникнення дисбалансу інструментальних систем в умовах високошвидкісної обробки, наслідки цього явища та чинники, які можуть мати вплив на нього.

Як відомо, дисбаланс зумовлюється нерівномірним розподілом навколо осі обертання маси тіла, яке обертається. Причини цього бувають:

– постійні: асиметричність вузла чи деталі. Для оправки це може бути наявність шпонкового пазу чи затискних гвинтів.

– змінні: неоднорідність матеріалу, виробничі фактори (спотворення припуску), дія змінних (через різні причини) відцентрових сил.

Отож дисбаланс може зумовлюватись конструкцією, матеріалом, виготовленням та складанням. Кожний ротор навіть за умови серійного виробництва має індивідуальний розподіл дисбалансу за довжиною.

Оскільки дисбаланс є характеристикою нерівномірності розподілу маси, він не залежить від швидкості, але ефект дисбалансу (тобто ефект відцентрових сил) визначається квадратом швидкості, що й зумовлює необхідність високоточного балансування швидкісних шпинделів.

Вирізняють експлуатаційні дисбаланси, які зумовлені пружними й пластичними деформаціями ротора (шпинделя), зношенням деталей, дією гідродинамічних та електромагнітних сил на ротор, і функціональні дисбаланси, які спостерігаються у кінці технічного ресурсу машини (перед її капітальним ремонтом), а їхні граничні значення, за яких ще зберігається працездатність виробу, встановлюють при проектуванні.

Статичний дисбаланс виникає у разі зміщення головної осі інерції паралельно до осі обертання (зміщення центру мас). Це може бути компенсовано додаванням або вилученням матеріалу, вага якого дорівнює дисбалансу, виконаним в одній площині, яка є перпендикулярною до осі обертання. Вимірювання можливе у статиці. Характерно для дискових роторів із співвідношенням довжини до діаметру меншим за 0,25.

Якщо дві маси з однаковим дисбалансом розташовані одна навпроти одної (кут 180°) у двох площинах, які є перпендикулярними до осі обертання, виникає моментний дисбаланс. Ось інерції перетинає ось обертання у точці центра ваги. Моментний дисбаланс можна виправити коригуючою масою, яка дорівнює вихідній парі мас, але розташована протилежно. Виміряти моментний дисбаланс можна лише на балансувальній машині, яка має обертовий рух. За динамічного дисбалансу ось інерції та ось обертання розташовані не паралельно, а ексцентрично і з нахилом, що зумовлює коливальні рухи ротора (оправки інструмента та / або інструмента). Виміряти цей дисбаланс можна також на балансувальній машині, яка має обертовий рух. Виправити можна лише шляхом компенсації (додавання або вилучення матеріалу) у двох площинах.

Залишковий дисбаланс (залишковий ексцентриситет центра мас) за звичай невідомий і дійсну величину дисбалансу визначають на балансувальній машині. Припустимий дисбаланс обумовлюється замовником і саме за ним оцінюють складність процесу балансування та можливість його здійснення взагалі.

Негативні наслідки дисбалансу:

– додаткове навантаження на опори шпинделя (при обробці інструментом великої ваги або із значним вильотом скорочує час їхньої експлуатації до 50% [8]). Саме через це виробники

шпинделів і обробних центрів рекомендують застосовувати лише збалансований інструмент, в іншому випадку обмежена або взагалі не діє гарантія виробника. Для високошвидкісного шпинделя навіть виконання однієї операції інструментом незбалансованим або встановленим у незбалансованій оправці, може зумовити пошкодження підшипників. Збалансований інструмент дозволяє збільшити строк служби шпинделя (до ≈ 10000 год при $n=15000$ об/хв) і надійність верстату.

– зменшення строку служби незбалансованого інструменту у складеному стані (оправка із затиснутим інструментом та штрівелем) – в середньому на 10% [8]. Радіальне биття з умови стійкості інструменту не повинно перевищувати 3 мкм на довжині 4D (D – діаметр інструменту). Наприклад, при збільшенні биття з 3 мкм до 12 мкм стійкість інструменту зменшується на 70 % [5]. Інструменти вимагають підвищеної уваги через високу вартість їхньої заміни, бо вартість інструменту, який використовують для верстатів високошвидкісної обробки, залежно від призначення у 4...10 разів вища ніж традиційного інструменту (частково висока вартість компенсується збільшенням строку експлуатації завдяки меншій глибині різання);

– вібрації, які погіршують стан обробленої поверхні (утворюються сліди, зумовлені биттям інструменту, які треба додатково оброблювати) та не дозволяють забезпечити точні допуски. Дисбаланси впливають на амплітуди вібрацій;

– змінювання умов контактування у з'єднанні шпиндель-оправка через значні відцентрові сили, що зумовлює виникнення зазорів і висування оправки із шпинделя або, навпаки, заклинювання у шпинделі.

