

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФРЕЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

©Скоркін А.О., Кондратюк О.Л.¹, Старченко О.П.², Камчатна-Степанова К. В.³

Українська інженерно-педагогічна академія¹

Харківський радіотехнічний коледж²

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"³

Інформація про авторів:

Скоркін Антон Олегович: ORCID: 0000-0003-3032-8341; Andromeda862@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри машинобудування та транспорту; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Кондратюк Олег Леонідович: ORCID:0000-0002-3263-0483; kondr20071@i.ua; кандидат технічних наук; доцент кафедри машинобудування та транспорту; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

Старченко Олена Павлівна: ORCID:0000-0002-7444-6668; Estarchenko79@gmail.com; заступник директора з навчальної роботи, Харківський радіотехнічний коледж, вул. Сумська 18/20, м. Харків, 61057, Україна

Камчатна-Степанова Катерина Валеріївна: ORCID: 0000-0001-7825-1238; katerina.ks@i.ua; інженер 1 категорії Науково-дослідної частини, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

Одним зі шляхів підвищення ефективності механообробки є застосування систем моніторингу динамічних параметрів. Вимір і аналіз динамічних параметрів у процесі обробки деталей було дотепер по технічним і економічним причинах непростим завданням, розв'язуваної для окремих випадків застосування. Істотний ріст розвитку мікропроцесорної техніки й програмного забезпечення в останні роки дозволив забезпечити розробку систем моніторингу динамічних параметрів і адаптивного керування, спрямованих на оптимізацію технологічних процесів високопродуктивної обробки й модернізацію металообробного встаткування.

Фрезерна обробка пов'язана із циклічними навантаженнями в обробній системі верстата, які збільшилися за останні роки багаторазово. Збільшення кутової швидкості обертання шпинделя обробних центрів до 20 – 30 тисяч обертів у хвилину, збільшення подачі на зуб і глибини фрезерування суттєво збільшує динамічну складову сил різання. Вимір і аналіз вібраційних процесів у верстаті при обробці дозволяє вивчити динамічні явища, що виникають в обробній системі, а безперервний моніторинг сили різання і її періодичної складової (тобто вібрації) дозволить замкнути обробну систему каналом зворотнього інформаційного зв'язку з метою наступного керування режимами обробки, мінімізуючи супутні коливання й вібрації.

Ключові слова: інструмент, фрезерування, високошвидкісна обробка, обробний центр, вібраційний контроль.

Skorkin A., Kondratyuk O, Starchenko O, Kamchatna-Stepanova K. «Improving the efficiency of milling through the use of dynamic performance monitoring systems»

One of the ways to increase the efficiency of machining is the use of monitoring systems for dynamic parameters. Measurement and analysis of dynamic parameters in the process of machining parts has until now been, for technical and economic reasons, a difficult task that can be solved for individual special cases of application. The significant growth in the development of

microprocessor technology and software in recent years has made it possible to ensure the development of systems for monitoring dynamic parameters and adaptive control aimed at optimizing technological processes of high-performance processing and modernizing metalworking equipment.

Milling is associated with cyclic loads in the machining system of the machine, which have increased many times over in recent years. An increase in the angular speed of rotation of the spindle of machining centers to 20-30 thousand rpm, an increase in feed per tooth and depth of milling significantly increases the dynamic component of cutting forces. Measurement and analysis of vibration processes in the machine during processing allows studying the dynamic phenomena that arise in the processing system, and continuous monitoring of the cutting force and its periodic component (i.e. vibration) will close the processing system with a feedback channel for the purpose of subsequent control of processing modes, minimizing accompanying vibrations and vibrations.

Keywords: tool, milling, high speed machining, machining center, vibration control.

Вступ

Сучасні обробні центри (ОЦ), володіючи широкими технологічними можливостями й значним потенціалом подальшого розвитку, є в цей час найбільш високопродуктивними й самими затребуваними типами багатофункціональних верстатів. На таких верстатах зняття припуску здійснюється інструментом, що поєднують одночасне обертання з лінійним переміщенням інструмента або заготовки. При цьому деталь закріплена на столі верстата або в спеціальному пристосуванні [1].

ОЦ отримали широке поширення за рахунок можливості виконання на одному верстаті декількох видів операцій обробки: розточування, свердління, фрезерування, а також необхідних вимірів. Виконання різних операцій на одному обробному центрі суттєво економічніше, ніж послідовна обробка на декількох спеціалізованих верстатах. Поряд з економією часу ОЦ дозволяє скоротити інвестиційні витрати й витрати, пов'язані з кадровим забезпеченням і виробничою площею [1,2].

