

Вплив вібрацій на стійкість багатолезового інструменту

Одним зі шляхів усунення вібрацій під час різання є вибір режимів різання, геометричних параметрів інструменту та інших технологічних факторів таким чином, щоб забезпечити роботу в області стійкості. Робота в області стійкості, знайденої за основними факторами, які впливають на інтенсивність вібрацій в системі, дозволяє майже повністю усунути вібрації, підвищити якість оброблюваних виробів і стійкість різального інструменту.

Вплив зносу інструменту на інтенсивність вібрацій починає позначатися вже за появи невеликого майданчика зносу. Це пояснюється демпфуючою дією майданчика. При подальшому збільшенні зносу амплітуда коливань зростає, тому надзвичайно актуальною є проблема дослідження впливу вібрацій не тільки на стійкість інструменту, але й на визначення областей роботи без вібрацій та зменшення їх впливу на експлуатаційні характеристики оброблюваних деталей. Тобто, важливо досягти мінімального зносу багатолезового інструменту, забезпечуючи при цьому його стійкість та здатність обробляти деталі з заданою точністю і шорсткістю поверхні. Найбільш повно вплив вібрацій на стійкість інструменту досліджено під час обробки звичайними різцями навіть новітньої конструкції зі змінними пластинами. При використанні багатолезового різання динамічна система верстата стає більш складною, що вимагає додаткових досліджень для встановлення областей режимів обробки вільних від вібрацій, що гарантує якість деталей. Новизна роботи полягає в комплексному дослідженні впливу вібрацій на роботу складних інструментів: фрез, свердел, протяжок, зенкерів, розгортки та різьбонарізних головок. Це дозволяє розробити рекомендації для стійкої роботи інструменту в умовах використання його в сучасних верстатних системах з обладнанням з ЧПУ.

Ключові слова: вібрації; знос; стійкість; багатолезовий інструмент; динамічна система.

Викладення основного матеріалу. Досягти високих показників якості під час обробки на верстатах важко через вібрації, що знижують продуктивність і точність обробки, надійність і довговічність роботи верстатів, а також стійкість різального інструменту.

Постановка завдання. Вібрації динамічної системи верстата значною мірою визначають стійкість багатолезового інструменту. Метою роботи є підвищення продуктивності та якості обробки деталей при роботі багатолезовим інструментом. Поставлено завдання дослідження вібрацій, що виникають, визначення областей режимів різання без вібрацій, розроблення рекомендацій за оптимальними параметрами геометрії багатолезового інструменту, надання рекомендацій щодо зниження впливу вібрацій на стійкість різального інструменту.

Актуальність теми. Проблема дослідження вібрацій при багатолезовій обробці, а саме їх вплив не тільки на якість обробки, а й на стійкість багатолезового інструменту, є надзвичайно актуальною. Такі дані набувають особливо важливого значення у зв'язку із застосуванням верстатів з ЧПУ, що працюють багатолезовим інструментом. При складанні програм для цих верстатів мають враховуватися обмеження на режими різання, які накладаються через можливість появи вібрації.

Аналіз попередніх досліджень. Явище вібрацій найбільш повно теоретично і експериментально досліджено при точінні одним різцем на токарних верстатах [1, 4, 7, 10, 11].

В опублікованих роботах недостатньо уваги приділяється питанню усунення вібрацій під час обробки металів з використанням багатолезових інструментів: свердел, розгортки, зенкерів, протяжок, фрез, різьбонарізних та інших інструментів. Результати досліджень вібрацій при багатолезовій обробці не систематизовані, в них недостатньо уваги приділено впливу вібрацій на продуктивність механічної обробки, стійкість різальних інструментів і показники якості деталей – точність, шорсткість і властивості поверхневих шарів деталей [2, 5, 6, 9]. Робота присвячена проблемі усунення впливу вібрацій на стійкість багатолезового інструменту та виділення областей роботи, що забезпечують його мінімальний знос.

Під час фрезерування помічено [5, 6, 9], що залежність стійкості від інтенсивності коливань має екстремальний характер. Дослідження проводилися при роботі кінцевими і дисковими фрезами, оснащеними твердим сплавом ВК8, а також кінцевими фрезами зі швидкорізальної сталі Р18 при обробці титанових сплавів і нержавіючих сталей. Необхідне збільшення амплітуд автоколивань досягалося зменшенням жорсткості оправки інструменту. Зменшення жорсткості інструмента в 9–10 разів призводить до збільшення амплітуд в 15–25 разів.

Для всіх досліджених процесів фрезерування існує деяка оптимальна амплітуда коливань, за якої спостерігається найвища стійкість інструменту (рис. 1, а). На рисунку 1 крива 1 відповідає обробці

сплаву ОТ4 дисковою фрезою, оснащеною твердим сплавом ВК8, діаметром 70 мм з кількістю зубів 16 при ширині фрезерування 3 мм, глибині різання 3 мм, подачі на зуб 0,05 мм/зуб, швидкості різання 82 м/хв, передньому куті 10° і задньому куті 15° ; крива 2 – обробці сплаву ВТ20 кінцевою фрезою, оснащеною твердим сплавом ВК8, діаметром 40 мм з кількістю зубів 5 при ширині фрезерування 13,5 мм, глибині різання 1 мм, подачі на зуб 0,055 мм/зуб, швидкості різання 120 м/хв, передньому куті 5° , задньому куті 15° і куті нахилу гвинтової лінії фрези 5° ; крива 3 відображає ті ж умови обробки, що і крива 2, але з кутом нахилу гвинтової лінії фрези 20° .

