

Національна Академія Наук України
Інститут надтвердих матеріалів
ім. В.М. Бакуля

Криворучко Дмитро Володимирович

УДК 621.941.001

**Підвищення ефективності процесів чистової обробки на основі
аналітичного моделювання
силової взаємодії леза з заготівкою**

Спеціальність 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2002

Дисертацією є рукопис.
Робота виконана у Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Залога Вільям Олександрович**,
Сумський державний університет, завідувач кафедри металорізальних верстатів та інструментів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Розенберг Олег Олександрович**,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, завідувач відділу (м. Київ)
кандидат технічних наук, доцент **Солодкий Валерій Іванович**, Національний технічний
університет України “Київський політехнічний інститут”, доцент кафедри інструментального
виробництва (м. Київ)

Провідна організація: Національний технічний університет “Харківський політехнічний
інститут” Міністерства освіти і науки України, кафедра різання матеріалів та різальних
інструментів

Захист дисертації відбудеться “ 16 ” січня 2003 р. о 13 годині 30 хв. на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д26.230.01 в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України за
адресою: 04074, м. Київ,
вул. Автозаводська, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М.

Бакуля НАН України.

Автореферат розісланий “5” грудня 2002 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради,

доктор технічних наук, професор

А. Л. Майстренко

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Орієнтація сучасного багатонаменклатурного машинобудування на ринкову економіку вимагає зниження матеріаломісткості, підвищення ефективності, точності, якості та екологічної чистоти механічної обробки, і зокрема обробки різанням, яка усе ще є переважаючим процесом формоутворення, особливо на операціях чистової обробки. Ці вимоги диктують необхідність прогнозування показників робочих процесів, причому точність результату і час його одержання багато в чому визначають успіх їхньої практичної реалізації і конкурентоспроможність продукції. У цих умовах експериментальні моделі, досвід технолога і робітника виявляються малоефективними, особливо під час розроблення технологічних процесів обробки нових конструкційних матеріалів із застосуванням нових інструментальних матеріалів, конструкцій інструментів або устаткування. На думку багатьох дослідників, у даний час найкращих результатів у вирішенні зазначеної проблеми можна досягти за допомогою використання теоретичних методів дослідження і прогнозуючих моделей у тісному взаємозв'язку з експериментом. Відомо, що у сучасному машинобудуванні питома вага чистових операцій постійно збільшується. Дедалі частіше використовуються процеси чистової лезової обробки конструкційних матеріалів, у тому числі пластичних, таких, як наприклад, сталь, мідь та ін. У цих випадках товщина зрізу становить соті або тисячні частки міліметра та часто менша від радіуса округлення різальної кромки (РК). Головною метою використання цих процесів є виготовлення поверхонь із заданою точністю їх розміру, похибки форми та шорсткістю тощо. Силова взаємодія леза із заготівкою є одним з головних чинників, що впливає на ці показники. Тому підвищення ефективності процесів чистової обробки на основі аналізу силової взаємодії РК із заготівкою на стадії проектування технологічного процесу обробки є актуальною науковою і практичною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі металорізальних верстатів та інструментів СумДУ в період з 1997 р. по цей час відповідно до координаційного плану Міністерства освіти України (Наказ №37 від 13.02.97 р.) на конкурсній основі (протокол №1 від 24.12.96 р. наукової експертної Ради №43) і в рамках щорічних держбюджетних робіт відповідно до тематичних планів СумДУ, що затверджені Міністерством освіти і науки України: "Розробка теоретичних основ оптимального проектування гнучких роторних обробляючих комплексів надвисокої продуктивності для машинобудування" (ДР №0197U016596) і "Розробка наукових основ оптимального проектування методів механічної обробки матеріалів і прогнозування їх вихідних показників на базі експериментально-теоретичних і теоретичних моделей нестационарних процесів різання" (ДР №0100U003217).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розроблення прогнозуючої аналітичної моделі силової взаємодії округленого леза із заготівкою при вільному прямокутному нестационарному різанні пластичних матеріалів з малою товщиною зрізу і на її основі рекомендацій для підвищення ефективності процесів чистової обробки.

Основними задачами наукового дослідження є:

- розроблення прогнозуючої аналітичної моделі силової взаємодії округленого леза із заготівкою, методу розв'язання задачі пластичного деформування жорсткопластичного тіла з невідомою границею пластичної області, алгоритму і програми реалізації розрахунків на ЕОМ;
- експериментальна перевірка розробленої моделі та оцінка точності прогнозування сили взаємодії леза із заготівкою при різних товщинах зрізу і швидкостях її зміни, а також факторів, що визначають цю точність;
- розроблення методик: проведення фізичного експерименту, вимірювання радіуса округлення різальної кромки і миттєвого значення товщини зрізу, математичного оброблення результатів експериментальних досліджень;
- розроблення рекомендацій щодо зменшення величини проковзування, підвищення точності обробки, а також вибору величини товщини зрізу, що дозволяє реалізувати процес різання у вигідних умовах.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес вільного прямокутного нестационарного різання округленим лезом з малою товщиною зрізу. Предметом дослідження є методика розрахунку показників силової взаємодії леза із заготівкою.

Методи досліджень. Дослідження базується на використанні методів теоретичної механіки, теорії пластичності, і, зокрема, методу ліній ковзання, чисельних методів, елементів теорії експерименту, а також стандартних і спеціальних вимірювальних пристроїв та спеціальної експериментальної установки.

Наукова новизна отриманих результатів.

- У роботі набула подальшого розвитку аналітична модель силової взаємодії леза із заготівкою. На відміну від відомих, дана модель враховує випадок різання з товщиною зрізу, яка безупинно змінюється та за величиною менша від радіуса округлення різальної кромки. Модель дозволяє обчислити силу взаємодії округленого леза із заготівкою, усадку стружки, геометрію пластичної області і залишкового напливу без попереднього проведення будь-яких експериментальних досліджень власне процесу різання.
- Запропоновано спосіб опису конфігурації границі пластичної області для випадку нестационарного різання з товщиною зрізу, меншою від радіуса округлення різальної кромки. Вперше розроблені математичні співвідношення для обчислення геометричних розмірів пластичної області в режимах як сталого, так і несталого стружкоутворення. Також розроблено умову зміни зазначених режимів.
- Розроблено методику вимірювання усередненого вздовж заданої ділянки різальної кромки радіуса її округлення за допомогою растрового електронного мікроскопа.
- Науково обґрунтована величина мінімальної товщини зрізу, що дозволяє реалізувати процес різання у вигідних умовах. Вперше розкрита причина утворення залишкового напливу на різальній кромці в умовах розриву контакту леза із заготівкою з нульовою товщиною зрізу.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.