Розрізняють горизонтальні й вертикальні ОЦ. Найбільше поширення одержали ОЦ із вертикальним розташуванням шпинделя, це пов'язано зі зручністю технічного обслуговування й скороченням займаної площі. Базова модель ОЦ (Рисунок 1) має три координати з розташуванням шпинделя уздовж осі Z, а 4 і 5 координатні центри на додаток до стандартних координат (X/Y/Z) мають додаткові кутові (A/B/C).

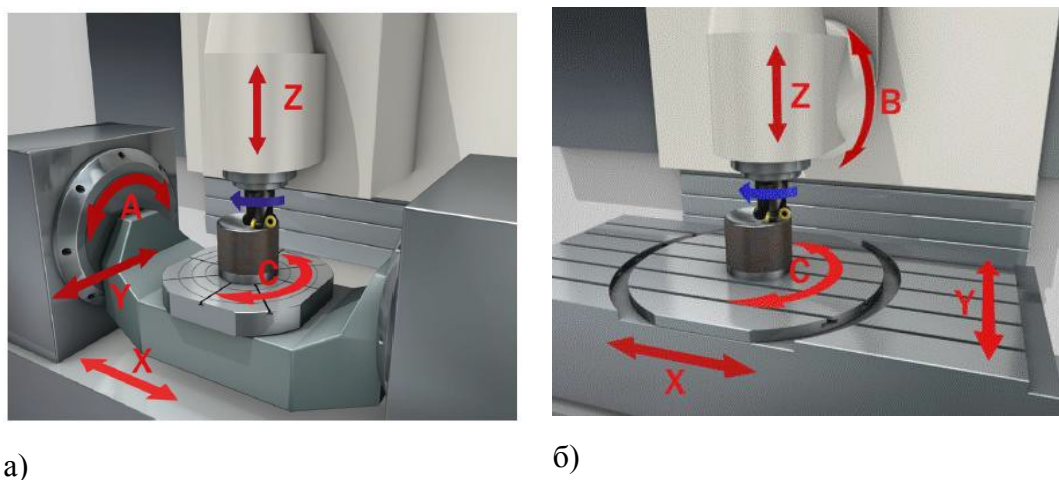


Рис. 1 - Базова модель обробного центру:
а)- з п'ятої віссю А; б)- з п'ятої віссю В

Вісь А паралельна осі Х, вісь В паралельна осі Y і вісь С паралельна осі Z. Як правило, вісь В дозволяє нахилити інструмент, а осі А і С забезпечують обертання оброблюваної заготовки. [3,4]. Наявність в ОЦ кутових координат дозволяє використовувати інструментальні системи з меншим вильотом, що підвищує жорсткість системи й уможливорює обробку на високих швидкостях, як показано на рисунку 2.