При оптимальних значеннях амплітуд коливань, що становлять для розглянутих процесів 10–20 мкм, підвищується якість і точність обробки, знижується хвилястість і шорсткість поверхні. Залежність стійкості інструменту від амплітуди автоколивань добре апроксимується емпіричними рівняннями виду:

$$T = QA^m l^{-nA},$$

де T – стійкість, хв, A – амплітуда, мкм, Q , m , n , – постійні, залежні від властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів і умов різання.

Під час обробки титанового сплаву ВТ20 кінцевими зрізами, оснащеними твердим сплавом ВК8 з кутом нахилу гвинтової лінії 20° , $Q = 79,5$, $m = 0,391$ і $n = -0,0298$.

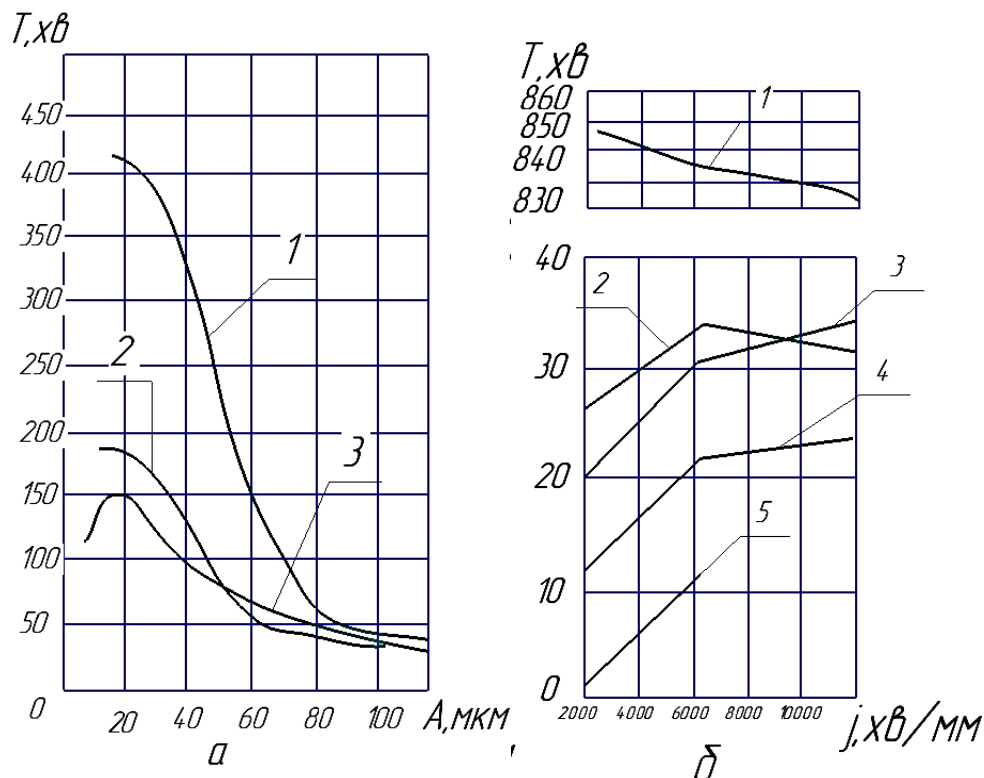


Рис. 1. Залежність стійкості фрези від амплітуди коливань і статичної жорсткості

Наявність екстремальної залежності стійкості від амплітуди пояснюється тим, що автоколивання, що виникають під час різання, сприяють полегшенню пластичного деформування. Крім того, коливання системи призводять до зміни робочих кутів, швидкостей різання, товщини шару, що зрізається, що також змінює співвідношення між дотичними і стискаючими напруженнями й опором пластичній деформації. Внаслідок цього зі збільшенням інтенсивності вібрацій до деякої оптимальної величини знижуються сили різання, споживана потужність, і збільшується стійкість інструменту.

У той же час автоколивання за певної інтенсивності можуть викликати втомлене руйнування лез інструмента під дією високочастотних знакозмінних навантажень, які збільшуються з ростом амплітуд. Втомне руйнування проявляється у вигляді мікро- і макротріщин, розпушення кобальтового прошарку твердого сплаву і підвищеного викришування різальних зерен. Особливо часто це спостерігається при вібраціях значної інтенсивності, внаслідок чого стійкість інструменту зменшується.

Частота коливань під час фрезерування слабо впливає на стійкість фрез, однак при значному підвищенні частоти коливань може істотно підвищитися знос інструменту.