Достовірність отриманих теоретичних закономірностей процесів силової взаємодії леза із заготівкою гарантується тим, що вони ґрунтуються на класичних законах теорії пластичності і сучасних поглядах теорії різання про процеси попереду РК, а також застосуванням широко використовуваного аналітичного методу розв'язання задачі пластичності і зіставленням результатів розрахунку як з власними, так і з відомими експериментальними даними. Достовірність отриманих експериментальних результатів обумовлена застосуванням сучасних вимірювальних засобів високої чутливості, їх ретельним настроюванням і задовільною помилкою вимірюваних величин.

Наукове значення роботи полягає в тому, що доведена можливість створення аналітичної

моделі для умов нестационарного різання з товщиною зрізу, меншою за радіус округлення РК, з урахуванням утворення напливу. Шляхом проведення розрахункового експерименту досліджено вплив товщини зрізу, швидкості її зміни, контактних дотичних напружень та геометрії леза на показники силової взаємодії. Не менш важливе наукове значення має теоретичне обґрунтування механізму утворення залишкового напливу та залишкової сили.

Практичне значення отриманих результатів. За результатами роботи розроблено інженерну методику визначення показників силової взаємодії леза із заготівкою, що реалізована у програмному забезпеченні для ЕОМ, визначено величину мінімальної товщини зрізу, геометричні розміри залишкового напливу та величину залишкової сили. Використання цих даних при проектуванні технологічного процесу дозволяє знизити енергоємність нестационарних процесів чистової обробки, підвищити ресурс інструменту і якість обробленої поверхні. Крім цього, розроблений новий спосіб вимірювання радіуса округлення РК може бути використаний для контролю якості лез у спеціалізованому інструментальному виробництві.

На даний час результати дослідження впроваджені на ВАТ “Сумське МНВО ім. Фрунзе” та у навчальний процес на кафедрі металорізальних верстатів та інструментів Сумського державного університету.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах [6, 9] здобувач провів аналіз існуючих моделей процесу різання, зокрема аналітичних. У роботах [1, 3, 5] ним запропоновані принцип та функціональна схема вимірювання товщини зрізу при тангенціальному точінні, методика оброблення результатів, а також науково обґрунтовано загальний вигляд емпіричної залежності сили від товщини зрізу. У роботі [7] автор запропонував ідею вимірювання радіуса округлення РК за допомогою растрового електронного мікроскопа, розробив методику вимірювання та розрахунків. У роботі [4] автор дослідив кінематику нестационарних процесів, порівняв їх за ознаками нестационарності та обґрунтував положення про те, що процес тангенціального точіння є найбільш загальним нестационарним процесом. У роботі [2] автором розроблена математична модель податливої технологічної системи, яка реалізує процес тангенціального точіння, та показана необхідність фундаментального прогнозуючого моделювання процесу нестационарного різання. У роботах [8, 10] автором розроблена прогнозуюча аналітична модель силової взаємодії леза з заготівкою при обробці зі змінною товщиною зрізу та алгоритм її реалізації на ЕОМ. Постановка задачі, розрахункове і експериментальне дослідження та аналіз результатів проведені автором разом з науковим керівником і частково зі співавторами публікацій.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на таких конференціях: Всеукраїнській науковій конференції “Математичні проблеми технічної механіки”, м. Дніпродзержинськ, 2001р., XI міжнародній науково-технічній конференції “MicroCAD-2001”, Харків, 2001 р.; XI міжнародній науково-технічній конференції “Інтерпартнер-2001”, Харків-Алушта, 2001 р.; Міжнародному науковому симпозиумі “Universitaria ROPET 2001”, м. Петрошани, Румунія, 2001 р.; Молодіжній конференції вузів прикордонних регіонів слов'янських держав, м. Брянськ, Росія, 2001 р.; Першій всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції “Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука - виробництво”, м. Суми, 2001 р.; Міжнародній науковій конференції “Сучасні проблеми механіки і фізико-хімії процесів різання, абразивної обробки і поверхневого пластичного деформування”, м. Київ, 2002 р.; Першому міжнародному молодіжному колоквиумі “Інструмент”, м. Київ, 2002 р.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 10 наукових праць, у тому числі 1 доповідь на міжнародній науково-технічній конференції і 8 статей у науково-технічних журналах. У фахових виданнях, затверджених переліком ВАКУ України, опубліковано 5 статей. Отримано деклараційний патент України на винахід.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі списку умовних позначень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації 205 сторінок, у тому числі 89 рисунків на 29 сторінках, 15 таблиць на 7 сторінках, список умовних позначень на 1 сторінці, 6 додатків на 35 сторінках, список використаних джерел з 108 найменувань на 9 сторінках.

Основний зміст роботи

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми з точки зору розв'язання проблеми підвищення ефективності процесів чистової обробки на основі аналітичного моделювання силової взаємодії леза із заготівкою на стадії проектування технологічного процесу. Сформульовано мету і задачі досліджень, подано загальну характеристику дисертаційної роботи.

У **першому розділі** розглянуто проблеми, що є вузьким місцем на шляху підвищення ефективності процесів чистової обробки в автоматизованому виробництві. Зокрема, показано, що для скорочення часу на освоєння виробництва необхідно ще на стадії проектування технологічного процесу мати достовірну інформацію щодо сили взаємодії леза із заготівкою, усадки стружки, мінімальної товщини зрізу, яка дозволяє реалізовувати обробку у вигідних умовах, та, для нестационарних процесів, таких, як наприклад, фрезерування, тангенціальне точіння та ін., залишкового напливу на РК і залишкової сили.

a) б)

Рис. 1. Стадії взаємодії леза із заготівкою (а) та зміна товщини зрізу в частині циклу “різання” нестационарних робочих процесів (б): $d_j = da_j/dL$, L – шлях різання

У цьому розділі також проаналізовані явища, що відбуваються попереду РК на різних стадіях стружкоутворення під час нестационарного процесу різання пластичних матеріалів, який реалізується у податливій технологічній системі (рис. 1). Зазначено, що під час чистової обробки, як правило, використовують такі умови різання, що забезпечують стружкоутворення за відсутності наросту.

На підставі огляду публікацій вітчизняних та зарубіжних вчених подано класифікацію способів схематизації зони стружкоутворення: ідеалізовані схеми, експериментальні схеми, схеми з єдиною умовною площиною зсуву, а також схеми з розвинутою зоною зсуву у вигляді поля ліній ковзання над поверхнею зсуву та під нею. Показано, що тільки остання схема, розроблення якої провели В. В. Севастьянов, J. Palmer та ін., може використовуватися для створення аналітичної моделі силової взаємодії округленого леза із заготівкою.