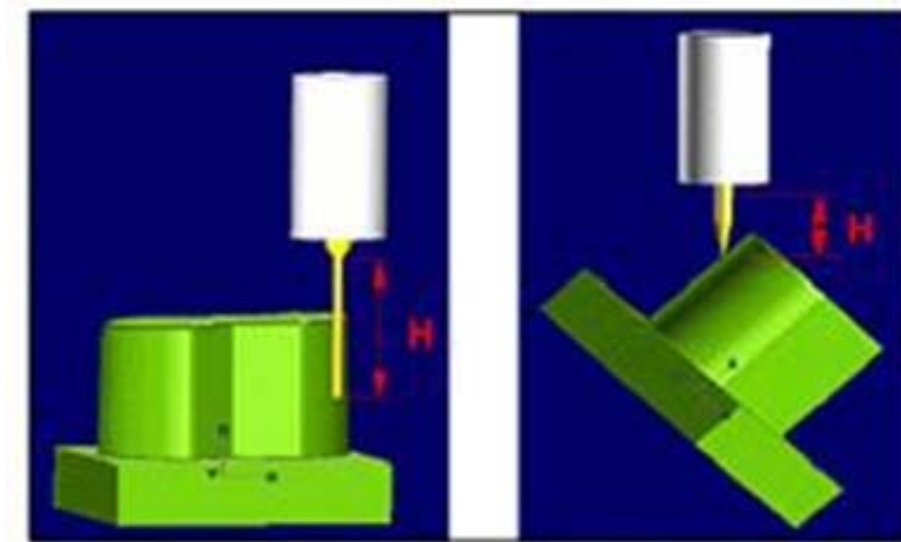


Рис. 2 - Зменшення вильоту інструмента за рахунок використання кутових координат

Багатоваріантність операцій обробки спричиняє використання різних видів інструментальних систем, до складу яких можуть входити патрони різних типів, цанги і т.п. Кожний елемент інструментальної системи має свою точність і твердість. Крім стандартних цангових патронів Ег-Типу, також застосовуються термозатискні, гідравлічні (Hydrogrip) і гідромеханічні (Corgrip) патрони, орієнтовані на високошвидкісну й високопродуктивну технологію обробки [3,4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом існує стійка тенденція впровадження в машинобудівне виробництво високошвидкісної (ВШО) і високопродуктивної (ВПО) обробки [4-6]. В основі цих понять лежить характерно однаковий процес різання. При ньому діючі значення швидкостей різання й подач в 5-10 разів вище, ніж при звичайній обробці.

Незважаючи на високу складність геометрії авіаційних деталей і різний характер виникаючих при їхній обробці проблем, такі деталі можуть бути згруповані на основі загальних ознак, типів оброблюваних елементів і поверхонь, застосовуваних верстатів і способів вирішення виникаючих проблем. Можна виділити кілька типів деталей при обробці яких виникають різні складності:

1) Силкові деталі з ребрами жорсткості із двох сторін, товщиною стінок від 5 мм і товщиною полотен від 3 мм (наприклад, обід шпангоута представлений на рисунку 3). Основна складність при обробці таких деталей – це запобігання вібрації, що виникає через відносно велику висоту стінок деталі. Для обробки потрібні фрези з більшим вильотом. Обробка ведеться на знижених режимах різання.

2) Довгомірні деталі довжиною до 30 м невеликого перетину (наприклад, стрингер).

3) Тонкостінні деталі, оснащені ребрами жорсткості з однієї або двох сторін, з товщиною полотна від 1 мм (наприклад, панель, представлена на рисунку 4). При обробці таких деталей часто виникають жолоблення й вібрації.

4) Деталі, поверхні яких виходять за теоретичний контур літака (наприклад, окантовка дверей літака, рама ліхтаря кабіни пілота). Такі деталі мають складну форму, поверхні одинарної й подвійної кривизни, закриті кишени. При виготовленні застосовується 5-ти осьові верстати й спеціальні грибкові фрези.

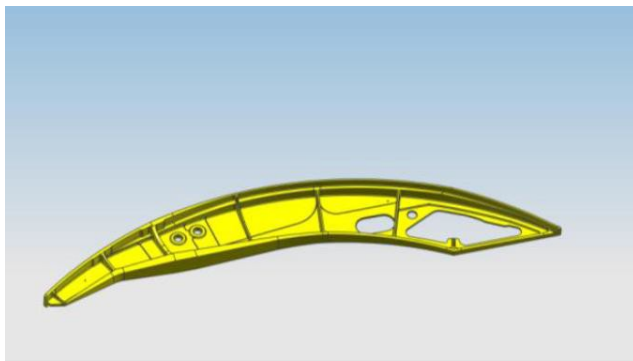


Рис. 3 - Деталь «Обід шпангоута»

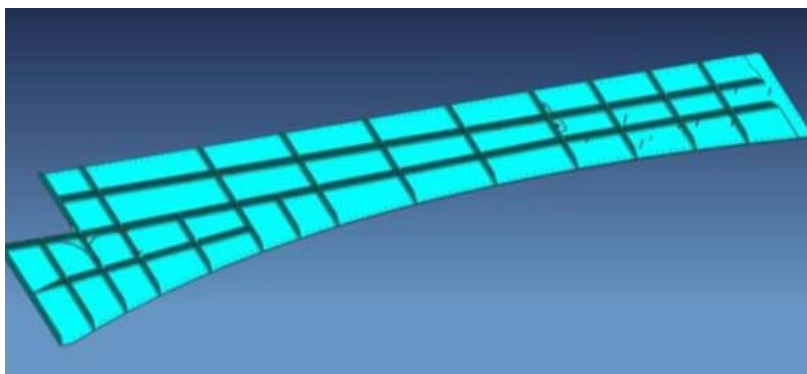


Рис. 4 – Деталь типу «Панель»

При виборі способів підвищення якості й продуктивності обробки деталей важливим критерієм є їхня економічна ефективність, що забезпечує зниження собівартості готових виробів, що особливо актуально в умовах низької серійності виготовлення [4-6].