Під час фрезерування кінцевими фрезами зі швидкорізальної сталі Р18 встановлено [5, 10], що зі зменшенням амплітуди коливань, що відповідає збільшенню жорсткості фрез, стійкість їх зростає (рис. 1, б). Ступінь впливу жорсткості на стійкість фрез не однакова і залежить від режимів різання.

Наприклад, при швидкості різання 30–40 м/хв, подачі 0,05–0,1 мм/зуб і ширині фрезерування 6 мм (криві 2 і 4) з підвищенням жорсткості від 6000 до 12000 Н/мм стійкість фрез практично не змінюється, а при зниженні жорсткості від 6000 до 2200 Н/мм зменшиться майже удвічі. При подачі 0,166 мм/зуб, ширині фрезерування 5 мм, тій же швидкості різання (крива 3) і підвищенні жорсткості від 2000 до 6000 Н/мм стійкість збільшується більше ніж у 1,5 раза. При ширині фрезерування 24 мм, швидкості різання 60 м/хв (крива 5) і такому ж збільшенні жорсткості стійкість зростає майже ушестеро. При подачі 0,01 мм/зуб, ширині фрезерування 5 мм і швидкості 20 м/хв (крива 1) з підвищенням жорсткості від 2000 до 12000 Н/мм стійкість фрез практично не змінюється, в той час як при збільшенні режимів різання вона підвищується.

Вплив амплітуди коливань різальної кромки на її стійкість пов'язаний з термодинамічним навантаженням. З її збільшенням вплив коливань на стійкість кромки зростає і навпаки. Крім того, підвищення режимів різання викликає збільшення амплітуди коливань фрез при збереженні їх статичної жорсткості. Тому жорсткість кінцевих фрез найбільше впливає на їх стійкість у разі роботи на підвищених режимах або обробки важкооброблюваних матеріалів.

Під час свердління крутильні коливання несприятливо впливають на стійкість і міцність свердлів [10, 11]. Наявність крутильних коливань обумовлює зміну швидкості в процесі різання. Наприклад, під час свердління сплаву ОТ4 свердлами діаметром 3 мм з номінальною швидкістю різання 3,8 м/хв фактично швидкість змінювалася від 2,3 до 5,3 м/хв. При гармонійній зміні швидкості миттєве її значення:

$$v_x = v_0 + A_v \cos \omega \tau, \quad (1)$$

де v_0 – номінальне значення швидкості різання, A_v – амплітуда коливань швидкості, м/хв, ω – кутова швидкість, рад/хв, $\omega = 2\pi f$, f – частота коливань, τ – час, хв.

Диференціальне рівняння зносу свердла, якщо припустити, що подача постійна, має вигляд:

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{h_0 S^{y_T}}{C_T} (v_0 + A_v \cos \omega \tau)^2, \quad (2)$$

де h_0 – критерій затуплення, S – подача, y_T – показник степеня, що визначає вплив подачі, C_T – деякий постійний коефіцієнт.

Знос свердла за час одного періоду коливань, хв,

$$h = \frac{h_0 S^{y_T}}{C_T} \int_{\tau=0}^{\tau=1/f} (v_0 + A_v \cos \omega \tau) d\tau. \quad (3)$$

Стійкість свердла за наявності крутильних коливань, хв,

$$T_K = \frac{h_0}{h_K} \cdot 60f.$$

Коефіцієнт $\eta = T_0/T_K$, де T_0 – розрахункова стійкість за відсутності коливань, T_K – стійкість за наявності крутильних коливань.

Підставивши у вираз для η значення T_0 і T_K , з урахуванням рівняння (15) отримаємо:

$$\eta = \frac{60f}{v_0^n} \int_{\tau=0}^{\tau=1/f} (v_0 + A_v \cos \omega \tau)^2 d\tau. \quad (4)$$

Змінну складову швидкості різання представимо у вигляді:

$$\Delta v = 60A\omega \cos \omega \tau / 1000,$$

де A – амплітуда крутильних коливань в лінійних переміщеннях по зовнішньому діаметру свердла, мм.

Приймаючи на основі дослідів стійкості сплаву ОТ4 показник відносної стійкості $m = 1/5(n - 5)$, після інтегрування отримуємо:

$$\eta = \frac{T_0}{T_K} = 1 + 0,71\xi^2 + 0,037\xi^4,$$

де $\xi = Af/v_0$.

Таким чином, чим більша амплітуда і частота крутильних коливань свердла, тим нижча його стійкість.

Для стандартного свердла при $A = W_{GT} = \frac{\pi d}{360} = \frac{1,5^\circ}{2} \cdot \frac{3,14 \cdot 3}{360} \approx 0,02$ мм, $f = 320$ Гц і $v_0 = 3,8$ м/хв отримаємо $\xi = 1,68$, а коефіцієнт зниження стійкості $\eta = 3,3$. Якщо ж розрахунок зробити, виходячи з максимальних амплітуд коливань $2W_{GT} = 3^\circ$, то коефіцієнт зниження стійкості становить 13,9.

