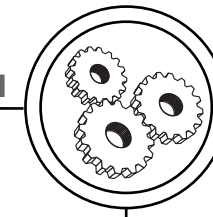


УДК 621.9.06-52

ЕФЕКТИВНЕ ДРОБЛЕННЯ СТРУЖКИ ПРИ ТОКАРНІЙ ОБРОБЦІ

© О. В. Шевченко, д.т.н., доцент, А. Ю. Бєляєва, к.т.н., НТУУ «КПІ», Київ, Україна

В статье рассмотрен вопрос использования вибрационного резания для дробления стружки при токарной обработке. Даны теоретические основы процесса дробления стружки, описание конструкции специального резцедержателя с упругими элементами, результаты теоретических и экспериментальных исследований эффективности его использования для дробления стружки.

In a paper the question of use of vibrational machining for chips breaking at turning processing is considered. Theoretical bases of process of chips breaking, the description of construction of special toolholder with elastic elements, results of theoretical and experimental researches of efficiency of its using for chips breaking, are given.

Постановка проблеми

При токарній обробці багатьох матеріалів, особливо таких, як високолеговані сталі та деякі сплави кольорових металів, стружка має вигляд довгої неперервної стрічки або спіралі, так званої «зливної» стружки. Намотування і заплутування стружки на деталі і робочі органи верстата утруднює експлуатацію автоматизованого устаткування та є основною причиною травматизму робітників на верстатних операціях. Вказаними факторами пояснюється постійний пошук заходів в напрямку дроблення зливної стружки.

Аналіз попередніх досліджень

В роботі [1] авторами запропоновано класифікація способів дроблення стружки, що дозволяє виявити загальні властивості різних способів та полегшує пошук найбільш раціональних шляхів надійного дроблення стружки стосовно до конкретних умов технологічного процесу.

Одним з найбільш ефективних і надійних способів дроблення стружки є вібраційне різання. Сутність процесу вібраційного різання полягає у тому, що на прийняту для даної операції кінематичну схему накладається додатковий направлений вібраційний рух інструменту відносно заготовки. При правильному виборі напрямку, частоти та амплітуди коливань вібраційне різання дозволяє надійно і ефективно дробити стружку без проведення попередніх експериментів щодо підбору геометрії інструментів, режимів різання, тощо. Разом з тим, примусове створення вібрацій в процесі різання може призводити до зниження

точності і якості оброблюваної поверхні та зменшення періоду стійкості різального інструменту. Однак, позитивний ефект, що можна отримати за рахунок дроблення стружки, може виправдати часткове зниження інших показників процесу різання.

Вібраційне дроблення стружки здійснюється з низькочастотними коливаннями в діапазоні до 200 Гц [2]. Вібрації можуть бути лінійними, кутовими чи комбінованими (лінійно-кутовими). У випадку лінійних коливань різальний інструмент здійснює прямолінійні коливання відносно заготовки паралельно напрямкам осьової і радіальної подач інструменту та вектору швидкості різання (тангенціальні вібрації). Кутові коливання, враховуючи малий діапазон переміщення різального інструменту, за своїм впливом на процес різання наближаються до лінійних.

При різанні з осьовими вібраціями інструмент відносно заготовки крім руху вздовж осі заготовки з подачею S здійснює коливальний рух в напрямку подачі. При різанні без вібрацій відстань a(t) між траєкторіями вершини різця на двох сусідніх обертах деталі постійна і дорівнює осьовій подачі S. При різанні з осьовими вібраціями ця відстань перемінна і залежить як від подачі, так і від амплітуди коливань A, фазового кута ωt та зсуву фаз у вигляді [1]:

$$a(t) = S + A\cdot\sin\omega_i t - A\cdot\sin(\omega_i t - - 2\pi\omega_i/\omega_д), \qquad (1)$$

де ω_i — кругова частота коливальних рухів інструменту; $\omega_д$ — кутова швидкість деталі. При цьому треба враховувати, що для забезпечення дроблення стружки, відношення $\omega_i/\omega_д$ не повинно бути цілим числом.

При різанні з радіальними вібраціями інструмент відносно заготовки здійснює коливальні рухи в напрямку поперечної подачі. Для надійного дроблення стружки радіальними вібраціями при поздовжньому точінні необхідно забезпечити більші амплітуди коливань по відношенню до амплітуд осьових вібрацій. Різання з радіальними вібраціями є досить ефективним на операціях з поперечною подачею.

