

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
Київський політехнічний інститут  
УДК 621.9.02:539.4:658.512.011.56

На правах рукопису

Мясіщев Олександр Анатолійович

**РОЗРОБКА МЕТОДУ  
РОЗРАХУНКУ КОНТАКТНИХ  
НАВАНТАЖЕНЬ НА РІЖУЧИХ  
ПОВЕРХНЯХ ІНСТРУМЕНТА З  
СКЛАДНОЮ ПЕРЕДНЬОЮ  
ПОВЕРХНЕЮ**

Спеціальність 05.03.01 - Процеси механічної та  
фізико-технічної обробки, верстати та інструмент

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
доктора технічних наук

Київ - 1994р.

Дисертацією є рукопис.

**Роботу виконано в Хмельницькому  
технологічному інституті.**

АВ 30.108

Науковий консультант: доктор технічних наук,  
професор Остаф'єв В.О.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук,  
професор Василенко М.В.

доктор технічних наук,  
професор Виноградов О.О.

доктор технічних наук,  
професор Кузьменко А.Г.

Ведуча організація: Хмельницьке ВО  
"ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТ"

Захист відбудеться 21 червня 1994 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої Ради Д 068.14.10 в Київському політехнічному інституті за адресою 252056, м.Київ, пр.Перемоги,37, гол.кор.ауд.214.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці КПІ

Автореферат розісланий "28" *КВІТНЯ* 1994 р.

Вчений секретар спеціалізованої Ради

д.т.н., професор

Равська Н.С.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00756449 (Z)

Подана робота присвячена розробці засобу розрахунку контактних навантажень для інструменту з складною передньою поверхнею, які є необхідним даним для вирішення задач прогнозування його працездатності. Створено математичні моделі процесу різання, досліджена закономірність розподілу напружень на поверхні інструменту, проведено комп'ютерне моделювання процесу стружкоутворення, створено пакет програм по розрахунку контактних навантажень, зусиль різання та еквівалентних напружень в ріжучому інструменті, який доведено до інженерного рівня. Розроблено експериментальну методику, яка підтверджує правильність обраних математичних моделей.

## АВТОР ЗАХИЩАЄ

1. Математичну модель процесу різання металів для розрахунку контактних напружень на поверхнях інструменту, зусиль різання, дослідження процесу стружкоутворення.
2. Виявлені вплив граничних, температурних, кінцевих умов різання на закономірність розподілу контактних навантажень на поверхні гострого інструменту.
3. Засіб розрахунку контактних навантажень на ріжучих поверхнях інструменту, який має радіус заокруглення та фаску при вершині.
4. Аналітичне рішення задачі визначення зусиль деформування при знятті стружки різцем з фаскою, здержане методом характеристик та операційного обчислення.
5. Засіб розрахунку геометрії стружки та інтенсивності накопичених деформацій в зоні стружкоутворення для різноманітних передніх кутів різця.
6. Можливість використання методу кінцевих елементів для проведення комп'ютерного моделювання процесу стружкоутворення для пружнопластичного зміцненого деформованого матеріалу, який підкоряється в пластичній області співвідношенням деформаційної теорії пластичності.
7. Експериментальну методику, яка підтверджує правильність моделювання процесу стружкоутворення.
8. Програмний комплекс, який дозволяє для різної геометрії ріжучого інструменту визначити контактні навантаження, зусилля різання, проаналізувати напружено-деформований стан зони стружкоутворення та інструменту, змодельувати стружку, розрахувати зміщення поверхневого шару деталі після обробки.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

## Актуальність.

Незважаючи на значний розвиток засобів формоутворення без зняття стружки, таких як лиття, кування, штампування та інші, обробка металів різанням залишається ведучим завершувачим процесом виготовлення деталей. Розповсюдження цього засобу в промислового виробництві пояснюється його універсальністю і можливістю досягнення високого класу точності та чистоти обробки.

Головним на шляху інтенсифікації виробництва є широке впровадження верстатів з ЧПУ, оброблювальних центрів, а також матизованих ліній. Аналіз техніко-економічної ефективності використання комп'ютерного металорізального устаткування показує, що головною причиною, що викликає значні економічні збитки при застосуванні верстатів з ЧПУ, є недостатнє підвищення продуктивності обробки (в 1.2-2.0 рази при мінімально необхідній в 3-5 раз) по зрівнянню з універсальними металорізальними верстатами. Підвищення продуктивності обробки в основному обмежується міцністю, стійкістю ріжучої кромки інструменту, яка є найбільш слабкою ланкою в системі ВПІД.

На сьогодні однією з задач, які стоять перед технологом, є підбір такої геометрії інструменту, яка забезпечує би найбільшу тривалість його роботи.

Прогнозування працездатності інструменту найчастіше виконується на основі експериментальних стійкісних досліджень.

Для узагальнення результатів експериментальних досліджень, розробки практичних рекомендацій, використовують звичайно емпіричні методи, які є дуже трудомісткими, потребують наявності складного, дорогавартісного експериментального устаткування і не мають достатньої точності. Найбільш перспективним є розвиток числових методів прогнозування працездатності інструменту на основі аналізу напружено-деформованого стану в зоні стружкоутворення та закономірності розподілу контактних навантажень на ріжучих поверхнях.

Запропонована робота присвячена розробці засобу розрахунку контактних навантажень для інструменту з складною передньою поверхнею, які є необхідними даними для розв'язку задач прогнозування його працездатності. Розроблено пакет програм, який дозволяє розраховувати контактні навантаження на ріжучих поверхнях, а також еквівалентне напруження в самому інструменті з метою аналізу надійності його роботи.

Мета роботи.  
.....

Розробка методів розрахунку контактних навантажень на ріжучих поверхнях інструмента в залежності від його геометричних параметрів, умов різання, властивості оброблюваного матеріалу для проведення силових, міцнісних і стійкісних розрахунків. Реалізація на основі створеного методу пакета програм по розрахунку контактних навантажень, зусиль різання та еквівалентних напружень в інструменті для прогнозування геометричних параметрів, забезпечуючих максимальну його продуктивність.

В зв'язку з цим вирішувались наступні задачі:

1. Створення математичної моделі процесу різання для розрахунку контактних навантажень на поверхнях інструменту зусиль різання і дослідження стружкоутворення.
2. Дослідження впливу граничних, температурних, швидкісних умов на закономірність розподілу контактних навантажень на поверхнях гострого інструменту.
3. Розрахунок контактних навантажень на ріжучих поверхнях інструменту, який має радіус заокруглення та фаску при вершині.
4. Дослідження процесу стружкоутворення пластичного матеріалу гострим інструментом з різноманітними передніми кутами.
5. Проведення експериментальних досліджень з метою підтвердження результатів теоретичного аналізу.
6. Розробка пакету програм по розрахунку контактних навантажень, зусиль різання та еквівалентних навантажень в ріжучому інструменті з метою прогнозування його роботоздатності.

Наукова новизна.  
.....

1. Розроблено математичну модель процесу різання для розрахунку контактних навантажень на поверхнях інструменту, дослідження напружено-деформованого стану в зоні різання та стружкоутворення при обробці пластичного матеріалу.

Модель дозволяє врахувати:

- зміну геометричних параметрів інструменту (переднього кута; заокруглення вершини, наявність фаски на передній поверхні);
- тертя по поверхні інструменту, при заданому законі його розподілу;
- вплив закономірності розподілу температури і швидкості деформації на величини контактних навантажень і напружено-деформований стан в зоні різання;

зміну геометричних параметрів стружки і значень накопичених деформацій від величини переднього кута гострого ідеально-гладкого ріжучого клину.

Створені алгоритми і програми розрахунку.

2. Встановлено вплив геометрії інструменту на закономірність розподілу навантажень по його поверхні.
3. Знайдено розподіл накопичених значень інтенсивності деформацій в зоні стружкоутворення в залежності від переднього кута гострого гладкого інструменту. Одержано розподіл накопичених деформацій на оброблених поверхні деталі. Встановлено вплив переднього кута інструменту на геометрію стружки.
4. Розроблена експериментальна методика, яка підтверджує характер розподілу навантажень на поверхнях інструменту.
5. Створено пакет програм у вигляді підсистеми САПР-ТІ (САПР-І), який дозволяє розрахувати контактні навантаження на ріжучих поверхнях, а також еквівалентні напруження в інструменті з метою прогнозування його працездатності.

Практична цінність.

.....

Знайдени закономірності розподілу контактних навантажень на поверхнях інструменту та їх вплив на надійність роботи інструменту показали можливість прогнозування працездатності інструменту на стадії його проектування.

Створено метод розрахунку контактних навантажень, реалізований у вигляді пакету програм підсистеми САПР-ТІ (САПР-І), доведений до інженерного рівня. Це дає можливість значно скоротити об'єм випробувань при проектуванні нового інструменту і знайти його геометричні параметри, які забезпечують максимальну тривалість обробки деталей.

В якості прикладу використання створеного пакету програм було виконане визначення надійних геометричних параметрів інструменту для токарної операції обробки направляючих термопластавтомату, які дозволили підвищити стійкість інструменту в 1.4 рази.

Реалізація результатів роботи.

.....

Розроблений пакет програм по моделюванню процесу різання багано застосовувати в виробничих, науково-дослідних, учбових лабораторіях з метою визначення геометрії інструмента, яка забезпечує максимальну тривалість його роботи.

