

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Криворучко Дмитро Володимирович

УДК 621.9.01:519.6 (043.3)

**НАУКОВІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ
ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ
ЧИСЛОВИХ МЕТОДІВ**

Спеціальність 05.03.01 – процеси механічної обробки,
верстати та інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор
Залога Вільям Олександрович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри технології машинобудування,
верстатів та інструментів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Внуков Юрій Миколайович,
Запорізький національний технічний університет,
проректор з наукової роботи,
завідувач кафедри технології машинобудування

доктор технічних наук, професор
Оборський Геннадій Олександрович,
Одеський національний політехнічний університет,
ректор, завідувач кафедри металорізальних
верстатів, метрології та сертифікації

доктор технічних наук, професор
Равська Наталія Сергіївна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
професор кафедри інтегрованих технологій
машинобудування

Захист дисертації відбудеться “23” грудня 2010 р. о 14 годині 00 хв. 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 бібліотечі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків, вул.Фрунзе, 21).

Автореферат розісланий “ ____ ” _____ 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

О. А. Пермяков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Оброблення різанням є одним із основних видів формоутворення у машинобудуванні. Теорія різання, спираючись головним чином на глибокі експериментальні дослідження, досягла значних успіхів не тільки у розумінні процесів та явищ, що відбуваються під час стружкоутворення, на контактних поверхнях різального інструмента та в обробленій поверхні, але й у створенні нормативної бази для розрахунків режимів різання, проектування інструментів, верстатів тощо. Разом з розвитком інструментальних матеріалів та зносостійких покриттів це дало змогу створити високопродуктивні верстати та різальні інструменти. Однак сучасне машинобудування вимагає від процесів різанням ще більш високих продуктивності та якості обробленої поверхні, впровадження високоефективних технологій оброблення нових, у тому числі важкооброблюваних, матеріалів. Важливим є вивчення процесу різання за умов, для реалізації яких оброблювані системи або їх елементи лише створюються, наприклад для високошвидкісного та надвисокошвидкісного різання, різання інструментами з нових інструментальних матеріалів, з новими покриттями та з новою геометрією різальної частини (леза), оброблення нових або удосконалених конструкційних матеріалів, нанооброблення тощо. Ці завдання можуть бути розв'язані за допомогою прогнозуючого моделювання процесів різання.

Для наявних математичних моделей процесів механічного оброблення, навіть найсучасніших термомеханічних моделей, необхідні дані про вид стружки, її усадку, розподіл контактних напружень, середній коефіцієнт тертя тощо. Такі дані можна отримати з використанням методик, які ґрунтуються на проведенні експериментів безпосередньо з різання, що потребує значних часових та матеріальних витрат, та часто є технічно неможливим. Має місце проблема створення прогнозуючих моделей процесів різання. Тому теоретичне узагальнення уявлень щодо деформаційних та теплових процесів і тертя при стружкоутворенні; розроблення наукових основ застосування даних випробувань при простих видах деформації та тертя для опису поведінки металів під час стружкоутворення; врахування фактичного стану контактних поверхонь інструмента; критеріїв утворення різних видів стружок, що в сукупності спрямоване на прогнозування із застосуванням лише фундаментальних законів і критеріїв теорії пластичності, руйнування і трибології показників та визначення ще на стадії проектування оптимальних параметрів робочих процесів різання і конструкцій різального інструмента є актуальними науковими проблемами в галузі теорії різання металів, вирішенню яких присвячена дисертаційна робота.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету в рамках держбюджетних робіт МОН України: «Розробка теоретичних основ управління процесами механічної обробки лезовим інструментом» (ДР №0103U000777), «Розробка наукових основ оптимізації процесів різання на основі їх комп'ютерного 3D-моделювання методом скінченних елементів» (ДР №0106U001932) і «Розробка наукових основ підвищення ресурсу інструментів із керамічних та надтвердих матеріалів для

переривчастого різання на основі імітаційного моделювання» (ДР №0109U001382) та робіт за господарчими договорами з підприємствами АТ «РОТОР» (м. Суми), ТОВ «Насостехкомплект» (м. Суми) та іншими, де здобувач був відповідальним виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження полягає у розробленні наукових основ створення термомеханічних моделей процесів різання металів для встановлення при проектуванні ефективних конструкцій різального інструмента та параметрів технологічного процесу на основі даних випробувань оброблюваного матеріалу при простих видах деформації та ортогональному різанні.

Для досягнення зазначеної мети поставлені такі задачі:

1. Розробити загальну методологію проектування термомеханічних моделей робочих процесів різання, що здатні прогнозувати вид, форму та розміри стружки, напружено-деформований та тепловий стан в об'ємі і на контактних поверхнях леза та силу різання, створити на її основі з використанням числових методів термомеханічні 2D- та 3D-моделі ортогонального різання інструментами з довільною формою передньої поверхні.

2. Дослідити вплив невизначеності фізико-термомеханічних, трибологічних властивостей та геометричних параметрів елементів системи на загальну похибку прогнозування показників процесу різання.

3. Розробити фізичні методи дослідження та ідентифікації фізико-термомеханічних властивостей оброблюваних матеріалів з випробувань при простих видах деформації.

4. Розробити фізичні методи дослідження та ідентифікації адгезійної складової тертя на границі «оброблюваний-інструментальний» матеріали.

5. Розробити математичну модель процесу зовнішнього тертя шорсткого пружного тіла з пружно-пластичним тілом при тисках, порівнянних з границею плинності цього тіла. Дослідити та встановити за допомогою розробленої моделі ролі деформаційної та адгезійної складових сили тертя на передній поверхні леза.

6. Дослідити механізми утворення стружок різних видів, формалізувати критерії та розробити відповідні алгоритми моделювання.

7. Розробити основні принципи практичного застосування математичних моделей процесів різання у широкому діапазоні умов оброблення.

Об'єкт дослідження – процес різання металів лезовим інструментом.

Предмет дослідження – характеристики механічних і трибологічних властивостей оброблюваного матеріалу та методи їх експериментального визначення, критерії формування стружок різних видів, напружено-деформований та тепловий стан в об'ємі і на контактних поверхнях леза та сили різання, прогнозуюча модель стружкоутворення.

Методи досліджень. Під час виконання дисертаційної роботи застосовувалися сучасні методи модельних та натурних досліджень. Для прогнозування виду, форми та розмірів стружки, напружено-деформованого та теплового стану у зоні різання та деформаційної складової сил тертя в роботі використано метод скінченних елементів (МСЕ). Отримання даних про термо-механічні властивості оброблюваних матеріалів виконано за допомогою випробувань на розтягання (ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9651-84), стискання (ГОСТ 25.503-97) стандартних та спеціальних зразків при нормальній та підвищеній температурі, а також ортогонального різання. Визначення адгезійної складової сил тертя виконано методом втискання сферичного індентора, що обертається, у півпростір при нормальній температурі. Дослідження відбитків проводилося за допомогою растрового електронного мікроскопа. При експериментальному дослідженні процесу різання вимірювання температури виконувалося методом природної термопари, вимірювання сил - за допомогою тензометричних та п'єзоелектричних динамометрів з реєстрацією цифрових даних у режимі реального часу. Вимірювання довжини контакту стружки з передньою поверхнею виконувалося за допомогою швидкісної кінозйомки та за слідами на передній поверхні. У методиках оброблювання результатів експериментальних досліджень застосовано числові методи розв'язання систем нелінійних трансцендентних рівнянь та числового інтегрування. Планування модельних та натурних експериментів і обробка їх результатів виконані на основі теорії багатофакторного експерименту. Дослідження похибок відтворення модельного та натурального експериментів виконано з використанням теорії дисперсійного аналізу. Реалізація числових моделей виконана з використанням ліцензійного програмного забезпечення.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Запропонована й обґрунтована нова концепція прогнозування показників робочих процесів різання у заданих умовах, у тому числі виду, форми та розмірів стружки, яка, на відміну від відомих, передбачає моделювання стружкоутворення методом скінченних елементів на основі даних стандартних випробувань термомеханічних і трибологічних властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів. Це дає можливість суттєво скоротити при дослідженні та оптимізації обсяг експериментальних випробувань безпосередньо досліджуваного процесу різання.

2. Вперше модельними дослідженнями вирішено проблему порівнянності кривої зміцнення при різанні та простих видах деформації: доведено можливість отримання адекватної моделі процесу різання з використанням визначальних рівнянь та рівнянь пластичності, параметри яких отримані за комплексом даних стандартних випробувань на розтягання, стиск та ортогональне різання.

3. Вперше висунуто та доведено модельними дослідженнями гіпотезу про єдину залежність між деформаційною складовою коефіцієнта зовнішнього тертя та фундаментальною характеристикою напружено-деформованого стану контактної поверхні стружки: відношенням дійсного тиску до середньої границі плинності оброблюваного матеріалу. Доведено, що фактична площа контакту при ковзанні на границі контакту стружка-лезо залежить від відношення номінального тиску до середньої

границі плинності оброблюваного матеріалу у контактній поверхні стружки, зведеного модуля пружності контактуючої пари, параметрів R_p та t_m мікрорельєфу контактної поверхні лека.

4. Вперше встановлено, що на границі контакту стружка-лезо:

а) в зоні зовнішнього тертя деформаційна складова коефіцієнта тертя за величиною порівнянна з адгезійною складовою;

б) зі зменшенням нормального напруження частка адгезійної складової коефіцієнта тертя збільшується;

в) зростання коефіцієнта тертя при віддаленні від різальної кромки зумовлено наявністю сил адгезійного опору ковзанню, що призводить до уповільнення зменшення дотичних напружень зі зменшенням нормальних напружень, причому цей ефект тим більший, чим більші початкова міцність адгезійних зв'язків та їх здатність до зміцнення зі збільшенням тиску;

г) розподіл напружень більшою мірою залежить від здатності адгезійних зв'язків до зміцнення, ніж від їх початкової міцності.

5. У результаті подальшого розвитку моделей руйнування та тертя при різанні металів доведено можливість прогнозування виду та форми стружки без проведення попередніх експериментів з різання. Для визначення моменту та характеру руйнування запропоновано враховувати адіабатичне знеміцнення та виконувати перевірку одночасно умов в'язкого та крихкого руйнування за критеріями відповідно накопичених руйнувань і максимальних головних напружень у кожному циклі розрахунку напружень з паралельним перебудуванням скінченно-елементної (СЕ) сітки. Визначення границі зон внутрішнього та зовнішнього тертя реалізовано умовою силової конкуренції цих процесів без уточнення координати реалізації зсуву.

6. Виходячи з локального зменшення об'ємної теплоємності, що є результатом утворення великої кількості дефектів у зоні зсуву при значній величині (більше за 0,25) пластичної деформації, вперше запропоновано та обґрунтовано фізичну і математичну моделі деформаційного знеміцнення оброблюваного матеріалу зі збільшенням величини деформації при її високій швидкості. Роль цього явища при утворенні стружки локалізованого зсуву при малих швидкостях різання полягає у формуванні умов завчасної втрати сталості процесом деформування з подальшим адіабатичним розігрівом та локалізацією пластичної деформації.

7. Вперше поставлено та розв'язано проблему впливу похибки визначення вихідних даних на похибку прогнозування показників процесу різання. Доведено, що похибка прогнозування, яка зумовлена невизначеністю вихідних даних, порівнянна з похибкою натурного експерименту. Встановлено, що серед усіх вихідних даних вплив, більший за 5%, на похибку прогнозування показників процесу різання дають похибки визначення границі плинності оброблюваного матеріалу, коефі-

цієнта його теплоємності, параметрів тертя, радіуса округлення різальної кромки, переднього кута та форми задньої поверхні.

Практичне значення одержаних результатів для машинобудівної галузі полягає у формулюванні основних методичних і програмних підходів до створення прогнозуючих моделей процесів різання з використанням стандартних програмних пакетів МСЕ. Створені передумови визначення комплексу термомеханічних властивостей оброблюваного матеріалу та трибологічних властивостей пари оброблюваний-інструментальний матеріал, що можуть використовуватися як вихідні дані при прогнозуючому моделюванні процесів різання. У сукупності все це складає апарат для дослідження в заданих умовах різальних інструментів та технологічних процесів з мінімальним обсягом їх натурних випробувань, наприклад, для експертної оцінки якості стружкоутворення змінних непереточуваних пластин різних виробників, визначення оптимального режиму різання за заданим критерієм тощо.

Результати дослідження впроваджені на ВАТ «Сумське НВО ім. М. В. Фрунзе» (м. Суми) для зменшення часу підготовки виробництва, на АТ «РОТОР» (м. Суми), ТОВ «Насостехкомплект» (м. Суми) для підвищення якості та продуктивності оброблення деталей компресорного обладнання, в Інституті надтвердих матеріалів НАН України (м. Київ), Фізико-технічному інституті НАН Білорусі (м. Мінськ), Інституті верстатів університету Штутгарта (Німеччина) для інтенсифікації досліджень процесів різання.