Для чотиристрічкових свердл амплітуда коливань зменшується більш інтенсивно, тому коефіцієнт зниження стійкості зменшується суттєво і досягає значення 6,7. Отже, стійкість чотиристрічкових свердл удвічі перевищує стійкість стандартних. Підвищення стійкості обумовлено зниженням температури за рахунок кращого проникнення змащувально-охолоджувальної рідини (ЗОР) в зону різання через додаткові канавки чотиристрічкового свердла.

Залежність між рівнем коливань і зносом різального інструменту дозволяє прогнозувати його знос. Збільшення фаски зносу інструменту в процесі обробки впливає на динамічні характеристики системи таким чином, що амплітуда коливань здебільшого зростає в міру зносу різальної кромки. Наприклад, під

час свердління свердлами Р6М5 діаметром 10 мм сталі 45 зі швидкістю 22 м/хв і подачею 0,14 мм/об на початку шляху різання середній рівень коливань зростає лінійно (рис. 2, а, б). Тут рівень коливань оцінюється в децибелах по їх звуковому тону. Після досягнення певної величини h_3 починається більш інтенсивний знос інструменту (рис. 2, а). Рівень коливань при цьому зростає майже експоненціально (рис. 2, б).

Рівняння, що визначає закономірність зміни середнього рівня коливань залежно від шляху різання, може бути записане таким чином: $q(L) = A + BL + C_{exp}[D(L - L_c)]$, де A, B, C, D – постійні коефіцієнти, L – шлях різання, $C = 0$ при $L < L_c$, L_c – довжина шляху різання, після якого починається експоненціальне збільшення функції $q(L)$.

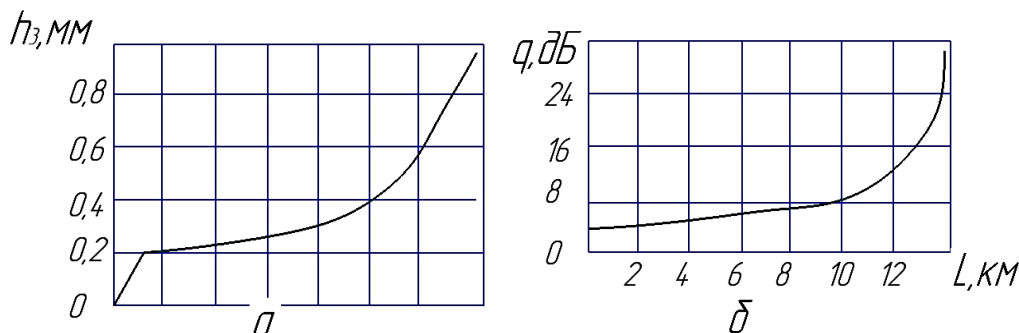


Рис. 2. Залежність зносу свердла по задній поверхні і рівня звукових коливань від шляху різання

Інформація, що міститься в сигналах, отриманих після посилення і фільтрації звукових коливань, що реєструються датчиками в певних точках динамічної системи, може бути використана для діагностики зносу різального інструменту в процесі обробки, аналізу вібростійкості верстатів і автоматичного управління процесом різання з метою його оптимізації. Оптимізувати процес різання дозволяє наявність зв'язку між рівнем коливань і режимами різання. Зміна швидкості різання на 10–15 % при обробці інструментом з однаковим затушенням тягне за собою зміну звукових коливань на 15–20 дБ при роботі інструментом зі швидкорізальної сталі і на 10–14 дБ – при роботі твердосплавним інструментом. Інші технологічні чинники, наприклад, твердість оброблюваного матеріалу, подача, глибина різання, геометричні параметри інструменту, також значною мірою впливають на рівень звукових коливань. Короткочасні перерви в подачі ЗОР під час свердління викликають збільшення рівня коливань в межах 5–10 дБ, що може слугувати додатковим сигналом виконавчим органам системи контролю про зміну умов обробки.

Процес протягування, особливо внутрішнього, відрізняється обмеженими умовами різання, дією знакозмінних навантажень, утрудненими умовами подачі МОР в зону різання, значними тепловими і динамічними навантаженнями. Тому стійкість зуба протягання, обчислена в метрах шляху, пройденого в контакт з виробом, значно нижче стійкості токарних і стругальних різців, а також деяких інших інструментів. Вібрації, що виникають при протягуванні, значною мірою знижують стійкість протяжок і якість обробленої поверхні. Оскільки при роботі на протяжних верстатах швидкість різання знаходиться в межах 2–12 м/хв, то в ряді випадків при протягуванні має місце робота в резонансній зоні або в безпосередній близькості від неї. Тому зростання амплітуд поперечних коливань призводить до швидкого зносу протяжок. При цьому слід враховувати, що коливальний процес у динамічній системі визначається не тільки характером руху робочої каретки, а й роботою головного двигуна, коливаннями інших вузлів і самого інструменту, якщо він не пов'язаний жорстко з робочою кареткою. Тому одним із шляхів підвищення стійкості протяжного інструменту є підвищення частоти власних коливань тих вузлів верстата, які безпосередньо пов'язані з інструментом і оброблюваною деталлю.