У результаті аналізу сучасних уявлень про силову взаємодію леза із заготівкою показано, що залежність сили від товщини зрізу може бути розділена на нелінійну ($a > a_K$) та лінійну ($a < a_K$) ділянки ($a_K > r_0$). Для розрахунку цієї сили найбільш розробленим є рівняння зі структурою, що припускає виділення її складових на плоскій передній поверхні, на округленій ділянці РК та на фасці зносу на задній поверхні. Для розрахунку сили на нелінійній ділянці відомо лише одне рівняння С. І. Тахмана, яке, однак, не враховує швидкості зміни товщини зрізу. Всі інші рівняння справедливі лише для розрахунків при $a > a_K$ і вимагають числового значення коефіцієнта усадки стружки.

Відомі результати експериментальних досліджень величини мінімальної товщини зрізу, яка гарантує стійке стружкоутворення, дають її значення у широкому діапазоні: від $0,003r_0$ до

0,3r₀. Дослідження причин цього факту в літературних джерелах майже відсутні. Відсутні в літературі й теоретично обґрунтовані рекомендації щодо визначення величини мінімальної товщини зрізу, яка дозволяє реалізовувати обробку у вигідних умовах, тобто таких, що несуттєво відрізняються від умов різання з $a/r_0 \gg 1$ за величинами питомої сили різання, коефіцієнта усадки стружки, контактних нормальних напружень.

Другий розділ присвячено розробленню прогнозуючої аналітичної моделі процесу силової взаємодії округленого леза із заготівкою при різанні з товщиною зрізу, яка може безперервно змінюватися (рис. 1, б). Вихідними даними для визначення сили взаємодії, коефіцієнта стовщення стружки та ін. показників є: межа текучості на зсув в пластичній області k , контактні дотичні напруження t_n , передній g і задній a кути леза, радіус округлення РК r_0 , ширина зрізу b , шорсткість вихідної поверхні Ra , закон зміни товщини зрізу $a = a(L)$ (наприклад, рис. 1, б).

Рис. 2. Конфігурація пластичної області попереду РК у найбільш загальному випадку
Модель розроблялася для умов різання без наросту та швидкості різання менш, ніж 10 м/с. Виходячи з результатів огляду літератури, були обґрунтовані та прийняті такі припущення: а) оброблюваний матеріал є абсолютно пластичним середовищем, яке не здатне зміцнюватися та стискуватися; б) плоска деформація; в) розподіл контактних дотичних напружень є рівномірним на всій ділянці контакту, за винятком тієї її частини, де швидкість руху частинок у пластичній області відносно поверхні леза дорівнює 0; г) довжина ділянок пружного контакту та фаски зносу дорівнює 0. Для врахування зміни механічних властивостей оброблюваного матеріалу у пластичній області в результаті деформаційного зміцнення та дії температурно-швидкісного фактора параметри k та t_n повинні бути попередньо обчислені за даними механічних випробувань (s_y , S_k , d_k , u_k та ін.) за допомогою однієї з відомих з літератури розрахункових залежностей. Наприклад, аналіз показав, що залежності О. М. Розенберга $k=0,67Be^{c-1}r(1+c)^{-1}$, $q_F=0,75t_n=0,28S_k$ дають задовільний за точністю результат. Тому спеціального проведення експериментів безпосередньо по різанню не потрібно.

Напружено-деформований стан визначався розв'язанням статично невизначеної, у загальному випадку, задачі пластичності з невідомою границею пластичної області. Була складена система з 5 рівнянь: умова пластичності, умова рівноваги, умова Сен-Венана-Мізеса, умова нестисливості. Розв'язання задачі здійснювалося в два етапи: 1) визначення геометрії пластичної області;

2) визначення напружено-деформованого стану.

На першому етапі, на підставі відомих з літератури експериментально отриманих фотографій зони стружкоутворення пластична область попереду РК була прийнята у вигляді криволінійного трикутника, ребра якого описані відрізками і дугами (рис. 2): з боку заготівки границею $KXGHRQDC$ (нижня границя), з боку леза - $KEFB$, а з боку стружки –

BC (верхня границя). У її межах також припущено наявність застійної зони, що характеризується положенням точок E та F . Для спрощення математичних викладок координати усіх характерних точок пластичної області були виражені через єдиний параметр JB - кут точки B кінця пластичного контакту.

Спираючись на припущення та відомі з літератури експериментальні дані, для пластичної області були сформульовані граничні умови в напруженнях та швидкостях. Границя $KXGHRQDC$ є лінією ковзання та розриву швидкостей ($\bar{v}_{n1} = \bar{v}_{n2}$). На контактній поверхні $KEFB$ задавався розподіл контактних дотичних напружень t_{nKB} , напрямом яких брався як протилежний відносно швидкості руху частинок. На границі BC нормальні s_{nBC} та дотичні t_{nBC} напруження вважалися такими, що дорівнюють 0. На усій границі $KEFB$ та біля точки B на границі BC також виконувалася умова непроникності через поверхню леза ($Pp_n \bar{v}_{KB} = 0$).

Для визначення параметра JB розглянуто режими несталого та сталого стружкоутворення. У першому з них параметр JB_1 визначався з умов рівності об'єму деформованого лезом матеріалу об'єму напливу, що утворюється попереду РК :

$$V_{\text{напливу}}(\vartheta_{B1}) = \int_0^L \rho_{\text{мдеф}}(a(l)) \cdot \rho_{m0}^{-1} \cdot k_c(a(l)) \cdot a(l) \cdot dl, \quad (1)$$

де $r_{\text{мдеф}}$ – щільність поверхневого шару; r_{m0} - щільність оброблюваного матеріалу; k_c – коефіцієнт стружкоутворення (за М. І. Богомолвим). Отримані в результаті інтегрування аналітичні залежності враховують наявність шорсткості вихідної поверхні та можливість пластичного деформування в боки від РК. У другому режимі параметр JB_2 визначався з граничних умов в швидкостях. Було отримано рівняння (рис. 2):

$$\zeta_m(\vartheta_{B2}) = 0. \quad (2)$$

Якщо візання починається з нульової товщини зрізу, взаємодія леза із заготівкою починається у режимі несталого стружкоутворення (за відсутності стружки). У подальшому, за умови перевищення кутом JB_2 кута JB_1 режим стружкоутворення є сталим (з'являється стружка). Цей режим зберігається навіть із зменшенням товщини зрізу аж до нуля, оскільки тільки у цьому режимі малому переміщенню леза відповідає мале зменшення об'єму пластичної області. Описаний механізм було покладено в основу алгоритму реалізації обчислень параметра JB на ЕОМ.