Отож лише якісне балансування інструменту навіть з оправкою не може забезпечити безпечну роботу на високих швидкостях. Треба враховувати також щонайменше такі змінні чинники, як тип з'єднання між шпинделем та державкою, тип виконуваної операції різання, жорсткість верстата, стан підшипників. Система шпиндель верстату-затискний пристрій-інструмент характеризується значними відхиленнями у часі, наприклад, через часте змінювання інструментів, як це відбувається у обробних центрах.

При кожній заміні інструмента через похибки базування фрези, оправки та тяги пристрою затиску змінюються відцентрові сили. Сила затягування внаслідок існування зазорів у напрямних тяги прикладена ексцентрично, що зумовлює виникнення радіальної складової, яка діє як незрівноважена сила, не залежить від частоти обертання, а визначається зазорами, тобто точністю виготовлення. Через радіальні й кутові похибки затиску заміна інструмента у шпинделі призводить до змінювання стану балансування всієї системи. Якість балансування обмежується допусками посадок окремих деталей (шпиндель, затискний пристрій, інструмент). Тож як наслідок маємо справу із неможливістю відтворити ідентичні умови балансування окремого елемента і вимогою здійснювати балансування системи з'єднань, зокрема й шпинделя, який начебто є збалансованим заздалегідь. Виробники відзначають, наприклад, проблеми при балансуванні гідравлічних патронів [6] : вже із швидкості 1100 об/хв з отворів, через які патрон заповнювали мастилом, під дією відцентрових сил просочується мастило, краплі якого, в свою чергу, створюють дисбаланс, що є порівнянним із фактичним дисбалансом наладки. Якщо це явище не врахувати, дисбаланс буде оцінено помилково.

Радіальна складова сили різання також діє як незрівноважена на крайку фрези при контакті із заготовкою. Дія сили різання є періодичною, напрямом її дії змінюється, коли у контакт із заготовкою входить наступна крайка. Характер сил різання при фрезеруванні зумовлює виникнення полігармонічних вібрацій. Отож обов'язковою умовою є балансування всіх складових системи, зокрема й інструментальних оправок: якщо оправка має биття 5 мкм, її експлуатація є неприпустимою.

Для інструментальних оправок на практиці найчастіше виконують статичне балансування в одній площині корекції, бо домінує радіальне зміщення центру мас, центральна головна вісь інерції лишається паралельною осі обертання. Корекція статичного дисбалансу вочевидь є достатньою при частотах обертання, що не перевищують $n = 10000$ об/хв. Умовна конструктивна ознака: $L \leq 2D$, де L – довжина інструменту, D – діаметр конусу інструменту (рис.3). Динамічне балансування у двох площинах рекомендується для довгих, важких і особливо для асиметричних за формою інструментів. Динамічний дисбаланс коригують при $n > 10000$ об/хв. Умовна конструктивна ознака: $L > 2D$ [6].



Рис.3. Дисбаланси оправок інструмента. Позначено: а) – статичний дисбаланс в одній площині; б) – динамічний дисбаланс в двох площинах [1].

Ефективний результат вимагає виконувати балансування при кожній заміні інструменту. Але ці дії вимагають наявності оправок, які припускають балансування, та відповідної балансувальної машини. Точність балансування, яку можна забезпечити на традиційних балансувальних верстатах, становить 0,5 мкм (1 клас точності балансування роторів з максимальною частотою обертання 8000 об/хв.). Менші значення можна забезпечити лише за умови застосування спеціального обладнання.