Відомо, що головним дефектом при протягуванні є наявність кільцевих рисок на оброблюваній поверхні. Наявність рисок свідчить про вдавнення різального леза і найближчої до нього задньої частини поверхні зуба в заготовку, тобто про наявність деформацій зминання. Підвищений тиск задньої поверхні зуба на оброблювану деталь викликає збільшення сили тертя і підвищення температури в зоні різання. Збільшення перетину стружки в свою чергу призводить до зростання сил різання і додаткового виділення тепла. Одночасна дія всіх цих факторів, що є наслідком наявності коливань у системі, негативно позначається на стані різального леза і задньої поверхні зубів протягання, викликає їх швидкий знос.

Вібрації, що виникають при нарізуванні зовнішніх різьб різьбонарізними головками з круглими гребінками, знижують стійкість гребінок.

При нарізуванні різьби різьбонарізними головками виникають низькочастотні вібрації з частотою, близькою до частоти власних коливань деталі. Вплив низькочастотних вібрацій на знос різьбових

гребінок досліджувався при різній жорсткості оброблюваних деталей. Зміна жорсткості досягалася шляхом зміни вільноту деталі, закріпленої в трикулачковому самоцентруючому патроні. Різна жорсткість оброблюваної деталі ($j = 3000 \dots 60\,000$ Н/мм) дозволила провести дослідження в широкому діапазоні інтенсивності вібрацій. Геометричні параметри різбових гребінок і швидкість різання були обрані таким чином, щоб забезпечити роботу в режимі вібрацій. Передній кут становив 15° , перевищення – $0,4$ мм, кут нахилу різальної кромки – 8° , швидкість різання – $8,5$ м/хв. Заточка гребінок проводилася кругами Е9А25СМ1КБ. Параметр шорсткості заточених поверхонь Ra дорівнював $0,5 \dots 1$ мкм. На інструментальному мікроскопі вимірювалися максимальні зноси по задній поверхні різальних зубів всіх різбових гребінок, і їх значення усереднювалися.

Характер зносу всіх чотирьох різбових гребінок аналогічний. Найбільше навантаження несуть два перших різальних зуба на забірній частині гребінок і перший калібруючий зуб. Максимальний знос спостерігається на другому різальному зубі забірної частини гребінки внаслідок того, що на другий зуб припадає найбільша товщина зрізаного шару.

На рисунку 3, а представлені криві зносу різбових гребінок, отримані при середній подвоєній амплітуді вібрацій деталі $135,6$, $74,5$ і $58,4$ мкм (відповідно криві 1, 2 і 3). Апроксимація експериментальних залежностей зносу різбових гребінок від кількості N оброблених деталей за методом найменших квадратів дозволили отримати рівняння зв'язку між цими параметрами у вигляді поліноміальних моделей при різних рівнях вібрацій:

2A, мкм
58,4
74,5
135,6

Рівняння зв'язку

$$h_3 = 0,184 + 0,0055N - 0,000025N^2$$

$$h_3 = 0,196 + 0,0071N - 0,000024N^2$$

$$h_3 = 0,188 + 0,0098N - 0,000047N^2$$

Як впливає з отриманих залежностей, вплив вібрацій на знос різбових гребінок досить значний. Так при зміні подвоєної амплітуди коливань деталі з $58,4$ до $135,6$ мкм за період стійкості знос різбових гребінок збільшується на $45\text{--}50\%$.

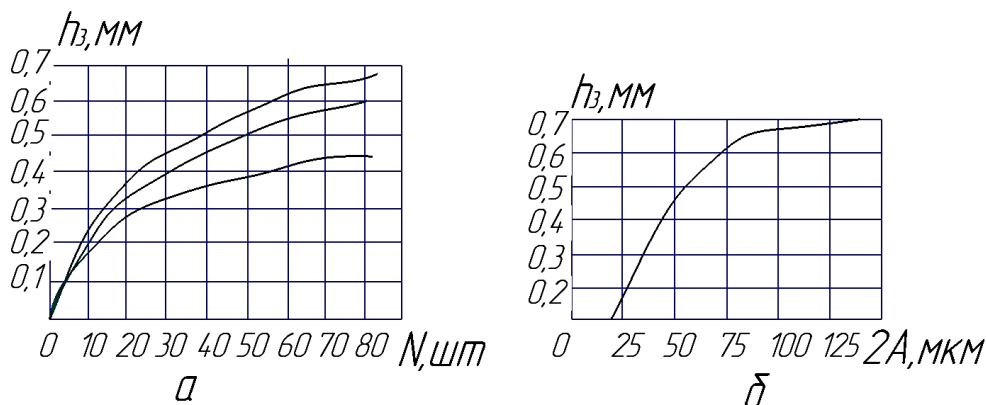


Рис. 3. Вплив вібрацій на знос різбових гребінок

Залежність зносу гребінок від амплітуди вібрацій наведена на рисунку 3, б. Вона виражається рівнянням $h_3 = -0,55 + 0,024(2A) - 0,00011(2A^2)$.