Результати досліджень і пакет програм, в який включено програми по розрахунку контактних навантажень напружено-деформованого стану в зоні стружкоутворення, еквівалентних навантажень в інструменті, по моделюванню процесу стружкоутворення, використовувались при розробці системи автоматизованого проектування технологічних процесів механічної обробки в діалоговому режимі.

Результати дослідження впроваджені на Хмельницькому ВО "АДВІС", Хмельницькому ВО "ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТ", Хотинському заводі "КАЛІВР". Очікуваний річний економічний ефект від застосування розробленої системи автоматизованого проектування в технологічних відділах тільки цих заводів повинен скласти в цінах 1991 року 205 тис. крб., що досягається за рахунок інтенсифікації праці інженера-технолога і підвищення надійності технологічних операцій механообробки.

Розроблені програми числового моделювання процесу різання впроваджені в навчальний процес Хмельницького технологічного інституту і використовуються в науково-дослідницькій діяльності.

#### А п р о б а ц і я   р о б о т и .

.....

Робота велась в співдружності з лабораторією САПР кафедри технології приладобудування Київського політехнічного інституту. Завідуючий лабораторією д.т.н. проф. Остаф'єв В.О. Загальні результати дисертації доповідались на наступних науково-технічних конференціях і семінарах: всесоюзна науково-технічна конференція "Проблеми підвищення якості, надійності і довговечності машин" (Брянськ 1990р.); всесоюзний учбово-технічний семінар "Механіка і технологія машиностроєння" (Свердловськ 1990р.); всесоюзний науково-технічний семінар "Наукоємкі технології розмірної обробки в виробництві деталей машин" (Звенигород, 1992р.); науково-технічна конференція "Современное состояние и перспективы развития процессов резания и холодного пластического деформирования металлов инструментом из сверхтвёрдых материалов" (Київ, 1992р.); науково-технічна конференція "Качество и надёжность технологических систем" (Краматорськ 1992р.); міжреспубліканська науково-технічна конференція "Качество и надёжность узлов трения" (Хмельницький 1992р.); науково-технічна конференція "Современная технология упрочнения, восстановления и механической обработки деталей с покрытиями" (Київ 1993г.); науково-технічна конференція "Повышение эффективности и качества механообрабатывающего производства" (Евпаторія 1993р.); міжнародна науково-технічна конференція "Оснастка-94"

(Київ 1994р.).

### Публікації.

.....

За матеріалами дисертації надруковано 28 робіт, з них одна монографія.

### Структура и об'єм роботи.

.....

Дисертація складається з вступу, шести глав, заключення, переліку літератури з 136 назв.

Робота складається з 214 сторінок машинописного тексту, 96 малюнків, 7 таблиць.

### ЗМІСТ РОБОТИ.

Розглянуті задачі, які стоять при рішенні проблеми розробки інженерних методів розрахунку на міцність ріжучої частини інструменту. Обґрунтовується актуальність роботи, приведений короткий склад її г.ав, відмічені найбільш важливі наукові положення, які захищає автор.

Проведено огляд літератури по питанням дисертації. Відмічено, що створення ефективних систем автоматизованого проектування неможливе без створення систем прогнозування стійкості металоріжучого інструменту в широкому діапазоні умов різання. Успішне рішення задач міцності та оброблюваності потребує ефективних методів вивчення природи та механізму контактних явищ на ріжучих поверхнях різця. Першорядне значення при цьому (особливо для рішення питань міцності ріжучої частини інструменту) мають величини та закономірності розподілу контактних навантажень на ріжучих поверхнях інструмента, визначення яких і уявляє собою одну з основних задач дослідження процесу різання.

Показано, що питання по розробці системи розрахунку контактних навантажень на поверхні ріжучого інструмента з різноманітними геометричними параметрами при обробці металів різанням розглянуті не достатньо глибоко. Вдосконалення методик розрахунку повинно базуватися на чисельних методах дослідження напружено-деформованого стану з урахуванням пружнопластичних деформацій. На основі аналізу існуючих моделей процесу різання вибрана модель,

найбільш припустима для розрахунку контактних навантажень на поверхню інструменту. Приведені огляд літературних джерел і на основі їх аналізу поставлені задачі дослідження.

Обґрунтоване використання моделі плоскої деформації для дослідження контактних навантажень на поверхні інструменту.

Визначені основні припущення і граничні умови.

Оброблюваний матеріал рахується ізотропним, пружно-пластичним тілом, з лінійним зміцненням, підкоряється закону Гука в пружному стані, пластичність матеріалу в області пластичної деформації задовільняє умові текучості Мізеса. В пластичній частині діють співвідношення Прандтля-Рейсса. На поверхні зіткнення матеріалу та абсолютно жорсткого ріжучого клину реалізуються умови ідеального ковзання та неградиєнтного тертя. Результатом вирішення поставленої задачі є знаходження рівнів напружень та переміщень в досліджуваному матеріалі, а також розрахунок напружень на інструменті в результаті його переміщення.

Відзначено, що для вирішення поставленої задачі доцільно використовувати метод кінцевих елементів. За кінцевий елемент прийнятий трикутний симплекс-елемент, який припускає, що напруга та деформація у середині елемента є постійною та змінюється при переході від одного кінцевого елемента до другого.

Характеристичне рівняння для трикутного симплекс-елемента при безкінцево малій деформації має вигляд:

$$\{P\} = AS [B]^T \{\epsilon\}, \quad (1)$$

де  $A, S$  - площа і товщина елемента,

$\{\epsilon\}$  - напруга в елементі,

$\{P\}$  - сили у вузлах,

$[B]^T$  - транспонована матриця градієнтів  $[B]$ .

Повний вираз для швидкості зміни сили в вузлі :

$$\{dP\} = AS [dB] \{\epsilon\} + AS [B]^T \{d\epsilon\}. \quad (2)$$

В рівнянні (2) не враховується зміна площі елемента  $A$ , так як при пластичному деформуванні металів зміною об'єму можна знехтувати.

В основному при вирішенні технологічних задач обробки металів методом кінцевих елементів використовується теорія безкінцево малої деформації, яка передбачає, що форма елемента або матриця градієнтів  $[B]$  не змінюється, оскільки при рошенні деформації дуже

мале і швидкість зміни напруження  $\{d\sigma\}$  залежить тільки від швидкості зміни деформації. В дійсності, для отримання більш точного результату, в кінцево-елементній моделі необхідно врахувати зміну форми елемента та його обертання при кожному прирощенні деформації. Така теорія називається теорією кінцевої деформації. Швидкість зміни напруження  $\{d\sigma\}$  при цьому залежить не тільки від деформації, тобто  $\{d\sigma\} = [D] \{d\epsilon\}$ , але й від обертання елемента. При обертанні елемента, навіть коли напруження, пов'язане з матеріально фіксованими координатами, залишається постійним, напруження Ейлера або Коші  $\{\sigma^e\}$ , пов'язане з просторово-фіксованими координатами, змінюється. Очевидно, що в характеристичному рівнянні повинно розглядатись прирощення напруження Йомена, пов'язане з рухомою системою координат, тобто  $\{d\sigma^i\}$ . Таким чином,  $\{d\sigma^i\} = [D] \{d\epsilon\}$ .

Знайшовши зв'язок між  $\{d\sigma^e\}$  і  $\{d\sigma^i\}$  для плоского деформованого стану, характеристичне рівняння можна подати у вигляді:

$$\{dP\} = AS[B]^T \{d\sigma^i\} + AS[dB]^T \{\sigma\} + AS[B]^T d\omega \begin{Bmatrix} -2 \tau_{xy}^e \\ 2 \tau_{xy}^e \\ (\sigma_x^e - \sigma_y^e) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Тоді загальну залежність можна записати як

$$\{dP\} = [K_1] \{du\} + [K_2] \{d\omega\} + [K_3] \{d\theta\} \quad (4)$$

де  $[K_1]$  - матриця, пов'язана із зміною деформації,

$$[K_1] = AS[B]^T [D] [B], \quad (5)$$

$[K_2]$  - матриця, пов'язана із зміною форми елемента;

і  $[K_3]$  - матриця, пов'язана з обертанням елемента.

При обчислюванні за наведеними залежностями повне напруження та деформації визначалися шляхом додавання величин прирощення, обчислюваних на кожному етапі.

Одержані матричні співвідношення для визначення матриці жорсткості легко вбудовуються в розрахункові моделі на ЕОМ та були реалізовані у вигляді кінцево-елементних програм.

В моделі також, на підставі обчислювання швидкості дисипації енергії пластичного деформування, передбачалась можливість повернення елемента в пружний стан при його розвантаженні.

Перевірка співвідношень проводилась на задачі стиснення металічного куба між двома паралельними гранично жорсткими

плитами в умовах плоскої деформації.