У результаті визначення параметра JB розв'язувана задача пластичності стала статично визначеною. Це дало можливість побудувати сітку ліній ковзання (рис.2), яка задовольняє взяті припущення і граничні умови. Розподіл контактних напружень σ_{nKB} та τ_{nKB} на KB визначався в пластичній області на основі властивостей ліній ковзання:

$$\sigma_{nKB} = -k(1.5\pi - 2\theta_{KB} - 2\min(\vartheta, \vartheta_p) + 2\theta_{KC} + 2\lambda(\vartheta_p) + 2\delta - \sin 2\theta_{KC} + \sin 2\theta_{KB}) + \sigma_{\text{вс}}, \quad \tau_{nKB} = \cos(2\theta_{KB}), \quad (3)$$

де $\theta_{KB}(\tau_n)$ та θ_{BC} - кути нахилу ліній ковзання до нормалей відповідних границь пластичної області; $\sigma_{nBC} = 0$ - нормальні напруження на границі BC .

Зважаючи на те, що в кожному окремому випадку в контакт беруть участь різні за формою ділянки контактної поверхні РК, проєкції сили різання запропоновано розраховувати методом чисельного інтегрування контактних напружень. Для цього в роботі застосовувався метод Сімпсона:

$$P_x = \int_{\vartheta_n}^{\vartheta_p} (\sigma_n \sin \vartheta + \tau_n \cos \vartheta) \frac{d\vartheta}{\cos^2(\Delta\vartheta)}, \quad P_y = \int_{\vartheta_n}^{\vartheta_p} (-\sigma_n \cos \vartheta + \tau_n \sin \vartheta) \frac{d\vartheta}{\cos^2(\Delta\vartheta)}, \quad \Delta\vartheta = \begin{cases} \vartheta_p - \vartheta \text{ при } \vartheta < \vartheta_p \\ 0 \text{ при } \vartheta_p \leq \vartheta \leq \vartheta_p \\ \vartheta - \vartheta_p \text{ при } \vartheta > \vartheta_p \end{cases} \cdot (4)$$

На основі сітки ліній ковзання побудовано годограф швидкостей, який дозволив аналітично визначати проєкції швидкостей частинок оброблюваного матеріалу в пластичній області:

$$v_x(\vartheta, \varphi) = \frac{\sin \tilde{\vartheta}}{\cos \theta_{KB}(\vartheta)} \cos \varphi - 1, \quad v_y(\vartheta, \varphi) = \frac{\sin \tilde{\vartheta}}{\cos \theta_{KB}(\vartheta)} \sin \varphi, \quad (5)$$

де $\tilde{\vartheta} = \min(\max(\vartheta, \vartheta_w), \vartheta_p)$; j - кут нахилу ліній ковзання до осі x (рис. 2).

На основі отриманих залежностей розроблено алгоритм розрахунку проєкцій сили взаємодії леза із заготівкою, коефіцієнта стовщення стружки ($K_a = a_1/a$) та ін. показників у частині циклу “різання” нестационарного процесу. Алгоритм передбачає виділення у цій частині циклу розрахункових точок і послідовне виконання розрахунків у кожній з них. Коректність підходу зумовлена подібністю геометрії пластичної області у цих точках через прийняту малість d .

Для перевірки адекватності розробленої моделі у *третьому розділі* подано методика фізичного експерименту з визначення залежності сили взаємодії леза із заготівкою від товщини зрізу, що безперервно змінюється. Цю залежність запропоновано отримувати шляхом одночасного вимірювання як проєкцій сили, так і товщини зрізу під час реалізації процесу попутного тангенціального точіння (ПТТ) на експериментальній установці на базі верстата 6P13Ф3 з ЧПК 2С42-65 у поєднанні з вимірювальним комплексом, що складається з динамометра УДМ1200, підсилювача 8АНЧ-21, індукційного датчика та генератора, джерела живлення, АЦП, ЕОМ. Для обслуговування цього комплексу розроблена програма на Turbo Pascal 7.0, а для математичного оброблення отриманих даних - модуль у пакеті математичного програмування MATLAB.

Заготівка являла собою кільце з зовнішнім діаметром 60-70 мм та товщиною $(2,0-2,5) \pm 0,02$ мм, яке встановлювалося та закріплювалося у шпинделі верстата напроти індуктивного датчика. У якості леза застосовувалася змінна пластина SNLM100408F, що закріплювалася у спеціальній державці та орієнтувалася таким чином, щоб забезпечити $l=0 \pm 0,1^\circ$ та $j = 90^\circ$. Матеріали заготівки та леза вибиралися відповідно до задач експерименту.

Для виділення з усього потоку тієї частини даних, що відповідає власне частині циклу “різання” у роботі було розроблено спосіб реєстрації початку і кінця контакту леза із заготівкою за рахунок введення в канал вимірювання термоЕРС додаткового джерела живлення з великим внутрішнім опором. Крім цього, було підвищено точність вимірювання миттєвої товщини зрізу індукційним датчиком за рахунок компенсації неточності початкового зазору шляхом балансування моста перед виконанням вимірів, застосування ЕОМ для реєстрації даних, попередньої фільтрації сигналу датчика і автоматизованого розрахунку товщини зрізу. Максимальна інструментальна похибка не перевищувала 7%. Чутливість датчика складала не гірше 4-10 мкм. Для зниження відносної похибки вимірювання і реалізації діапазону відносин a/r_0 від 0,05 до 4 за наявної чутливості датчика для проведення дослідів вибиралися пластини з радіусом округлення РК 80-100 мкм. Його величина контролювалася запатентованим способом автоматизованого вимірювання радіуса округлення РК на растровому електронному мікроскопі. Він полягає у скануванні пучком електронів РК з різними збільшеннями уздовж напрямків сканування та реєстрації сигналу вторинних електронів, ширина смуги неперервної зміни якого відповідає радіусу округлення РК (рис. 3):

Рис. 3. Схема вимірювання радіуса округлення різальної кромки

$$\rho_0 = \frac{H}{K_Y} \begin{cases} 1 & \text{при } \beta < \frac{\pi}{2}, \\ 1/\cos\left(\beta - \frac{\pi}{2}\right) & \text{при } \beta \geq \frac{\pi}{2} \end{cases}, \quad (6)$$

де H - ширина смуги зміни сигналу; K_Y – збільшення у напрямку Y . Застосування оригінального алгоритму оброблення зображення на ЕОМ забезпечило можливість вимірювання радіусів менше 10 мкм на протяжній ділянці уздовж РК з похибкою, не більше ніж 10%.