Результати дисертаційної роботи використано у навчальному процесі на кафедрах технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету, технології машинобудування Запорізького національного технічного університету, технології машинобудування Севастопольського національного технічного університету, технології машинобудування Хмельницького національного університету у курсі «Теорія різання», при виконанні курсових та дипломних робіт.

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: концепція створення моделей і самі 2D- та 3D-моделі процесів різання ортогонального різання інструментами з довільною формою передньої поверхні, обґрунтування планів і програм модельних та натурних експериментів, виконання досліджень, обробка та узагальнення результатів, участь у впровадженні. Постановлення задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем спільно з науковим консультантом та, частково, зі співавторами публікацій.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: IV, V, VI, VII Всеукраїнських конференціях «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї, наука, виробництво» (м. Київ, 2004 р.; м. Суми, 2005 р.; м. Хмельницький, 2006 р.; м. Одеса, 2007 р.);

XIII Міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (м. Харків, 2005 р.); II, VI, VII Міжнародних науково-практичних конференціях “Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку” (м. Краматорськ, 2004, 2008, 2009 рр.); XI, XII та XIII Міжнародних науково-технічних семінарах «Інтерпартнер» (м. Алушта, 2005, 2007, 2008 рр.); V Міжнародній науково-технічній конференції „Процеси механічної обробки, верстати та інструменти” (м. Житомир, 2007 р.); 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations (м. Калабрія, Італія, 2009 р.); Першій міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні технології у газотурбобудуванні» (м. Алушта, 2009 р.); Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених, аспірантів та студентів "Прогресивные направления машино-приборостроительных отраслей и транспорта" (м. Севастополь, 2009 р.); 2nd CIRP International Conference “Process Machine Interactions” (м. Ванкувер, Канада, 2010 р.); розгорнутих наукових семінарах кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету (2004 - 2010 рік), кафедри технології машинобудування Тернопільського державного технічного університету ім. І. Пулюя (2009 р.), кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету (2009 р.), кафедри технології машинобудування Запорізького національного технічного університету (2009 р.), кафедри інтегрованих технологій ім. М. Ф. Семка НТУ «ХПІ» (2009 р.), відділу №20 Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (2009 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 35 наукових публікаціях, з них 24 статті у наукових фахових виданнях ВАК України.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків, 8 додатків, списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації становить 453 сторінки; з них 124 рисунка по тексту, 57 рисунків на 49 окремих сторінках, 31 таблиця по тексту, 25 таблиць на 27 окремих сторінках, 8 додатків на 58 сторінках, список використаних джерел зі 343 найменувань на 29 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об’єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

У **першому розділі** розглянуто проблеми, пов’язані з реалізацією прогноуючого моделювання процесів обробки матеріалів різанням.

Праці видатних вчених, зокрема Є. В. Артамонова, В. Ф. Боброва, С. О. Васіна, А. С. Верещаки, Ю. М. Внукова, А. І. Грабченко, Г. І. Грановського, В. О. Залого, М. М. Зорева, С. А. Клименка, В. С. Кушнера, Т. М. Лолодзе, М. П. Мазура, О. Д. Макарова, М. В. Новикова, Г. О. Оборського, В. О. Остаф’єва, В. М. Подураєва, М. Ф. Полетики, Н. С. Равської, А. Н. Резникова, О. М. Розенберга, О. О. Розерберга, Ю. О. Розенберга, М. Ф. Семка, С. С. Силіна,

Е. J. A. Armarego, P. L. B. Oxley та інших сформували сучасне уявлення про процес різання металів як нестационарний, високонелінійний, термомеханічний процес пружно-пластичного деформування оброблюваного матеріалу попереду різального леза з можливістю в'язкого або крихкого руйнування при постійній зміні області впливу та ковзання на робочих ділянках поверхонь леза різального інструмента під дією надвисоких тисків, швидкостей та температур. Разом з тим відомо, що вчення про різання матеріалів, наукові висновки й узагальнення уявлень про процеси, що відбуваються при різанні, головним чином спираються на емпіричні факти реалізації різання в окремих умовах оброблення, що відображається практично у всіх сучасних моделях різання цілим комплексом припущень, які значно звужують сфери застосування цих моделей на практиці. Такий стан обумовлений складністю експериментального виявлення єдиних закономірностей для різних процесів різання з великою кількістю факторів, які впливають на них, і складністю взаємозв'язків між цими факторами.

Аналіз публікацій показав, що на сучасному рівні розвитку науки про різання матеріалів узагальнення моделей процесу різання вже відбувається шляхом заміни емпіричних залежностей між явищами, що супроводжують процеси деформування та руйнування під час різання, фундаментальними співвідношеннями механіки деформованого твердого тіла. Останніми роками В. С. Кушнером, М. П. Мазуром та їх учнями узагальнено накопичений досвід та розроблено *аналітичні моделі* процесів різання пластичних матеріалів з утворенням зливної стружки з урахуванням температурного та швидкісного факторів через узагальнене рівняння М. А. Зайкова зв'язку границі плинності, деформації, швидкості деформації і температури. Але необхідність геометричних припущень щодо виду і форми стружки, форми зони стружкоутворення та розподілу контактних напружень не дозволяє у цілому узагальнити ці моделі на достатньо широкий діапазон умов різання, у т.ч. на більш високі швидкості різання й інші типи стружки, та розкрити окремі розбіжності у поглядах, які ще існують у даний час в теорії різання. Серед вчених ще й до цього часу немає єдиної думки про характер розподілу контактних нормальних та дотичних напружень на поверхнях леза та їх залежність від умов оброблення. Мають місце різні погляди на трибологічні процеси під час різання, у тому числі про вплив температури на дотичні напруження, роль адгезійної та деформаційної складових. Протиріччя викликають і процеси утворення стружки адіабатичного зсуву, наприклад, при обробці титанових сплавів з малими швидкостями різання, тощо.

Найбільш перспективними є моделі процесу різання, що базуються на *числових методах*, які дають змогу розв'язувати задачу деформування та руйнування зрізаного шару на основі фундаментальних рівнянь термомеханіки деформованого твердого тіла шляхом дискретизації простору. Одним з таких методів є метод скінченних елементів. Саме за рахунок реалізації цього методу можна виключити геометричні припущення аналітичних моделей, хоча й за рахунок збільшення часу розрахунку. Зважаючи на це, саме методом скінченних елементів Ю. В. Віноградовим, С. А. Крижановським, С. С. Ковальчуком,

М. П. Мазуром, О. А. Мясіщевим, В. О. Остаф'євим, А. Є. Родигіною, Т. Altan, Т. С. Н. Childs, S. Hoppe, F. Klocke, J. Leopold, F. Linares, T. D. Marusich, M. Monno, T. Obikawa, T. Ozel, A. J. Shih, J. S. Strenkovski, Y. C. Yen, E. Zeren, P. Zeng та іншими реалізовані моделі різних процесів різання сталей та сплавів, у тому числі титанових, та розроблено методики розрахунку форми стружки, напружено-деформованого та теплового стану в стружці та лезі, сили різання при високих та надвисоких швидкостях різання, досліджено вплив радіуса округлення різального леза, формування деформаційної складової мікронерівностей обробленої поверхні, динамічної міцності лез переважно при квазістационарних видах оброблення, спираючись в тій чи іншій мірі, на дані про вид стружки, її усадку, розподіл контактних напружень, середній коефіцієнт тертя, отримані з експерименту з різання. Отже все ще не розроблено методологій модельних досліджень, для реалізації яких не потрібно проводити попередні експерименти безпосередньо з різання в тих умовах, що моделюються. Головними перешкодами у цьому є недосконалість уявлень про деформаційні та трибологічні процеси при різанні, що не дозволяє спрогнозувати деформаційну складову сил тертя у фундаментальних термінах теорії пластичності, відсутність надійних експериментальних методів визначення адгезійної складової сил тертя; недостатньо глибоке врахування термомеханічних властивостей оброблюваного матеріалу; обмежені уявлення про джерела похибок прогнозу показників процесу різання тощо. Крім того, і сама реалізація МСЕ у тому трактуванні, яке сьогодні найчастіше використовується для моделювання процесів різання, потребує модернізації.

На підставі проведеного аналізу сформульовано задачі досліджень та напрями їх розв'язання.

Другий розділ присвячено розробленню загальної методології прогнозуючого моделювання процесів різання та, на її основі, 2D- та 3D-термомеханічних моделей процесу стружкоутворення при ортогональному різанні, удосконаленню обчислювальних процедур та програмного забезпечення.

Проведено аналіз задач, які характерні для виробничого процесу. Серед задач теорії різання, що вирішують технічні аспекти підвищення ефективності виробництва, виділені такі, що можуть бути розв'язані шляхом моделювання. Для них в роботі запропоновано створення прогнозуючих моделей в залежності від розмірів характерного елемента досліджуваної системи. Виділено п'ять рівнів деталізації моделей процесу різання (рис. 1): чим менший розмір його характерного елемента, тим більш детально (як геометрично, так і фізично) повинна бути модель процесу оброблення. Від рівня деталізації задачі залежать час обчислень і складність моделі, у тому числі і при використанні МСЕ для розв'язання визначальної системи рівнянь. Доказано, що час обчислень можна істотно скоротити за рахунок вирівнювання характерних розмірів досліджуваних об'єктів із розмірами СЕ, необхідних для моделювання.

Система різання, що моделюється, в роботі подана у вигляді двох об'єктів (заготовка (З) або її частина та інструмент (І) або його частина), певним чином орієнтованих у просторі один відносно одного і взаємодіючих один з одним. Ці об'єкти здійснюють відносні рухи зі швидкостями різання і подачі. Об'єкти взаємодіють між собою по контактних поверхнях, створюючи

один в одному деформації за рахунок дії контактних сил, обумовлених заданою моделлю тертя на відповідних ділянках контактних поверхонь. Кожний об'єкт чинить опір деформації, у результаті чого виникають внутрішні сили (напруження) відповідно до заданої моделі матеріалу об'єкта. Разом з тим якщо міцність об'єкта недостатня, то відбувається його руйнування. Критерій та схема руйнування задаються моделлю цього процесу. Вплив температури на деформації відбувається шляхом зміни механічних властивостей оброблюваного матеріалу та трибологічних властивостей на контактній ділянці інструменту. В силу малості, пружні деформації заготовки, що виникають внаслідок лінійного температурного розширення, в моделі не враховуються.

Грунтуючись на описаних уявленнях запропонована й обґрунтована нова концепція прогнозування показників робочих процесів різання у заданих умовах, у тому числі виду, форми та розмірів стружки, яка передбачає моделювання стружкоутворення виходячи з фундаментальних законів та рівнянь у загальному вигляді у прямокутній декартовій системі координат. Розв'язуюча система містить наступні рівняння:

1. Диференційні рівняння руху

$$\rho \ddot{u}_i = \rho f_i + \sigma_{ij,j}, \quad i = 1, 2, 3, \quad j = 1, 2, 3; \quad (1)$$

2. Результируюча сила $f = f_{load} + f_{contact} - I$;

3. Зв'язок прискорень \ddot{u}_i зі швидкостями переміщень \dot{u}_i та переміщеннями u_i

$$\dot{u}_i = \int \ddot{u}_i d\tau; \quad u_i = \int \dot{u}_i d\tau; \quad (2)$$

4. Зв'язок швидкостей деформацій $\dot{\epsilon}_{ij}$ зі швидкостями переміщень

II

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{d\dot{u}_i}{dx_j} + \frac{d\dot{u}_j}{dx_i} \right); \quad (3)$$

5. Рівняння нерозривності

$$\rho = \rho_0 \det(F); \quad (4)$$

6. Зв'язок приросту повних деформацій зі швидкостями деформацій

$$d\varepsilon_i = \dot{\varepsilon}_i d\tau; \quad (5)$$

7. Зв'язок приросту повних деформацій з приростами пластичних та пружних деформацій

$$d\varepsilon_i = d\varepsilon_i^e + d\varepsilon_i^p; \quad (6)$$

8. Рівняння зв'язку напружень з деформаціями

$$p = K \left(1 / \det(F) - 1 \right); \quad s_{ij} = C^e \left(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p \right); \quad (7)$$

9. Умова пластичності з урахуванням визначального рівняння (2)

$$\Phi = \bar{\sigma} - \sigma_s \left(\bar{\varepsilon}^p, \dot{\bar{\varepsilon}}^p, T \right) = 0; \quad (8)$$

10. Умова навантаження-розвантаження Куна-Такера

$$\dot{\lambda} \geq 0, \Phi \leq 0, \dot{\lambda}\Phi = 0, \dot{\lambda}_{ij} = \dot{\bar{\varepsilon}}^p \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}}; \quad (9)$$

11. Зв'язок компонент напружень та деформацій

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}; \quad \sigma_{ij} = s_{ij} - \frac{1}{3} tr(p); \quad \dot{\bar{\varepsilon}} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p}, \quad \bar{\varepsilon}^p = \int \dot{\bar{\varepsilon}}^p d\tau; \quad (10)$$

12. Умова руйнування $D = \sum \frac{\Delta \bar{\varepsilon}^p}{\bar{\varepsilon}_f^p \left(p / \sigma_s, \dot{\bar{\varepsilon}}^p, T \right)} \geq 1$;

13. Рівняння теплопровідності

$$\rho C_m \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \eta \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p, \quad (11)$$

або рівняння адиабатичного розігріву

$$\dot{T} = \eta \frac{\sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p}{\rho C_m}, \text{ якщо } \frac{\lambda_T}{\rho C_m} \frac{h K_L}{V} (1 - \alpha) \leq 0.5 L_e^2 - \int_0^{L_e} r \operatorname{erf} \left(\frac{r}{2\sqrt{\omega\tau}} \right) dr. \quad (12)$$

У наведених рівнях прийняті такі умовні позначення: τ - час; T - температура; F - градієнт руху; u_i - вектор переміщень; x_i - вектор координат; σ_{ij} - тензор напружень; s_{ij} - девиатор напружень; ρ - густина; p - гідростатичний тиск (додатний при стисканні); C^e - тензор пружних коефіцієнтів; ε_{ij} - тензор деформацій; f_{load} - щільність зовнішніх сил; $f_{contact}$ - щільність сил на контактній границі тіла; f_i - щільність об'ємних сил; I - щільність внутрішніх сил; h - розмір зони первинних деформацій; K_L - коефіцієнт укорочення стружки, V - швидкість різання; η - доля механічної роботи, що перетворюється у теплоту; параметри матеріалів: ρ_0 - початкова густина; λ_T - теплопровідність; C_m - масова теплоємність.