Постановка проблеми

Одним з найважливіших завдань сучасного машинобудування є одержання максимальної віддачі від дорогих обробних центрів із забезпеченням необхідних якостей поверхні одержуваних деталей. На сьогоднішній день існує велика кількість розроблених методик, що дозволяють підвищити ефективність механообробки, але по різних причинах вони не одержали широке поширення. У таблиці 1. представлені основні методи підвищення ефективності механообробки.

Таблиця 1.1 - Методи підвищення ефективності механообробки

Метод	Спостережувана ефективність
Удосконалювання геометрії й використання спеціальних зносостійких покриттів для різального інструменту	Підвищення надійності процесів різання, стійкості інструмента й поліпшення якості оброблених поверхонь. Скорочення часу операції механообробки.
Удосконалювання САМ,САЕ-систем	Підвищення продуктивності, функціональних властивостей і технологічності деталі
Удосконалювання способів охолодження зони різання	Підвищення надійності процесів різання, стійкості інструмента, зниження витрат на ЗОТС
Вибір оптимальної траєкторії обробки	Скорочення машинного часу обробки, підвищення продуктивності і якості оброблених поверхонь
Оптимізація режимів різання на основі динамічних характеристик обробного встаткування	Ідентифікація зон стабільної обробки, поліпшення якості обробки
Застосування технології високошвидкісної обробки	Підвищення продуктивності, поліпшення якості обробки; зниження сил різання, обробка тонкостінних деталей, підвищення стійкості, зниження витрат на ЗОТС

Сучасної тенденції в області механообробки металів є перехід у зони високошвидкісної обробки (ВШО), при якому значення швидкостей різання й подач різання в десятки й сотні раз вище в порівнянні із традиційною обробкою [5,7,8]. Перехід до технології ВШО має на увазі комплексне залучення в тому або іншому виді всіх доступних методів підвищення ефективності механообробки . Так для забезпечення найменшого контакту стружки з інструментом розробляються нові геометрії й покриття ріжучих крайок, що дозволяють забезпечити найменше тертя [5,7,8]. Охолодний ефект ЗОТС при ВШО не затребуваний, але досить ефективне змазування, що сприяє найкращому ковзанню стружки по інструменту без теплообміну. ВШО висуває особливі вимоги до інструмента, який повинен бути виготовлений переважно із твердих сплавів з різними зносостійкими покриттями. Стійкість інструмента при різних покриттях представлено на рисунку 5.

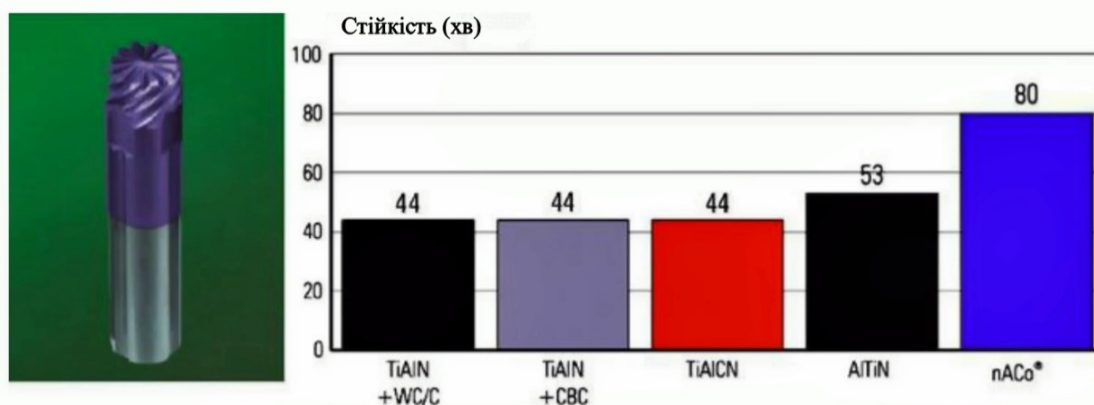


Рис. 5 - Стійкість інструмента при різних покриттях

Метою роботи є дослідження ефективності фрезерної обробки за рахунок використання систем моніторингу динамічних характеристик.