Для апробації моделі в якості заготовки використовували чисту дилатену мідь. Розрахунки проводились для таких випадків навантаження:

1 - враховувалось обертання і зміна форми елемента, тобто,

$$\{dP\} = [K_1]\{du\} + [K_2]\{du\} + [K_3]\{du\}, \quad (6)$$

2 - враховувалась зміна форми, тобто,

$$\{dP\} = [K_1]\{du\} + [K_2]\{du\}, \quad (7)$$

3 - не враховувалось обертання і зміна форми, тобто

$$\{dP\} = [K_1]\{du\}. \quad (8)$$

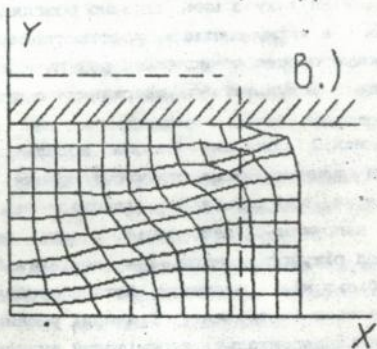
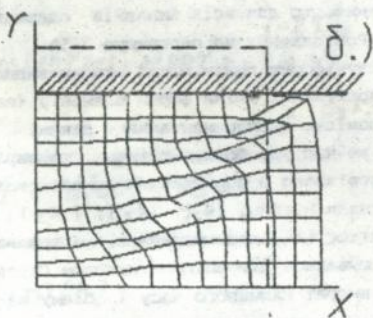
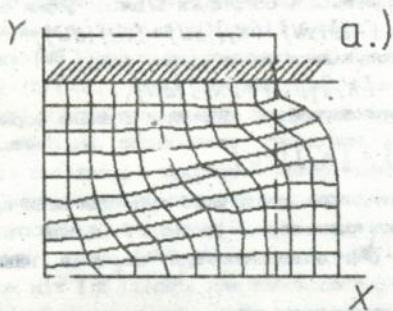
Повна величина деформації кубу для всіх випадків навантаження приймалась однаковою. На мал.1 (а,б,в) відповідно показані результати формоутворення для випадків навантаження, описаних вище.

Якщо аналізувати зміну розрахованого деформуючого зусилля від переміщення, то для всіх випадків одержано достатньо близькі результати. Розходження не перевищує 2-5%.

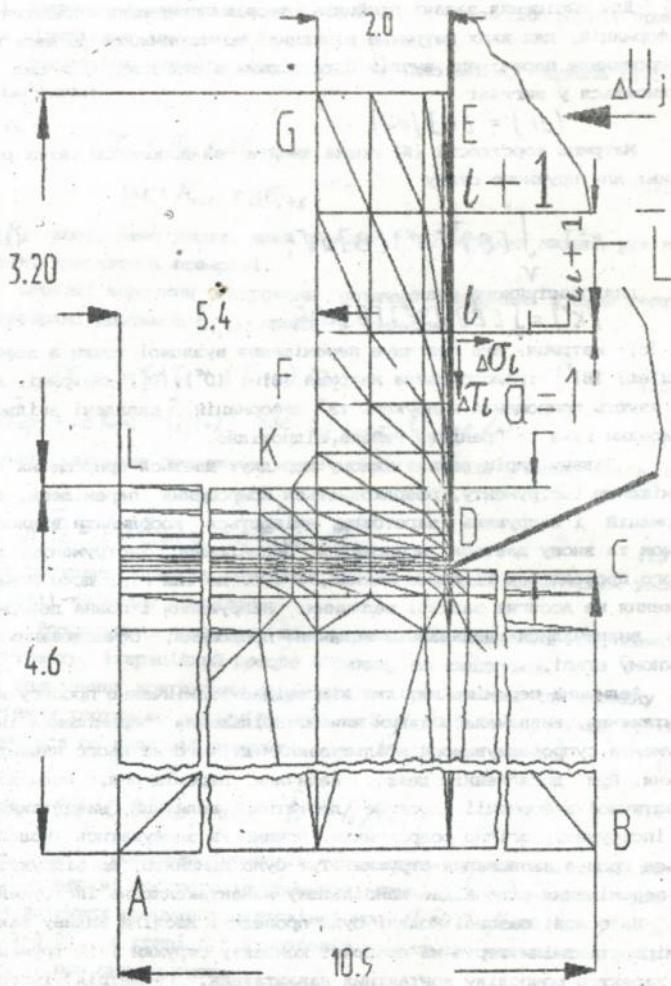
З аналізу форми плити після осадки видно, що в другому випадку (при врахуванні зміни форми елемента (мал.1б)) вона найбільш близько відповідає експериментальним даним.

В той же час у роботі відмічено, що вирішення першої і другої задачі пов'язано з формуванням комплексної матриці жорсткості, яка включала матриці  $[K_1]$ ,  $[K_2]$ ,  $[K_3]$ . При цьому глобальна матриця жорсткості є несиметричною, одержана система лінійних рівнянь вирішувалась ітераційним методом Гауса-Зейделя, що потребує великих витрат машинного часу і об'єму пам'яті для проведення обчислень. У зв'язку з цим, доречно розглянути третій випадок навантаження, в якому матриця жорсткості має симетричну форму, що різко спрощує процес обчислень, а результати розрахунків практично співпадають з результатами, одержаними в другому випадку навантаження.

На мал.2 показана базова модель процесу зняття стружки ріжучим клином. Зона стружкоутворення розбита на елементи, розміри яких вар'юються у відповідності до нерівномірності розподілу напружень і деформацій. В зоні найбільшої деформації, тобто перед ріжучою кромкою, і в контактній зоні проведена розбивка на більш малі елементи. Деталь прийнята нерухомою, переміщення надається інструменту. Граничні умови такі: вздовж AL - горизонтальні. Вузловим точкам поверхні DE надаються однакові го-



Нап. 1. Результати еормоутворення для відповідних випадків навантажень.



Мал. 2. Базова модель процесу зняття струмки ідеалі: о-гострик ріжучий клином.

ризонгальні переміщення, рівні переміщенню інструменту. Величина кроку визначалася в результаті пробних запусків моделі.

Для вирішення задачі прийнята теорія приросення пластичних деформацій, для яких матричне рівняння, що встановлює зв'язок між приросенням переміщень вузлів  $U$  та діючих в них приросень сил  $F$ , залишається у вигляді :

$$\{dF\} = [K] \{dU\}. \quad (9)$$

Матрицю жорсткості  $[K]$  можна знайти за допомогою таких рівнянь: для пружного стану

$$[K^e] = \int_V [B]^T [D^e] [B] dV; \quad (10)$$

для пластичного стану

$$[K^p] = \int_V [B]^T [D^p] [B] dV, \quad (11)$$

де  $[B]$  - матриця, яка пов'язує переміщення вузлової точки з деформацією;  $[B]^T$  - транспонована матриця  $[B]$ ;  $[D^e]$ ,  $[D^p]$  - матриці, які зв'язують приросення напружень та деформацій, складені згідно з законами Гука та Прандтля-Рейсса відповідно.

Задачу вирішували в такому порядку: дається приросення переміщенню інструменту, розраховується приросення переміщень, деформацій і напружень заготовки, змінюються координати вузлових точок та знову дається приросення переміщенню інструменту, для якого проводяться ті ж розрахунки, і т.п. до тих пір, доки навантаження не досягне заданої величини. Напруження і повна деформація визначалися додаванням величин приросень, обчислюваних на кожному етапі.

Величина переміщення, яка відповідає закінченню процесу навантаження, визначалася таким чином. Збільшення переміщення інструмента супроводжувалося збільшуванням діючого на нього навантаження. При досягненні деякої величини переміщення, коли зона пластичної деформації досягне достатньої величини, навантаження на інструмент, згідно розрахунків, починають знижуватись (моделюється процес сколювання стружки). Тут було прийнято, що відшукування переміщення відповідає найбільшому навантаженню на інструмент.

На основі базової моделі були проведені дослідні впливи закономірності зміни тертя на поверхні контакту стружки і інструменту на характер розподілу контактних навантажень. Геометрія інструменту, параметри процесу різання та граничні умови по закріпленню заготовки використовувалися такі ж, як і в попередній задачі.

Для врахування тертя по передній поверхні інструменту використаний коефіцієнт пропорційності між нормальними і дотичними

нагруженнями  $\mu_x$ .

Урахування тертя проводилося таким чином. Нехай  $i$  - а та  $(i+1)$  - а вузлові точки получили  $j$  - е приращення переміщень  $dU_j$ . Тоді приращення нормальних напружень в цих вузлових точках приймуть відповідно значення  $\Delta \bar{\sigma}_i, \Delta \bar{\sigma}_{i+1}$  (мал.2).

Приращення дотичних напружень, згідно закону Кулона будуть порівнювати:

$$\begin{aligned} \Delta \tau_i &= \mu_{xi} \times \Delta \bar{\sigma}_i; \\ \Delta \tau_{i+1} &= \mu_{x(i+1)} \times \Delta \bar{\sigma}_{i+1}, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $\mu_x$  - коефіцієнт тертя, який в загальному випадку змінюється по довжині контактної поверхні.

Середні величини приращень дотичних напружень і сили тертя на поверхні довжиною  $l_{i,i+1}$  приймуть значення:

$$\Delta \tau_{cp i} = (\Delta \tau_i + \Delta \tau_{i+1}) / 2; \quad (13)$$

$$\Delta \bar{F}_{cp i} = \Delta \tau_{cp i} \cdot \bar{l}_{i,i+1}, \quad \text{где } \bar{l}_{i,i+1} = \bar{l}_{i,i+1} / a. \quad (14)$$

Нарешті, величина приращення сили тертя в точці  $i$  визначалась як

$$\Delta \bar{F}_i = (\Delta \bar{F}_{cp i-1} + \Delta \bar{F}_{cp i}) / 2, \quad (15)$$

і використовувалась при вирішенні задачі в якості початкових умов для  $(i+1)$ -го етапу обчислень.

Розрахунки показали, що при заданій величині приращення інструменту, ітераційний процес є таким, що сходиться.