Початкові умови задаються наступним чином: $\tau = 0$; $\forall M \in I \cup \mathcal{C}$
 $x_i^0 = x_i^0(M)$; $\sigma_{ij}^0(M) = 0$; $\rho_0 = \rho_0(M)$; $\varepsilon_{ij}^0(M) = 0$, $\bar{\varepsilon}^p = 0$, $T_0(M) = T_c$.

Граничні умови: на внутрішніх границях заготовки $\Sigma_{\mathcal{C}_\infty}$ $\forall M \in \Sigma_{\mathcal{C}_\infty}$
 $u_i(M) = 0$, $T(M) = T_c$ та інструмента Σ_{z_∞} $\forall M \in \Sigma_{z_\infty}$ $\dot{u}_i(M) = V_i(\tau)$,
 $T(M) = T_c$, на вільних границях заготовки $\Sigma_{\mathcal{C}_{-\dot{a}\dot{v}\dot{e}}}$ та інструмента
 $\Sigma_{I_{-\dot{a}\dot{v}\dot{e}}}$: $\forall M \in \Sigma_{\mathcal{C}_{-\dot{a}\dot{v}\dot{e}}} \cup \Sigma_{I_{-\dot{a}\dot{v}\dot{e}}}$ $\sigma_{ij}|_M \cdot n_i = 0$, $-\lambda_T \left(\frac{dT}{dn} \right)_M = \alpha_T (T - T_c)$, де α_T - кое-
фіцієнт тепловіддачі.

На контактній поверхні $\Sigma_{\mathcal{C}}$, що є геометрично спільною частиною пове-
рхонь заготовки $\Sigma_{\mathcal{C}}$ та інструмента Σ_z , тобто $\Sigma_{\mathcal{C}} \in \Sigma_z \cap \Sigma_{\mathcal{C}}$: $\forall M \in \Sigma_{\mathcal{C}}$

$$\dot{g} = (\dot{u}_i)_{\Sigma_{\mathcal{C}}} n_i - (\dot{u}_i)_{\Sigma_z} n_i; \quad \sigma_n \leq 0; \quad \dot{g} \geq 0; \quad \sigma_n \cdot \dot{g} = 0; \quad \frac{q_{\Sigma_{\mathcal{C}}}}{q_{\Sigma_z}} = \frac{\sqrt{\lambda_{\mathcal{C}} c_{\mathcal{C}} \rho_{\mathcal{C}}}}{\sqrt{\lambda_z c_z \rho_z}};$$

$q_M R^* = T_{\Sigma_{\mathcal{C}}} - T_{\Sigma_z}$; $q_I = \tau_n V_c - (q_{\Sigma_{\mathcal{C}}} + q_{\Sigma_z})$, де σ_n - контактні нормальні напру-
ження, $V_c = \left| \dot{u}_i|_{\Sigma_z} - \dot{u}_i|_{\Sigma_{\mathcal{C}}} \right|$, дотичні напруження τ_n - за розділом 5; умова схоп-
лення за формулою (7); на границі, між зонами схоплення $\Sigma_v \in M$ та ковзання
 $\Sigma_\tau \in M$ $\sigma_{ij}|_{\Sigma_v} = \sigma_{ij}|_{\Sigma_\tau}$; $\dot{u}_i|_{\Sigma_v} = \dot{u}_i|_{\Sigma_\tau}$; у зоні схоплення $\forall G \in \Sigma_v$ $\dot{u}_i|_{\Sigma_v} = \dot{u}_i|_{\Sigma_{\mathcal{C}}}$.

Розв'язання цієї визначальної системи рівнянь в роботі виконано методом
скінченних елементів з інтегруванням за часом явним методом за допомогою
розв'язувача LS-DYNA компанії LSTC. Крок інтегрування за часом залежить від
рівня деталізації задачі (розміру скінченного елемента) та модуля пружності об-
роблюваного матеріалу. Так, для випадку моделювання ортогонального різання
сталей прийнято крок інтегрування від 1 до 10 нс. Цим забезпечується числова
сталість обчислювальних процедур при нормальній формі скінченних елементів.
Для зменшення спотворення скінченних елементів у роботі запропоновано та
реалізовано алгоритм періодичної перебудови SE-сітки.

Враховуючи те, що розв'язувач LS-DYNA не реалізує необхідних моделей
матеріалу (визначальних рівнянь), алгоритмів руйнування, моделей розрахунку сил
тертя та теплових граничних умов, для розв'язання 3D-моделей на рівні деталізації
«Інструмент» було у головну обчислювану процедуру імплементовано користува-
цькі процедури розрахунку напружень в елементі та сил тертя на контактній повер-
хні (див. розділ 4). Додатково розв'язувач було адаптовано для моделювання орто-
гонального різання у 2D-просторі (рівень деталізації «Лезо») шляхом реалізації зов-
нішнього обчислювального циклу у розробленій програмі OCFEM. У цьому зовні-
шньому обчислювальному циклі реалізовано контроль за руйнуванням, якістю скін-
ченно-елементної сітки, граничними умовами та силами тертя.

Запропоновано об'єктно-орієнтований підхід до побудови моделей про-
цесу різання. Кожний об'єкт системи різання є матеріальним тілом, яке харак-

теризується геометричними розмірами і формою, теплофізичними властивостями матеріалу і властивостями контактної взаємодії з іншим тілами. У загальному випадку для кожного об'єкта повинні бути задані такі дані: геометричні розміри і форма об'єктів через їх СЕ-сітку; механічні і теплофізичні властивості через параметри моделей матеріалу і руйнування (див. розд. 3); властивості контактної взаємодії через модель тертя (див. розд. 4).

У *третьому розділі* наведені методологічні основи експериментального визначення кількісних показників (ідентифікації) фізико-термомеханічних властивостей (моделі) оброблюваного та інструментального матеріалів. Доведено, що комплекс фізико-термомеханічних властивостей матеріалів тіл системи різання складається з визначального рівняння, рівняння стану та рівняння пластичності, рівнянь залежності від температури густини, теплоємності та теплопровідності оброблюваного та інструментального матеріалів.

Встановлено, що найбільш ефективним з точки зору співвідношення «похибка»/«швидкість розрахунку» є визначальне рівняння у формі Джонсона-Кука:

$$\sigma_s = \left(A + B(\bar{\varepsilon}^p)^n \right) \left(1 + C \ln \left(\dot{\bar{\varepsilon}}^p / \dot{\bar{\varepsilon}}_0^p \right) \right) (1 - T^{*m}), \quad (13)$$

де константи матеріалу відображають його здатність: A, B, n - до деформаційного зміцнення; C - до швидкісного зміцнення; m - до температурного зменшення.

За рівняння пластичності, яке зумовлює критерій в'язкого руйнування за умовою накопичення пошкоджень, взято рівняння у формі В. Л. Колмогорова з поправками Джонсона-Кука на швидкість та температуру деформації:

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_f^p &= (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + D_4 \ln \dot{\bar{\varepsilon}}) (1 + D_5 T^*), \\ \sigma^* &= p / \sigma_s, T^* = (T - T_0) / (T_{i\bar{\varepsilon}} - T_0), \end{aligned} \quad (14)$$

де константи D_1, D_2, D_3 матеріалу відображають вплив напруженого стану на граничні пластичні деформації до руйнування; D_4 - вплив швидкості деформації; D_5 - вплив температури деформації.

Умову крихкого руйнування використано у вигляді рівняння першої теорії міцності, тобто $\sigma_1 = \sigma_{\max}$, де σ_{\max} є константою матеріалу.

З аналізу відомих даних про вплив температури на густину ρ , теплоємність C_V та теплопровідність λ матеріалів показано, що ці взаємозв'язки апроксимуються поліномом другого ступеня з похибкою у межах 11%.

Таким чином у загальному випадку моделювання процесу різання на рівні деталізації «Лезо», крім пружних властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів E та μ , необхідне визначення ще 11 констант фізико-термомеханічних властивостей ($A, B, n, C, m, D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, \sigma_{\max}$) та трьох рівнянь-поліномів ($\rho = \rho(T), C_m = C_m(T), \lambda = \lambda(T)$), що визначають нелінійні фізико-термомеханічні властивості цих матеріалів. Методи визначення цих констант повинні бути розроблені для того, щоб врахувати одночасне існування

великих деформацій, швидкостей деформацій та температур, що достатньою для моделювання мірою не враховується в жодній із відомих методик.

Для досліджень механічних властивостей матеріалів при температурах до 900°C у науково-дослідній лабораторії механічних випробувань Сумського державного університету розроблено експериментальну установку (рис. 2) шляхом модернізації та оснащення стандартної машини УМЭ-10М сучасними вимірювальними приладами (тензометричним динамометром з температурною компенсацією та роздільною здатністю 24bit, незалежним контролером температури, оптичним датчиком лінійних переміщень траверси з дискретністю 10 мкм, ПЕОМ для автоматизованої обробки результатів) та додатковими захватами для зразків спеціальної форми.

Для знаходження констант A, B, n, C, m та D_1, D_2, D_3, D_4, D_5 визначально-го рівняння в роботі розроблені спеціальні методики та алгоритми експериментальних випробувань та обробки результатів.

На практиці часто бувають відомі лише стандартні механічні характеристики матеріалу $\sigma_{0.2}, \sigma_b, \delta, \psi_K$, обумовлені ГОСТ 1497-84. Тому в роботі для першого наближення для металів запропонована методика знаходження констант визначального рівняння за цими показниками.

Розв'язуючи систему рівнянь методом Ньютона відносно $A, B, n, \varepsilon_\phi^p$, знаходять невідомі константи визначального рівняння:

$$\begin{cases} \sigma_{0.2} (1 + 0.002) = A + B(0.002)^n, \\ Bn(\varepsilon_\phi^p)^{n-1} (1 + \varepsilon_\phi^p) = A + B(\varepsilon_\phi^p)^n, \\ Bn(\varepsilon_\phi^p)^{n-1} = \sigma_a, \\ A + B\left(\frac{\psi_K}{1 - \psi_K}\right)^n = \begin{cases} \sigma_a (1 + 1.35\psi_E) \text{ і } \delta \text{ є } \psi_B \leq 15\%, \\ \sigma_a (0.8 + 2.06\psi_E) \text{ і } \delta \text{ є } \psi_B > 15\%. \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

Аналіз отриманих результатів показує, що для всіх конструкційних матеріалів похибка прогнозування твердості шляхом віртуального вдавлювання сферичного індентора відповідно до ГОСТ 9012-59 за знайденими константами визначального рівняння не перевищує 21%. Разом з тим існує екстремальна залежність між твердістю матеріалу й похибкою прогнозування цієї твердості: мінімальна похибка (близько 15%) має місце в діапазоні твердості від 2000 до 5000 МПа, що обумовлене мінімальною похибкою апроксимації визначального рівняння.

Як приклади реалізації розроблених методик та алгоритмів наведені отримані константи визначального рівняння та рівняння пластичності для декількох матеріалів (табл.1) з різними кристалічними ґратами.