Виклад основного матеріалу

Будь-яке механообробне встаткування має обертові вузли, які створюють механічні коливання й вібрації, що є причиною зниження якості деталей, що випускаються, підвищеного зношування інструмента, передчасного виходу з ладу обробних верстатів. Вібрація в значній мірі визначає показники точності верстатів і характеризує стан вузлів, деталей і їх складових. На верстат, шпиндель, інструмент і заготовку деталі при обробці діє складний комплекс мінливих у часі силових, інерційних і кінематичних збурювань.

Під параметрами вібрації, вимірюваної на шпинделі обробного центру, розуміються тимчасові складові (осцилограми) коливань по трьом взаємно перпендикулярним напрямкам, тобто первинні сигнали вібропришвидження, одержувані датчиками вібрації (п'єзоакселерометрами), а також результати їх обробки при аналізі [6,9,10].

Сили й збурювання, що генерують просторову вібрацію при роботі шпинделя в режимі холостого ходу діляться на:

- ✓ інерційні сили дисбалансів інструмента, оправлення, ротора шпинделя;
- ✓ кінематичні збурювання передані через корпус шпинделі від роботи й дефектів підшипників, від розцентровки опор шпинделя, від роботи зубчастих передач механічного приводу шпинделя;
- ✓ інерційні й кінематичні збурювання на шпинделі від роботи й дефектів механізмів подач;
- ✓ електромагнітні, електродинамічні й магнітострикційні сили від статора й ротора асинхронного або синхронного електродвигунів приводу обертання шпинделя або приводів подач;
- ✓ нелінійні пружні реакції на інерційне порушення (залишковий дисбаланс) при дефектах опорної системи: механічних ослаблень нерушливих з'єднань, посадки зовнішніх кілець підшипника, люфтів у підшипнику й рухливих з'єднаннях.

При роботі шпинделя в режимі обробки деталей до силових і кінематичних збурювань холостого ходу додаються періодичні кінематичні збурювання від взаємодії ріжучих крайок інструмента з матеріалом деталі, від порушення автоколивань пов'язаних з дією сил тертя й париметричних коливань через можливі періодичні зміни пружно-, що демпфують параметрів механічної системи. У механічній системі верстата, приводів подач, шпинделя й інструментів найчастіше спостерігаються резонанси й околорезонансні режими роботи, супроводжувані модуляцією інерційних сил порушення. Вони обумовлені більшою кількістю

власних частот механічної системи «верстат – пристосування – інструмент - заготовка» (ВППЗ), частина яких, збігається із частотами інерційного порушення.

Підвищення частоти обертання шпинделя (до 10000 - 20000 хв⁻¹ і більш) приводить до виникнення нових негативних явищ при обробці, пов'язаних з динамічною нестабільністю процесу різання – вібраціями системи ВППЗ. При чорновій обробці масивних заготовок вібрації обумовлені коливаннями шпиндельної групи верстата, що включає властиво шпиндель і інструмент із системою його кріплення. Такі вібрації мають амплітуду порядку товщини стружки й приводять до появи «дроблення» на обробленій поверхні (Рисунок б). Вібрації знижують якість обробки й ведуть до передчасного руйнування інструмента й підшипників шпинделя. При виникненні вібрацій оператор верстата або технолог зменшують глибину/ширину фрезерування або подачу інструмента, що приводить до зниження продуктивності обробки не дозволяє повною мірою реалізувати потужність привода шпинделя.



Рис.6 - Дроблення на обробленій поверхні в результаті вібрацій інструмента

Обсяг матеріалу, що віддаляється, [см³/хв] визначається вираженням:

$$Q = \frac{a_p \cdot a_e \cdot V_f}{10000},$$

де a_p -глибина фрезерування; a_e – ширина фрезерування; V_f - подача стола;

Підвищення значень перших трьох параметрів фрезерування ($a_p \cdot a_e \cdot v_f$) приводить до росту зусиль у взаємодії «фреза – заготовка». Підвищення частоти обертання шпинделя (відповідне до росту швидкості різання) розширює частотний діапазон впливу сил різання на компоненти системи ВППЗ. У результаті суттєво розширюються діапазони виникнення вібрацій інструмента, закріпленого в шпинделі.