Основними особливостями різання з тангенціальними вібраціями є: практично незмінні розміри поздовжнього та поперечного перерізів зрізу; коливання за один цикл у великих межах швидкостей різання, при цьому їх значення можуть суттєво перевищувати швидкості, з якими виконується звичайне різання; мікропрофіль обробленої поверхні в цьому випадку мало відрізняється від профілю поверхні, отриманої звичайним різанням.

Мета роботи

Метою роботи є підвищення ефективності точіння з дробленням стружки шляхом використання спеціальних різцетримачів з пружними елементами для забезпечення коливальних рухів різця в заданому амплітудно-частотному діапазоні.

Різцетримачі встановлюються в револьверній головці верстата та забезпечують коливальний рух різця від привода

інструментального шпинделя завдяки пружним елементам, які виконують функцію напрямних чи шарнірів та з'єднують корпус різцетримача з віджимною частиною з різцем. Враховуючи те, що різцетримачі з пружними елементами мають характеристики жорсткості, що суттєво відрізняються від аналогічних характеристик типових різцетримачів верстатів, їх вплив на динамічні процеси під час дроблення стружки потребують окремого дослідження.

В пружній системі інструменту для точіння з дробленням стружки в напрямку поздовжньої подачі (рис. 1) супорт m_2 отримує переміщення від приводу поздовжніх подач. В механічній системі обертової частини приводу подач враховані параметри ротора двигуна привода подач з приведеним моментом інерції I_3, крутячим моментом $M_{дв}$ та кутом повороту ротора φ_2, гвинтової пари з кроком $t_{гв}$ та кутом повороту φ_3, сумарної сили тертя в напрямних повзуна супорта F_{TP}, сумарні приведені коефіцієнти крутильного демпфірування і крутильної жорсткості відповідно h_{23} і c_{23}. На систему діє осьова складова сили різання $P_x(t)$.

Привод коливальних рухів різця в напрямку поздовжньої подачі складається з двигуна з приведеним моментом інерції ротора I_0, крутячим моментом M_i та кутом повороту ротора — φ_0, валу вібраційного приводу з кутом повороту φ_1 та передаточного механізму K, що перетворює обертальний рух валу на зворотно поступальний рух віджимної частини різцетримача з різцем m_1. Крім того в моделі приводу враховано сумарні приведені коефіцієнти крутильного демпфірування і крутильної жорсткості відповідно h_{01} та c_{01}, сумарні приведені коефіцієнти демпфірування і жорсткості віджимної частини різцетримача в напрямку поздовжньої подачі h_{12}, c_{12}.

Рівняння руху пружної системи інструменту для моделюван-

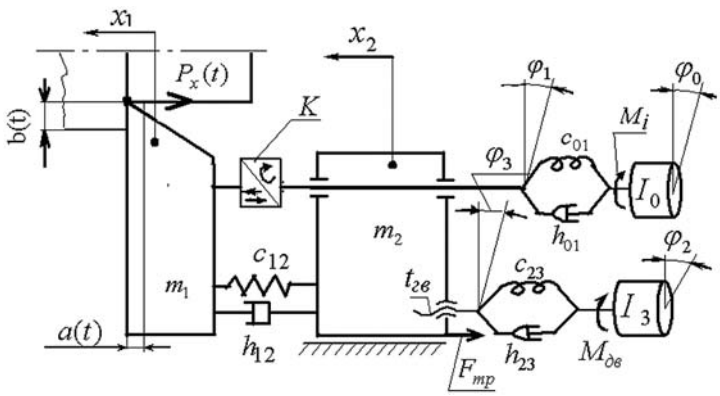


Рис. 1. Динамічна схема пружної системи інструменту з приводом коливальних рухів різця в напрямку поздовжньої подачі

ня процесу дроблення стружки у напрямку поздовжньої подачі має вигляд:

$$\begin{cases} J_0\cdot\ddot{\varphi}_1+h_{01}(\dot{\varphi}_1-\varphi_0)+ \\ +c_{01}(\varphi_1-\varphi_0)=M_i \\ J_3\cdot\ddot{\varphi}_2+h_{23}(\dot{\varphi}_3-\dot{\varphi}_2)+ \\ +c_{23}(\varphi_3-\varphi_2)=M_{дв} \\ m_2\cdot\ddot{x}_2+h_{12}(\dot{\varphi}_3-\dot{\varphi}_2)+ \\ +c_{12}(\varphi_3-\varphi_2)-h_{23}\cdot \\ \cdot\frac{2\pi}{t_{гв}}(\dot{\varphi}_3-\dot{\varphi}_2)+ \\ +c_{23}\frac{2\pi}{t_{ГВ}}(\varphi_3-\varphi_2)=-F_{TP} \\ m_1\cdot\ddot{x}_1+h_{12}(\dot{\varphi}_3-\dot{\varphi}_2)- \\ -c_{12}(\varphi_3-\varphi_2)=-P_x \end{cases}, \qquad (2)$$