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальної перевірки розробленої моделі. Перевірка виконувалася шляхом порівняння результатів прогнозування у різних умовах конфігурації пластичної області, розподілу контактних напружень, проекції сили взаємодії леза із заготівкою та усадки стружки з експериментальними даними, що опубліковані у літературі, а також з тими, що отримані автором самостійно за методикою, яка викладена у третьому розділі. Значна увага приділялася ідентичності умов фізичного експерименту та при розрахунках за моделлю. На жаль, це не завжди можна було досягти через обмежений обсяг інформації про експеримент, що наводився у літературі.

Показано, що основні особливості поля ліній ковзання (кут нахилу ліній ковзання, площа зони пластичних деформацій та товщина стружки) в ідентичних умовах збігаються за характером та близькі за величиною (рис. 4). Зважаючи на прийняті припущення про матеріал, який не зміцнюється, про ідеалізовану конструкцію поля та про відсутність фаски зносу, розбіг у формі ліній ковзання та глибині їх проникнення під площину різання неминучий. Крім того, у розрахованому полі розглянуто лише ділянку пластичного контакту, у той час як у експериментальному - і ділянку пружного контакту. Тому повна розрахункова довжина контакту менша за експериментальну.

Порівняння епюр розподілу контактних напружень, що отримані експериментально В. О. Остаф'євим та іншими дослідниками методом розрізного різця, з тими, що отримані автором та іншими дослідниками різними розрахунковими методами, у тому числі і МКЕ, показало, що характери усіх розрахункових епюр збігаються між собою, але відрізняються від характеру експериментальних на ділянці контакту округленої частини РК нижче від застійної зони.

Рис. 4. Порівняння конфігурації пластичної області

Рис. 5. Вплив величини межі текучості на похибку прогнозування сили взаємодії леза із заготівкою при ПТТ (ШХ15-ВК8; $s=1$ мм/об; $D=1$ мм; $d=65$ мм; $b=2,5$ мм; $r_0=80$ мкм; $Ra=6,3$ мкм):

1 – експеримент; 2 – $k=450$ МПа, $t_n/k=0,72$; 3 – $k=600$ МПа, $t_n/k=0,72$

Порівняння результатів прогнозування сили та усадки стружки для випадків протягування сталі 30ХГСА та сплаву В93Т, стругання сталей 20, 33ХСА, 45Х, тангенціального точіння сталі ШХ15 з експериментом показало, що залежності $P=P(a)$ та $K_a=K_a(a)$ збігаються як якісно, так і кількісно (рис. 5). Похибка прогнозування сили при $a/r_0 \leq 1$ не перевищує 21%, а усадки - 10%, і значною мірою, залежить від похибки визначення вихідних даних. Зокрема, межа текучості на зсув k змінює амплітуду залежності $P=P(a)$, залишаючи її характер незмінним. Зі зменшенням статичного переднього кута g_0 збільшується ширина петлі. Цей ефект підсилюється при збільшенні контактних дотичних напружень t_n . За рахунок впливу останнього фактора також і на ділянці переважного контакту вздовж округленої поверхні РК збільшується ширина звуження петлі на нелінійній ділянці. Зменшення радіусу округлення РК та шорсткості вихідної поверхні і збільшення коефіцієнта стружкоутворення приводить до початку сталого стружкоутворення при меншій товщині зрізу.

Експериментально підтверджено наявність при зменшенні товщини зрізу до нуля напливу оброблюваного матеріалу попереду РК – *залишкового напливу* (рис. 6). Силу взаємодії леза із заготівкою у цей момент ми назвали *залишковою силою*. Зіставлення експериментальних та розрахункових даних для умов ПТТ з подачею менше ніж $s=1,5$ мм/об показало, що проєкції залишкової сили P_z і P_y не залежать від подачі, а похибка їх прогнозування складає відповідно 21% і 5,4 %.

Рис. 6. Залишковий наплив на РК: вигляд з боку A_g

Виходячи з підтвердженої адекватності розробленої моделі, у *н'ятому розділі* подані результати дослідження методом розрахункового експерименту процесу стружкоутворення при різанні з товщиною зрізу $a/r_0 \leq 1$. Прийнято, що процес реалізується в абсолютно жорсткій технологічній системі, в якій задовольняються прийняті в моделі припущення. Досліджено процеси різання з постійною товщиною зрізу (ПТЗ) і циклічною її зміною за законом трикутника (ЦЗТ) (рис. 1,б). Встановлено, що за умови перевищення товщиною зрізу величини $2Ra$ сталого стружкоутворення починається тільки після проходження лезом у контакт із заготівкою такого шляху, названого граничним (шляхом проковзування), щоб об'єм деформованого матеріалу зрізаного шару, що надходить в наплив, був достатнім для досягнення об'ємом напливу свого граничного значення при поточних товщині зрізу,

швидкості її зміни і контактних дотичних напруженнях (рис. 8).

Встановлено, що величина проковзування зменшується зі зростанням товщини зрізу (за умов ПТЗ) або швидкості її зміни (за умов ЦЗТ), причому тим швидше, чим менше контактні дотичні напруження. У першому випадку проковзування буде суттєвим лише при $a/r_0 < 0,1$, а у другому - лише при $d < 1^\circ$. З іншого боку, при дуже великому значенні d об'єм пластичної області може ніколи не досягти граничного значення, що робить неможливим і початок сталого стружкоутворення. Для швидкої оцінки можливості початку стружкоутворення розроблено діаграму "d-t_n" (рис. 7), на якій в області припустимих значень d і t_n на нескінченному шляху різання виділені зони гарантованого і лише можливого початку сталого стружкоутворення. Встановлено, що при істотному відхиленні режиму від межі розділу зон зростає питома вага режиму несталого стружкоутворення (силової взаємодії леза із заготівкою без утворення стружки). Тому умови різання, які істотно відхиляються від межі зон, не є ефективними.