З метою виявлення взаємозв'язки технологічних режимів фрезерної обробки з параметрами генеруємої вібрації, проведені експериментальні дослідження на широко використовуваних типах обробних центрів. При вимірі й аналізі вібрації використовувався багатоканальний (8 каналів) програмно-апаратний комплекс фірми National Instruments (США) з вимірювальними модулями 3-Серії NI-9234 з наступним аналізом параметрів вібрації в середовищі графічного програмування Labview. Виміру вібрації проводилися на наступних типах обробних центрів: DMG HSC 75 Linear; DMC 635 V; DMU 80 P; DMF 500; DMU 50; FFQ 100A.

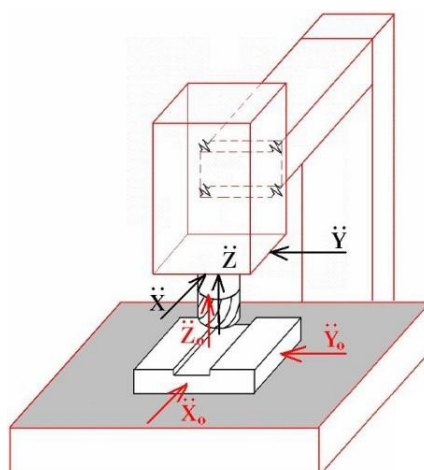


Рис. 7 - Модель шпинделя як твердого тіла із пружно-грузлими зв'язками з напрямними й станиною обробного центру DMC 635V

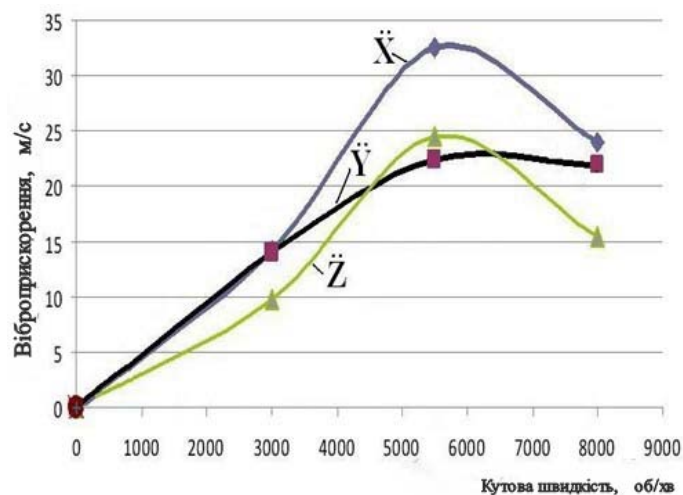


Рис. 8 - Залежність віброприскорення по координатах переміщення шпинделя й стола при збільшенні його кутової швидкості (обробний центр DMC 635V)

Схема виміру вібрації на шпинделі обробного центру «Г-Г-образної» компоновання, наприклад DMC 635V, і на робочому столі верстата представлено на рисунку 7. Випробування верстатів на холостому ході (без обробки заготовки) проводиться послідовним збільшенням швидкості обертання шпинделя від мінімальної до максимальної. У результаті, одержуємо амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) обробного центру (ОЦ) у режимі вибігу на максимальну частоту обертання шпинделя, наприклад для ОЦ DMC 635V така характеристика представлено на рисунку 8. Середньоквадратичне значення (СКЗ) віброприскорення, що характеризує силові характеристики вібрації, обмірюване на шпинделі зростає до значної величини – $3g$ і більш (Рисунок 8). По напрямках виміру збільшення вібрації нерівномірне, причому, зі збільшенням швидкості обертання шпинделя з 6000 до 9000 об/хв вібрація трохи знижується. Крок зміни кутової швидкості шпинделя був значним – 2500 об/хв. При зменшенні кроку зміни кутової швидкості до 100 об/хв амплітудно-частотна

характеристика верстата й шпинделя буде більш складною – з декількома зонами високої й низької вібрації.

Об'єктом дослідження в режимі обробки була обрана операція високопродуктивного фрезерування алюмінію з фрезою (діаметр 16 мм, число ріжучих крайок - 3) фірми Sandvik. З урахуванням рекомендацій виробника даної фрези були призначені наступні режими різання: швидкість обертання шпинделя $n = 21700$ об/хв; глибина різання $ap = 15$ мм; подача на зуб $fz = 0.18$ мм/зуб. Ширина фрезерування прийнята $ae = 16$ мм.