Таблиця 1

Зведена таблиця коефіцієнтів визначального рівняння і рівняння пластичності

Матеріал	A, МПа	B, МПа	n	C	m	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
Сталь 45 (HB 140)	410	280	0,47	0,0037	1,1	0	1,3	-0,17	0,063	2,8
Сталь 12X18H10T(HB160)	280	1215	0,43	0,0310	1,0	0	1,15	-0,1	-0,015	-0,5
Сплав ВТ22 (HRC41)	845	660	0,08	-0,024	1,20	0	0,1	-0,53	0,134	22,9
Сплав ВТ1-0 (HB160)	120	895	0,39	0,0066	0,85	0	2,5	-0,4	0	4,5

У *четвертому розділі* наведені результати дослідження адгезійних властивостей пари «оброблюваний-інструментальний» матеріал та методологічні основи їх ідентифікації з експерименту. Доведено, що комплекс трибологічних властивостей матеріалів, що перебувають у процесі різання у контактній взаємодії, складається з рівнянь, що зв'язують температуру і нормальні напруження на контактній поверхні з дотичними напруженнями. Виходячи з прийнятої згідно з молекулярно-механічною теорією, моделі тертя, співвідношення між дотичними напруженнями τ_i та показниками термомеханічного стану використані у вигляді:

$$\tau_i = \tau_a + \tau_d, \quad \tau_d = \mu_d \sigma_n, \quad \tau_a = \tau_0 + (\beta_0 - k_b \cdot \max(0; T - T_k)) \cdot \sigma_{nr}, \quad (16)$$

де τ_a – дотичні напруження адгезійного опору ковзанню; τ_d – дотичні напруження деформаційного опору ковзанню; σ_n , σ_{nr} – номінальні та фактичні нормальні напруження. Константи τ_0 (міцність адгезійних зв'язків), β_0 (коефіцієнт зміцнення адгезійних зв'язків), k_b , T_k є властивостями пари «оброблюваний-інструментальний» матеріал та відображають вплив температури та нормальних напружень на адгезійну складову сил тертя, а константа μ_d – деформаційний коефіцієнт тертя – мікрорельєфу поверхні інструмента, пружних властивостей матеріалів системи та деформованого стану оброблюваного матеріалу на деформаційну складову сил тертя.

У загальному випадку моделювання процесу різання на рівні деталізації «Лезо» повинні бути додатково визначені 5 констант (τ_0 , β_0 , k_b , T_k , μ_d), що відображають трибологічні властивості контактуючої пари. У першому наближенні константи k_b і T_k впливу температури в роботі запропоновано визначати за наближеними формулами $T_k \approx 700$ °С, $k_b \approx \beta_0 / 300$. Результати досліджень Л. Ш. Шустера, В. Л. Коротченка для різних металів свідчать про незначну зміну τ_0 (20-50 МПа) та β_0 (0,02-0,05) до температури 700°С. Ці коливання, швидше за все, пов'язані з похибкою вимірювань.

Для визначення констант τ_0 , β_0 рівняння (16) в роботі розроблені методика та алгоритм експериментальних досліджень визначення параметрів тертя при ковзанні в умовах високих тисків за допомогою адгезіометра оригінальної конструкції (рис.3), що дозволяє визначити силу опору ковзанню за схемою занурення сферичного індентора при його обертанні. На відміну від відомих експериментальних досліджень Ю. М. Внукова, В. Л. Коротченка, О. Д. Макарова, Л. Ш. Шустера та інших дослідників розроблена методика

реалізує більш близькі до різання умови випробувань за рахунок забезпечення стабілізації мікрорельєфу та величини зміцнення контактних поверхонь за жорсткої схеми навантаження індентора при значному (10-30 обертів індентора) шляху тертя з малою відносною швидкістю ковзання. Урахування дійсного розподілу контактних напружень та величини деформаційної складової сили опору ковзанню забезпечило визначення лінійної моделі саме адгезійної складової тертя для чотирьох металів різних груп (табл. 2).

Таблиця 2

Параметри моделі адгезійної складової сили тертя ковзання різних матеріалів з індентором ВК8

Коефіцієнт	Матеріал			
	сталь 45	сталь 12X18H10T	ВТ22	ВТ1-0
$\bar{\sigma}_s$, МПа	800	600	805	620
τ_0 , МПа	5	0	20	30
β_0	0,46	0,47	0,32	0,13

У *п'ятому розділі* на основі моделювання процесу ортогонального різання виконано модельні дослідження явищ тертя на контактних поверхнях леза та процесу пружно-пластичного деформування в умовах високих швидкостей різання.

Процес тертя на контактних поверхнях різального леза розглядався, виходячи з молекулярно-механічної теорії. Вважалося, що в загальному випадку зсув може відбуватися як на границі поділу інструмента та стружки (зовнішнє тертя), так і в приконтактній поверхні стружки (внутрішнє тертя). Відносна швидкість ковзання V_c та дотичні контактні напруження τ визначають механізм тертя на контактній поверхні $\Sigma_{\mathcal{E}}$

(17)

де τ_{\max} - максимальні дотичні напруження опору ковзанню в заданій точці різальної кромки на контактній поверхні.

У роботі доведено, що реалізацію описаного закону тертя слід виконувати залежно від рівня деталізації моделі процесу різання (рис. 4):

- на рівні деталізації «Лезо» - $\tau_{\max} = \tau_i(\sigma_n, \varepsilon^p, V_c, T)$ що відображає зовнішнє тертя на поверхні $\Sigma_{\mathcal{E}}$ з одночасним передбаченням скінченних елементів з характерним розміром близько 2мкм на контактній поверхні для моделювання внутрішнього тертя у приконтактному шарі стружки;
- на рівні деталізації «Інструмент» - $\tau_{\max} = \min(m\sigma_s(\bar{\varepsilon}^p, \dot{\varepsilon}^p, T); \tau_i(\sigma_n, \bar{\varepsilon}^p, V_c, T))$ що відображає конкуренцію

Рис. 4. Зона вторинних деформацій залежно від розміру скінченного елемента

внутрішнього та зовнішнього тертя на поверхні Σ_{σ} без уточнення місця реалізації зсуву.

Відомо, що сила тертя складається з сил опору деформації поверхневих шарів тіл та сил адгезійного зчеплення (див. формулу (16)). Якщо сила адгезійного зчеплення є функцією лише фізико-хімічних властивостей пари контактуючих тіл та умов контактування, то деформаційна складова за результатами досліджень І. В. Крагельського, А. Г. Сулова, М. М. Міхіна, М. Б. Демкіна, Е. В. Риждова, Т. Н. С. Childs та інших залежить від мікрорельєфу поверхні лева, напружено-деформованого стану приконтактних поверхонь стружки та лева, фактичної площі їх контакту тощо. Разом з тим опубліковані теоретичні залежності для визначення деформаційної складової коефіцієнта зовнішнього тертя мають значну складність та враховують термомеханічний стан поверхонь контакту через їх мікротвердість і мають емпіричні коефіцієнти. Це робить неможливим застосування цих залежностей в прогнозуючих моделях процесів різання, що створені на основі методу скінчених елементів, бо для цього необхідні залежності відносно фундаментальних характеристик термомеханічного стану поверхонь контакту, адекватні у широкому діапазоні умовам контакту.

Для створення залежності деформаційної складової сил тертя в парі «оброблюваний-інструментальний» матеріали від різних факторів використано скінченно-елементну модель системи двох тіл, названих за властивостями «заготовка» та «інструмент», що переміщуються одне відносно іншого з постійною швидкістю в умовах безперервного стискання постійною силою (м'яке навантаження) (рис. 5) або з постійним зближенням (жорстке навантаження). «Заготовка» взята абсолютно рівною, у той час як мікрорельєф «інструмента» задавався відповідно до такої моделі: де M_S – математичне сподівання випадкової висоти мікронерівностей; D_S – дисперсія відхилення випадкової висоти мікронерівностей.

Проведені дослідження в діапазонах параметрів моделі: $E_{\text{заг}}$ від 100 до 400 ГПа, $\sigma_{0,2}$ від 250 до 1000 МПа, Ra від 0,4 до 1,6 мкм, t_m від 30 до 70%, σ_n від 85 до 850 МПа при $E_{\text{інстр}} = 560$ ГПа $S_m = 20$ мкм виявили, що при співвідношенні $\sigma_n/\sigma_S(\epsilon_p=0) > 0,5$ форма контактної поверхні «заготовки» за рахунок її пластичної деформації та зміцнення мікронерівностями «інструмента» повністю змінюється (рис. 6) при їх

відносному ковзанні вже на шляху декількох десятків мікрометрів. Тобто відбувається адаптація поверхні заготовки до умов ковзання. Максимальний шлях, який необхідний для завершення цієї адаптації, у проведених випробуваннях становив 60 мкм. Під час адаптації поверхні величина накопичених пластичних деформацій постійно збільшується та досягає після завершення адаптації рівноважної величини, що забезпечує достатню міцність поверхні «заготовки» для опору проникненню в неї мікронерівностей «інструмента».

Аналіз впливу різних факторів показав, що існує пряма кореляція коефіцієнта деформаційної складової зовнішнього тертя μ_d лише з відношенням фактичних напружень σ_{nr} на контактній поверхні до фактичної границі плинності матеріалу поверхні заготовки (рис. 7), що дозволяє з задовільною похибкою визначити μ_d з емпіричного співвідношення, що отримано методом найменших квадратів (МНК):

$$\mu_d = 0,150 \left(\sigma_{nr} / \sigma_s (\bar{\varepsilon}_p, \dot{\varepsilon}_p, T) \right)^{2,3}. \quad (18)$$

Відомо, що фактичні нормальні напруження σ_{nr} визначаються як $\sigma_{nr} = \sigma_n / K_r$, де $K_r = A_r / A_0$. Проведені дослідження показали, що зі всіх можливих параметрів контактної пари коефіцієнт K_r корелює лише зі зведеним модулем пружності

$$E^* = \left(\frac{1 - \nu_{i\bar{n}o}^2}{E_{i\bar{n}o} \partial \bar{\alpha} \partial \bar{\alpha} \partial \bar{\alpha}} + \frac{1 - \nu_{\bar{c}a\bar{c}a}^2}{E_{\bar{c}a\bar{c}a} \partial \bar{i} \partial \bar{e} \partial \bar{e}} \right)^{-1}, \quad (19)$$

зі співвідношенням $\sigma_n / \sigma_s (\bar{\varepsilon}_p, \dot{\varepsilon}_p, T)$, найбільшою висотою виступів (висотою згладжування) R_p та відносною опорною довжиною на висоті середньої лінії t_m . Апроксимація цих залежностей МНК дозволила встановити співвідношення для визначення коефіцієнта K_r :

$$K_r = \frac{A_r}{A_0} \approx 1 - e^{-c_r \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_s}}, \quad (20)$$

де $c_r = 0,33 \left(\frac{E^*}{E_0^*} \right)^{-0,4} \left(\frac{\ln(R_p / R_{p0})}{\ln(t_m / 100\%)} + 4,0 \right)$ при $R_{\theta 0} = 1$ мкм та $E_0^* = 163$ ГПа для

досліджуваних умов взаємодії сталі з твердим сплавом. Перевірка формули (20) показала, що для умов великих нормальних напружень на контактній ділянці передньої поверхні леза середнє квадратичне відхилення прогнозу K_r у діапазоні K_r від 0,05 до 0,8 становить 0,054, що свідчить про достатню високу точність оцінки K_r при великих його значеннях.

Аналіз формул (18) та (20) показує, що зі збільшенням ступеня зміцнення контактної поверхні «заготовки» за інших рівних умов фактична площа контакту буде зменшуватися, а отже, будуть зростати фактичні нормальні напруження та коефіцієнт μ_d . При зменшенні поверхневого шару «заготовки» слід очікува-

Рис. 9. Вплив параметрів моделі тертя (μ і τ_s) на середній коефіцієнт тертя $\bar{\mu}$ при ортогональному різанні сталі 12X18H10T

ти зворотного процесу. Саме це пояснює зміну ролі деформаційної складової у сумарній силі тертя на контактній поверхні леза при підвищенні температури різання (рис. 8 а). Шляхом моделювання процесу стружкоутворення встановлено, що при підвищенні температури на поверхні контакту частка деформаційної складової сили тертя зменшується, а адгезійної зростає, що пояснює відоме збільшення коефіцієнта тертя зі збільшенням швидкості різання в тому діапазоні швидкостей різання, де утворюється наріст.