У результаті аналізу поля швидкостей та ліній току в пластичній області в режимі сталого стружкоутворення при різних величинах товщини зрізу, контактних дотичних напружень і переднього кута було встановлено, що завжди попереду округленої частини леза має місце застійна зона, але її форма і розміри залежать від умов тертя (рис. 8, б). При від'ємному передньому куті та великому значенні контактних дотичних напружень застійна зона може зайняти досить протяжну ділянку зони пластичного контакту. Встановлено, що причинами виникнення застійної зони можна вважати: *кінематичну*, пов'язану з необхідністю обтікання округленого леза, та *фізичну*, пов'язану з

Цикл зменшення товщини зрізу

гальмування частинок оброблюваного матеріалу силами

тертя.

а)

б)

Рис. 10. Залежність проєкцій питомої сили взаємодії леза із заготівкою (а) та коефіцієнта стовщення стружки (б) від відношення a/r_0 при $g = 0^\circ$

Розглянуто вплив товщини зрізу a , швидкості її зміни, вираженої кутом нахилу вихідної поверхні d (див. рис. 1, б), контактних дотичних напружень t_n і переднього кута g на розподіл контактних нормальних напружень, силу взаємодії леза із заготівкою, її питому величину, геометрію залишкового напливу і залишкову силу, а також на співвідношення проєкцій цих сил і коефіцієнт усадки стружки. Встановлено, що зі зменшенням контактних дотичних напружень контактні нормальні напруження зростають та можуть досягти $5k$ (рис. 9). Їх розподіл у загальному випадку має два екстремуми у точках з координатами $J = 0$ та $J = r/4$, які конкурують між собою: перший екстремум більший при малих дотичних напруженнях, а другий - при великих. У режимі несталого стружкоутворення другого екстремуму може і не бути. Але у режимі сталого стружкоутворення напруження на передній поверхні завжди менші, ніж на округленій частині леза. Запропоновано розрізняти мінімальну товщину зрізу $a_{\min k}$, що дозволяє спостерігати стале

стружкоутворення, і мінімальну товщину зрізу a_{\min} , що дозволяє реалізувати процес різання у вигідних умовах. Перша визначається експериментально, але опубліковані про неї дані дають значення в широких межах. Встановлені причини такої розбіжності: 1) різне співвідношення t_n/s_T , реалізоване в експериментах різних дослідників; 2) пластичне відтискування матеріалу в боки від РК; 3) зміна радіуса округлення r_0 уздовж РК і відносно невелика точність його вимірювання; 4) різна шорсткість вихідної поверхні заготовки в експериментах різних дослідників. Величина товщини зрізу a_{\min} за результатами проведених досліджень взята такою, що $(0,2 - 0,4)r_0$, виходячи з того, що при меншій товщині зрізу суттєво (більш ніж у два рази) збільшуються питома сила взаємодії леза із заготовкою та коефіцієнт стовщення стружки (рис. 10). Отже, при виборі режиму різання необхідно зменшувати частини циклу “різання” з не вигідним співвідношенням a/r_0 , навіть коли стале стружкоутворення має місце.

Методом аналізу розробленої у другому розділі умови зміни режимів стружкоутворення показано, що існування режиму сталого стружкоутворення при виході леза з контакту із заготовкою при нульовій товщині зрізу потребує наявності пластичної області великих розмірів та є причиною утворення залишкового напливу попереду РК (рис. 8). Встановлено, що на його геометрію та величину залишкової сили впливають: g (при значеннях, менших від (-10°)), d (при значеннях, менших ніж (-1°)), t_n (особливо при від'ємних g). Якщо g такий, що залишковий наплив контактує з плоскою передньою поверхнею, то зі збільшенням t_n обидві проекції залишкової сили зростають. У іншому випадку зростає тільки P_z , а P_y зменшується. Швидкість зміни товщини зрізу впливає практично лише на P_y при своїх великих значеннях. У реальних умовах величини проекцій залишкової сили становлять близько $(1,5 - 2,0)kbr_0$ та $(1,9 - 2,8)kbr_0$ відповідно для P_z та P_y (рис. 11). Співвідношення P_y/P_z не перевищує 2. Воно менше при більших t_n .

Рис. 11 - Залежність проекцій сили взаємодії леза із заготовкою при зменшенні товщини зрізу, якщо $g = 0^\circ$

У п'ятому розділі також наведені приклади прогнозування та розглянуті особливості силової взаємодії леза із заготовкою у випадку ПТТ, фрезерування та обробки хвилястої поверхні. Порівняння розрахункових та експериментальних кривих для ПТТ дозволило виявити розбіжність залежностей $P=P(a)$ у кінці циклу різання, що можна пояснити зміною фізико-механічного стану вихідної поверхні в процесі різання.

ВИСНОВКИ

1. Результати аналітичних досліджень автора і сучасні уявлення про процес стружкоутворення були узагальнені і формалізовані в розробленій аналітичній прогнозуючій моделі силової взаємодії округленого леза із заготовкою для випадку вільного прямокутного різання пластичних матеріалів з товщиною зрізу, яка безупинно змінюється, в умовах відсутності наростоутворення і швидкості різання, меншої від 10 м/с. Модель дозволяє з похибкою не

більше ніж 21% (при $a/r_0 \geq 1$) спрогнозувати силу взаємодії леза із заготівкою, а також коефіцієнт стовщення стружки, величину контактних нормальних напружень, геометрію пластичної області і залишкового напливу без попереднього проведення експериментальних досліджень власне процесу різання.

