

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Чубенко Вікторія Анатоліївна

УДК 621.9

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ВІБРАЦІЙНОГО РІЗАННЯ
ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ
ЛЕЗОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ**

Спеціальність 05.03.01 – процеси механічної
обробки, верстати та інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2006

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі "Обробка металів тиском та металургійне обладнання" Криворізького технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бережний Микола Миколайович,
Криворізький технічний університет,
завідувач кафедри "Обробка металів тиском
та металургійне обладнання".

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Остаф'єв Володимир Олександрович,
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут",
професор кафедри "Виробництво приладів"
Міністерства освіти і науки України, м. Київ;
кандидат технічних наук, доцент
Пижов Іван Миколайович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
докторант кафедри "Інтегровані технології машинобудування"
ім. М.Ф. Семка Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Провідна установа: Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, м. Харків.

Захист відбудеться "18" травня 2006 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.12 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "11" квітня 2006 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Пермяков О.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасне машинобудування характеризується широким використанням конструкційних матеріалів з особливими фізико-механічними властивостями. До них відносяться високоміцні, жароміцні, марганцевисті, неіржавіючі, титанові, тугоплавкі та інші високолеговані сплави. Високі вимоги до точності розмірів і форми, складність конструкції деталей з таких матеріалів призводить до того, що традиційні методи формоутворення поверхонь деталей різанням стають малоефективними, а в деяких випадках, і неможливими. На сучасному етапі розвитку технології лезової обробки розроблені способи, які дозволяють істотно підвищити ефективність виготовлення деталей з важкооброблюваних матеріалів. Одним з таких способів є обробка різанням з вібраціями, які направлено накладаються на ріжучий інструмент. Перевага вібраційного різання полягає в можливості створення умов, що забезпечують зниження сил різання і температури в зоні контакту інструменту із заготовкою. Різання з низькочастотними вібраціями (до 200 Гц) використовується на попередній обробці для подрібнення стружки. Різання з ультразвуковими коливаннями (понад 16 кГц) застосовується при остаточній обробці для поліпшення якості обробленої поверхні. Проте ці дослідження не дозволяють реалізувати переваги вібраційного різання для напівчистої і чистої лезової обробки важкооброблюваних матеріалів. Це можливо при використанні високочастотного вібраційного різання. Введення в зону різання вимушених високочастотних коливань і вивчення їх дії на процес є актуальною задачею, що дозволить підвищити ефективність вібраційного різання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно з планами Міністерства освіти та науки України, з тематикою Криворізького технічного університету в межах тем: "Исследование, разработка и внедрение методов и средств интенсификации основных процессов машиностроительного производства с использованием силовых волн" (ДР № 01870037984); "Разработка технических средств повышения производительности механической обработки деталей из труднообрабатываемых материалов" (ДР № 01910058054), в яких здобувач був виконавцем по окремих розділах.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності напівчистої і чистої лезової обробки важкооброблюваних матеріалів шляхом введення в зону різання вимушених високочастотних коливань.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язувалися наступні задачі:

1. Аналіз методологічних підходів до вивчення і удосконалення процесів вібраційного різання з використанням високочастотних коливань інструменту.
2. Розробка і дослідження нових конструкцій пристроїв для практичної реалізації високочастотного вібраційного різання.

3. Визначення залежності частоти коливань і амплітуди збурюючої сили пневматичного генератора від його конструктивних параметрів і тиску стислого повітря, що подається на вхід, з метою регулювання сили різання.

4. Дослідження можливості відображення хвиль у зворотному напрямку опорами інструменту для гасіння вібрацій. Розробка конструкції кріпильних елементів інструменту для зменшення розповсюдження хвиль на верстатну систему.

5. Складання енергетичного балансу вібраційного різання важкооброблюваних матеріалів. Обґрунтування застосування високочастотного діапазону хвиль для напівчистої і чистої обробки різанням важкооброблюваних матеріалів.

6. Проведення експериментальних досліджень вібраційного різання важкооброблюваних матеріалів при точінні, свердлінні і протягуванні. Визначення раціональних режимів високочастотного вібраційного різання, які дозволять підвищити ефективність процесу за такими показниками, як продуктивність обробки, стійкість інструменту, якість обробленої поверхні.

Об'єкт дослідження - процес вібраційного різання з використанням високочастотних коливань.

Предмет дослідження – закономірності вібраційного різання важкооброблюваних матеріалів при напівчистій і чистій обробці лезовим інструментом.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконувалися на основі фундаментальних положень теорії різання матеріалів, термодинаміки, теорії коливань і хвиль. Експериментальні дослідження базуються на досягненнях вібраційного різання та проводилися з використанням спеціальної експериментальної техніки, сучасної вимірювальної апаратури, математичного планування експериментів та статистичних методів обробки експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Визначена можливість та сформульовані принципи регулювання частоти і амплітуди коливань в умовах вібраційного різання, що забезпечує підвищення ефективності обробки.

2. Визначено закономірності впливу частоти коливань пневматичного генератора і його конструктивних параметрів на вібраційну складову сили різання і на цій основі обґрунтовані шляхи зниження середньої складової сили різання.