Частота коливань деталі змінюється зі зміною її жорсткості. При збільшенні амплітуди коливань частота їх падає. Зміна частоти коливань при нарізуванні різби головками, пов'язане зі зміною технологічних факторів, знаходиться в межах $100\text{--}300$ Гц.

Збільшення частоти коливань призводить до зниження інтенсивності зносу різбових гребінок, інтенсивність і частота коливань деталі змінюються зі збільшенням зносу різбових гребінок. Зі збільшенням зносу гребінок амплітуда вібрацій дещо знижується, а частота збільшується. Зниження інтенсивності вібрацій і збільшення частоти пов'язані з утворенням на задній поверхні гребінок плями контакту з деталлю, площа якого збільшується зі збільшенням зносу різбових гребінок. Збільшення площі плями контакту гребінок з деталлю є причиною зростання сил тертя, в результаті чого настає деяке зниження інтенсивності вібрацій. Цей ефект іноді використовується для гасіння вібрацій при токарній обробці, коли на задній поверхні різця шляхом заточування штучно створюється віброгасильна площа.

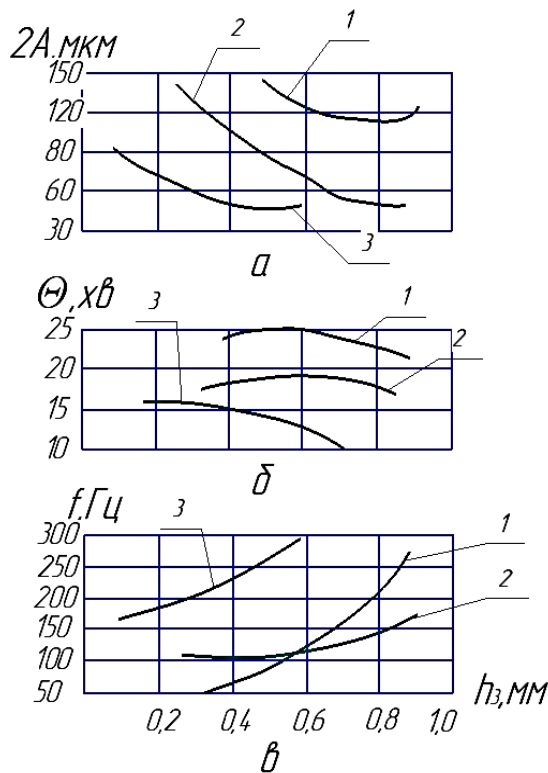


Рис. 4. Залежність параметрів вібрації від зносу різбових гребінок

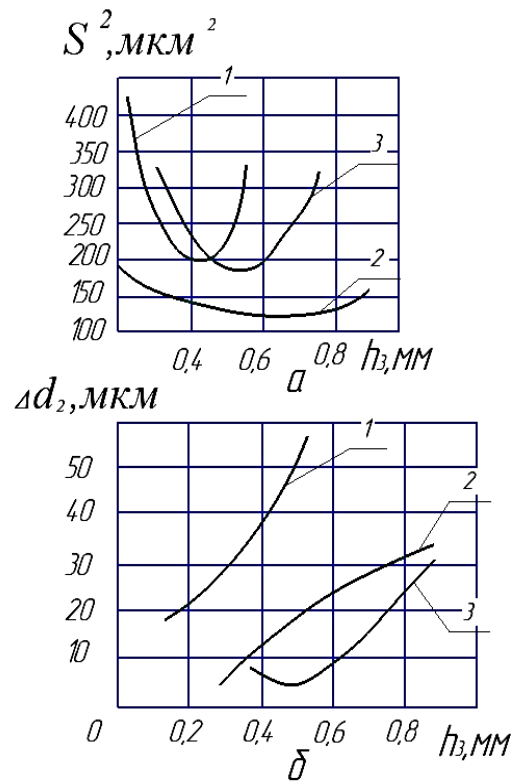


Рис. 5. Залежність точності, дисперсії середнього діаметра різби від зносу гребінок

На рисунку 4 представлені графіки залежності амплітуди, кута закручування деталі і частоти коливань від зносу різбових гребінок. Тут криві 1, 2, 3 побудовані для деталей довжиною відповідно 180, 120 і 60 мм.

Як видно з графіків (рис. 4, б) і наведених в таблиці 1 рівнянь, кут закручування деталі зі збільшенням зносу різбових гребінок змінюється незначно. Це пояснюється порівняно невеликим зростанням крутних моментів зі збільшенням зносу. При визначенні впливу зносу на інтенсивність вібрацій було встановлено, що зниження інтенсивності вібрацій по мірі зносу триває до зносу гребінок по задній поверхні $h_3 = 0,5$ мм. Після досягнення цього зносу амплітуда вібрацій стабілізується.

На стійкість гребінок зі сталі P18 впливає жорсткість оброблюваної деталі. Вона значно підвищується під час обробки деталей більшої жорсткості.