Визначення контактних навантажень проводилося для випадку з постійним тертям по передній поверхні  $\mu_x = 0.2, 0.4$ , і, коли тертя змінюється по передній поверхні, по лінійному закону

$$\mu_x = 0.2 + 0.21 \times \bar{L}, \quad \text{где } \bar{L} = L/a. \quad (16)$$

На мал.3 показано розподіл контактних навантажень по передній поверхні гострого інструменту. Криві 1,2,3 показують розподіл дотичних напружень відповідно при  $\mu_x = 0.2, \mu_x = 0.4, \mu_x = 0.2 + 0.21 \bar{L}$ . А криві 4,5,6 розподіл нормальних навантажень, відповідно, при цих же умовах.

Якісне порівняння розрахункових кривих з експериментальними даними показало, що випадок з  $\mu_x = 0.2 + 0.21 \bar{L}$  (мал.3(3,6)) найбільш близько відповідає досліду. Особливо це має відношення до дотичних

напружень, де спостерігається плосина текучості в пластичній зоні. Одержані результати підтверджують, що характер зміни тертя по поверхні близький до лінійного, це необхідно враховувати при розрахунку дотичних навантажень.

При вирішенні попередніх задач допускалося, що процес деформації проходив при мінімальних швидкостях різання та не враховувався вплив швидкості деформації, нерівномірності температурного поля на закономірність розподілу контактних навантажень. При вирішенні пластично неоднорідної задачі взаємозв'язок між температурами у зоні різання та границев текучості оброблюваного матеріалу були апроксимовані залежністю:

$$\sigma_{OS} = \sigma_{OSH} (1 - 0.5 \times 10^{-3} \theta), \quad (17)$$

де  $\theta$  - температура у зоні стружкоутворення,  $\sigma_{OSH}$  - границя текучості матеріалу в нормальних умовах. Сумісний вплив швидкості деформації та температури враховано за допомогою формули:

$$\sigma_{OS} = 1.15 \sigma_{OSH} (1 - \theta'), \quad (18)$$

де  $\theta'$  - приведена температура і  $\theta' = \theta/\theta_c$ , де  $\theta_c$  - температура плавлення оброблюваного матеріалу.

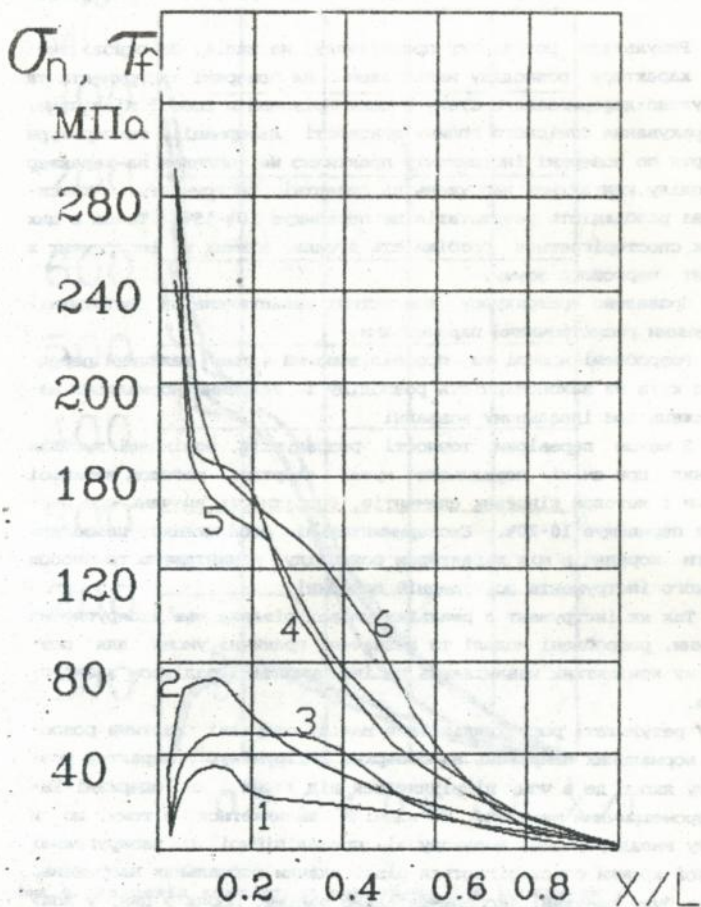
Для врахування впливу температури на границю текучості матеріалу у зоні різання у роботі використана температурна модель, яка одержана за методикою Резнікова А.Н., при таких умовах: матеріал ШХ15, швидкість різання  $V = 80$  м/хв, подача  $S = 0.5$  мм/об, глибина  $t = 4.1$  мм, передній кут  $\gamma = 0^\circ$ , матеріал інструмента Т14К8.

Заготовка має такі механічні характеристики: модуль пружності  $E = 2 \times 10^5$  МПа, коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0.3$ , напруження початку текучості, при  $\theta = 20^\circ$ ,  $\sigma_{SH} = 410$  МПа, модуль міцності  $H' = 330$  МПа.

Зону стружкоутворення розбили на елементи, визначили температуру в вузлах і середню в елементах.

Задачі вирішені при таких умовах:

1. Без урахування температурного поля, швидкості деформації для ідеально гладкого інструменту.
2. З урахуванням нерівномірності температурного поля, без урахування швидкості деформації для ідеально гладкого інструмента.
3. З урахуванням спільного впливу нерівномірності температурного поля, швидкості деформації для негранично шоркуватого інструменту.
4. З урахуванням нерівномірності температурного поля, без ураху-



Мал. 3. Розподіл контактних напружень на поверхні інструменту для різних умов тертя по передній поверхні.

- (1- $\tau_f$ ), (4- $\sigma_n$ ),  $\mu_x = 0.2$ ;  
 (2- $\tau_f$ ), (5- $\sigma_n$ ),  $\mu_x = 0.4$ ;  
 (3- $\tau_f$ ), (6- $\sigma_n$ ),  $\mu_x = 0.2 + 0.21\bar{L}$ .

вання швидкості деформації для негранично-шорокуватого інструмента.

Результати розрахунку представлені на мал.4. На основі аналізу характеру розподілу навантажень на поверхні інструмента та напружено-деформованого стану в зоні різання в роботі відмічено, що урахування сумісного впливу швидкості деформації, температури і тертя по поверхні інструменту практично не впливає на характер розподілу контактних напружень на поверхні інструменту. Максимальна розбіжність результатів не перевищує 10%-15%. Також в цих межах спостерігається розбіжність зусиль, діючих на інструмент в момент чергового зсуву.

Проведено розрахунок контактних навантажень на інструменті з різними геометричними параметрами.

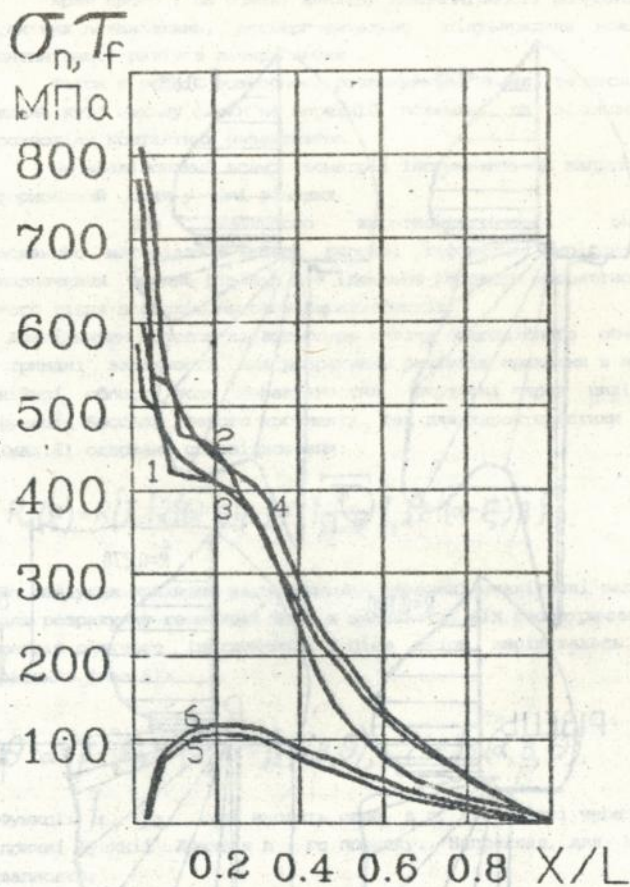
Розроблені моделі та проаналізований вплив величини переднього кута на закономірність розподілу і величини нормальних навантажень при ідеальному ковзанні.

З метою перевірки точності розрахунків, порівняні зусилля різання при зміні переднього кута, одержані методом верхньої оцінки і методом кінцевих елементів. Розбіжність значень при цьому не перевищує 10-20%. Експериментальні дослідження дозволили знайти кореляцію між характером розподілу навантажень та зносом ріжучого інструмента по передній поверхні.