Зростання частки адгезійної складової також можливе зі зменшенням нормальних контактних напружень, що, як відомо, відбувається при віддаленні від різальної кромки. А оскільки адгезійна складова існує навіть при нульових нормальних напруженнях, то саме цим можна пояснити ненульове значення миттєвого коефіцієнта тертя в точці відриву стружки від передньої поверхні (рис. 8б). Більше того, характер зміни цього коефіцієнта тертя та епюри контактних напружень вздовж передньої поверхні залежать значною мірою від значень параметрів τ_0 та β_0 моделі адгезійної складової сили тертя (16). Встановлено, що зі збільшенням τ_0 суттєво зростає значення коефіцієнта тертя в точці відриву стружки від передньої поверхні, але незначно збільшуються довжина контакту та форма епюр контактних напружень. Зі збільшенням β_0 значно збільшується довжина контакту, нормальні та дотичні напруження концентруються біля різальної кромки, але збільшується швидкість зростання коефіцієнта тертя з віддаленням від різальної кромки.

Модель ортогонального різання може бути застосована для визначення середнього коефіцієнта тертя $\bar{\mu}$ на контактних поверхнях різального інструмента без виконання натурних досліджень процесу різання. Так, проведені розрахунки з моделювання оброблення сталі 45 у можливому діапазоні параметрів моделі тертя - $\mu = \tau_i / \sigma_N \in [0; 1]$, $\tau_s = m\sigma_D \in [0; 2000]$ дозволили встановити залежність від цих параметрів середнього коефіцієнта тертя $\bar{\mu}$ (рис. 9) та визначити, що максимальне значення $\bar{\mu}$ становить 0,7 при $\tau_s = 2000$ МПа. Враховуючи, границю пластичності сталі 45 при температурі різання 300-600°C, спрогнозовано, що імовірно значення $\bar{\mu}$ буде перебувати в діапазоні 0,5-0,6. Проведені експериментальні дослідження з точіння цієї сталі інструментом з ВК8 у діапазоні швидкостей від 20 до 70 м/хв показали, що середній коефіцієнт тертя у цьому діапазоні швидкостей становить 0,61, що відповідає спрогнозованим значенням.

З метою вирішення проблеми прогнозування стружки адіабатичного зсуву, що утворюється при обробці деяких матеріалів, наприклад титанових сплавів, було досліджено причини втрати сталості процесу пластичного деформування. Зважаючи на те що навіть при швидкостях 10-20 м/хв швидкість деформації може становити $10^2 - 10^3 \text{ c}^{-1}$, адіабатичне підвищення температури

та відповідне зменшення оброблюваного матеріалу можуть стати причиною втрати сталості процесу пластичного деформування

$$T_{ad} = \int_0^{\tau} \frac{\sigma_s \dot{\varepsilon}_p}{C_V} d\tau. \quad (21)$$

Аналіз фундаментальних робіт з питань фізики та термодинаміки твердих тіл показав, що об'ємна теплоємність $C_V = C_m \rho$ тіла, що деформується, залежить від умов, за яких вона визначається, і не тільки збільшується зі збільшенням температури, але й суттєво зменшується зі зростанням пластичних деформацій внаслідок утворення пор та дислокацій. Отже, зменшення об'ємної теплоємності при високих швидкостях деформації призводить до підвищення швидкості збільшення температури та завчасної втрати сталості деформування. Виходячи з такого якісного опису, в роботі запропоновано визначити об'ємну теплоємність при заданій деформації, у тому числі зсуву, виразом

$$C_{V\delta}(T) = C_{V\varepsilon_p=0}(T) / (1 + g \cdot \varepsilon_p), \quad (22)$$

де g - константа, що близька за значенням до одиниці. Проведені модельні експерименти зі стандартних випробувань показали, що описаний процес дійсно сприяє деформаційному зменщенню зі збільшенням швидкості деформації навіть при деформаціях зсуву. Моделювання процесу різання титанового сплаву ВТ6 (Ti6Al4V) за допомогою програми LS-DYNA з модифікованими у роботі процедурами розрахунку напружень в елементі за моделлю Джонсона-Кука підтвердило, що зменшення об'ємної теплоємності при високих швидкостях деформації призводить до втрати сталості пластичної деформації в зоні зсуву під час різання навіть при невеликих швидкостях різання (рис. 10).

У *шостому розділі* виконано аналіз проблем практичної реалізації розроблених прогнозуючих скінченно-елементних моделей та запропоновані принципи їх практичного застосування для дослідження та оптимізації робочих процесів різання.

У роботі систематизовано джерела похибок при прогнозуючому моделюванні процесу різання та, враховуючи необхідність забезпечення достовірності моделі у широкому діапазоні режимів різання, запропоновано три критерії її оцінки: 1) критерій коректності, який передбачає доведення наявності розв'язку, його єдиності та сталості; 2) критерій якісної адекватності, який передбачає доведення відповідності експерименту загальних тенденцій зміни досліджуваних показників процесу; 3) критерій кількісної адекватності, який передбачає доведення кількісної відповідності досліджуваних показників процесу в окремих точках області визначення моделі при заданому рівні значущості.

На виконання першого критерію в роботі доведена сталість моделі ортогонального різання за 21 фактором $x_i \in \{V, a, \gamma, \rho, h_s, \alpha, E_i, \nu_i, C_{mi}, \lambda_i, A, B, n, C, m, E_s, \nu_s, C_{ms}, \lambda_s, \varepsilon_p, \mu\}$ та за 3 показниками $\mathcal{R} \in \{P_z, P_y, T\}$ за критерієм зменшення приросту обчисленого показника зі зменшенням приросту вхідних факторів.

Критерій якісної адекватності в роботі сформульовано у вигляді критерію підтвердження гіпотези про значущість коефіцієнта кореляції. Відповідність моделі процесу ортогонального різання критерію якісної адекватності в роботі продемонстрована шляхом дослідження впливу кута дії ω зі значеннями від 15° до 20° , переднього кута γ - від 0 до 50° , швидкості різання V - від 1 до 600 м/хв, міцності оброблюваного матеріалу - від 200 до 1400 МПа та відносного подовження – від 8% до 55% . У роботі проведені порівняння отриманих результатів із відомими результатами експериментальних досліджень М. М. Зорева з ортогонального різання сталі 20Х, міді та інших матеріалів. Мінімальна величина коефіцієнта кореляції з усіх випробувань становила $0,87$, яка значно перевищувала критичне значення при рівні значущості $0,05$.

Важливим показником процесу різання є форма стружки. Якісна адекватність за цим показником може бути оцінена шляхом порівняння фотографій спрогнозованої і отриманої з експерименту стружок. Таке порівняння для ортогонального різання наведено на рис. 11.

Чавун, $V=3$ м/с, $a=0,15$ мм Сталь 45, $a=0,15$ мм, $V=5$ м/с Сталь 45, $a=0,15$ мм; $V=50$ м/с
Рис.11. Вплив оброблюваного матеріалу та швидкості різання на форму стружок при точінні ¹

Перевірку кількісної адекватності в роботі запропоновано виконувати на основі перевірки гіпотези значущості залишкової дисперсії відхилення прогнозованих значень досліджуваного показника від його експериментальних значень за критерієм Фішера:

$$\frac{s_{\text{c\ddot{a}e}}^2}{\sigma_{\text{c\ddot{a}o}}^2} \leq F(\alpha, k, n), \quad s_{\text{c\ddot{a}e}}^2 = \frac{r \sum_{v=1}^n (\bar{\mathfrak{R}}_v - \mathfrak{R}_v^{\text{d\ddot{i}c\ddot{e}}})^2}{(k-n)}, \quad (23)$$

де α - рівень значущості, r – кількість повторень кожного з k натурних дослідів, m – кількість факторів моделі, n – кількість модельних дослідів, $\bar{\mathfrak{R}}_v$ - групова середня значення показника та $\mathfrak{R}_v^{\text{d\ddot{i}c\ddot{e}}}$ - розраховане значення показника.

На відміну від інших відомих досліджень, в роботі було враховано можливість виникнення похибки через наявність похибок визначення вихідних

¹ Фотографії стружок: сталі 45 взяті з праці Tönshoff Н. К., Hollmann С. Hochgeschwindigkeitsspanen metallischer Werkstoffe. –WILEY-VCH,2004; чавуну – з праці Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов. -М.: Высшая школа, 1985. -304 с.

даних шляхом сумування дисперсій відтворення експерименту $\sigma_{\mathfrak{R}\delta\psi\delta}^2$ та розрахунку $\sigma_{\chi\delta\psi\delta}^2$:

$$\sigma_{\delta\psi\delta}^2 = \sigma_{\chi\delta\psi\delta}^2 + \sigma_{\mathfrak{R}\delta\psi\delta}^2, \quad \sigma_{\mathfrak{R}\delta\psi\delta}^2 = \frac{\sum_{v=1}^k \sum_{i=1}^r (\mathfrak{R}_{vi} - \bar{\mathfrak{R}}_v)^2}{k(r-1)}, \quad \sigma_{\chi\delta\psi\delta}^2 = \sum_{i=1}^m \frac{\partial \mathfrak{R}}{\partial \chi_i} \sigma_i^2 \quad (24)$$

Проведені розрахунки похідних $\frac{\partial \mathfrak{R}}{\partial \chi_i}$ за $m=21$ названим раніше фактором для

умов різання сталі 45 з режимом різання $V=100$ м/хв, $S=0,15$ мм/об показали, що найбільший вплив на похибку прогнозування сили та температури різання мають похибки прогнозування показників тертя (37-47%) та радіуса округлення різальної кромки (20-35%). На проекцію P_z істотний вплив мають також передній кут γ (7%) та теплосмість оброблюваного матеріалу C_V (6%), на температуру різання вплив мають параметр A визначального рівняння оброблюваного матеріалу (13%) та максимальна величина накопичених пластичних деформацій до руйнування ϵ_p (14%). Такий набір факторів, що істотно впливають на показники процесу різання, показує, що значна частка невизначеності у прогнозованих параметрах впливає з невизначеності у вихідних даних, зокрема у μ та ρ .

Додаткова перевірка моделі, що виконана шляхом порівняння прогнозів головної складової сили різання для різних матеріалів з відомими даними експериментальних досліджень М. М. Зорева (табл. 3), виявила, що з 8 тестів лише 2 (25%) показали похибку більшу за 15%, що зумовлено обмеженістю вихідних даних.

Таблиця 3

Порівняння прогнозів головної складової сили різання при зовнішньому повздовжньому точінні з експериментальними даними М. М. Зорева

Матеріал	Твердість	$\varphi, ^\circ$	$\gamma, ^\circ$	$r_b, \text{мм}$	ІМ	V, м/хв	S, мм/об	t, мм	Pz, Н		$\delta Pz, \%$
									розрах.	експерим.	
1. сталь 10	HB187	60	10	1	T5K10	182	0,51	4	2630	3000	-12,4
2. сталь 10	HB187	60	10	1	P18	47	0,51	4	2680	4150	-35,5
3. сталь 20	HB167	60	10	1	T5K10	190	0,51	4	2720	3150	-13,7
4. сталь 50	HB220	60	10	1	T5K10	72	0,85	12	21500	15850	+35,6
5. 20X13	HB200	60	10	1	T5K10	92	0,78	4	5080	5000	+1,6
6. 40XHM	HRC35	30	-10	0,5	BK6	40	0,55	2	3400	3000	+13,3
7. 9XC	HRC48	30	-10	0,5	BK6	21	0,55	2	4400	4200	+4,8
8. CЧ21	HB200	60	10	1	BK8	70	0,28	4	1390	1400	-0,7

У роботі на основі аналізу причин виникнення похибок сформульовано *принцип прийнятої похибки* прогнозування, який полягає у тому, що для одержання достовірних результатів модельного дослідження необхідно і достатньо забезпечити коректність, якісну (слабка достовірність) та за необхідності кількісну адекватність (сильна достовірність) скінченно-елементної моделі процесу різання тільки за досліджуваними показниками. При цьому доведено, що похибка прогнозування за іншими показниками не має істотного значення. Встановлено, що за сучасною якіс-

тю вимірювального обладнання досягнути кращої за 15-20% розбіжності між експериментальними та розрахунковими даними показників робочих процесів різання у широкому діапазоні режимів різання навіть з прийняттям 0,01 рівня значущості результатів прогнозування практично неможливо.

Виходячи з розробленої класифікації задач прогнозуючого моделювання процесів різання, у роботі сформульовано *принцип раціонального спрощення*, який полягає у виборі такої структури прогнозуючої моделі, яка забезпечує найменший час прогнозування показників процесу різання із прийнятною похибкою. Наприклад, якщо необхідно збільшити міцність різальної кромки леза, то ця задача має масштаб (рівень деталізації) леза і, отже, під час побудови моделі для розв'язання цієї задачі необхідно враховувати форму округлення різальної кромки, локальний розподіл контактних напружень тощо. Отже, модель різання має бути максимально подібною до головної січної площини та може мати значні спрощення просторової геометрії системи. З іншого боку, якщо ставиться задача визначення прогину заготовки при обробці точінням, то вона вже має масштаб (рівень деталізації) заготовки, тому що характерним геометричним розміром є довжина або діаметр заготовки. Тому така детальна інформація про процес взаємодії леза із заготовкою і стружкою, як визначено в попередньому прикладі, у даному випадку не потрібна, а достатньо лише достовірно спрогнозувати вектор сили різання і геометрично точно описати розміри заготовки та її граничні умови.