де $P_x(t) = K_{різ}k_x\cdot a(t)\cdot b(t)\cdot \cdot (1-e^{\frac{t-t_0}{T_{різ}}})$, $T_{різ}$ — постійна часу стружкоутворення, t — поточне значення часу, t_0 — початкове значення часу в момент врізання різця в деталь ($t \ge t_0$), k_x — коефіцієнт осьової складової сили

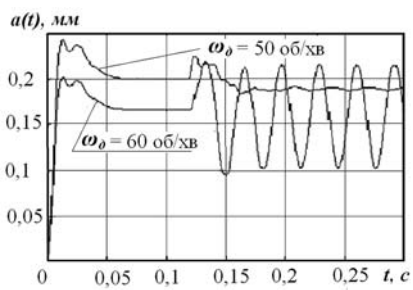


Рис. 2. Розрахункові графіки поточного значення товщини зрізуваного шару a(t) при моделюванні процесу точіння з дробленням стружки із врахуванням парного та непарного співвідношення ω_i/ω_∂ при амплітуді коливальних рухів різця A = 0,15 мм та ω_i = 200 об/хв

P(t), a(t) і b(t) — змінні у часі товщина та ширина зрізуваного шару, $K_{різ}$ — питома сила різання.

Із врахуванням змінної у часі товщини зрізуваного шару a(t) (1) та аперіодичної характеристики процесу різання вираз сили різання має вигляд:

$$P_x(t) = K_{різ}k_x\cdot[(S(t)+ +A\sin\omega_i t- -A\sin(\omega_i t-\frac{2\pi\omega_i}{\omega_\partial}))\cdot \cdot b(t)]\cdot(1-e^{\frac{-t}{T_{різ}}}). \qquad (3)$$

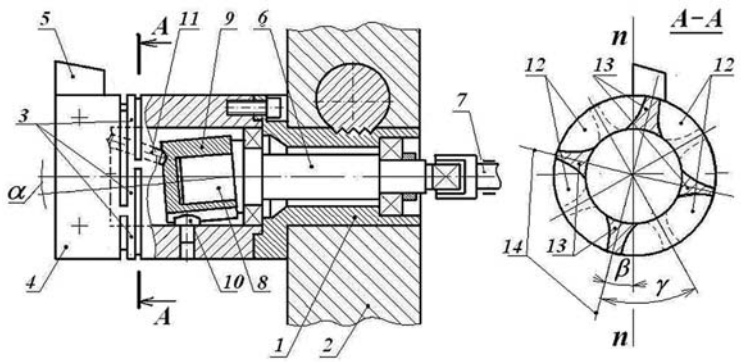
Із аналізу кінематики вібраційного різання витікає, що при осьових вібраціях різця дроблення стружки з мінімальною амплітудою досягається тільки при певному співвідношенні між кутовою швидкістю деталі $\omega_д$ та кутовою частотою коливань інструменту ω_i, а саме: $\omega_i/\omega_\partial = k+0{,}5$, де k — будь-яке ціле число.

Результати проведених досліджень

На рис. 2 наведені розрахункові графіки поточного значення товщини зрізуваного шару a(t) при моделюванні за виразами (2) і (3) процесу точіння з дробленням стружки деталі діаметром 40 мм, аналіз яких показав, що у випадку цілого числа хвиль коливань різця за один оберт деталі ($\omega_i/\omega_\partial = 200/50$) дроблення стружки не відбувається навіть при збільшенні амплітуди коливань внаслідок наявності ефекту «обробки за слідом». Разом з тим, при дробному значенні ω_i/ω_∂, наприклад $\omega_i/\omega_\partial = 200/60$,

моделюється процес дроблення стружки з заданою амплітудою за рахунок періодичної зміни a(t). Фактично на графіках представлений процес утворення сегментної стружки в результаті вібраційного руху різця. Модель динамічної системи реалізована з використанням пакету Matlab-Simulink [4].