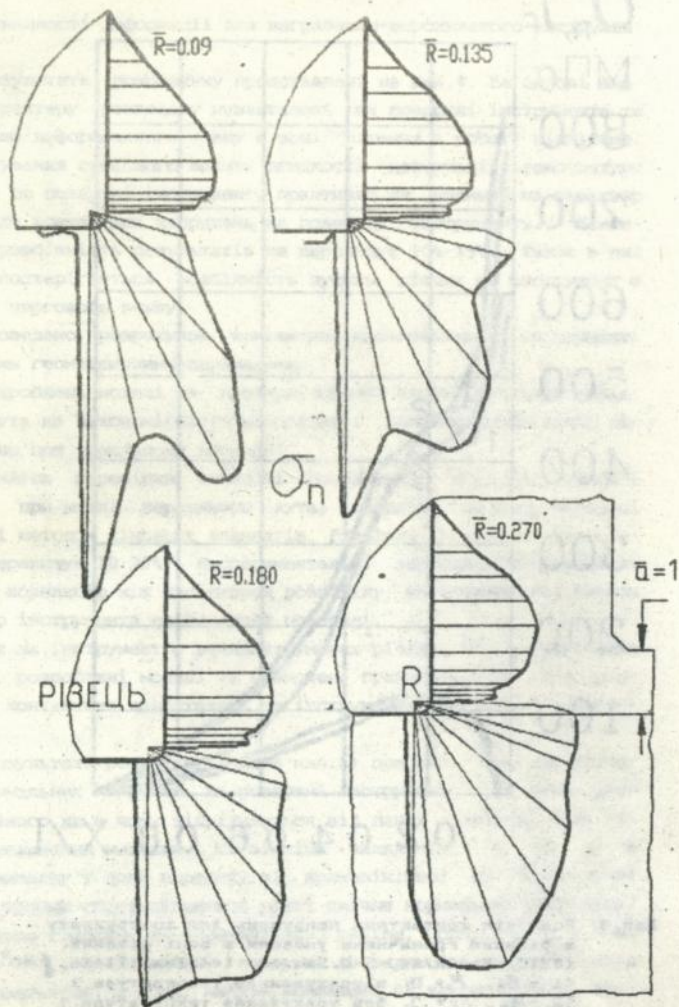
Так як інструмент в реальних умовах різання має заокруглені вершини, розроблені моделі та визначені граничні умови для розрахунку контактних навантажень на інструменті з радіусом заокруглення.

У результаті розрахунків (див мал.5) одержані картини розподілу нормальних напружень на поверхні інструменту, характер розподілу якого де в чому відрізняється від даних, які одержані інтерферометричним методом. Ця відміна виявляється в тому, що в нашому випадку у зоні переходу від прямолінійної до заокругленої ріжучої кромки спостерігаються різкі скачки нормальних напружень, які не були одержані експериментально раніше. Поряд з цим, у зоні переходу від криволінійної поверхні до задньої спостерігаються піки навантажень, і вони, мабуть, впливають на закономірність зношення інструменту в цій області.

Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану інструмента інтерферометричним методом на розробленій в Київському політехнічному інституті установці підтвердили отриманий розрахунком характер розподілу нормальних навантажень.



Нап. 4. Розподіл контактних напружень для інструменту з різними граничними умовами в зоні різання. (BX15,  $V=80\text{м/хв}$ ,  $S=0.5\text{мм/об}$ ,  $t=4\text{.лм}$ ,  $T14\text{KB}$ ,  $\gamma=0^\circ$ )  
 (1 -  $\sigma_n$ ,  $\mu_x=0$ , з урахуванням температури)  
 (2 -  $\sigma_n$ ,  $\mu_x=0$ , без урахування температури)  
 (3 -  $\sigma_n$ ,  $\tau$ ,  $\mu_x=0.2+0.21L$ , з урахуванням температури)  
 (4 -  $\sigma_n$ ,  $\tau$ ,  $\mu_x=0.2+0.21L$ , з урахуванням температури і швидкості дезоріації).



Мал. 5. Вплив величини радіуса заокруглення на закономірність розподілу нормальних напружень на поверхні інструменту.

Крім цього, на основі аналізу закономірності розподілу контактних навантажень, експериментально підтверджена можливість оптимізації радіуса заокруглення.

Також у роботі розроблені розрахункові моделі та досліджений вплив кута нахилу фаски на передній поверхні на закономірність розподілу контактних навантажень.

Проаналізований вплив геометрії інструменту на напружено-деформований стан у зоні різання.

Для ідеального жорсткопластичного деформованого матеріала в умовах плоскої деформації вирішена задача визначення зусиль різання для ідеально-гладкого абсолютно жорсткого тіла з фаскою методом характеристик.

Аналітичним методом, за допомогою метода операційного обчислення отримані залежності для розрахунку радіусів кривизни в криволінійній області поля характеристик, виражені через циліндричні функції Бесселя уявного аргументу. Так для характеристики (мал.6) одержано співвідношення:

$$R_n(\xi) = R \left[ I_0 \{ 2\sqrt{(\alpha-\xi)\beta} \} + \sqrt{\frac{\beta}{\alpha-\xi}} I_1 \{ 2\sqrt{(\alpha-\xi)\beta} \} \right]. \quad (19)$$

По радіусам кривизни характеристик знайдені аналітичні залежності для розрахунку геометрії поля в залежності від геометричних параметрів ріжучого інструмента. З цією метою вирішувалась система рівнянь (мал.6):

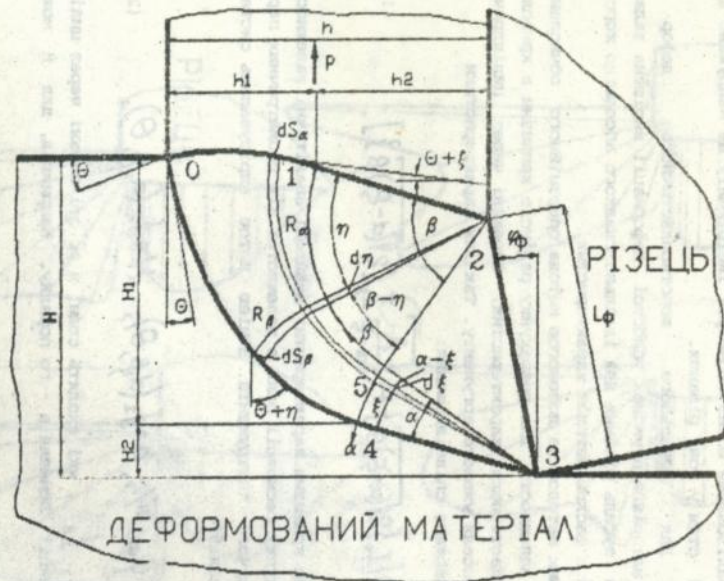
$$\theta + \alpha = \beta \cdot \varphi \varphi - \pi/4, \quad h = f_1(\alpha, \beta, \theta), \quad H = f_2(\alpha, \beta, \theta). \quad (20)$$

функції  $f_1$ ,  $f_2$ , які входять сюди, в рс зті подані через циліндричні функції Ломмеля  $n$ -го порядку. Наприклад, для  $H$  можна записати:

$$H = H_1 + (L\varphi/\sqrt{2}) \cos(\theta + \beta), \quad (21)$$

тут  $H$  визначиться

$$H_1 = R \left[ \cos \theta \int_0^{\beta} I_0 \{ 2\sqrt{\alpha(\beta-\eta)} \} \cos \eta d\eta + \cos \theta \times \int_0^{\beta} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta-\eta}} I_1 \{ 2\sqrt{\alpha(\beta-\eta)} \} \cos \eta d\eta - \right. \quad (22)$$



Мал. 6. Поле характеристик для інструменту в евасков.

$$-\sin \theta \int_0^{\beta} I_0 \{ 2\sqrt{\alpha(\beta-\eta)} \} \sin \eta d\eta - \sin \theta \times \\ \times \int_0^{\beta} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta-\eta}} I_1 \{ 2\sqrt{\alpha(\beta-\eta)} \} \sin \eta d\eta ],$$

а один із інтегралів по залежності:

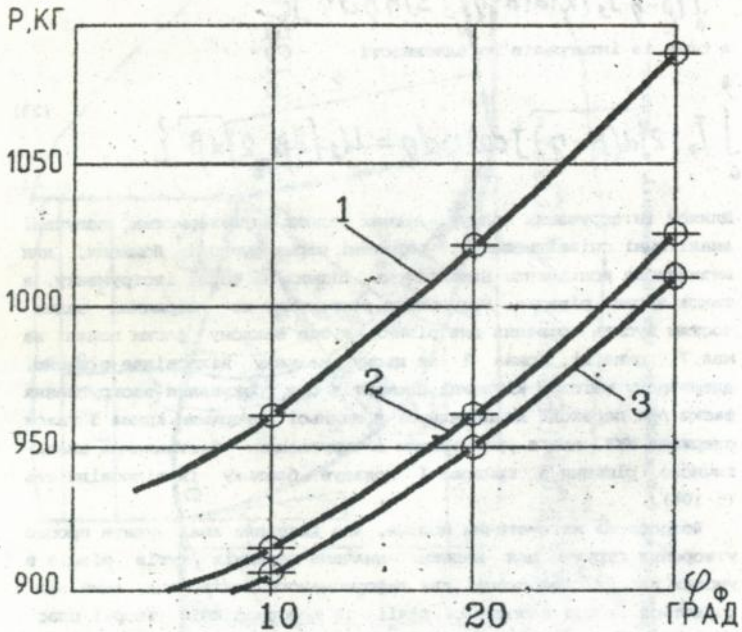
$$\int_0^{\beta} I_0 \{ 2\sqrt{\alpha(\beta-\eta)} \} \cos \eta d\eta = U_1 \{ 2\beta, 2\sqrt{\alpha\beta} \}. \quad (23)$$

Шляхом інтегрування напруг, діючих уздовж характеристик, отримані аналітичні співвідношення, виражені через функції Ломмеля, для визначення контактних навантажень, діючих на фасці інструменту, а також зусиль різання. Результати розрахунку по одержаним залежностям зусиль різання для різних кутів наклону фаски подані на мал.7 (крива 2). Крива 1 на цьому малюнку відповідає рішенню, одержаному методом кінцевих елементів без урахування заокруглення фаски при переході до передньої и задньої поверхням. Крива 3 також одержана МКЕ, але з урахуванням заокруглення. Зіставлення аналітичного рішення з кривою 1 показує близьку їх відповідність (5-10%).