2. Для аналітичного розв'язання задачі про визначення напружено-деформованого стану в пластичній області з невідомою границею, яка виникає перед округленою різальною кромкою у процесі нестационарного різання, запропоновано спосіб опису геометричної конфігурації границі цієї області і розроблено відповідні аналітичні залежності. За рахунок цього стало можливим визначити окремо напружений і деформований стани у пластичній області за допомогою методу ліній ковзання.
3. Ґрунтуючись на результатах експериментальних спостережень автора та інших дослідників процесу нестационарного різання з малою товщиною зрізу, у частині циклу "різання" виділені режими несталого (утворення напливу попереду різальної кромки) і сталого (утворення стружки, як такої) стружкоутворення. Розроблено рівняння для визначення параметра, що визначає геометричні розміри границі пластичної області в кожному з цих режимів, умова їхньої зміни, а також алгоритм реалізації обчислень на ЕОМ.
4. Для перевірки адекватності запропонованої аналітичної моделі розроблена методика експериментального визначення залежності сили взаємодії леза із заготівкою від товщини зрізу при безупинній зміні останньої. Методика реалізує безпосереднє вимірювання як сили, так і товщини зрізу у процесі тангенціального точіння. Для контролювання радіуса округлення різальної кромки також розроблена методика вимірювання усередненого його значення вздовж заданої ділянки різальної кромки за допомогою растрового електронного мікроскопа. Розроблено програмне забезпечення для автоматизації виконання робіт на кожному етапі їх проведення.
5. Адекватність моделі була підтверджена для умов $a/r_0 \geq 1$ методом порівняння розрахункової залежності $P = P(a)$ з результатами експериментів, отриманих як самим автором (методом тангенціального точіння), так і іншими дослідниками (на прикладі протягування і стругання). Виконано дослідження факторів, що впливають на точність прогнозування показників процесу силової взаємодії леза із заготівкою.
6. Ґрунтуючись на результатах виконаних досліджень методом розрахункового експерименту сформульовані такі рекомендації для проектування технологічної операції чистової обробки з відношенням $a/r_0 \geq 1$:
 - режим різання і геометрія леза повинні забезпечувати відношення a/r_0 не менш 0,2-0,4;
 - режим різання, інструментальний матеріал та інші умови повинні забезпечувати такі значення d та t_n , щоб точки з відповідними координатами на діаграмі " $d - t_n$ " наближалися до границі між зоною гарантованого і зоною можливого початку сталого стружкоутворення з боку першої з них;
 - при настроюванні верстата необхідно враховувати деформацію технологічної системи наприкінці частини циклу "різання" під дією залишкової сили, величини проєкцій якої знаходяться в межах $(1,5 - 2,0)kbr_0$ для P_z
 - і $(1,9 - 2,8)kbr_0$ для P_y .
7. Розроблено інженерну методику визначення показників силової взаємодії леза із заготівкою, що реалізована в програмному забезпеченні для ЕОМ. Вона може бути використана для розрахунку на стадії проектування сил закріплення інструмента, наприклад, сили затиску плаваючого різця на операції розточування, розрахунку вузлів верстатів і пристосувань на міцність та жорсткість тощо. Виконання рекомендацій, що стосуються величини мінімальної товщини зрізу та величини залишкової сили, дозволяє знизити енергоємність нестационарних процесів чистової обробки, підвищити ресурс інструмента і якість обробленої поверхні. Крім цього, розроблений спосіб вимірювання радіуса округлення РК може бути використаний для

контролю якості різальних лез у спеціалізованому інструментальному виробництві.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Залога В. А., Приходько В. В., Криворучко Д. В. Теоретическое описание кинематики попутного тангенциального точения//Высокие технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг: Труды VII Международного научно-технического семинара "Интерпартнер 97", 24-28 сентября 1997г. -Х.: ХГТУ, 1997. -С. 47- 52 (0,15 авт. арк.).
2. Залога В. А., Криворучко Д. В. К вопросу об аналитическом прогнозировании толщины среза при свободном прямоугольном тангенциальном точении//Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн. техн. сборник. -Х.: ХГТУ, 2000. -Вып. 57. -С. 83-87 (0,22 авт. арк.).
3. Залога В. А., Криворучко Д. В. К вопросу о выводе уравнения силы резания для процессов с переменной толщиной среза//Системні технології: Математичні проблеми технічної механіки. -Дніпропетровськ, 2001. -С. 63- 67 (0,21 авт. арк.).
4. Залога В. А., Криворучко Д. В. К вопросу об общности математического описания процессов резания с переменной толщиной среза//Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. -Х.,2001.-№59.-С.86-92 (0,27 авт. арк.).
5. Залога В. А., Криворучко Д. В., Сайко В. В. Методика экспериментального определения коэффициентов уравнения силы резания для процессов с переменной толщиной среза//Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". -Х., 2001. -№ 6. -С.101- 104 (0,21 авт. арк.).
6. Криворучко Д. В. Моделирование как основа развития современных технологий механической обработки//Тезисы докладов молодежной научно-технической конференции вузов приграничных регионов славянских государств, 23-24 октября 2001 г. -Брянск: БГТУ, 2001. -С. 48- 50 (0,13 авт. арк.).
7. Пат. 45759А UA, МКИ G 01 В 11/24. Спосіб вимірювання малого радіуса сполучення площин об'єкта/ Д. В. Криворучко, В. А. Залога (UA). -№2001064433; Заявлено 25.06.2001; Опубл. 15.04.2002. Бюл. №4. -5 с.
8. Zaloha V. A., Krivoruchko D. V. Prediction of the Tool-Workpiece Interaction Force in Machining Operations with Small Undeformed Chip Thickness//Lucrarile Stiintifice Ale Simpozionului International "Universitaria ROPET 2001": Inginerie Mecanica. -Petrosani: Unerversity of Petrosani, 2001. -V. 2. -Pp. 159- 164 (0,53 авт. арк.).
9. Залога В. А., Криворучко Д. В. Современные подходы аналитического моделирования процессов резания//Вестник Сумского государственного университета. -2002. -№ 2. -С. 54-60 (0,5 авт. арк.).
10. Залога В. А., Криворучко Д. В. Прогнозирующая аналитическая модель силового взаимодействия лезвия с заготовкой//Вопросы механики и физики процесса резания и холодного пластического деформирования: Сб. науч. тр. Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. -К.,2002. -С.103- 118 (0,47 авт. арк.).

Аннотация

Криворучко Д. В. Повышение эффективности процессов чистовой обработки на основе аналитического моделирования силового взаимодействия лезвия с заготовкой. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – Процессы механической обработки, станки и инструменты. Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, Киев, 2002. Диссертация посвящена повышению эффективности процессов чистовой обработки на основе моделирования силового взаимодействия лезвия с заготовкой при резании с непрерывно изменяющейся толщиной среза, по величине соизмеримой с радиусом округления режущей кромки (РК). Актуальность исследования обусловлена тем, что большинство известных прогнозирующих моделей основано на допущении об абсолютно

остром лезвии и, следовательно, они не могут быть применены для указанных условий. В то же время доля процессов чистовой обработки непрерывно увеличивается и необходимость их оптимизации требует разработки моделей процесса резания округленным лезвием. Результаты аналитических исследований автора и современные представления о процессе резания были обобщены, формализованы и положены в основу разработанной прогнозирующей модели силового взаимодействия округленного лезвия с заготовкой для случая свободного прямоугольного резания с непрерывно изменяющейся толщиной среза в условиях отсутствия наростообразования, позволяющей с ошибкой не более 21% (при $a \leq r_0$) спрогнозировать контактные нормальные напряжения, силу взаимодействия лезвия с заготовкой, коэффициент усадки стружки, геометрию пластической области и остаточного напльва без предварительного проведения каких-либо экспериментальных исследований собственно процесса резания.