3. Складено баланс енергії високочастотного вібраційного різання, який дозволив визначити раціональні характеристики вібрацій, що забезпечують мінімальні енергетичні витрати на утворення нових поверхонь, на пластичну деформацію, на нагрів металу при різанні важкооброблюваних матеріалів.

4. Доведено ефективність суміщення повздовжніх і крутильних коливань при високочастотному вібраційному свердлінні важкооброблюваних матеріалів.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені практичні рекомендації з вібраційної обробки, які дозволяють вибирати раціональні режими вібраційного різання при

точінні, свердлінні і протягуванні. Запропоновані конструкції вібраторів та оснащення, що дозволяють здійснити високочастотне вібраційне різання. Така обробка забезпечує зменшення сили різання на 20÷30%, підвищення продуктивності обробки до двох разів, зменшення інтенсивності зносу інструменту, в деяких випадках пониження шорсткості обробленої поверхні в 1,5÷2,5 рази. Запропоновано суміщати повздовжні і крутильні коливання при високочастотному вібраційному свердлінні. Розроблені технічні рішення реалізовано при обробці важкооброблюваних матеріалів (ВАТ "Терни – авто" м. Кривий Ріг). Економічний ефект від впровадження результатів роботи складає 31 тис. грн. Результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри "Обробка металів тиском та металургійне обладнання" Криворізького технічного університету у дисципліні "Процеси виготовлення металовиробів".

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення, які виносяться на захист, сформульовані самостійно, визначені мета і завдання дослідження, розроблена програма для розрахунку на ПЕОМ витрат енергії на вібраційне різання, вдосконалені і виготовлені конструкції генераторів високочастотних коливань. У роботі приведено посилання на авторів і джерела при використанні відомих залежностей, експериментальних даних, наукових положень.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати, які приводяться в дисертації, докладалися на міжнародній науковій конференції в НТУ "ХПІ" (Харків, 2001); на міжнародних наукових семінарах "Високі технології в машинобудуванні" (Харків - Алушта, 2001, 2002); на науковому семінарі в КТУ (Кривий Ріг, 2002), на XVII науково - технічній конференції молодих учених "Криворіжсталь 2003" (Кривий Ріг, 2003); на конференції в ДГУ "Проблеми механіки гірничо-металургійного комплексу" (Дніпропетровськ, 2004), на конференції в КТУ "Сталий розвиток металургійної промисловості" (Кривий Ріг, 2004), на засіданнях кафедр: "Обробка металів тиском та металургійне обладнання" КТУ (Кривий Ріг 2002 - 2005); "Виробництво приладів" НТУУ "КПІ" (Київ, 2005); "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф. Семка НТУ "ХПІ" (Харків, 2006).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи опубліковано в 11 наукових працях, серед яких: 9 статей в фахових наукових виданнях ВАК України, 2 тези доповідей.

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел. Повний об'єм дисертації - 159 сторінок, 48 ілюстрацій, з них 36 на 19 окремих сторінках, 29 таблиць, з них 1 на окремій сторінці, 3 додатки на 8 сторінках, 137 найменувань використаних літературних джерел на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, її зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета і завдання досліджень, приведені наукова новизна, апробація результатів досліджень і практична цінність отриманих результатів.

Перший розділ присвячений аналізу сучасного стану технології обробки різанням важкооброблюваних матеріалів. Проведена оцінка ефективності способів накладення направлених вібрацій на інструмент. Розглянуті методи експериментальних досліджень вібраційного різання.

Аналіз робіт Бажала А.Г., Заковоротного В.Л., Ісаєва А.И, Кудінова В.О., Кумабе Д., Маркова О.І, Подураєва В.М. показав, що підвищити ефективність обробки металів можна, використовуючи вібраційне різання.

У розділі проведено аналіз існуючих методів вібраційного різання і способів накладення вібрацій при свердлінні, точінні і протягуванні. Аналіз літературних даних показав, що різання з низькочастотними вібраціями (до 200 Гц) призводить тільки до кількісної зміни умов стружкоутворення (зміна швидкості різання, робочих кутів і параметрів перетину зрізу) і звичайно використовується при попередній і обдирній обробці для подрібнення стружки. Вібрації ультразвукової частоти (понад 15 кГц) роблять якісний вплив на процес пластичної деформації і руйнування, і звичайно використовуються при остаточній обробці для поліпшення якості обробленої поверхні. У роботах Бажала А.Г. зроблено припущення про можливість досягти подібного якісного впливу для напівчистої і чистої обробки різанням важкооброблюваних матеріалів, використовуючи високочастотні вібрації, напрям яких співпадає з напрямом швидкості різання. Для формування високочастотних коливань рекомендується використовувати пневматичні генератори. Проте такі генератори недостатньо вивчені, і для їх раціонального застосування необхідно виявити вплив характеристик генератора і тиску стиснутого повітря на амплітуду і частоту коливань сили різання.

Не дивлячись на великий об'єм фундаментальних досліджень у сфері використання високочастотних вібрацій в металообробці, не уявляється можливим достатньо чітко вибрати аналітичну модель для вирішення конкретної задачі з визначення сили різання при вібраційній обробці.