Необхідною умовою успішної практичної реалізації розробленої скінченно-елементної моделі процесу різання є виконання *принципу оптимальності параметрів обчислювальних процедур*, який полягає у тому, що кожний розв'язувач повинен бути попередньо оптимізований для розв'язання саме задач різання шляхом визначення параметрів скінченних елементів, контактних алгоритмів, алгоритмів інтегрування рівнянь руху таким чином, щоб забезпечити найвищу продуктивність обчислювальних процедур. У роботі цей принцип проілюстровано на прикладі визначення оптимальних параметрів розв'язувача LS-DYNA для розв'язання 3D-задач моделювання процесу стружкоутворення. Зокрема, показано, що зменшення впливу похибки розв'язання контактної задачі при прийнятному часі розрахунку може бути досягнуте за рахунок вибору розміру скінченного елемента заготовки в діапазоні $\rho/L_e=2-3$ та леза $\rho/L_e>2,5$ (рис. 12).

Ще одним важливим принципом практичної реалізації скінченно-елементних моделей процесів різання є *принцип порівнянності умов модельного й натурного робочих процесів*, що полягає в необхідності забезпечення геометричної подібності, подібності граничних та початкових умов скінченно-елементної моделі реальному процесу. Зокрема, проведені дослідження показали, що при розв'язанні задач на рівні деталізації «Лезо» достовірність розрахунків залежить від просторової розмірності моделі навіть для ортогонального різання. Встановлено, що 2D-модель може бути застосована тільки для випадків, коли ширина зрізу не менша за $b_{min}=20a$, оскільки лише у цьому випадку стружка може бути взята прямокутною в поперечному перерізі (рис. 13а). Доведено, що застосування 3D-моделі процесу різання з

вільними поверхнями забезпечує прогнозування реальної форми стружки за будь-якої її ширини (рис. 13б).

У роботі розглянута низка прикладів застосування розробленої моделі ортогонального різання конструкційних сталей для розв'язання задач на рівні деталізації «Лезо» (див. рис. 1). Наприклад, доведена достовірність результатів модельних досліджень товщини (усадки) стружки, проєкцій сили та температури різання при точінні сталі 45 (HB180), проведених за допомогою цієї моделі в діапазоні швидкостей різання від 100 до 300 м/хв, шляхом їх порівняння з експериментальними даними US National Institute of Standards and Technology, які є узагальненням результатів вимірювань цих показників в ідентичних із моделлю умовах у трьох лабораторіях різних країн світу. При цьому відносні похибки не перевищували для проєкції P_z – 15,2%, проєкції P_y – 23,1%, температури різання T – 22%, коефіцієнта стовщення K_a – 34%, що з урахуванням похибок відтворення вихідних даних задовольняють критерію Фішера з рівнем значущості 0,1.

У *сьомому розділі* наведені приклади застосування поданих теоретичних положень та принципів для підвищення ефективності робочих процесів різання на основі їх прогнозуючого моделювання методом скінченних елементів.

Під час проектування верстатів, різальних інструментів і технологічних процесів одним з найважливіших задач є прогнозування питомих сил різання. У цьому напрямку найбільш актуальним використанням прогнозуючої моделі є визначення закону зміни питомих сил в умовах перехідних процесів з подальшим застосуванням цих даних для дослідження та оптимізації динаміки робочих процесів. Напрямом реалізації цього підходу є побудова діаграм сталості для кінцевих фрез при обробці досліджуваного матеріалу за розрахованими за моделлю ортогонального різання питомими силами різання та сталим стружкоутворенням T_p . У роботі подано приклад розв'язання такої задачі для випадку чорнового оброблення лопаток дифузора компресора зі сталі 45 фрезою діаметром 40 мм зі змінними непереточуваними пластинами з шириною фрезерування 40 мм та глибиною різання до 10 мм на верстаті 6P13Ф3 з системою ЧПК 2С42-65. Показано, що отримане підвищення продуктивності оброблення на 41% дозволило отримати економічний ефект при обробці кожної лопатки 52,3 грн.

Важливим напрямом застосування прогнозуючої моделі є визначення оптимальних режимів різання. У роботі подано приклад розв'язання такої задачі для випадку обробки точінням сталі 45 (HB160), виходячи з критерію оптимальної температури. Спираючись на принцип порівняльності умов модельного й натурального робочих процесів шляхом моделювання процесу ортогонального різання в діапазоні швидкостей 50-300 м/хв та товщин зрізу від 0,1 до 0,3 мм при $t = 6$ мм, методом планування багатofакторного експерименту отримано залежність для розрахунку середньої температури різання

$$T = e^{(5,53-0,017)} V^{0,25} S^{0,24} . \quad (25)$$

Оптимальна температура для зазначеної пари «Т15К6-сталь 45» становить, за даними С. С. Сіліна², 1000°C. Та оскільки ця величина отримана методом природної термопари, то вона є завищеною та порівнювалася з розрахунковою з поправкою 0,56, що визначена порівнянням розрахованої та експериментальної середньої температури різання за однакових умов. Підставляючи скоректоване значення оп-

Рис. 14. Крива найбільшого ресурсу різця з Т15К6 при точінні сталі 45 ($\varphi=45^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $\gamma=8^\circ$, $t=6\text{мм}$)

тимальної температури у формулу (25), при $\gamma=8^\circ$ було розраховано криву найбільшого ресурсу інструмента (рис. 14). Порівняння цих даних з даними О. Д. Макарова свідчать про адекватність отриманого результату. Розбіжність при малих подачах зумовлена відмінністю умов натурального експерименту від модельного через те, що фактичний радіус округлення різального леза, за якого було проведено експериментальні дослідження, є невідомим.

У роботі подано низку прикладів застосування 3D-моделей робочих процесів різання конструкційних сталей для розв'язання задач на рівні деталізації «Інструмент» (див. рис. 1). Однією з таких задач є експертна оцінка працездатності інструментів. Як приклад розглянуто задачу оцінювання працездатності змінних непереточуваних пластин різних фірм-виробників при обробці глибоких канавок точінням канавковими різцями. Оскільки за цих умов найбільшою проблемою є стружковідведення, то й за критерій ранжування пластин вибрано форму стружки. Було досліджено сім пластин шириною 4 мм: 13532 за ГОСТ 17163-90, ISCAR TAG N4J, WIDIA M4 235 67 440, кругла R4 1235 67 605, Sandvik N 151.400-40-45, Kennametal A4CO405L06CF02, TaeguTec TDJ4. Ранжування пластин за розробленою бальною оцінкою показало, що для досліджуваних умов можуть бути рекомендовані пластини ISCAR TAG N4J (перше місце) та WIDIA M4 1235 67 440, TaeguTec TDJ4 і Kennametal A4CO405L06CF02 (друге місце) як такі, що реалізують точіння з утворенням стружки найменшої ширини за прийнятної сили різання, що забезпечує надійне відведення стружки, надійність та продуктивність обробки (рис. 15).

Узагальнюючи основні напрями використання прогнозуючого моделювання у роботі розроблена концепція оцінки працездатності інструмента на стадії його проектування. Відповідно до цієї концепції спроектований різальний інструмент перевіряється моделюванням за основними видами відмов: за інтенсивністю зношування, за напруженням у лезі, які можуть призводити до викришування різальної кромки, за напруженнями в робочій частині інструмента, за сталістю обробки. На першому етапі виконують 2D-моделювання на рівні деталізації «Лезо», отримуючи розподіл контактних напружень і температур, напруження в лезі, питомі проєкції сили різання та постійну стружкоутворення, а також середній коефіцієнт тертя за заданими умовами. На другому етапі виконують 3D-моделювання на рівні деталізації «Інструмент» та визначають напруження в робочій частині інструмента та жорсткість леза. На третьому етапі за відомими критеріями визначають ступінь працездатності за всіма переліченими показниками. Такий підхід дозволяє визначити лише декілька найбільш раціональних рішень щодо конструкції інструмента з

² Силин С. С. Метод подобия при резании материалов. -М.: Машиностроение, 1979. -152 с.

метою їх подальшої експериментальної перевірки та запобігає виготовленню великої кількості експериментальних зразків.

У додатках А, Б, В наведено розроблені здобувачем обчислювальні процедури, структура файлів вихідних даних та числові значення параметрів, що прийняті за замовчуванням. Додаток Г містить детальний опис скінченно-елементних моделей, що досліджувалися у роботі. У додатку Д представлено таблиці для визначення максимально можливих припущень прогнозуючих скінченно-елементних моделей. Приклад застосування розроблених положень і рекомендацій для розв'язання виробничих задач подано у додатку Е, а результати виробничих випробувань та впровадження - у додатку Ж. Копія ліцензії (№499557) на програмний продукт LS-DYNA представлена у додатку К.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі комплексного використання числових методів та сучасних положень теорії різання при створенні термомеханічних моделей процесів стружкоутворення розв'язано актуальну науково-практичну проблему прогнозування показників робочих процесів та конструкцій різального інструмента з використанням даних випробувань оброблюваного матеріалу при простих видах деформації та ортогональному різанні.

1. Використовуючи фундаментальні закони та критерії теорії пластичності, руйнування та трибології розроблена загальна методологія створення термомеханічних моделей робочих процесів різання, що здатні прогнозувати вид, форму та розміри стружки, силу різання, показники пластичної деформації, напружено-деформований та тепловий стан в об'ємі і на контактних границях заготовки, стружки та леза. Розв'язок визначальної системи рівнянь реалізовано методом скінченних елементів з урахуванням температурно-швидкісних ефектів і реалізацією конкуренції внутрішнього та зовнішнього механізмів тертя за заданими граничними умовами. Це забезпечує можливість отримання адекватних прогнозів названих показників процесу різання лише за даними стандартних випробувань на основі встановлення фундаментальних характеристик механічних і трибологічних властивостей оброблюваного та інструментального матеріалів.

2. На основі розробленої методології практично реалізовані 2D- та 3D-моделі ортогонального різання інструментами з довільною формою передньої поверхні. Особливість цих моделей, на відміну від інших, полягає у врахуванні температурно-швидкісних ефектів шляхом застосування ітераційних алгоритмів розрахунку напружень за визначальним рівнянням Джонсона-Кука, прогнозуванні моменту і характеру руйнування попереду різальної кромки виконуючи перевірку одночасно умов в'язкого та крихкого руйнування за критеріями відповідно накопичених руйнувань і максимальних головних напружень у кожному циклі розрахунку з паралельним перебудуванням скінченно-елементної сітки, визначенні сил опору ковзанню на контактних поверхнях за тиском, температурою та фактичним значенням границі плинності оброблюваного матеріалу в ньому.

3. Встановлено числовий вплив 21 фактора на похибку прогнозування показників процесу різання та доведено, що найбільшою мірою вона зумовлена невизна-

ченістю границі плинності оброблюваного матеріалу, коефіцієнта його теплоємності, параметрів тертя, радіуса округлення різальної кромки, переднього кута та форми задньої поверхні. Зменшення похибки саме цих параметрів процесу різання зменшує похибку моделі в цілому. Внаслідок значної похибки вихідних даних дисперсія відтворення розрахунку становить близько 10% показника, який прогнозується, та порівнянна за величиною з дисперсією відтворення експерименту. Це свідчить про практичну неможливість у загальному випадку отримати розбіжність прогнозу показників процесу різання з експериментом, меншу за 15-20%.

4. Зменшення невизначеності механічних властивостей оброблюваного матеріалу в роботі досягнуто ідентифікацією законів зміцнення та в'язкого руйнування металів зі стандартних випробувань за умови їх апроксимації визначальним рівнянням і рівнянням пластичності, параметри яких визначаються апроксимацією комплексу даних випробувань на квазістатичне розтягання та стиск при нормальних і підвищених температурах, та ортогонального різання. Достовірність отриманих рівнянь при великих пластичних деформаціях, температурах та швидкостях деформації, що мають місце при різанні, забезпечується врахуванням під час розрахунку їх коефіцієнтів істинних величин напружень та деформацій в областях її локалізації у спеціальних зразках під час випробувань, що апробовано та доведено на практиці для чотирьох матеріалів різних груп.

5. Визначення адгезійної складової сили опору ковзанню при великих контактних тисках можливо з випробувань на вдавлювання сферичного індентора, що обертається, у півпростір. Методика, що розроблена в роботі, реалізує більш близькі до різання умови випробувань, ніж відомі методики, за рахунок забезпечення стабілізації мікрорельєфу та величини зміцнення контактних поверхонь за жорсткої схеми навантаження індентора при значному (10-30 обертів індентора) шляху тертя з малою відносною швидкістю ковзання. Врахування дійсного розподілу контактних напружень та величини деформаційної складової сили опору ковзанню забезпечило визначення лінійної моделі саме адгезійної складової тертя. Для чотирьох матеріалів різних груп експериментально визначені коефіцієнти лінійної моделі адгезійної складової тертя.