Таблиця 1

Поліноміальні рівняння другого степеня, що описують залежність амплітуди коливань, кута закручування деталі і частоти коливань від зносу різбових головок під час обробки деталей з різною довжиною

l , мм	Подвійна амплітуда коливань (рис. 4, а)	Кут закручування (рис. 4, б)	Частота коливань (рис. 4, в)
60	$2A = 131,78 - 459,97h_3 + 670,08h_3^2$	$\theta = 42,06 - 132,04h_3 + 143,51h_3^2$	$f = 214,47 - 181,69h_3 + 774,65h_3^2$
120	$2A = 244,65 - 570,93h_3 + 423,05h_3^2$	$\theta = 6,84 + 49,07h_3 - 52,45h_3^2$	$f = 92,06 + 43,25h_3 + 52,25h_3^2$
180	$2A = 382,02 - 910,59h_3 + 780,20h_3^2$	$\theta = 25,49 - 1,21h_3 - 4,51h_3^2$	$f = 122,12 - 258,65h_3 + 632,40h_3^2$

Точність різбових поверхонь, нарізаних різбонарізними головками, значною мірою залежить від зносу різбових гребінок. На рисунку 5, а представлені графіки залежності дисперсії середнього діаметра різби від зносу гребінок за різної інтенсивності вібрацій. Математично ці залежності можуть бути виражені в такому вигляді:

2A, мкм
58,4 (крива 1) ...
74,5 (крива 2) ...
135,6 (крива 3) ...

Дисперсія середнього діаметра
 $S^2 = 2521,65 - 11131,4h_3 + 13343,6h_3^2$
 $S^2 = 244,65 - 570,93h_3 + 423,05h_3^2$
 $S^2 = 382,02 - 910,59h_3 + 780,20h_3^2$

Аналіз рівнянь і графіків показує, що залежності точності різьби від зносу гребінок мають екстремальний характер. Порівняння дисперсій за критерієм Фішера показує, що дисперсія середнього діаметра різьби при роботі щойно заточеними гребінками істотно відрізняється від дисперсії середнього діаметра при досягненні зносу гребінок 0,4–0,5 мм.

Це явище можна пояснити тим, що на початковому етапі роботи знову заточеними гребінками відбувається їх «приробіток», різання має нестабільний характер, внаслідок чого спостерігається значне розсіювання розмірів середнього діаметра витків різьби. Крім того, як було зазначено вище, на цій ділянці спостерігаються вібрації підвищеної інтенсивності, що також збільшує поле розсіювання розмірів середнього діаметра. Ділянка зносу різьбових гребінок від 0,3 до 0,6 мм забезпечує найвищу точність різьбових виробів. При зносі 0,7–0,8 мм точність різьби по середньому діаметру починає знижуватися. Це зниження обумовлено зростаючими в міру збільшення зносу силами різання, які за великих значень характеризуються більшою нестабільністю.

Знос різьбових гребінок обумовлює постійне збільшення середнього діаметра різьби, що в кінцевому рахунку призводить до зміни розміру, на який налаштований верстат. На рисунку 5, б представлені залежності прирощення середнього діаметра різьби Δd_2 від зносу гребінок, які при різних рівнях вібрацій можна виразити в такому вигляді:

2А, мкм	Приріст середнього діаметра різьби
58,4 (крива 1) . . .	$\Delta d_2 = 53,10 - 268,79h_3 + 577,99h_3^2$
74,5 (крива 2) . . .	$\Delta d_2 = -25,07 + 113,25h_3 - 52,11h_3^2$
135,6 (крива 3) . . .	$\Delta d_2 = 125,63 - 518,34h_3 + 554,45h_3^2$

Залежність між середнім діаметром різьби і зносом різьбових гребінок дозволяє казати про зміну розміру, на який налаштований верстат, у міру зносу гребінок.

Існуючий зв'язок між точністю різьби по середньому діаметру і зносом різьбових гребінок дозволяє побічно оцінювати стан інструменту по точності одержуваних деталей. Така оцінка особливо корисна в разі автоматичного циклу роботи, вона дозволяє проводити заміну різального інструменту без виміру його зносу.

Висновки. Досліджено вплив вібрацій на стійкість багатолезового інструменту. Показано, що природа коливань динамічної системи верстата за одночасної роботи кількома лезами суттєво відрізняється від процесу різання одним лезом. Одночасна робота багатьма лезами іноді має позитивний ефект з точки зору стійкої роботи інструменту та зменшення його зносу. Виявлені області стійкості, в яких знос інструменту мінімальний. Вказані дослідження дозволяють забезпечити якісні показники обробки деталей за рахунок усунення вібрацій при збереженні стійкості інструменту. Результати роботи дають можливість проєктувати багатолезовий інструмент зі змінними пластинами для його використання на сучасних верстатах з ЧПУ.