На підставі проведеного аналізу визначені мета і завдання наукового дослідження.

Другий розділ присвячений методикам експериментальних досліджень ефективності вібраційного різання з використанням високочастотних коливань. Представлені розробки пристроїв для реалізації вібраційного різання при точінні, свердленні і протягуванні.

Розроблена методика дослідження впливу частоти коливань генератора на сили різання, довжину стружки, шорсткість обробленої поверхні, знос інструменту для визначення раціональних режимів вібраційного різання, що дозволить збільшити ефективність обробки. З метою забезпечення порівняльного аналізу ці показники розглядалися щодо їх значень, характерних для обробки без накладення вібрацій.

Дослідження вібраційного точіння проводилися з використанням математичного планування багатofакторного експерименту. На різець, який оснащений пластинами з твердого

сплаву ВК8, накладалися високочастотні коливання у напрямку тангенційної складової сили різання з амплітудою в діапазоні $0,05 \div 0,2$ мм і частоті $1,8 \div 5,4$ кГц. Обробці піддавалися циліндричні деталі діаметром 100 мм з жароміцного сплаву ХН51ВМТЮКФР. Експериментальні дослідження вібраційного точіння виконувалися на токарному верстаті моделі 16К20. Пристрій для вібраційного точіння наведено на рис.1.

Рис. 1. Пристрій для вібраційного точіння: 1 –різцетримач; 2 – гвинты кріплення; 3 – різець; 4 – призма; 5– генератор високочастотних коливань.

Параметри поперечних хвиль, які створюються в тілі різця вібратором, а також параметри високочастотних коливань, які утворені вібраційним контактом інструменту з деталлю в зоні різання, фіксувалися двома п'езокерамічними датчиками (мод. ДН1) з базою 10 мм.

При експериментальних дослідженнях вібраційного різання на карусельному верстаті (мод. 1516Ф1) оброблялися фланці корпусу турбіни діаметром 1000 мм. Матеріал - жароміцний сплав ХН50ВМТКФЮ.

Дослідження вібраційного протягування лопаток газових турбін із сталі Х17Н12Ш проводилися на протяжному верстаті моделі 7Б57. Як інструмент використовувалася блокова протяжка (матеріал ріжучих зубів Р6М5К6). Вібратор встановлювався з боку задньої напрямної протяжки. Генератор утворював коливання протяжки з частотою $2 \div 4$ кГц і амплітудою $0,1 \div 0,2$ мм.

Дослідження вібраційного свердління проводилися при обробці глибокого отвору $l / d \approx 40$ (труба для підведення масла з жароміцного сплаву 13ХН12ВМФ, інструмент з швидкорізальної сталі Р6М5К6). Для реалізації вібраційного різання при свердлінні був розроблений і виготовлений спеціальний хвилевід - перетворювач (рис.2) поздовжніх коливань в крутильні. Вібраційне свердління виконувалося при частоті коливань $2 \div 5,4$ кГц, амплітуді $0,2 \div 0,3$ мм.

Рис. 2. Устаткування для реалізації вібраційного свердління:
1 – корпус; 2 – хвилевід – перетворювач; 3 - генератор

У третьому розділі наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень з оцінкою можливості регулювання імпульсної сили і частоти коливань з використанням пневматичних генераторів.

Генератор уявляє собою турбіну, яка дозволяє внаслідок динамічного дисбалансу мас формувати пружні коливання державки різця. Визначено вплив характеристик генератора на частоту f_T і амплітуду сили F_T коливань.

Регулювання тиску стислого повітря на вході в генератор і підбір радіусу бігових доріжок, діаметру кульки, що обертається, дозволяють змінювати частоту коливань f_T в межах $1,8 \div 5,4$ кГц і амплітуду сили дії генератора на різець: F_T в межах $6 \div 128$ кН (рис. 3 а, б).

Рис. 3. Вплив радіусу обертання кульки і тиску стисненого повітря на амплітуду (а) і частоту (б) коливань збудовуючої сили генератора F_T .
Виявлення функціонального взаємозв'язку амплітуди і частоти коливань сили F_T з

амплітудою і частотою коливань сили різання (табл.1) дозволяє направлено визначати умови різання.

Силу різання P_z можна уявити у вигляді двох складових:

$$P_{z\Sigma} = P_{zcp} + P_{zb} \quad (1)$$

де P_{zcp} - середня складова сили різання, Н; P_{zb} - вібраційна складова, яка характеризується амплітудою і частотою коливань сили P_z , Н.

Вібраційна складова має форму синусоїди (рис. 4):

Рис. 4. Зміна сили різання у вібраційному режимі:

1 – вібраційна складова сили різання; 2 – середня складова; 3 – сумарна складова

Вплив сили F_T на вібраційну складову визначається залежністю:

$$P_{zb} = Q_p F_T \sin(\omega t), \quad (2)$$

Виявлена залежність вібраційної складової сили різання від характеристик генератора має наступний вигляд:

$$P_{zb} = Q_p m_{ш} 4\pi^2 f_T^2 R_{TP} \sin(\omega t), \quad (3)$$

де Q_p - коефіцієнт проходження хвилі в різці; $m_{ш}$ - маса кульки, кг; f_T - частота обертання кульки в генераторі, Гц; R_{TP} - радіус траєкторії руху кульки, м; ω - окружна швидкість руху кульки, c^{-1} ; t - період коливань, с.