Возроблена математична модель, яка дозволяє аналізувати процес утворення стружки для великих значень передніх кутів різців в умовах плоскої деформації для деформованого матеріалу, який підкоряється теорії пластичної течії та деформаційній теорії пластичності. Використовуючи основні співвідношення деформаційної теорії пластичності одержані залежності, і використовуються при кінцево-елементному моделюванні. З метою можливості розрахунку напружено-деформованого стану в пластичній області введено поняття січного модуля, який визначається по залежностям:

$$E_s = \sigma_i / \epsilon_i = 3T / \gamma. \quad (24)$$

В роботі розглянуті два критерія розділу обробленого матеріалу при утворенні стружки, причому перший базується на критичній величині ефективної пластичної деформації поблизу ріжучої кромки, а другий - на моделі руйнування, заснований на концепції пластичного розривлення матеріалу при пластичній деформації.



Мал. 7. Залежність зусилля деформування від кута нахилу фаски для різних методів вирівнювання:  
1-НКЕ без заокруглення фасок;  
2-Аналітичний метод;  
3-НКЕ з заокругленням фасок.

Згідно першого критерія приймалося, що вузол відділявся від заготовки і становився частиною стружки в випадку, коли величина ефективно пластичної деформації в найближчому до вершини інструмента вузлі досягала заданої величини (наприклад 0.4 або 0.8 од).

Другий критерій припускав, що початок утворення макроскопічної тріщини та перехід частини матеріалу в стружку було пов'язане з досягненням критичного значення пластичного розривлення. При цій умові руйнування макрочастки подавалося так:

$$\psi = \int_{t_0}^{t_p} (H/\Delta p) dt = 1. \quad (25)$$

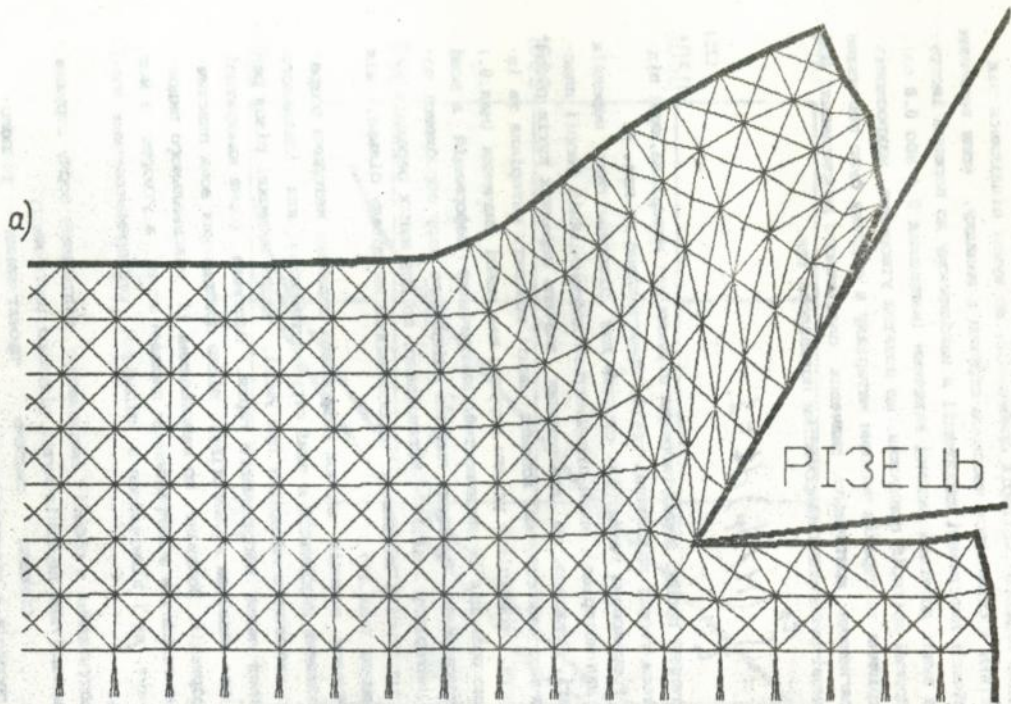
Поетапний процес формоутворення стружки для матеріала, який підкоряється теорії пластичної течії, представлено на мал. 8.

Розрахована геометрія стружки для різноманітних передніх кутів для матеріала, який підкоряється деформаційній теорії пластичності. Показано, що для великих значень передніх кутів різця радіус закрутки стружки, довжина лінії контакту матеріала та інструмента, коефіцієнт усадки стружки має менші значення (мал.9.) Знайдено розподіл інтенсивностей накопичених деформацій в зоні стружкоутворення. Виявлена глибина зміцненого шару обробленої поверхні матеріалу (мал.10). Встановлено, що для малих передніх кутів різця ступінь зміцнення оброблюваного матеріалу більше, ніж для великих (мал.11).

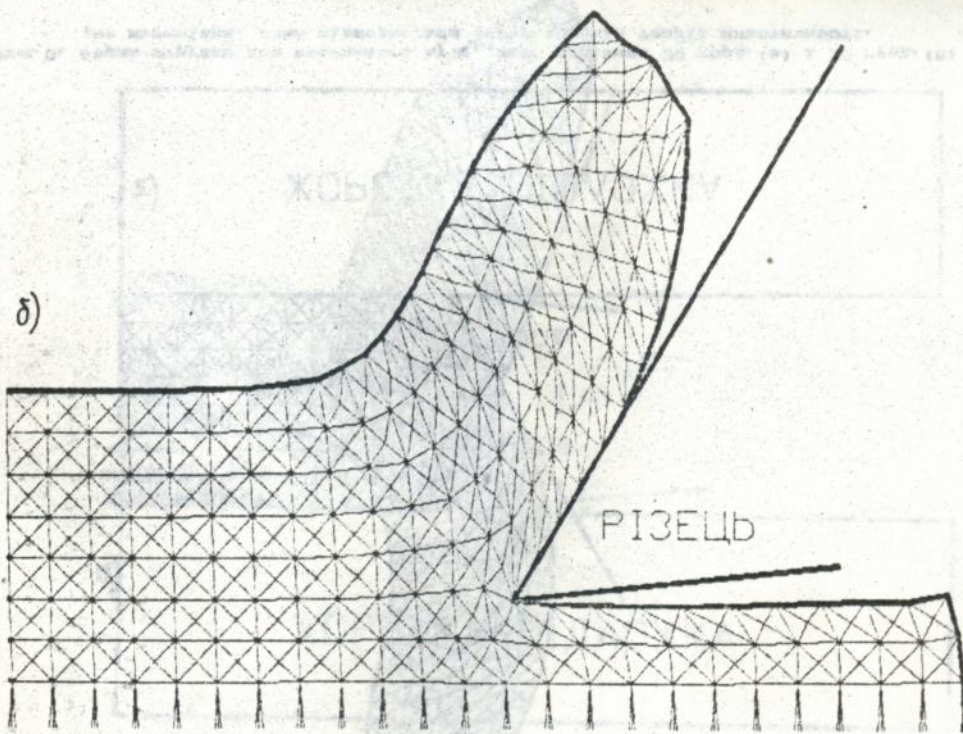
Методом верхніх оцінок розроблена спрощена методика розрахунку значень деформацій в зоні стружкоутворення для ідеального жорсткопластичного матеріалу при умові, що на поверхні різця реалізуються умови неграничного тертя. Одержана форма квадратної сітки, яка нанесена на заготовку, після проходження зони пластичної деформації. Показано, що напрямлення її максимального видовження не співпадає з напрямленням площини зсуву, а утворює з нею деякий кут, як і відмічалось в більшості експериментальних досліджень.

Представлений в роботі експеримент підтвердив форму стружки для різноманітних передніх кутів ріжучого інструменту.

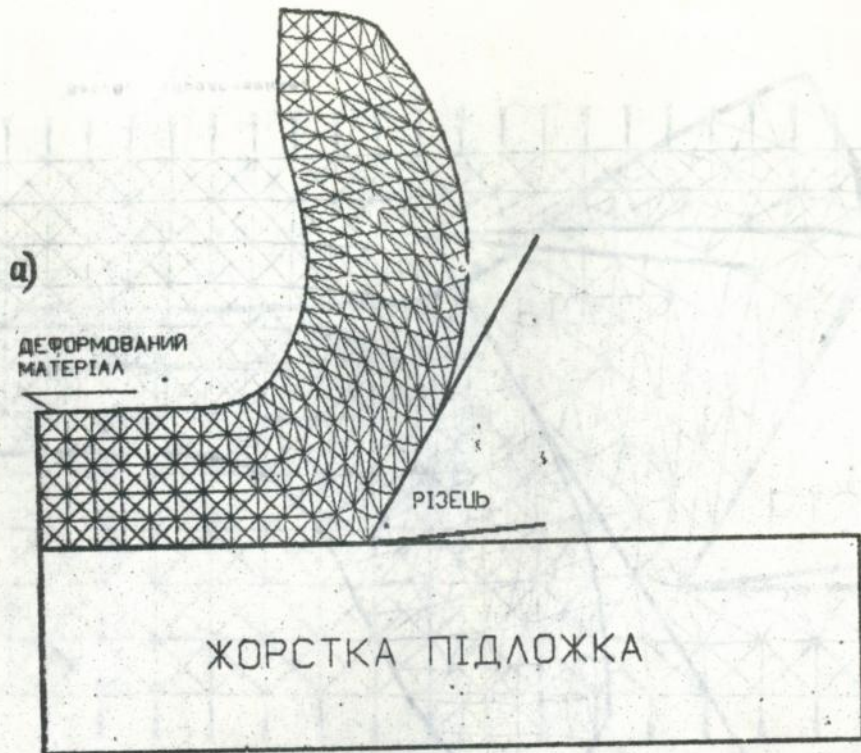
Описана система проектування технологічних процесів в діалоговому режимі (САПР-ТП). Система розроблена на кафедрі технології машинобудування Хмельницького технологічного інституту і уявляє собою комплекс програм і інформаційних файлів, призначених для автоматизації проектування техноло-