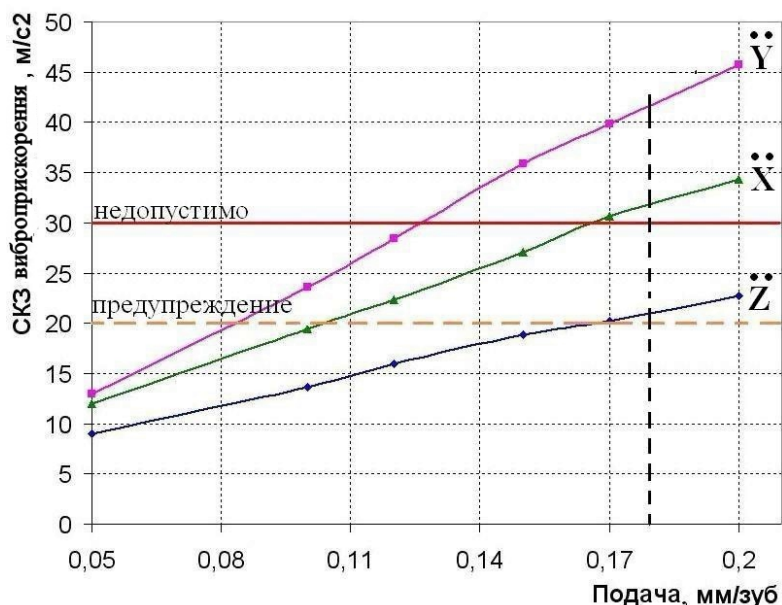


Рис. 9 - Залежність СКЗ віброприскорення на шпинделі від величини подачі

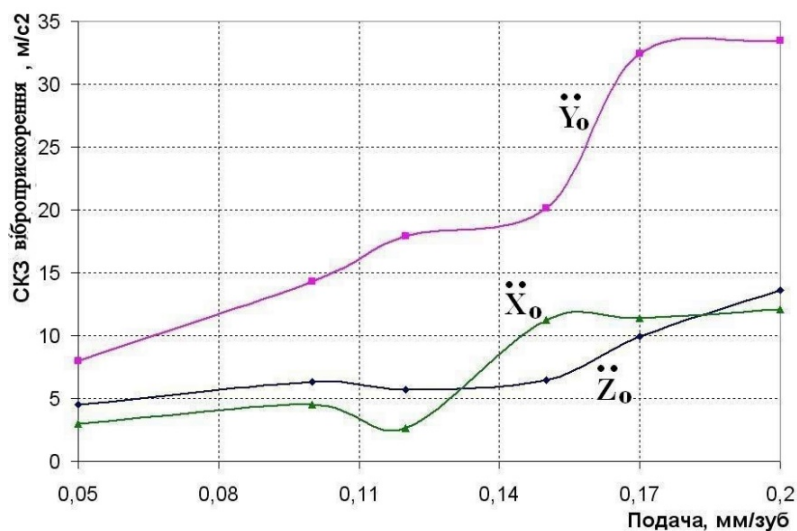


Рис. 10 - Рівень вібрації деталі, за даними датчиків, установлених на столі подачі

За даними експерименту визначалася залежність середньоквадратичного значення віброприскорення від величини подачі (Рисунок 9). На рисунку нанесені рівні неприпустимої вібрації й попередження при частоті обертання шпинделя 21700 хв^{-1} . Рекомендований рівень припустимої вібрації шпинделя (Рисунок 9) визначається виробниками верстата й установлюється в паспортних даних або в їхню відсутність, призначається згідно з нормами ГОСТ ИСО 10816-3-2002 (для потужності електропривода шпинделя від 15 до 300 кВт).

На підставі отриманих даних (Рисунок 9) можна укласти, що вібрація, що виникає на рекомендованій виробником інструмента величині подачі $fz = 0.18$ [мм/зуб], перевищує гранично припустимий рівень вібрації шпинделя, установлений нормами ГОСТ ИСО 10816-3-2002. Максимальна вібрація шпинделя спостерігається в напрямку перпендикулярному подачі деталі (Y_0), при її обробці. У цім же напрямку (Рисунок 10) збуджується максимальна вібрація деталі (заготовки) (Y_0). Причому, різке збільшення вібрації деталі відбувається в діапазоні подач $fz = 0,15 - 0,17$.