6. Неможливість експериментального розділення сили опору ковзанню при зовнішньому терті на адгезійну та деформаційну складові в роботі подолана шляхом застосування модельного експерименту методом скінченних елементів з відносного ковзання шорсткого пружного тіла відносно пружно-пластичного тіла в широкому діапазоні тисків, механічних властивостей матеріалів та параметрів мікрорельєфу поверхні індентора. Отримані за результатами випробувань залежності для визначення деформаційної складової коефіцієнта зовнішнього тертя та фактичної площі контакту дозволили встановити з модельних експериментів з ортогонального різання наявність значної частки деформаційної складової у силі опору ковзанню на ділянці зовнішнього тертя в області великих нормальних напружень. Зі зменшенням нормальних напружень збільшується роль адгезії, що зумовлює зростання коефіцієнта тертя при віддаленні від різальної кромки.

7. Проблему прогнозування утворення стружок різних видів вирішено шляхом застосування комплексного критерію руйнування одночасно за критеріями в'язкого

(накопичених пошкоджень) та крихкого (максимальних головних напружень) руйнування із забезпеченням можливості адіабатичного знеміцнення та втрати сталості процесом пластичного деформування. Утворення стружки локалізованого зсуву у випадках малої швидкості різання окремих матеріалів, наприклад титанових сплавів, зумовлено деформаційним знеміцненням при високій швидкості деформації. Фізичним поясненням цього явища є додаткове підвищення швидкості зростання адіабатичної температури та спричинене цим знеміцнення внаслідок зменшення об'ємної теплоємності через утворення дефектів у деформованому об'ємі.

8. Основні проблеми реалізації прогнозуючих моделей процесу різання на практиці полягають у виборі нерациональної структури моделі, некерованості похибкою прогнозування досліджуваних показників, низькій сталості обчислюваного процесу. Розв'язок цих проблем у роботі забезпечено через розроблення і впровадження основних принципів практичної реалізації прогнозуючих моделей, які передбачають прогнозування допустимої похибки розрахунку показників процесу різання із врахуванням невизначеності вихідних даних, здійснення раціонального спрощення розрахункової схеми розв'язуваної задачі, визначення раціональних параметрів розв'язувача та порівняння результатів розрахунків з результатами натурного експерименту в еквівалентних умовах.

9. Від впровадження розроблених теоретичних положень та принципів практичного застосування прогнозуючих моделей процесів різання отримано ефект, який полягає у зменшенні шорсткості обробленої поверхні до Ra1,6 при розточуванні конусних глибоких отворів з найменшим діаметром 21 мм та довжиною 350 мм з кутом конуса 6° (ТОВ «НАСОСТЕХКОМПЛЕКТ», м. Суми), зменшенні основного часу на 41% при контурному фрезеруванні лопаток (АТ «РОТОР», м. Суми) за рахунок визначення за спрогнозованими даними про питомі сили різання та постійну часу стружкоутворення режимів різання, що забезпечують сталість названих процесів оброблення. Зменшення часу на впровадження нових відрізнних інструментів на ВАТ «Сумське НВО ім. М. В. Фрунзе» (м. Суми) було забезпечено шляхом відкидання нерациональних конструкцій токарних пластин із заданого набору пропозицій за результатами моделювання стружкоутворення за розробленою 3D-моделлю ортогонального різання.

10. Розроблена методологія створення прогнозуючих моделей процесів різання методом скінченних елементів впроваджено в ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України (м. Київ), Фізико-технічному інституті НАН Білорусі (м. Мінськ), Інституті верстатів університету Штутгарта (Німеччина), на кафедрі технології машинобудування Севастопольського національного технічного університету. Результати роботи впроваджені у навчальний процес у чотирьох ВНЗ України.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Залога, В. А. Проскальзывание при нестационарном резании с малой толщиной среза/ В. А. Залога, Д. В. Криворучко //Вісник Сумського державного університету. -Суми: Вид-во СумДУ, 2003. -№ 2. -С. 55- 66.

Здобувачем було виконано дослідження впливу різних факторів на характер зміни сили різання зі зміною товщини зрізу при різанні округленим лезом.

2. Залога, В. А. Обзор способов экспериментального определения параметров уравнения состояния пластических материалов для моделирования методом конечных элементов их механической обработки/ В. А. Залога, Д. В. Криворучко // Резание и инструмент в технологических системах. -2005.-Вып.68.-С.193-202.

Здобувачем виконано аналіз способів експериментального визначення параметрів визначальних рівнянь матеріалів в умовах, що існують при обробці різанням.

3. Залога, В. А. О повышении работоспособности инструментов в условиях прерывистого и неравномерного резания / В. А. Залога, Д. В. Криворучко, Д.Е.Собочарь, О. А. Запорожец// Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем. –Краматорськ: ДДМА, 2005. -№17. –С. 78-86.

Поставлено задачу, розроблено імітаційну модель переривчастого різання та визначено геометричні параметри леза, що забезпечують найменше динамічне навантаження на інструмент.

4. Залога, В. А. Имитационная модель прямоугольного свободного резания / В. А. Залога, Д. В. Криворучко, С. Н. Хвостик //Вісник Сумського державного університету. -Суми: Вид-во СумДУ, 2005. -№ 11. -С. 55-66.

Здобувачем розроблено математичну модель та програмне забезпечення 2D-моделювання процесу ортогонального різання.

5. Залога, В. О. До питання підтвердження адекватності скінченно-елементної моделі процесу прямокутного різання / В. О. Залога, Д. В. Криворучко, А. М. Сорокін// Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем. –Краматорськ: ДДМА, 2006. -№19. –С. 18-23.

Здобувачем поставлено задачу, розроблено план розрахункового експерименту та виконано аналіз впливу похибок вихідних даних на загальну похибку прогнозування показників процесу різання.

6. Залога, В. А. Прогнозирование динамического состояния инструмента при концевом фрезеровании / В.А.Залога, Д.В. Криворучко, С. С. Емельяненко //Сучасні технології у машинобудуванні. –Харків:НТУ«ХП»,2006.–Т.2.–С.146-156.

Здобувачем поставлено задачу досліджень та сформульовано підхід до прогнозування динамічного стану фрез при кінцевому фрезеруванні.

7. Залога, В. А. О выборе уравнения состояния обрабатываемого материала для моделирования процесса резания методом конечных элементов / В. А. Залога, Д.В.Криворучко, С. Н. Хвостик // Вісник Сумського державного університету. -Суми: Вид-во СумДУ, 2006. -№12. – С. 101-115.

Здобувачем на основі аналізу переваг та недоліків різних визначальних рівнянь запропоновано форму визначального рівняння, що може бути застосована при моделюванні різання.

8. Криворучко, Д. В. К вопросу о перспективах моделирования методом конечных элементов процесса разрушения обрабатываемого материала (трещинообразование) при резании / Д. В. Криворучко, В. А. Залога, С. С. Некрасов //Сучасні технології у машинобудуванні. –Харків: НТУ "ХП", 2007. -С. 75- 86.

Здобувачем сформульовано задачу моделювання руйнування при різанні.

9. Залога, В. А. Применение методики прогнозирования устойчивости процесса концевой фрезерования к автоколебаниям для повышения производительности

сти обработки конструкционных сталей / В. А. Залого, Д. В.Криворучко, С. С. Емельяненко // Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА, 2007. -№22. –С. 178-186.

Здобувачем розроблено концепцію підвищення продуктивності обробки шлямхолем комп'ютерного моделювання процесу фрезерування.

10. Залого, В. А. К вопросу определения передаточной функции процесса резания при фрезеровании / В. А. Залого, Д. В.Криворучко, С. С. Емельяненко, Д. Г. Голдун // Вісник Сумського державного університету. -Суми: Вид-во СумДУ, 2007. -№ 1. -С. 80- 91.

Здобувачем поставлено задачу та виконано аналіз результатів розрахункових та експериментальних досліджень питомих сил різання при ортогональному різанні.

11. Криворучко, Д. В. Скінченно-елементна модель процесу різання. Підтвердження її адекватності експерименту / Д. В. Криворучко, В. О. Залого, С. С. Некрасов //Процеси механічної обробки в машинобудуванні. -Житомир: ЖДТУ, 2007. -Т. 1. -С. 60- 71.

Здобувачем поставлено задачу, розроблено план розрахункового експерименту та виконано аналіз впливу похибок вихідних даних на загальну похибку прогнозування показників процесу різання.

12. Криворучко, Д. В. Анализ современных методов численного моделирования тепловых явлений при резании материалов / Д. В. Криворучко, В. А. Залого, Н. П.Мазур //Сучасні технології у машинобудуванні. –Харків: НТУ «ХП», 2007. -С. 31- 42.

Здобувачем виконано аналіз сучасних модельних досліджень теплових явищ.

13. Залого, В. А. Имитационное моделирование процесса прерывистого резания керамическими инструментами, упрочненными ионно-лучевой имплантацией: постановка задачи / В. А. Залого, Д.В. Криворучко, В.Я. Лебедев //Резание и инструмент в технологических системах. -2008. -Вип. 75. - С. 123-128.

Здобувачем проаналізовані можливості створення моделі методом скінченних елементів щодо прогнозування впливу іонно-променевої імплантації на показники процесу різання.

14. Залого, В. А. Идентификация режима автоколебаний в технологической системе при фрезеровании концевыми фрезами / В.А. Залого, Д.В.Криворучко, С.С.Емельяненко // Труды Одесского политехнического университета. –Одесса, 2008. – Вып. 1(29). –С. 73-77.

Здобувачем поставлено задачі, розроблено моделі силової взаємодії леза фрези із заготовкою, запрограмовано алгоритм розрахунку діаграм динамічної сталості процесу фрезерування та виконано аналіз розрахунків для окремих умов оброблення.

15. Залого, В. А. Современные направления исследований в области имитационного моделирования процессов обработки резанием / В. А. Залого, Д. В. Криворучко, М.Сторчак // Сучасні технології у машинобудуванні. –Харків: НТУ „ХП”, 2008. -С.71 – 78.

Здобувачем проведено аналіз робочих процесів різання як об'єкта прогнозуючого моделювання та виявлені розбіжності у поглядах у сучасній теорії різання, у тому числі з погляду створення моделей з використанням числових методів.

16. Залога, В. А. Исследование методом конечных элементов динамики изменения силы резания при врезании / В. А. Залога, Д. В. Криворучко, М. Г. Сторчак, С. С. Емельяненко, С. М. Селивоненко // Вісник Сумського державного університету. - Суми: Вид-во СумДУ, 2008. - № 3. – С. 13–24.

Здобувачем поставлено задачі та виконано аналіз впливу різних факторів на постійну стружкоутворення.

17. Розенберг, О. А. Исследование работоспособности резцов из кубического нитрида бора при точении титанового сплава BT22 / О. А. Розенберг, В. А. Залога, Д. В. Криворучко, С. С. Некрасов, В. О. Сидоренко // Резание и инструмент в технологических системах. -2009. - Вып. 76. –С. 151-160.

Здобувачем розроблено план експериментальних досліджень питомих сил різання та виконано аналіз їх результатів.

18. Криворучко, Д. В. Исследование влияния параметров модели трения на распределение контактных напряжений, силы и температуры резания при механической обработке сталей / Д. В. Криворучко, В. А. Залога, О. А. Залога // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машинобудування. -2009. -№57. –С. 132-138.

Здобувачем поставлено задачу та розроблено план розрахункового експерименту, виконано аналіз результатів та встановлено вплив параметрів моделі зовнішнього тертя на контактні напруження, силу та температуру різання.

19. Залога, В. А. К вопросу об экспериментальном определении коэффициента трения / В. А. Залога, Д. В. Криворучко, О. А. Залога // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. – Краматорськ: ДДМА, 2009. -Вып.25. – С. 150-159.

Здобувачем виконано критичний огляд сучасних експериментальних можливостей визначення показників тертя.

20. Залога, В. А. Классификация задач моделирования процессов резания материалов / В. А. Залога, Д. В. Криворучко, С. С. Ковальчук // Сучасні технології в машинобудуванні. –Х.: НТУ «ХПІ», 2009. -Вып.3. – С. 186-196.

Здобувачем розроблена класифікація задач моделювання та запропоновано підхід до формалізації визначення припущень прогнозуючих моделей процесу різання.

21. Залога, В. А. Методика численной оценки показателей прочности обрабатываемого материала по его модели / В. А. Залога, Д. В. Криворучко, С. С. Некрасов //Компрессорное и энергетическое машиностроение.–2008-2009. – №4(14), 1(15). –С. 47-50.

Здобувачем поставлено задачі, розроблено конструкції пристроїв, методики, сплановано і проведено експерименти та встановлено нові закономірності щодо фізико-термомеханічних властивостей оброблюваних матеріалів.