Сучасне балансувальне обладнання [1, 8, 16] в багатьох випадках є універсальним, поєднується з вимірювальною технікою відомих виробників, має інтегровані блоки ЧПК для автоматичного усунення дисбалансу в одному чи двох перерізах шляхом видалення металу у вертикальному або горизонтальному напрямках. Після вимірювання дисбалансу програма розраховує потрібну глибину свердління, фрезерування чи шліфування для усунення дисбалансу. У сучасних машинах намагаються уникати видалення металу з метою балансування (субтрактивна компенсація), бо це псує саму оправку. Дисбаланс ліквідують компенсуючими кільцями [3, 12] й пересувними тягарцями з використанням лазерного позиціонування (можуть використовуватись багаторазово). Вимірювання дисбалансу триває 1 хвилину, а балансування в цілому у разі застосування кілець – 2 хвилини, у разі видалення матеріалу трохи довше. За даними фірми Kennametal-Hertel використання шпиндельних оправок з балансувальними кільцями забезпечує сталу роботу за частот обертання до 40000 об/хв (для звичайних оправок частоти не перевищують 8000 об/хв) [12].

Провідні виробничі компанії, які випускають інструменти й інструментальні системи для високошвидкісної обробки та балансувальне обладнання й, відповідно, здійснюють певні дослідження у цій сфері (SGS Tool Company й Kennametal Hertel (США), Sandvik Coromant (Швеція), Seco (Італія), Korloy й Taegu Tec (Південна Корея), Iscar (Ізраїль), Walter, Hofmann і Haimer (Німеччина) та ін) встановлюють свої вимоги до якості балансування, котрі можуть суттєво відрізнитися між собою та від відповідних стандартів загального призначення, які регламентують балансування жорстких чи гнучких роторів. Наприклад, більшість виробників високошвидкісних електрошпинделів для фрезерних обробних центрів вимагають балансувати інструментальні насадки для $n=23000$ об/хв не нижче класу G 6.3 [7]. Фірма Walter рекомендує застосовувати стандарт балансування DIN 69888, який містить вимоги, що стосуються саме інструментів для обробки різанням, а не галузі машинобудування в цілому. Вимоги щодо випадку обробки із швидкістю різання > 1000 м/хв містяться у стандарті DIN ISO 15641 [10], який стосується вимог до безпеки експлуатації фрез для високошвидкісної обробки. [13]. Наприклад, фреза Sandvik RAL90 для обробки алюмінію сертифікована саме за цим стандартом для роботи з частотою обертання шпинделя до 27500 об/хв.

Виробники надають доволі жорсткі рекомендації щодо припустимих частот обертання за встановлених стандартами дисбалансів, підкреслюють, що це стосується лише інструментів без додаткових подовжувачів, але при цьому орієнтують споживача на використання оригінальних елементів (наприклад, ріжучих пластин, затискних гвинтів) лише власного виробництва. Фірма Walter, наприклад, вимагає додержуватись моментів затиску, що їх вказано у каталозі для конкретних інструментів, а після 5 змінювань пластин встановлювати нові гвинти [13]. Скоріш за все це свідчить про відсутність чіткого уявлення, не просто про причинний зв'язок чинників

впливу на дисбаланс та характер цього впливу, а про відображення у вигляді конкретних значень, наприклад, наслідків конструктивних змін з можливістю прогнозування величини дисбалансу.

Фірма Taegu Tec (рис. 4) пропонує цангові патрони з можливістю статичного чи динамічного балансування за рахунок конструкції (наявність балансувальних кілець), але з необхідністю коригування методу відповідно до балансувальної машини, що застосовується. Наприклад, на деяких машинах можна здійснити балансування поворотом точки максимуму, яку вказано на балансувальних кільцях, а на інших – змінюванням дисбалансу кілець за їхнього незмінного кутового положення (рис. 5).

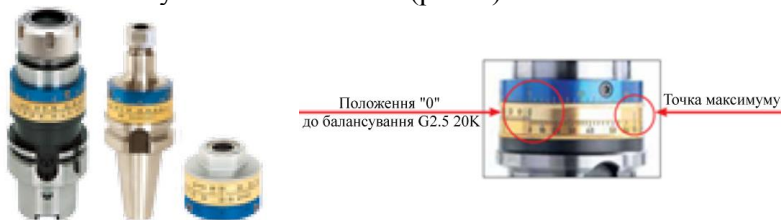


Рис. 4. Цангові патрони Taegu Tec з балансувальними кільцями [14]

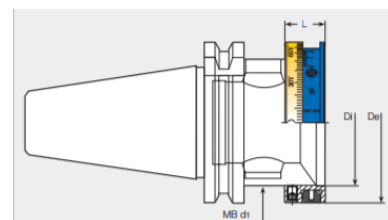


Рис. 5. Змінні кільця для балансування MB-BL-RING [3, 12]

Тримачі інструменту «Silent Tools» [15] мають конструкцію, яка мінімізує вібрації за допомогою системи демпфірування в самому інструменті. Найчастіше їх застосовують, наприклад, при розточуванні за великих вильотів інструменту – $(4-6) \times D$.