Вплив частоти коливань генераторів на амплітуду коливань сили різання показаний на рис. 5.

Рис. 5. Вплив частоти коливань f_T збуджуючої сили генератора на вібраційну складову P_{zb} сили різання при різних радіусах бігових доріжок

Таблиця – 1. Вплив параметрів генератору на вібраційну силу різання.

Тиск повітря на вході P_1 , МПа	Тиск повітря на виході P_2 , МПа	Швидкість руху кульки, м/с	Радіус траєкторії руху кульки, м	Амплітуда сили, F , кН	Частота коливань f , Гц	Вібраційна складова P_{zb} , Н
0,2	0,12	314	0,01	10,2	4000	176
			0,012	8,6	3626	172
			0,015	6,56	2887	137
			0,02	5,2	2165	102
0,3	0,16	300	0,01	12,6	4777	251
			0,012	10,5	4000	210
			0,015	8,1	3184	167
			0,02	6,3	2388	123
0,5	0,2	272	0,01	13,9	5015	280
			0,012	11,5	4200	231
			0,015	9,3	3351	185

В тілі інструменту і деталі розповсюджуються згинаючі хвилі на довжині l_p , яка зворотно пропорційна частоті вимушених коливань:

$$l_p = c_\tau \frac{1}{f_\Gamma}, \quad (4)$$

де c_τ - швидкість розповсюдження зсувної хвилі, $c_\tau = 3000$ м/с; l_p - довжина, на яку розповсюджується хвиля, м.

Зменшення розсіювання хвилі за межами ріжучого інструменту досягалося кріпленням його на опорах, що конструктивно реалізує ефект механічних напівпровідників (створено декілька різких перепадів акустичної жорсткості). На опорах завдяки перепадам поперечних перерізів хвилевий опір стрибкоподібно змінюється у напрямку розповсюдження хвилі і забезпечує її відображення у зворотному напрямку відповідно до залежності:

$$R_o = \frac{\rho_p a_p F_p - \rho_{оп} a_{оп} F_{оп}}{\rho_{оп} a_{оп} F_{оп} + \rho_p a_p F_p}, \quad (5)$$

де R_o - коефіцієнт віддзеркалення хвилі; ρ_p - густина різця, кг/м³; $\rho_{оп}$ - густина матеріалу опор, кг/м³; a_p і $a_{оп}$ - швидкість хвилі в різці і матеріалі опор, м/с; F_p і $F_{оп}$ - поперечний переріз різця і опор, м².

Аналітична оцінка розповсюдження хвилі на верстатну систему показала, що забезпечується фактично повне відображення хвилі ($R_o = 97 \div 98$ %).

Модель стружкоутворення для вібраційного різання розроблена і вдосконалена на основі типової схеми тріщиноутворення. Руйнування матеріалів при різанні розглянуте по Старкову В. К. як рух тріщини із затупленою вершиною.

Енергія тріщиноутворення визначається тріщиноутворюючою силою (по Гріффітсу А.А.). Функціональну залежність для визначення потужності, що витрачається на рух тріщини, в умовах вібраційного різання можна уявити як:

$$N = P_x \frac{s\pi d}{v_{CT} + v_B} + (P_{ZCP} + P_{ZB})(v_{CT} + v_B) = C_1 k \left[\frac{\beta}{E} \left(\frac{(P_{ZCC} + P_{ZB})}{\sqrt{\pi d}} \sqrt{\frac{l+x_0}{l-x_0}} \right)^2 + \frac{\beta}{E} \left(\frac{P_Y}{\sqrt{\pi d}} \sqrt{\frac{l+x_0}{l-x_0}} \right)^2 + \frac{1+\gamma}{E} \left(\frac{P_X}{\sqrt{\pi d}} \sqrt{\frac{l+x_0}{l-x_0}} \right)^2 \right] \frac{(v_{CT} + v_B)}{b} \quad (6)$$

де P_x , P_y - вісьова і радіальна складові сили різання, Н; β - коефіцієнт напруженого стану, для плоского напруженого стану $\beta = 1$; $l_{тр}$ - довжина тріщини, м; μ - коефіцієнт Пуассона, x_0 - відстань від вершини різця до точки прикладення сили різання, м; b - ширина різання, м.

Визначення балансу енергії процесу різання за наведеними режимами (табл.2) проводилося для оцінки ефективності використання додаткової енергії, що введено в зону різання за рахунок утворення вібрацій.

Таблиця – 2. Режими вібраційного різання

Частота коливань генератора, f , кГц	Глибина різання, t , мм	Подача, S , мм/об	Швидкість різання, v , м/с	Сила різання, P , кг	Робота в одиницю часу A , кгм/с	Витрати енергії за час роботи (32 хв), E , ккал
0	1	0,5	0,5	156	78	346
	1,5			234	117	519
3	1	0,5	0,5	145	72,5	322
	1,5			215	107,5	473
5	1	0,5	0,5	125	62,5	249,5
	1,5			187	93,5	411

Енергетичний баланс складається з частин енергії, які витрачаються на утворення нових поверхонь, пластичну деформацію металу і тепло, утворення тріщин в стружці і знос інструменту (рис. 6 а). Вивчення енергетичного балансу в умовах вібраційного різання дозволило визначити додаткові витрати енергії на вібрацію (рис. 6 б).