Список використаної літератури:

1. Асташев В.К. Термомеханическая модель возбуждения автоколебаний при обработке металлов резанием / В.К. Асташев, Г.К. Корендяев, В.И. Ерофеев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – Вып. 1 (3). – С. 29–35.
2. Дослідження вібрацій при різанні сталі комбінованим інструментом / Г.М. Виговский та ін. // Вісник Сумського державного університету. – 2008. – № 2.
3. Как избежать вибраций на станке HAAS / Abamet. – 2021.
4. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М. : Машиностроение, 1967. – 359 с.
5. Пашинин А.В. Анализ причин появления вибрации при фрезеровании фланцев корпусов / А.В. Пашинин, Е.А. Чернышев // Научный вестник ДГМА. – 2012. – № 2.
6. Петраков Ю.В. Причины возникновения колебаний при фрезеровании / Ю.В. Петраков, М.О. Сікайло // Інновації молоді в машинобудуванні. – К., 2021.
7. Чернышев Е.А. Развитие представлений о вибрациях при резании / Е.А. Чернышев // Научный вестник ДГМА. – 2010. – № 1.
8. How to reduce vibration in milling / Sandvik Coromant. – 2018 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.sandvikcoromant.com>.
9. Analysis on affecting factors of vibration in milling / Liaoning Tech. Univ., 2011. – № 30. – P. 884–887.
10. Peterson Linus Vibration in Metal Cutting / Linus Peterson. – Ronneby, Sweden, 2002. – 101 p.
11. Altintas Y. Manufacturing automation / Y. Altintas // Cambridge University Press, 2000. – 286 p.
12. Sandvik Coromant / CoroDoill, 2018. – 860 p.

References:

1. Astashev, V.K., Korendyasev, G.K. and Erofeev, V.I. (2013), «Termomekhanicheskaya model' возбuzhdeniya avtokolebanii pri obrabotke metallov rezaniem», *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, Issue 1 (3), pp. 29–35.
2. Vygovskiy, G.M. et al. (2008), «Doslidzhennja vibracij pry rizanni stali kombinovanim instrumentom», *Visnyk Sums'kogo derzhavnogo universytetu*, No. 2.
3. Abamet (2021), *Kak izbezhat' vibratsii na stanke HAAS*
4. Kudinov, V.A. (1967), *Dinamika stankov*, Mashinostroenie, M., 359 p.
5. Pashinin, A.V. and Chernyshev, E.A. (2012), «Analiz prichin poyavleniya vibratsii pri frezerovanii flantsev korpusov», *Nauchnyi vestnik DGMA*, No. 2.
6. Petrakov, Ju.V. and Sikajlo, M.O. (2021), «Prychyny vynyknennja kolyvan' pry frezeruvanni», *Innovacii' molodi v mashynobuduvanni*, K.
7. Chernyshev, E.A. (2010), «Razvitie predstavlenii o vibratsiyakh pri rezanii», *Nauchnyi vestnik DGMA*, No. 1.
8. Sandvik Coromant (2018), *How to reduce vibration in milling*, [Online], available at: <https://cutt.ly/EBEO37j>
9. Liaoning Tech. Univ. (2011), *Analysis on affecting factors of vibration in milling*, No. 30, pp. 884–887.
10. Peterson, Linus (2002), *Vibration in Metal Cutting*, Sweden, Ronneby, 101 p.
11. Altintas, Y. (2000), *Manufacturing automation*, Cambridge University Press, 286 p.
12. CoroDoill (2018), *Sandvik Coromant*, 860 p.

Пуховський Євген Степанович – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0001-7843-0922>.

Наукові інтереси:

- гнучкі виробничі системи машинобудування;
- обробка металів різанням;
- динаміка верстатів;
- технологія машинобудування.

E-mail: puhovskije50@gmail.com.

Pukhovskiy E.S.

The effect of vibrations on the stability of a multi-blade tool

One of the ways to eliminate vibrations when cutting is to select cutting modes, tool geometry parameters and other technological factors in such a way as to ensure stability. Work in the field of stability, found on the main factors that affect the intensity of vibrations in the system, allows you to almost completely eliminate vibrations, improve the quality of the products processed and the stability of the cutting tool [2, 4, 7].

The effect of tool wear on the intensity of vibrations begins to affect already when a small wear site. This is due to the damp action of the site. With a further increase in the wear of the oscillation amplitude increases, therefore, the problem of the study of the effect of vibrations not only on the stability of the tool, but also on determining the areas of work without vibrations and reducing their impact on the performance of the processed parts [1, 6, 10]. That is, it is important to achieve minimal wear of a multi-blade tool, while ensuring its stability and ability to process parts with a given surface accuracy and roughness. The most complete effect of vibrations on the stability of the tool is investigated when processing ordinary incisors even the latest design with replaceable plates [2, 3, 7, 8, 12]. When using multi-blade cutting, the dynamic machine system becomes more complex, which requires additional research to establish areas of vibration-free processing modes, which guarantees the quality of the parts. The novelty of the work consists in a comprehensive study of the effect of vibrations on the work of complex tools: cutter, drill, tensioners, vertical drills, scans and threaded heads. This allows you to develop recommendations for the sustainable operation of the tool in the conditions of its use in modern machine systems with CNC equipment.

Keywords: vibration; wear; stability; multi-blade tool; dynamic system.

Стаття надійшла до редакції 16.08.2022.