Отож маємо дві характерні тенденції: збалансовані виробником оправки і оправки, що є придатними до балансування, зокрема з використанням спеціальних балансувальних машин.

Коли застосовувати збалансовані виробником оправки, а коли – оправки, що придатні для балансування? Вочевидь в цих оправок різна вартість. Але слід враховувати, що неякісне або недостатнє балансування в решті решт призведе до суттєвих витрат по заміні підшипників або дуже вартісного шпинделя [8] і ще й до простоювання обладнання із високою вартістю хвилини роботи. Традиційно вважають, що додаткове балансування не потрібне при швидкості обертання шпинделя в межах 8000-10000 об/хв. Але для інструмента простої форми й незначної довжини, встановленого у збалансовану оправку (наприклад, кінцева фреза) межею додаткового балансування може бути 12000-15000 об/хв, а для довгої розточувальної оправки в аналогічному тримачі – 5000-6000 об/хв. Якщо швидкість шпинделя перевищує 15000 об/хв треба використовувати оправки, які припускають балансування, а при більш ніж 20000 об/хв – обов'язковим є балансування у двох площинах, яке за менших швидкостей застосовують лише для відносно довгого й несиметричного інструменту.

Висновки. У результаті проведеного аналізу встановлено, що існує необхідність не лише у структуруванні інформації й рекомендацій щодо призначення припустимих дисбалансів обертових інструментальних систем, а, в першу чергу, у докладнішій конкретизації цих рекомендацій і наслідків їхнього порушення.

Слід зазначити, що призначення припустимих дисбалансів в основному базується на досвіді застосування певних інструментів, тобто обґрунтуванням є експертна оцінка, правильність якої нічим не підтверджується, окрім довіри до знань та досвіду самого експерта. Наслідки помилки описані дуже загально й, скоріш за все, не одразу й пов'язані будуть саме із дисбалансом. Майже відсутні дослідження, які встановлюють зв'язок між якістю балансування й відхиленнями параметрів робочих процесів і параметрів працездатності обладнання. Подібна інформація існує відносно швидкості обертання, відповідно, може бути адаптована щодо маси і діаметрів інструментів.

Безперечно, дуже привабливим здається варіант наявності й використання на підприємстві спеціального балансувального обладнання, але повинна розглядатися економічна доцільність такого розв'язку питання у конкретному випадку. Порівняльний аналіз різних варіантів, зокрема й можливості та ризиків застосування лише збалансованих виробником інструментальних систем, ускладнюється відсутністю аргументованих даних, як початкових, так і для усвідомлення результату.

Таким чином, вважаємо, що, враховуючи тенденцію підвищення швидкостей обробки обертовим інструментом та зростання вимог до її якості, необхідно надати певні рекомендації

користувачу щодо наслідків порушення рекомендованого припустимого дисбалансу, підкріпленні відповідними дослідженнями та моделюванням робочих процесів.