Рис. 6. Баланс енергії при точінні сплаву ХН51ВМТЮКФР

а) - без накладення вібрацій; б) - з накладенням вібрацій: швидкість різання $x = 30$ м/хв; глибина різання $t = 1$ мм; подача $S = 0,5$ мм/об; енергія витрачається на: 1 - пластичну деформацію; 2 - утворення нових поверхонь при стружковідділенні; 3 – нагрівання металу; 4 - утворення направлених вібрацій

Сила та потужність різання знизилася в умовах вібраційної обробки на 15 – 20 %. Таке зниження забезпечується введенням додаткової енергії за допомогою накладення вібрацій, яка складає до 58 % від загальної енергії, витраченої на вібраційне різання.

Сформульовані принципи регулювання імпульсної сили та частоти коливань дозволили перейти до експериментальних досліджень раціональних режимів вібраційного різання.

Четвертий розділ присвячений практичній реалізації вібраційної обробки жароміцних сплавів і експериментальному визначенню раціональних режимів вібраційного різання при точінні, свердлінні і протягуванні, що забезпечує підвищення ефективності за такими показниками, як продуктивність обробки, стійкість інструменту, шорсткість обробленої поверхні.

В умовах вібраційного різання з використанням високочастотних коливань при точінні було одержане зниження середньої складової сили різання P_{zcp} порівняно із звичайною обробкою на 15÷20 % в залежності від частоти коливань генератору (рис. 7). Дослідженнями встановлено, що при збільшенні частоти вібрацій знижується середня сила різання P_{zcp} , зменшується інтенсивність зносу різця h_3 (рис. 8) при збереженні шорсткості обробленої поверхні в межах вимог креслення ($R_a 3,2$).

В результаті багатофакторного експерименту визначені раціональні параметри вібраційного різання при точінні жароміцного сплаву ХН51ВМТФКЮ: частота коливань $f_T = 5$ кГц, амплітуда $A_z = 0,1$ мм, швидкість різання $v = 30$ м/хв, глибина різання $t = 1,5$ мм, подача $S = 0,5$ мм.

При дослідженні вібраційного різання на карусельному верстаті при частоті коливань $f_T = 5$ кГц і амплітуді $A_z = 0,1$ мм було одержано підвищення швидкості різання v (з 5,2 м/хв до 9,8 м/хв) і стійкості інструменту (з 32 хв до 61 хв), що дозволило збільшити продуктивність обробки.

Рис. 7. Вплив частоти коливань різця на силу різання при точінні:

подача $S = 0,5$ мм/об, швидкість різання $v = 30$ м/хв

Рис. 8. Інтенсивність зносу різця по задній поверхні при точінні:

глибина різання $t = 1,5$ мм; подача $S = 0,5$ мм;

швидкість різання $v = 30$ м/хв

При вібраційному свердлінні з використанням перетворювача повздовжніх коливань в крутильні забезпечувався крутильний момент досить великої величини ($M_{cp} = 130 \div 320$ Нм), тобто в 8,5 разів більше, ніж в звичайному режимі. Крутильний момент визначався з наступної залежності:

$$M_{cp} = M_{max} t_u f_T, \quad (7)$$

де M_{max} - максимальний крутильний момент; t_u - тривалість імпульсу; $t_u = 2 L / a$, L - довжина втулки перетворювача; a - швидкість повздовжньої хвилі.

Дослідження виявило зниження середньої вісьової сили на 10÷30 % залежно від частоти коливань генератора і подачі S (рис. 9).

Рис. 9. Вплив частоти коливань генератора на вісьову силу при вібраційному свердлінні з використанням перетворювача залежно від подачі:

оброблюваний матеріал жароміцний сплав 13ХН12ВМФ; $n = 200$ об/хв; діаметр отвору 10 мм

Завдяки крутильним коливанням зменшується шорсткість в 1,5÷2,5 рази (рис. 10), в умовах звичайного свердління вона складає $R_a 6,3$, при вібраційному вона знижується до $R_a 2,5$.

Рис. 10. Вплив частоти коливань генератора на шорсткість поверхні при свердленні: $n = 400$ об/хв; $S = 0,15$ мм/об; діаметр отвору 10 мм

Вивчення зносу свердла показало, що в умовах вібраційного різання інтенсивність зносу істотно зменшується (рис. 11), що призводить до збільшення періоду стійкості з 8 до 15 хв. При цьому частота обертання шпинделя була збільшена з 200 до 400 об/хв.