22. Залога, В. О. Про вибір адекватних умов імітаційного моделювання процесу прямокутного різання / В. О. Залога, Д. В. Криворучко, С. М. Селивоненко, М. Г. Сторчак // Проектування, виробництво, експлуатація автотранспортних засобів і поїздів. -Львів, 2009.- Вып. 3. –С. 58-65.

Здобувачем розроблено 3D-модель прямокутного різання, проведені розрахункові та натурні експерименти, порівняні їх результати та встановлені умови порівняльності модельних досліджень з реальним процесом різання.

23. Криворучко, Д. В. Повышение производительности 3D-моделирования нестационарных процессов резания методом конечных элементов путем выбора рациональных параметров решателя / Д.В.Криворучко, В.А.Залого, А. Н. Сорокин // Високі технології в машинобудуванні. –Харків:НТУ«ХП»,2009.–Вип. 2(19). – С.48-55.

Здобувачем поставлено задачу, розроблено план розрахункового експерименту, виконано аналіз його результатів та сформульовано умови ефективного застосування розв'язувача LS-DYNA для моделювання 3D- процесів різання.

24. Залого, В. О. Прогнозування деформаційної складової сил тертя на контактних поверхнях різального інструмента / В.О.Залого, Д.В.Криворучко, О.О.Залого // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. - Житомир: ЖДТУ, 2009. – №3 (50). – С. 38 – 45.

Здобувачем поставлено задачу, розроблено модель, план розрахункового експерименту та виконано аналіз результатів досліджень деформаційної складової сили тертя.

25. Залого, В. А. Перспективы создания прогнозирующей модели процесса резания на основе базового процесса – тангенциального точения/В. А. Залого, Д. В. Криворучко //Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». –Харків: Курсор, 2005. –С.101 – 108.

Виконано порівняння робочих процесів різання та проаналізовано можливість та необхідність створення узагальненої моделі процесу різання.

26. Heisel, U. Cause Analysis of Errors in FE Prediction Orthogonal Cutting Performances/ U.Heisel, D. V. Kryvoruchko, V. A. Zaloha, M.Storchak // Proceedings of the 10th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. -Calabria, 2007. -С.141-148.

Здобувачем поставлено задачу, розроблено план розрахункового експерименту, виконано аналіз його результатів та сформульовано умови ефективного застосування розв'язувача LS-DYNA для моделювання 2D-процесів різання.

27. Heisel, U. Finite Element Analysis of Cutting Force Dynamics / U.Heisel, D. V. Kryvoruchko, V. A. Zaloha, M. Storchak, S. S. Emelyanenko, S. N. Selivonenko //Proceedings of the 11th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations. -Gaithersburg: NIST, 2008. -С. 163- 170.

Здобувачем поставлено задачі та виконано аналіз результатів розрахункових досліджень динаміки зміни сил при ортогональному різанні.

28. Криворучко, Д. В. Моделирование процессов обработки материалов резанием / Д. В. Криворучко, В.А. Залого, Н.П. Кутовой //Оборудование и инструмент для профессионалов. -2009. -№6 (117).–С.20-23.

Здобувачем розроблено моделі ортогонального різання, відрізання, свердління та фрезерування.

29. Heisel, U. Thermomechanische Wechselwirkungen beim Zerspanen / U.Heisel, D. V. Kryvoruchko, V. A. Zaloha, M. Storchak, T.Stehle // ZWF.- 2009.– № 4. –С.263-272.

Здобувачем виконано критичний огляд моделей тертя та сформульовано ті, що можуть бути застосовані під час моделювання різання.

30. Heisel, U. Bruchmodelle für die Modellierung von Zerspanprozessen/ U. Heisel, D. V. Kryvoruchko, V. A. Zaloha, M. Storchak, T.Stehle // ZWF.–2009.-№5.–С.330-339.

Здобувачем виконано огляд моделей руйнування при різанні та визначено ті, що можуть забезпечити одночасне прогнозування в'язкого та крихкого руйнування.

31. Heisel, U. Thermomechanische Materialmodelle zur Modellierung von Zerspanprozessen/ U. Heisel, D. V. Kryvoruchko, V. A. Zaloha, M. Storchak, T. Stehle // ZWF. – 2009. -№ 6. -С. 482-491.

Здобувачем виконано критичний огляд визначальних рівнянь та рівнянь стану та запропоновано використовувати модель Джонсона-Кука як базову під час моделювання різання металів.

32. Heisel, U. Die FEM-Modellierung als moderner Ansatz zur Untersuchung von Zerspanprozessen/ U. Heisel, D. V. Kryvoruchko, V. A. Zaloha, M. Storchak, T. Stehle // ZWF. – 2009. -№7-8. -С. 604-616.

Здобувачем виконано аналіз особливостей реалізації методу скінченних елементів при різанні та визначені елементи обчислювальної процедури, що підлягають удосконаленню.

33. Криворучко, Д. В. Моделирование процессов обработки материалов резанием / Д. В. Криворучко, М. Г. Сторчак, В. А. Залого //Оборудование и инструмент для профессионалов. -2009. -№4 (115). – С. 46-48.

Здобувачем розроблено моделі ортогонального різання, відрізання, свердління та фрезерування.

34. Криворучко, Д. В. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів: навчальний посібник / Д. В. Криворучко, В.О. Залого, В.Г. Корбач. -Суми: Вид-во СумДУ, 2010. –208 с.

Здобувачем розроблено методологію прогнозуючого моделювання робочих процесів різання.

35. Heisel U. Modeling of Interaction Processes in Cutting [Електронний ресурс]/ U. Heisel, M. Storchak, D. V. Kryvoruchko, S. Braun // Proceedings of 2nd International CIRP Process Machine Interaction (PMI) Conference. -Vancouver: University of British Columbia, 2010. -8с.

Здобувачем досліджено процес ортогонального різання у податливій технологічній системі та доведено можливість прогнозування впливу технологічної системи на процес стружкоутворення.

АНОТАЦІЇ

Криворучко Д. В. Научные основы моделирования процессов резания с использованием численных методов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты. – Харьковский национальный университет «ХПИ», Харьков, 2010.

В диссертации представлено новое решение актуальной научно-технической проблемы прогнозирования показателей и определения на стадии проектирования оптимальных параметров рабочих процессов резания и конструкций режущего инструмента на основе данных испытаний при простых видах нагружения и ортогонального резания.

Показано, что практически во всех существующих до сих пор методологиях создания прогнозирующих моделей процесса резания, которые могут быть использованы для реализации концепции виртуального производства, в данное

время используется целый ряд эмпирических допущений, которые исключают создание и практическое использование моделей в широком диапазоне условий резания – прогнозирующих моделей. С целью устранения этого существенного недостатка в работе предложен новый подход к проектированию прогнозирующих 2D- и 3D- моделей процесса резания, который предусматривает определение вида, формы и размеров стружки, границы контакта на контактных поверхностях лезвия и других показателей рабочего процесса исключительно на основе фундаментальных критериев и законов теории пластичности с применением метода конечных элементов в приложении к термомеханической пластической деформации и контактному взаимодействию инструмента с заготовкой, учитывая экспериментально определенные лишь из стандартных испытаний модели материалов (определяющее уравнение, уравнение состояния, теплофизические константы) и трибологические свойства заготовки и инструмента.

Разработана классификация задач прогнозирующего моделирования процессов резания и доказано, что производительность вычислений при решении этих задач прямо зависит от уровня детализации расчетной схемы. На уровне детализации «Лезвие» выполнены модельные и экспериментальные исследования контактного взаимодействия лезвия со стружкой и поверхностями на заготовке, которые позволили исключить предположение относительно величины и распределения сил сопротивления скольжению на контактных поверхностях инструмента путем прогнозирования методом конечных элементов соотношений между нормальными напряжениями, адгезионной и деформационной составляющими сил трения и распределением этих напряжений на контактных поверхностях.

Впервые формализованы подходы и разработана методология оценки достоверности прогнозирующих моделей процесса резания, которая состоит как в оценке корректности решения задачи, так и в оценке ее качественной и количественной адекватности.

Путем моделирования ортогонального резания, выполняя разделение влияний процессов деформирования, трения, разрушения и теплопередачи, доказано, что: а) деформационная составляющая силы трения сопоставима по величине с силой адгезионного сцепления; б) распределение напряжений на передней поверхности более всего зависит упрочнения адгезионных связей с увеличением нормального давления; в) увеличение коэффициента трения при отдалении от режущей кромки обусловлено наличием сил адгезионного сопротивления скольжению, что приводит к замедлению уменьшения касательных напряжений при уменьшении нормальных напряжений, причем этот эффект тем больше, чем больше прочность адгезионных связей и их способность к упрочнению; г) образование стружек адиабатического сдвига при малых скоростях деформации обусловлено деформационным разупрочнением, которое возникает при больших скоростях деформации за счет уменьшения объемной теплоемкости; д) среди всех исходных данных самое большое влияние на погрешность прогнозирования показателей процесса резания имеют погрешности определения радиуса округления режущей кромки, кинематического переднего угла, формы задней поверхности, среднего коэффициента трения, предела текучести обрабатываемого материала и коэффициента его теплоемкости;

е) дисперсия воспроизведения расчетов составляет около 10% прогнозируемого показателя и сопоставима по величине с дисперсией воспроизведения эксперимента, что является следствием погрешности подготовки исходных данных.

Сформулированы основные принципы практического применения прогнозирующих моделей процесса резания, которые предусматривают прогнозирование допустимой погрешности расчетов показателей процесса резания, осуществление рационального упрощения расчетной схемы решаемой задачи, определение рациональных параметров решателя и сравнение результатов расчетов с результатами натурального эксперимента в эквивалентных условиях.

Разработанные теоретические положения и принципы практического применения прогнозирующих моделей рабочих процессов резания продемонстрированы на примерах моделей в среде LS-DYNA процессов ортогонального резания, точения инструментами со сложной передней поверхностью и фрезерования.

Ключевые слова: теория резания, процесс механической обработки, математическая модель, стружка, сила резания, температура, пластическая деформация, трение, разрушение, метод конечных элементов.

Криворучко Д. В. Наукові основи моделювання процесів різання з використанням числових методів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Національний технічний університет «ХПІ», Харків, 2010.

У дисертації розроблені наукові основи побудови 2D- та 3D-скінченно-елементних прогнозуючих моделей процесів різання і вирішена науково - технічна проблема підвищення ефективності механічної обробки шляхом прогнозування показників цих робочих процесів без проведення експериментальних досліджень безпосередньо з різання в умовах, що досліджуються. Шляхом моделювання ортогонального процесу різання, виконуючи розділення впливів процесів деформування, тертя, руйнування та теплопередачі, вивчені: співвідношення між деформаційною та адгезійною складовими сил тертя; можливість деформаційного зменшення за рахунок зменшення об'ємної теплоємності; вплив похибок відтворення вихідних даних на похибки прогнозування показників процесу різання. Розроблені теоретичні положення й принципи підвищення ефективності робочих процесів різання продемонстровані на прикладах прогнозування моделювання в середовищі LS-DYNA процесів ортогонального різання, точіння інструментами зі складною передньою поверхнею й фрезерування.

Ключові слова: теорія різання, процес механічної обробки, математична модель, стружка, сила різання, температура, пластична деформація, тертя, руйнування, метод скінченних елементів.

Kryvoruchko D. V. Scientific backgrounds of machining simulation using numeric methods. – Manuscript.

Thesis for doctor degree in technical sciences by specialty 05.03.01 – machining operations, machines and tools. – National Technical University "KhPI", Kharkiv, 2010.

In the thesis the scientific backgrounds for designing of 2D and 3D finite element models of the cutting processes are developed. Important scientific and technical problem of improving the machining efficiency by prediction of machining operation performances without conducting experimental research directly of the cutting. The ratio between the deformation and adhesion component of friction forces, the possibility of deformation softening under high strain rate by reduction of the volume heat capacity, the impact of errors in input variable values on errors of predicted performance of the cutting process are studied by simulation of orthogonal cutting following the separation of the effects of deformation, friction, heat and failure. Developed theories and principles for machining efficiency increasing shown by the examples of simulation of orthogonal cutting, turning with complex rake face tools and milling in LS-DYNA.

Keywords: cutting theory, mathematical model, chip, cutting force, temperature, plastic strain, friction, failure, finite element method.

Підписано до друку 25.10.2010р.	Формат 60×90/16	Папір ксероксний
Обл.– вид. арк. 1,8.	Тираж 100пр.	Гарнітура Times New
Ум. друк. арк. 1,9.	Замовлення №	Roman Cyr

Видавництво СумДУ при Сумському державному університеті
вул. Римського-Корсакова, 2, м.Суми, 40007.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
ДК №3062 від 17.12.2007р.

Надруковано у друкарні СумДУ
вул.Римського-Корсакова, 2, м.Суми, 40007.