Інформаційні джерела

1. Балансировочные станки для инструментальных оправок/ HOFMANN Mess- und Balancing Technology GmbH & Co. KG – Режим доступу: <http://www.uralinco-centr.ru/>
2. Балансировка инструмента URL: <http://sibengine.com/balansirovka-instrumenta/>
3. Маслов А.Р. Конструкции прогрессивного инструмента и его эксплуатация. М.: Издательство «ИТО», 2006. – 166 с.
4. Потапов В. А. Оценка реального качества балансировки инструментов [Электронный ресурс]. URL: http://rstanok.ru/articles/article_07.php (27.04.2015)
5. Рыженков В.М. Вибрация и балансировка технологической системы. // Мир техники и технологий. – 2007 – №8 (69) – с. 76-78.
6. Савилов А.В., Николаев Д.Ю., Николаев А.Ю. Исследование влияния дисбаланса инструментальных наладок на выходные показатели фрезерования. // Вестник ИрГТУ, №7 (102) – 2015 – с. 81-90
7. Серебrenицкий П.П. Высокоскоростная механическая обработка. // РИТМ, №2(32), 2008 – с. 21-27.
8. Haimer. Балансировка и производительность – причинно-следственная связь. // Оборудование и инструмент для профессионалов (металлообработка) – 2010. – №6 – с. 44-45.
9. DIN 69888:2008-09. Auswuchtsanforderungen an rotierende Werkzeugsysteme. 2008.37 p.
10. DIN ISO 15641. Фрезы для высокоскоростной обработки. Требования безопасности.
11. ISO/FDIS 1940/1 :2002(E). Mechanical vibration – Balance quality requirements of rigid rotors – Part 1: Specification and verification of balance tolerances. Geneva: ISO TC 108/SC 1/WG 8, 2002. 36 p.
12. Техническая информация. Инструментальные системы. URL: www.kennametal.ru/doc/load/sistema-instrumenta-kennametal-2009-god/page/805
13. Walter AG (Walter Tools). Офіційний сайт. URL: <http://www.walter-tools.ru>
14. Техническая информация. URL:
15. Техническая информация. Инструментальные системы и станки. URL: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/tooling-systems/Machine-and-tooling-systems-considerations/balancing-and-rpm>
16. HAIMER Tool Dynamic Seite/Auswuchttechnik URL: www.haimer.com

Верба І.І., к.т.н., Даниленко А.В., к.т.н.,

Национальный технический университет Украины „Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского“

БАЛАНСИРОВКА ВРАЩАЮЩИХСЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ: МНОГО ВОПРОСОВ И НЕКОТОРЫЕ ОТВЕТЫ

Рассмотрены проблемы, обусловленные наличием дисбалансов при обработке деталей из металлических и неметаллических материалов высокоскоростными вращающимися инструментами. Необходимость балансировки не подлежит сомнению, но полностью устранить дисбалансы невозможно. Поэтому необходимо обосновано выбрать допустимый остаточный дисбаланс и обеспечить возможность, целесообразность и стабильность поддержания границ, которые он не должен превышать. Задача усложняется отсутствием общепризнанной точки зрения на нормативные требования, на последствия остаточного дисбаланса для конкретной инструментальной системы, используемой в конкретном технологическом процессе.

Существуют международные стандарты с рекомендациями по точности и классу балансировки, но они не однозначны. Анализ информационных источников показал, что не учитываются, например, индивидуальные особенности инструментов и оборудования, которые значительно влияют на дисбаланс, не согласованы рекомендации производителей инструментов и балансировочных машин. Широко используются экспертные оценки, но они нуждаются в подтверждении исследованиями последствий нарушения границ допустимого дисбаланса и моделированием рабочих процессов.

Ключевые слова: высокоскоростная обработка, влияние дисбаланса, необходимость балансировки, рекомендации стандартов, рекомендации производителей инструментов, экспертные оценки, исследования допустимой величины дисбаланса.

Verba I.I., Ph.D., Danylenko O.V., Ph.D.

National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"

BALANCING OF ROTATING TOOLS SYSTEMS: MULTIPLE QUESTIONS AND SOME ANSWERS

The problems caused by the presence of imbalances in the processing of parts from metal and nonmetallic materials by high-speed rotating tools are considered. The need for balancing is unquestionable, but it is impossible to completely eliminate imbalances. Therefore, it is necessary to choose the permissible residual imbalance and provide the possibility, expediency and stability of maintaining the boundaries, which it should not exceed. The task is complicated by the lack of a generally recognized viewpoint on regulatory requirements, the consequences of residual imbalance for a particular instrument system used in a particular technological process.

There are international standards with recommendations for accuracy and class balancing, but they are not unambiguous. An analysis of information sources showed that, for example, individual features of tools and equipment that significantly affect imbalance are not taken into account, the recommendations of tool manufacturers and balancing machines are not agreed upon. Expert assessments are widely used, but they need to be confirmed by examining the consequences of breaking the boundaries of the assumed imbalance and modeling work processes.

Key words: *high-speed processing, the effect of imbalance, the need for balancing, the recommendations of standards, the recommendations of tool manufacturers, expert assessments, studies of the permissible magnitude of imbalance.*

Стаття надійшла до редакції 25.03.2018.