В результаті експериментів були визначені раціональні режими різання і параметри вібрацій при свердлінні отворів діаметром 10 мм: частота обертання шпинделя $n = 400$ об/хв. У цих умовах швидкість різання складала $v = 12,5$ м/хв, подача $S = 0,15$ мм/об, частота коливань генератора $f_T = 5$ кГц, амплітуда крутильних коливань $0,2 \div 0,3$ мм, або $3^{\circ}30'$, вісьових – 0,05 мм.

Рис. 11. Знос свердла в часі при режимах:
частота обертання шпинделя $n = 200$ об/хв; подача $S = 0,15$ мм/об;
частота коливань генератора $f_T = 5$ кГц, діаметр свердла 10 мм

При протягуванні шорсткість обробленої поверхні в умовах вібраційного різання знижується в порівнянні із звичайним майже вдвічі (з R_a 1,6 до 0,8). Це забезпечує виключення операцій чистової обробки і відповідно зменшення витрат на подальші операції. Обробка відбувається без задирок, що дозволяє виключити операцію їх видалення. Відбувається ефективніше подрібнення стружки при частоті коливань генератора $2 \div 4$ кГц. Із збільшенням частоти коливань довжина стружки зменшується з 2,5 до 1,5 мм (у звичайному режимі - 4 мм).

В умовах вібраційного різання (амплітуда коливань $A = 0,2$ мм, частота коливань генератора $f = 3,8 \div 4$ кГц) зменшується інтенсивність зносу протяжки (рис. 12). При цьому викришування і поломок ріжучих кромek не спостерігалось. Визначені раціональні характеристики вібрацій при протягуванні: частота коливань генератора $3,8 \div 4$ кГц, амплітуда 0,2 мм при швидкості різання $v = 2,5$ м/хв, подачі на зуб $S_z = 0,1$ мм.

Рис. 12. Знос протяжки по задній поверхні: швидкість різання $v = 2,5$ м/хв,
подача на зуб $S_z = 0,1$ мм

Дослідження з вібраційного точіння, свердління і протягування дозволили вибрати раціональні режими вібраційного різання залежно від виду обробки: частота коливань генератора при точінні і свердлінні складала $4,5 \div 5$ кГц, при протягуванні $3,8 \div 4$ кГц. При забезпеченні раціональних умов різання підвищується ефективність обробки: збільшується продуктивність процесу до двох разів, зменшується інтенсивність зносу інструменту, в деяких випадках знижується шорсткість обробленої поверхні в $1,5 \div 2,5$ рази, зменшується довжина стружки.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі досягнуто рішення науково - практичної задачі, що полягає в підвищенні ефективності вібраційного різання важкооброблюваних матеріалів лезовим інструментом за рахунок використання направлених високочастотних вібрацій.

1. Аналіз методологічних підходів до вивчення і удосконалення вібраційного різання показав, що підвищити ефективність процесу можна, використовуючи високочастотні вібрації, спрямування яких співпадає з напрямком тангенційної складової сили різання. Це дозволяє підвищити швидкість різання, стійкість інструменту, знизити сили різання, в деяких випадках шорсткість поверхні.

2. Пневматичні генератори дозволяють забезпечити раціональні характеристики вібрацій при обробці важкооброблюваних матеріалів на проміжних та чистових режимах. Запропоновані їх конструкції забезпечують коливання ріжучої кромки інструменту в межах амплітуди $0,05 \div 0,3$ мм і частоти $1,8 \div 5,4$ кГц.

3. Визначена залежність частоти коливань і амплітуди збурюючої сили пневматичного генератора від його конструктивних параметрів і тиску стислого повітря, що підводиться на вхід. Це дозволяє регулювати сили різання, а саме знизити їх на 20 – 30 %.

4. Зменшення розсіювання хвилі за межами ріжучого інструменту забезпечується встановленням його на спеціальних опорах. У місцях кріплення інструменту використовується ефект механічних напівпровідників, що полягає в створенні декількох різких перепадів акустичної жорсткості. Це забезпечило відображення енергії хвилі у зворотному напрямку на $97 \div 98$ %.

5. Визначення енергетичного балансу вібраційного різання важкооброблюваних матеріалів дозволило обґрунтувати застосування високочастотного діапазону хвиль на напівчистових і чистових режимах різання і теоретично визначити раціональні режими вібраційного різання і додаткові витрати енергії на створення вібрацій, які складають $49 \div 58$ % енергії, витраченої на вібраційне різання.

6. Дослідження вібраційного точіння, свердління і протягування дозволили вибрати раціональні режими вібраційного різання залежно від виду обробки: частота коливань генератора при точінні і свердлінні складала $4,5 \div 5$ кГц, при протягуванні $3,8 \div 4$ кГц. Ці режими забезпечують підвищення ефективності процесу за такими показниками, як зниження сил різання на $15 \div 30$ %, збільшення продуктивності процесу до двох разів, стійкості інструменту майже в два рази, в деяких випадках, зниження шорсткості поверхні в $1,5 \div 2,5$ рази, зменшення довжини стружки. На базі проведених досліджень розроблені зразки оснащення для перетворення подовжніх коливань в крутильні при свердлінні. Використання перетворювача повздовжніх коливань у обертальні при свердлінні дозволило зменшити вісьову силу на $20 \div 30$ %, понизити шорсткість поверхні з Ra 6,3 до 2,5, що знижує витрати на додаткову механічну обробку.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджено на ВАТ "Терни – авто" (м. Кривий Ріг). Очікувана економічна ефективність склала 31 тис. грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ СТАТЕЙ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бажал А.И., Чубенко В.А. Управление пластическими процессами при волновом резании в металлообработке // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. - №4. – С. 3-5. Здобувачем визначена швидкість хвильових рухів високих коливань, зроблена математична обробка результатів експериментів.