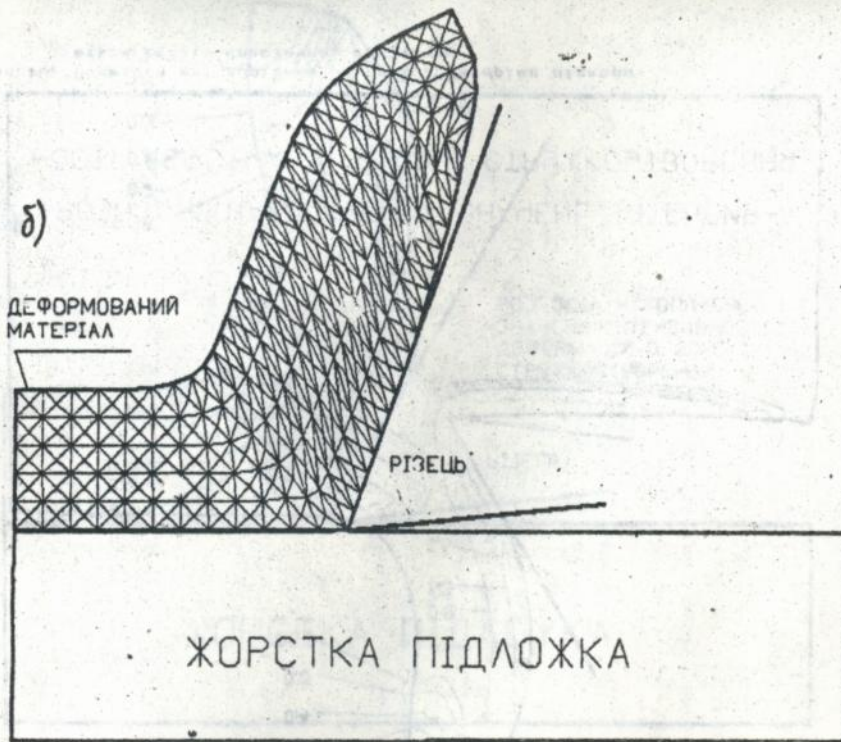
Мал. 8. Перший (а) та другий (б) етапи формування для матеріалу, який підкоряється теорії пластичної течії.



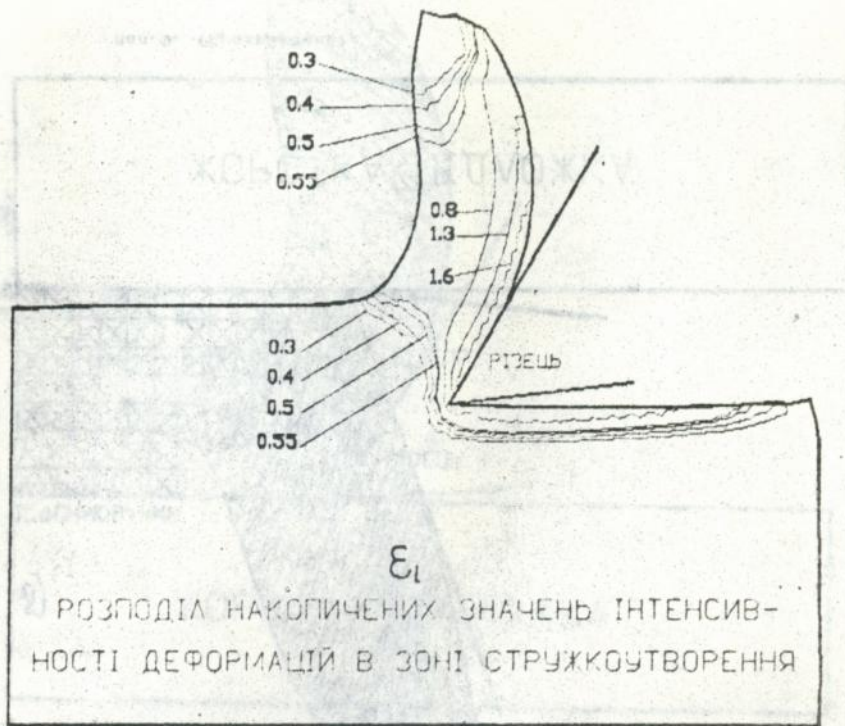
Мал. 8. (Продовження)



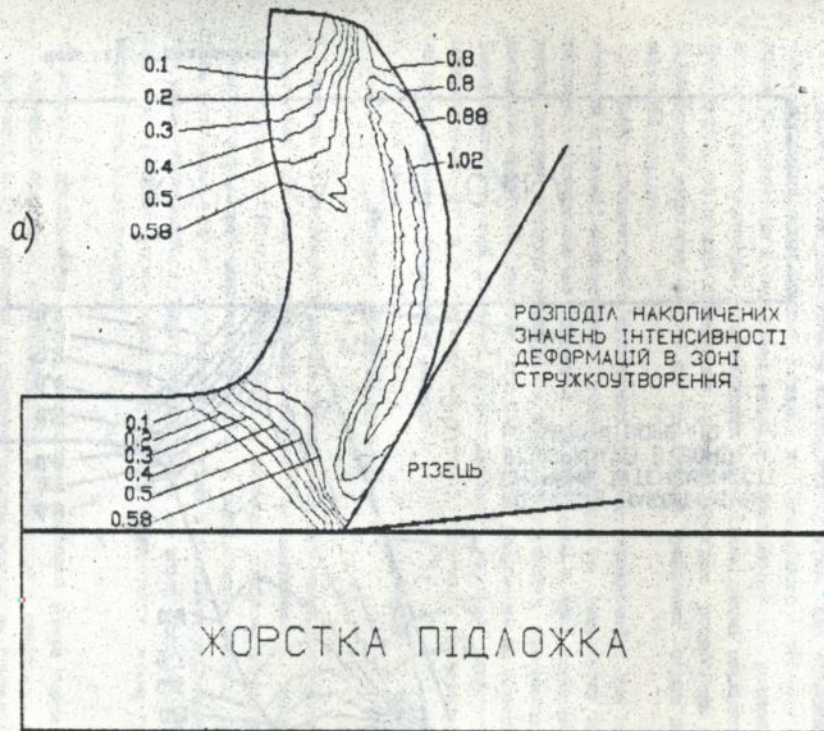
Нап. 9. Форма стружки для переднього кута, який дорівнює 30 град. (а) і 20 град. (б) для матеріала, який підкоряється деформаційній теорії пластичності.



Нап. 9. (Продовження)



Мал. 10. Передній кут долівки 30 град., матеріал підкоряється теорії пластичної течії.



Мал. 11. Передній кут дорівнює 30 град. (а) і 20 град. (б). Матеріал підкоряється деорнаційній теорії пластичності.



Мал. 11. (Продовження)

гічких процесів обробки деталей на універсальному обладнанні. Система складається з програм по формуванню баз даних обладнання, оснащення, пристроїв, інструментів і оригінального екранного редактора-технолога, який, використовуючи бази даних, програми по розрахунку режимів різання, дозволяє в діалозі формувати, коректувати технологічний процес обробки деталей та одержувати комплект технологічної документації в відповідності з ЕСКД.

Система також забезпечена комплектом програм, які дозволяють чисельно змодельвати процес різання др. літучого матеріалу обраним інструментом і на основі аналізу закономірності розподілу контактних навантажень скоректувати його геометричні параметри. Крім цього, на основі створеного пакету програм розроблено послідовність розв'язку задачі по визначенню граничних подач для операції точіння.

Пакет складається з сукупності програм, призначених для підготовки моделей, моделювання процесу різання та розрахунку контактних навантажень на поверхні та напружень в зоні різання, а також програм обробки результатів розрахунку. Тобто, малювання за допомогою графічної системи AutoCAD картин напружень на поверхні інструменту і в зоні різання, по розрахунку і аналізу напружено-деформованого ст. у в різучому інструменті, викликаного зовнішніми навантаженнями, одержаними раніше.

#### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Розроблена теоретична модель процесу різання пластичного матеріалу, яка дозволяє розрахувати контактні навантаження на поверхні інструменту. Модель реалізована у вигляді кінцево-елементної моделі процесу ортогонального різання. Р розробленій моделі деталь розглядається як пружнопластичне тіло з лінійним зміцненням, при цьому враховуються: вплив умов різання на зміну його механічних властивостей, умови тертя по поверхні інструменту, зміна геометрії передньої поверхні.
2. Виконані дослідження дають можливість оцінити вплив тертя по передній поверхні, нерівномірність температури і швидкості деформації в зоні різання на закономірність розподілу контактних напруг. При цьому встановлено:
  - Використання усередненого коефіцієнту тертя  $\mu$  по поверхні інструменту викривляє характер розподілу дотичних напружень. Для їх розрахунку припустиво використовувати лінійний закон роз-

поділу тертя по довжині контакту.