Прогнозируемые показатели определялись по данным о напряженно-деформированном состоянии (НДС) в пластической области, формирующейся перед округленной РК в процессе нестационарного резания. Ее граница заранее неизвестна. С целью аналитического определения НДС предложен способ описания конфигурации пластической области и разработаны соответствующие аналитические зависимости. За счет этого стало возможным раздельное определение напряженного и деформированного состояний в пластической области с помощью метода линий скольжения.

Показано, что с самого начала контакта лезвия с заготовкой в ходе их относительного перемещения режим неустановившегося стружкообразования (образование напльва перед РК) переходит в установившийся режим (образование стружки). Предложено математическое описание процесса образования напльва перед режущей кромкой в процессе резания с постоянно изменяющейся толщиной среза, разработаны математическая модель этого процесса, алгоритм и программное обеспечение для его реализации на ЭВМ. Адекватность модели была подтверждена методом сравнения расчетной зависимости $P=P(a)$ с результатами эксперимента, полученными как самим автором (методом тангенциального точения стали ШХ15), так и другими исследователями (на примере протягивания и строгания сталей 20, 30ХГСА, 33ХСА, 45Х и сплава В93Т при толщине среза $a \leq r_0$). В эксперименте автора зависимость $P=P(a)$ определялась непосредственным измерением как силы взаимодействия лезвия с заготовкой, так и толщины среза на специальной экспериментальной установке, реализованной на базе станка 6Р13Ф3 с ЧПУ 2С42-65 совместно с измерительным комплексом, оснащенный динамометром УДМ1200, индуктивным датчиком толщины среза, АЦП, ЭВМ и другими вспомогательными устройствами. Также сравнивались конфигурация пластической области, распределение напряжений, проекции силы резания и усадка стружки при разных условиях. Выполнены исследования влияния различных факторов на ошибку прогнозирования. Показано, что она возникает в результате как принятых допущений, так и ошибки определения исходных данных.

Методом вычислительного эксперимента исследовано влияние толщины среза a , скорости ее изменения, выраженной углом наклона исходной поверхности d , контактных касательных напряжений t_n и переднего угла g на распределение контактных нормальных напряжений, силу взаимодействия лезвия с заготовкой, ее удельную величину, геометрию остаточного напльва и остаточную силу, а также на соотношение проекций этих сил и коэффициент усадки стружки. Показано, что стружкообразование при обработке реальной поверхности имеет место уже при толщине среза, большей $2Ra$. Однако реализация процесса резания в выгодных условиях возможна лишь при толщине среза свыше $(0,2 - 0,4)r_0$.

Установлено, что образование остаточного напльва является результатом недостаточного оттока материала из пластической области и имеет место во всех случаях, когда лезвие

выходит из контакта с заготовкой при нулевой толщине среза (тангенциальное точение, попутное фрезерование и др.). Показано, что размеры остаточного напльва при переднем угле, близком к 0, увеличиваются с увеличением касательных напряжений на контактной поверхности. При этом величины проекций остаточной силы изменяются в узких пределах: $(1,5 - 2,0)kbr_0$ для P_z и $(1,8 - 2,8)kbr_0$ для P_y .

В результате выполнения исследований разработана инженерная методика определения показателей силового взаимодействия лезвия с заготовкой, которая реализована в программном обеспечении для ЭВМ. Она может быть использована уже на стадии проектирования элементов технологической системы для расчета сил закрепления инструмента, узлов станков и приспособлений на прочность и жесткость, оптимизации конструкции и геометрии лезвия и др. Выполнение рекомендаций, касающихся величины минимальной толщины среза, геометрических размеров остаточного напльва и величины остаточной силы, позволяет снизить энергоемкость нестационарных процессов чистовой обработки, повысить ресурс инструмента и качество обработанной поверхности. Кроме этого, разработанный новый способ измерения радиуса округления РК может быть использован для контроля качества режущих лезвий в специализированном инструментальном производстве.

Ключевые слова: стружкообразование, толщина среза, напльв, радиус округления РК, пластичная деформация, метод линий скольжения, сила, контактные напряжения.

Анотація

Криворучко Д. В. Підвищення ефективності процесів чистової обробки на основі аналітичного моделювання силової взаємодії леза із заготівкою.

–Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти. Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Київ, 2002.

В дисертації розроблені методика моделювання силової взаємодії леза із заготівкою при різанні з товщиною зрізу, що безперервно змінюється у межах, порівняних з радіусом округлення РК, алгоритм розрахунків та програма його реалізації на ЕОМ. Задача визначення напружено-деформованого стану пластичної області вирішувалася методом ліній ковзання. Вихідними даними є: механічні властивості матеріалу, що оброблюється, геометрія леза та умови обробки. Виконана перевірка показала задовільну відповідність результатів прогнозування сили експериментальним даним. В результаті виконаних теоретичних досліджень за цією моделлю формалізовано процес утворення напльву попереду РК, визначено величини залишкової сили та мінімальної товщини зрізу, що реалізує процес різання у вигідних умовах. Використання результатів дослідження при проектуванні технологічного процесу дозволяє знизити енергоємність нестационарних процесів чистової обробки, підвищити ресурс інструменту і якість обробленої поверхні.

Ключові слова: стружкоутворення, товщина зрізу, напльв, радіус округлення РК, пластична деформация, метод ліній ковзання, сила, контактні напруження.

Summary

Kryvoruchko D. V. An increase of finish operation efficiency by means of analytical modeling of tool-workpiece force interaction. – Manuscript.

Thesis for candidate's degree in technical sciences by specialty 05.03.01 – machining operations, machines and tools. Institute of Superhard Materials named after V. N. Bakul of National Academy of Science of Ukraine, Kiev, 2002.

A method of modeling of tool-workpiece interaction during the cutting with continuously varying undeformed chip thickness within the value of tool edge radius as well as calculation algorithm and respective software have been developed in this thesis. Stress and strain are determined with aid of slip line method. The source data are mechanical properties of workpiece material, tool geometry and cutting conditions. The model validation has shown a satisfactory correspondence

between calculated and experimental data. The hypothesis of buldge formation mechanics, values of residual force and minimal undeformed chip thickness, which allows efficient cutting process, are the main results of this research. Its utilization during development of manufacturing technology can result in decrease of power-consumption of unsteady-state finish cutting operations, in increase of tool life and quality of machined surface.

Keywords: chip formation, undeformed chip thickness, buldge, tool edge radius, plastic flow, slip-line method, cutting force, contact stress.

Підп. до друку 14.11.2002 р.
Наклад 100 прим.
Замовл. №

Формат 60г90/16.
Обл.-вид. арк. 1,1.

“Ризоцентр” СумДУ, 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсокова, 2.