2. Бажал А.И., Чубенко В.А. Локализация силовых процессов при волновом резании в механообработке // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – № 6. – С. 7–9. Здобувачем визначено довжину хвилі залежно від частоти коливань.

3. Бажал А.И., Чубенко В.А. Снижение вибронгруженности и особенности повреждения поверхностей деталей в посадочных сопряжениях машин при вибрационно-волновом резании материалов // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – №7. – С. 10–13. Здобувачем визначені перепади акустичної жорсткості, які дозволяють відобразити хвилю у зворотному напрямку.

4. Бажал А.И., Чубенко В.А. Оптимизация использования энергии в технологических системах с волновым взаимодействием // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. – № 8. – С. 3–5. Здобувачем експериментально визначено форму хвилі і критичне напруження в хвилі.

5. Бажал А.И., Чубенко В.А. Механическая обработка деталей из труднообрабатываемых материалов в волновых полях // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ. – 2001. – Вып. 59. – С. 20-23. Здобувачем проведені дослідження параметрів генераторів і їх вплив на процес точіння. Визначені раціональні режими різання і характеристики коливань.

6. Чубенко В.А. Волновое изнашивание при волновом резании // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ. – 2002. – Вып.62. – С. 184 – 190.

7. Чубенко В.А. Холодное деформирование с закритическими скоростями волнового движения// Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2002. – №9, т.11. – С.118-120.

8. Бережной Н.Н., Вилкул Ю.Г., Чубенко В.А. Расчет площади новых поверхностей и объема снятого металла // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог: КТУ. – 2003. – №84. –С. 149–153. Здобувачем виконаний розрахунок утворення нових поверхонь при точінні і запропонований спосіб підвищення ефективності процесу за допомогою вібраційного різання.

9. Бережний М.М., Вилкул Ю.Г., Чубенко В.А. Розпушення стружки під час обробки

деталей різанням // Сборник научных трудов Национального горного университета. – Днепропетровск: ДНУ. – 2004. – № 19, Т. 5. – С. 98–104. Здобувачем досліджені витрати енергії на утворення нових поверхонь, визначені зміни енергетичного балансу при використанні вібраційного різання.

10. Чубенко В.А. Новые направления в обработке металлов // Тез. докл. конф. "Проблемы развития Криворожского железорудного бассейна". – Кривой Рог, 2002, С. 82-83.

11. Бережний М. М., Чубенко В.А. Розподіл витраченої енергії між продуктами процесу різання металів // Тез. докл. конференції "Криворожсталь – 2003". – Кривой Рог – 2003 – с. 50 – 51. Здобувачем визначено продуктивність верстату в залежності від режимів різання.

АНОТАЦІЇ

Чубенко В.А. Підвищення ефективності вібраційного різання важкооброблюваних матеріалів лезовим інструментом Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2005.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності вібраційного різання важкооброблюваних матеріалів лезовим інструментом з використанням вимушених високочастотних коливань, напрямком яких співпадає з напрямком швидкості обробки. Виконано аналіз існуючого стану теорії та практики вібраційного різання. Розроблено пневматичні генератори, що забезпечують коливання з частотою $1,8 \div 5,4$ кГц. Визначена залежність частоти коливань і амплітуди збурюючої сили пневматичного генератора від його конструктивних параметрів та тиску стислого повітря, що подається на вхід. В роботі набуло подальшого розвитку теоретичне уявлення про силу різання при вібраційній обробці, яка визначається як сума двох складових: середньої та вібраційної. Визначено залежність вібраційної складової сили різання від частоти коливань генератору. Розроблені конструкції кріпильних елементів інструменту для зменшення розповсюдження хвиль на верстатну систему. Розроблений та виготовлений перетворювач повздовжніх коливань у обертальні для вібраційного свердління дозволяє зменшити шорсткість обробленої поверхні в $1,5 \div 2,5$ та зменшити вісьову силу на $20 \div 30$ %. В дослідженнях вібраційного точіння, свердління та протягування вибрані раціональні режими вібраційного різання. Економічна ефективність процесу досягається за рахунок збільшення продуктивності обробки, в деяких випадках зменшення шорсткості обробленої поверхні. Результати роботи впроваджено в виробництво (ВАТ "Терни – авто") та навчальний процес.

Ключові слова: вібраційне різання, пневматичний генератор, важкооброблювані матеріали, сила різання, високочастотні коливання.

Чубенко В.А. Повышение эффективности вибрационного резания труднообрабатываемых материалов лезвийным инструментом. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2005.