Для реалізації процесу точіння з дробленням стружки осьовими вібраціями різця розроблено оригінальну конструкцію різцетримача, конструктивна схема якого наведена рис. 3. Різцетримач складається з корпусу *1*, встановленого в револьверній головці *2* токарно-револьверного верстата та з'єднаного за допомогою пружних елементів *3* з віджимною частиною *4* з різцем *5*. Пружні елементи *3* забезпечують можливість здійснення коливальних рухів віджимної частини *4* відносно корпусу *1* під дією приводу. Привод коливальних рухів віджимної частини *4* складається з приводного валу *6*, що має кінематичний зв'язок з штатним приводом верстата *7* із безступінчатим регулюванням частоти обертання, кривошипа *8*, вісь якого знаходиться під кутом α до осі вала *6*, шайби *9*, що утримується від прокручування шпонкою *10*, та шатуна *11*. Кривошипно-шатунний механізм приводу перетворює обертальний



а б

в

Рис. 3. Різцетримач для дроблення стружки в напрямку поздовжньої подачі з пружним елементом у вигляді прорізної пружини: а — конструктивна схема різцетримача; б — розріз А-А на рис. 3, а; в — загальний вигляд прорізної пружини

рух валу *6* в зворотно-поступальний рух віджимної частини *4* з різцем *5*.

Зворотно-поступальне переміщення різця *5* здійснюється за рахунок деформацій пружних елементів *3*, що виконані у вигляді прорізної пружини з парною кількістю прорізів *12* та перемичок *13* в кожному із рядів. При цьому вісі *14* перемичок перпендикулярні між собою і для одного із рядів, який можна назвати базовим, орієнтовані під кутом β до нормалі n-n до оброблюваної поверхні, а вісі перемичок інших рядів мають відповідний кутовий зв'язок γ з цим рядом. Таке виконання пружних елементів *3* дозволяє забезпечити достатню жорсткість віджимної частини *4* з різцем *5* та наблизити вісь її найбільшої жорсткості до напрямку дії сили різання, що є одним із чинників підвищення вібростійкості пружної системи верстата при точінні. Крім того, використання прорізної пружини такої форми забезпечує необхідний амплітудно-частотний діапазон вібраційних рухів різця за рахунок достатньої циклічної витривалості її пружних елементів при максимальних амплітудах коливань різця.

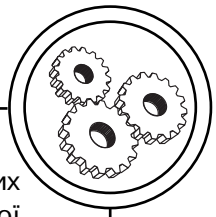
Проведені експериментальні дослідження дозволили визначити наступне. Статична жорсткість віджимної частини різцетримача в напрямках дії складових сили різання складає: C_x = = 67,5 Н/мкм, C_y = 23, 5 Н/мкм, C_z = 11,2 Н/мкм. При поздовжньому точінні заготовок із сталі 45 і нержавіючої сталі марки 04Х18Н10 з осьовими коливаннями різця (амплітуда A = 0,1 мм, частота f = = 40 Гц) в діапазоні режимів різання t = 0,25 ÷ 2,0 мм, V = 50–170 м/хв., при S = 0,16 мм/об відбувається стійке дроблення стружки.

Порівняльним аналізом профілограм оброблених поверхонь встановлено збільшення шорсткості при обробленні з додатковими коливаннями різця в середньому не більше ніж на 10 % по відношенню до різання без додаткових вібрацій. Тому використання різання з осьовими вібраціями різця бажано обмежити чорновими та напівчистовими операціями, при яких не пред'являються жорсткі вимоги до якості оброблених поверхонь.

Висновки

На основі виконаних досліджень встановлено що, використання пружних елементів для коливальних рухів різця є ефективним способом забезпечення амплітудно-частотного діапазонів вібраційної обробки для надійного дроблення стружки в широкому діапазоні режимів різання.

Дослідженнями математичної моделі пружної системи інструменту для моделювання процесу дроблення стружки в напрямку осьової подачі підтверджено, що надійність дроблення стружки при осьових вібраціях різця головним чином залежить від співвідношення амплітуди коливань і величини осьової подачі різця із врахуванням умови непарності відно-



шення частот обертання деталі та коливань різального інструменту.

Експериментальними дослідженнями підтверджена ефективність використання пружних елементів у вигляді прорізної пружини направленої жорсткості для вібраційних рухів різця при дробленні стружки.

1. Вибрационное резание металлов / Н. И. Ахметшин, Э. М. Гоц, Н. Ф. Родиков; Под. ред. К. М. Рагульскиса. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. — 80 с.(Б-ка инженера. Вибрационная техника; Вып. 10). 2. Подураев В. Н. Обработка резанием с вибрациями / Подураев В. Н. — М. : Машиностроение, 1970. — 352 с. 3. Різцетримач: Патент України на корисну модель № 43535: МПК B23B 25/00/ Шевченко О. В., Бєляєва А. Ю. — Опуб. 25.08.2009, Бюл. № 16. — 3 с. 4. Дэбни Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Б. Дэбни, Т. Л. Харман; Пер. с англ. М. Л. Симонова. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. — 403 с.

Рецензент — О. О. Боронко, д.т.н.,
професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 13.10.10