- Спільне врахування температурно-швидкісного фактору не змінює характер розподілу напружень на поверхні інструменту і не значно впливає на їх величину. Тобто, дослідження напружень, які діють на інструмент, можна проводити з достатньою достовірністю, нехтуючи нерівномірністю розподілу температури і швидкості деформацій в зоні різання.
3. На підставі досліджень встановлено, що більш працездатний інструмент має таку геометрію, яка забезпечує найбільш рівномірний розподіл напружень по його поверхням.
- Так, зменшення переднього кута дає більш рівномірний розподіл нормальних напружень при вершині інструменту.
  - Наявність радіусу заокруглення вершини інструменту та на перехідних поверхнях (від фаски до задньої та передньої поверхням) зменшує піки напружень в цих областях інструменту, отже підвищує міцність ріжучої кромки згідно критерію граничного стану.
  - Встановлено, що для досліджених матеріалів, геометрії інструменту величина відносного радіусу заокруглення, який забезпечує максимальну працездатність інструменту, знаходиться в межах 0.25-0.27 одиниць.
  - Наявність фаски на передній поверхні зменшує пік напружень при вершині інструменту. Для досліджених матеріалів при  $\gamma = 0^\circ$  кут нахилу фаски, який відповідає найбільшій міцності ріжучої кромки і найменшому зносу по задній поверхні знаходиться в межах  $-20^\circ \dots -30^\circ$ .
4. Розроблено математичну модель, яка дозволяє аналізувати процес утворення стружки для великих передніх кутів при умові, що деформований матеріал - пластичне тіло, яке підкоряється теорії пластичної течії і деформаційної теорії пластичності.
- Розраховано геометрію стружки для різноманітних передніх кутів. Показано, що для великих значень передніх кутів різця радіус скрутки стружки, довжина лінії контакту матеріалу і інструменту, коефіцієнт усадки стружки мають менші значення.
  - Знайдено розподіл інтенсивності накопичених деформацій в зоні стружкоутворення. Встановлено, що для малих передніх кутів різця ступінь зміцнення оброблюваного матеріалу більше, ніж для великих.
- Виявлена глибина зміцненого шару обробленої поверхні матеріалу.

- Експериментально підтверджена форма стружки для різьблених передніх кутів ріжучого інструменту.
5. Методом характеристик одержані аналітичні залежності для визначення зусилля деформування при знятті стружки різцем з фаскою. Залежності виражені через циліндричні функції Ломеля та Весселя. Співставлення зусиль, розрахованих методом кінцевих елементів і аналітично для різних кутів нахилу фаски показує їх відповідність.
  6. На основі розробленої математичної моделі створений програмний комплекс. Він включений в систему діалогового проектування технологічних процесів. Дозволяє для різної геометрії ріжучого інструменту визначити контактні навантаження, проаналізувати напружено-деформований стан зони стружкоутворення та інструменту, змодельувати стружку, розрахувати зміцнення поверхневого шару деталі після обробки.
  7. В якості прикладу подана послідовність розрахунку надійних геометричних параметрів інструменту і граничних подач для операції точіння.
  8. Показана можливість використання розробленого пакету програм для розрахунку зусиль різання при обробці металів.
  9. Програмний комплекс може бути ефективним при проектуванні нового інструменту з складною передньою поверхнею. Він дозволяє зпрогнозувати надійність роботи інструменту по характеру розподілу напружень на його поверхнях. Може бути пристосований для відшукування геометрії інструменту при проектуванні технологічних операцій обробки нових надтвердих матеріалів.

Впровадження результатів роботи на Хмельницькому ВО "АДВІС", Хмельницькому ВО "ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТ", Хотинському заводі "КАЛІВР" дозволили одержати економічний ефект в сумі 205 тис.руб. (ціни 1991р.).

Основний зміст дисертації надруковано в наступних роботах:

1. Смарагдов И.А., Мясичев А.А. Аналитическое решение задачи образования острения. В сб.: Исследование в области пластичности и обработки металлов давлением. - Тула: ТПИ, 1981.
2. Ренне И.П., Мясичев А.А. Аналитическое решение с помощью рядов задачи определения удельного усилия режущего инструмента через гладкую матрицу. В сб.: Обработка металлов давлением, вып. 7. - Свердловск: УПИ, 1980.
3. Смарагдов И.А., Ренне И.П., Мясичев А.А. Аналитическое решение задачи образования выступов при вдавливании тупых сре-

метричных клиньев. Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1981, №9.

4.Смарагдов И.А., Мясидев А.А. Аналитическое решение задачи образования выступов при выдавливании тупых несимметричных клиньев. - В сб.:Исследование в области пластичности и обработки металлов давлением. -Тула:ТПИ,1983.

5.Ренне И.П., Смарагдов И.А., Мясидев А.А. Аналитическое решение задач плоского формоизменения. Тула,1981. Деп.в ВИНИТИ 20 мая 1981, N 2348-81 152 с.

6.Ренне И.П., Смарагдов И.А., Мясидев А.А. Аналитическое решение задач. определения удельного усилия редуцирования полосы через гладкую клиновую матрицу. Известия ВУЗов, Машиностроение, 1980, N12.

7.Смарагдов И.А., Мясидев А.А., Борисов В.А. Формообразование зубьев на тонкой полосе. Известия ВУЗов, Машиностроение,1981, N3.

8.Мясидев А.А. Изменение шероховатости при контактном взаимодействии со штампом. Известия ВУЗов, Машиностроение,1978,N1.

9.Мясидев А.А. Вдавливание поворачивающегося штампа в жесткопластическую полосу. Известия ВУЗов, Машиностроение,1985,N10.

10.Мясидев А.А. Решение в рядах задачи сжатия жесткопластического слоя шероховатыми плитками. Известия ВУЗов. Черная металлургия. 1986,N1.

11.Мясидев А.А. Сжатие упрочняющегося упругопластического слоя упругим инструментом. Известия ВУЗов, Машиностроение,1986, N1.

12.Мясидев А.А., Погняйко В.Б. Анализ сжатия упругопластического слоя упругими бойками. Известия ВУЗов, Машиностроение,1986, N6.

13.Мясидев А.А. Упругопластический анализ обратного выдавливания методом конечных элементов. Хмельницкий,1987, Деп. в УкрНИИТИ 23 сентября 1987, N2671-Ук87.

14.Мясидев А.А. Соотношения для анализа конечных упругопластических деформаций методом конечных элементов. Известия ВУЗов, Машиностроение,1988,N6.

15.Силин Р.И., Мясидев А.А., Ковальчук С.С. Анализ процесса сжатия стружки металла режущим клином. Известия ВУЗов, Машиностроение,1989 N ст. 145-148.

16.Силин Р.И., Мясидев А.А., Ковальчук С.С.Анализ контактных нагрузок на режущей поверхности инструмента. Деп. 10.11.89. N: 2527-Ук.89

17. Мясников А.А., Ковальчук С.С. Использование метода конечных элементов для анализа процесса резания. - В сб. Проблемы повышения качества, надежности и долговечности машин. - Брянск, 1990г. с.102.

18. Мясников А.А. Анализ контактных нагрузок на режущей поверхности инструмента. Известия ВУЗов, Машиностроение, 1990, №9.

19. Мясников А.А., Ковальчук С.С. Упругопластический анализ процесса резания металлов. В сб. "Механика и технология машиностроения", г. Свердловск, 1990г с.86.

20. Силин Р.И., Мясников А.А., Ковальчук С.С. Расчет контактных нагрузок на поверхностях режущего инструмента. - В сб. "Научно-технические аспекты размерной обработки в производстве деталей машин", г. Звенигород, 1992г.

21. Автоматизированная система диалогового проектирования технологических процессов механической обработки деталей. - Мясников А.А. Ковальчук С.С., Дзедзюк В.П., Цвигунов В.Е., Гандзюк А.Г. Информ. листок № 26-91 г. Хмельницкий, МПДТИ.

22. Силин Р.И., Мясников А.А., Ковальчук С.С. Контактные взаимодействия на поверхностях инструмента при резании металлов. - В сб.: "Качество и надежность узлов трения". г. Хмельницкий 1992г. с.8

23. Мясников А.А., Ковальчук С.С. К вопросу о повышении надежности режущего инструмента. - В сб. "Качество и надежность технологических систем", г. Краматорск, 1994г. с.26.

24. Остафьев В.А., Мясников А.А. Ковальчук С.С. К вопросу об анализе контактных нагрузок на поверхности режущего инструмента. Вестник машиностроения, 1992, №4, с.47-49.

25. Силин Р.И., Мясников А.А., Ковальчук С.С. Анализ процесса снятия стружки металла режущим клином со скруглением. Известия ВУЗов, Машиностроение, 1992. №10-12.

26. Силин Р.И., Мясников А.А., Кулис З.З. Моделирование процесса стружкообразования методом конечных элементов. - В сб. "Современная технология упрочнения, восстановления и механической обработки деталей с покрытиями", г. Киев, 1993г.

27. Мясников А.А., Ковальчук С.С. Оптимизация геометрических параметров инструментов для операции точения на основе анализ контактных напряжений. - В сб. "Повышение эффективности и качества механообрабатывающего производства", г. Евпатория, 1993г.

28. Силин Р.И., Мясников А.А., Кулис З.З. Применение метода конечных элементов для моделирования процесса стружкообразования. - В сб. "Оснастка-94", г. Киев, 1994г.



ХМД. Зам.1337. 150. 1994 р.

157285

AB 30.108

**AB 30.108**