Диссертация посвящена развитию научных основ и практической реализации вибрационного резания труднообрабатываемых материалов лезвийным инструментом с использованием высокочастотных колебаний, которые дополнительно накладываются на режущий инструмент. Выполнен анализ существующего состояния теории и практики вибрационного резания. Для повышения эффективности обработки резанием принято решение использовать вибрации, направление которых совпадает с направлением скорости резания.

Для реализации высокочастотного вибрационного резания использовались специальные пневмомеханические генераторы, которые обеспечивали частоту колебаний в диапазоне $1,8 \div 5,4$ кГц. Разработанные генераторы позволяют за счет смены давления сжатого воздуха, подаваемого на вход в генератор, и смены конструкции регулировать частоту колебаний и центробежную силу, возникающую при работе генератора. В работе получило дальнейшее развитие теоретическое представление силы резания при вибрационной обработке, которая рассматривается как сумма двух составляющих: постоянной, которая соответствует средней силе, и вибрационной, создаваемой микроударами в зоне резания. Определено влияние частоты колебаний генератора и его конструктивных параметров на вибрационную составляющую силы резания, благодаря которой осуществляется эффективное разрушение труднообрабатываемого материала. Это позволяет регулировать силу резания. Вибрационная составляющая силы резания, вследствие кратковременного действия, на всю станочную систему не передается, а затухает на инструменте, детали и приспособлении. Распространяется на всю станочную систему только статическая составляющая силы резания, а она будет ниже, чем при обработке без вибраций. Это обеспечивают защиту станочной системы от попадания на нее вибрационных силовых воздействий. Проведены соответствующие теоретические исследования.

Выполненные экспериментальные исследования процессов точения, сверления и протягивания показали, что с применением высокочастотных вибраций улучшаются показатели эффективности обработки на промежуточных операциях, повышается стойкость инструментов, снижается сила и в некоторых случаях удается увеличить скорость резания или снизить шероховатость поверхности. Определены рациональные параметры высокочастотных вибраций в зависимости от режимов резания и вида обработки. При вибрационном точении создавались тангенциальные высокочастотные вибрации. Рациональная частота колебаний $4,5 \div 5$ кГц,

амплитуда 0,1 мм. При этом сила резания уменьшается на $15 \div 20$ %, снижается сила трения, улучшается подвод смазочно-охлаждающих технических средств, уменьшается температура резания. Это приводит к увеличению стойкости инструмента в $2 \div 2,5$ раза. Точность разменов и шероховатость поверхности оставались в пределах требований чертежа (R_a 3,2). При вибрационном точении на карусельном станке скорость резания удалось повысить в два раза при сохранении периода стойкости инструмента. При вибрационном протягивании рациональная частота колебаний $3,8 \div 4$ кГц, амплитуда 0,2 мм. Обработка в таком режиме позволила уменьшить длину стружки с 4 до 2,5мм, снизить шероховатость поверхности в два раза (с R_a 1,6 до 0,8), уменьшить износ протяжки. В экспериментальных исследованиях процесса вибрационного сверления использовался преобразователь продольных колебаний в крутильные. Разработанное устройство позволило снизить осевую силу на $20 \div 30$ % и уменьшить шероховатость обработанной поверхности с R_a 6,3 до 2,5 мкм, увеличить стойкость инструмента в два раза, улучшить подвод смазочно-охлаждающих технологических сред при частоте колебаний $4,5 \div 5$ кГц, амплитуде осевых колебаний 0,05мм, тангенциальных 0,3мм.

Экономическая эффективность процесса достигается за счет увеличения производительности обработки, в некоторых случаях уменьшения шероховатости обработанной поверхности. Результаты работы внедрены в производство (ОАО "Терны – авто") и в учебный процесс.

Ключевые слова: вибрационное резание, пневматический генератор, труднообрабатываемые материалы, сила резания, высокочастотные колебания.

V.A. Chubenko. Efficiency increase of vibration machining for hard-to-machine material cutting. - Manuscript.

The thesis for academic degree of technical science candidate in 05.03.01 specialty – The machining processes, machine tools and cutting tools. National Engineering University "Kharkiv polytechnic institute", Kharkov, 2006.

The thesis is devoted to efficiency increase while the vibration cutting of hard-to-machine materials by using forced high-frequency vibrations that direction coincides with the direction of cutting speed. The analysis of the existing theory and practice of vibration cutting is given. The mechanical pneumatic generators are designed which can generate vibration frequency within $1,8 \div 5,4$ kHz. The relationships have been found between vibration frequency and amplitude of the generator disturbing forces as well as its design parameters and compressed air pressure supplied to the inlet. In this work, the machining force is determined as the sum of two average and vibration components. The relationship has determined for the vibration component of the cutting force as a function of a generator vibration frequency. The longitudinal – to – torsion vibration converter which is designed and manufactured for the

vibration drilling enables to reduce the machined surface roughness in $1,5 \div 2,5$ times and the axial thrust force in 20 ÷ 30 percent. The vibration turning, drilling, and broaching rational machining modes have been found in the investigation. Economic efficiency of the processes are achieved owing more high level of machining productivity. The work results are implemented in commercial production (Public joint – stock company "Terny – Auto" and in teaching process.

Key words: vibration machining, pneumatic generator, hard – to – machine materials, cutting force, high – frequency vibrations.