Висновки

Проведено експериментальні дослідження впливу технологічних режимів фрезерування на рівень вібрації шпиндельного вузла обробного центру, які показали необхідність при реалізації технологій ВПО узгодження режимів різання з рівнем можливої вібрації шпинделя, ріжучого інструменту і деталі.

Список використаних джерел:

1. Вибрации в технике : справочник в 6-ти т. Т. 5: Измерения и испытания / под ред. М. Д. Генкина. – М. : Машиностроение 1981. – 496 с.
2. Неразрушающий контроль : справочник в 8 т. Т. 7 : В 2 кн. Кн. 1: Иванов В. И. Метод акустической эмиссии / В. И. Иванов, И. Э. Власов. Кн. 2 : Вибродиагностика / Ф. Я. Балицкий, А. В. Барков, Н. А. Баркова и др. – М. : Машиностроение. – 2006. – 829 с.
3. Altintas Y. A General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills / Y. Altintas, P. Lee // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 1998. – № 120(4). – P. 684–692.
4. Campatelli G. Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4 [Electronic resource] / G. Campatelli, A. Scippa // *Conference on High Performance Cutting*. – 2012. – P. 563–568. – Access mode : <https://goo-gl.su/axpapyh>. (Lastaccessed : 28.04.2021).
5. Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge / A. Skorkin, O. Kondratyuk, N. Lamnauer, V. Burdeinaya // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – № 2/1 (98). – P. 60–69.
6. Jayaram S. Analytical stability analysis of variable spindle speed machining / S. Jayaram, S. G. Kapoor, R. E. Devor // *ASME J. Eng. Indus.* – 2000. – Vol. 122. – Pp. 391–397.
7. Sastry S. Chatter stability analysis of the variable speed face-milling process / S. Sastry, S. G. Kapoor, R. E. Devor // *ASME J.130. Eng. Indus.* – 2001. – Vol. 123. – Pp. 753–756.
8. Richard Y. Chiou Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning / Y. Chiou Richard, Y. Liang Steven // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2000. – № 40. – P. 114–118.
9. Engin S. Mechanics and Dynamics of general milling cutters. Part 1: helical end mills / S. Engin, Y. Altintas // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2001. – № 45. – P. 2195–2212.
10. Altintas Y. *Manufacturing Automation / Y. Altintas // Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. – Cambridge : University Press, 2012. – 366 p.

References:

1. Genkin, MD (ed.) 1981, *Vibracii v tehnikе: spravochnik*, vol. 5 Izmerenija i ispytaniya, Mashinostroenie, Moskva.
2. Ivanov, VI Vlasov, Ie 2006, ‘Metod akusticheskoy jemissii’, in *Nerazrushajushhij kontrol*, vol. 7, Mashinostroenie, Moskva.
3. Balickij, FJa, Barkov, AV, Barkova, NA et al. 2006, ‘Vibrodiagnostika’, in *Nerazrushajushhij kontrol*, vol. 7, Mashinostroenie, Moskva.
4. Altintas, YA & Lee, P 1998, ‘General Mechanics and Dynamics Model for Helical End Mills’, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, pp. 684-692.
5. Campatelli, G & Scippa, A 2012, ‘Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4’, *Conference on High Performance Cutting*, PP. 563-568.
6. Skorkin, A, Kondratyuk, O, Lamnauer, N & Burdeinaya, V 2019, ‘Improving efficiency of machining the geometrically complex shaped surfaces by milling with a fixed shift of the cutting edge’, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 2/1 (98), pp. 60-69.
7. Jayaram, S, Kapoor, SG & Devor, RE 2000, ‘Analytical stability analysis of variable spindle speed machining’, *ASME J. Eng. Indus.*, vol. 122, pp. 391-397.
8. Sastry, S, Kapoor, SG & Devor, RE 2001, ‘Chatter stability analysis of the variable speed face-milling process’, *ASME J.130. Eng. Indus.*, vol. 123, pp. 753-756.
9. Richard, CY & Liang, SY 2000, ‘Analysis of acoustic emission in chatter vibration with tool wear effect in turning’, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, no. 40, pp. 114-118.
10. Engin, S & Altintas, Y 2001, ‘Mechanics and Dynamics of general milling cutters. Part 1: helical end mills’, *International Journal of Machine Tools and Manufac-ture*, no. 45, pp. 2195-2212.
11. Altintas, Y 2012, ‘Manufacturing Automation’, *Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, University Press, Cambridge, pp. 366 .

Стаття надійшла до редакції 03 травня 2021 року