

Східноукраїнський державний університет

На правах рукопису

УДК 621.9.022:621.963.44

ШЛОТНИК Володимир Андрійович

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСУ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ
ПРИ ТЕРМОБІКЦІЙНІЙ ОБРОБЦІ ПЛОСКИХ
ПОВЕРХОНЬ РІЗАННЯМ

05.03.01 Процеси механічної і
фізико-хімічної обробки,
верстати та інструмент

05.03.05 Процеси та машини
обробки тиском

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Дуганськ 1994

АВ 29.309

Робота виконана на кафедрі "Металорізальні верстати"
Східноукраїнського державного університету.

Науковий керівник - доктор технічних наук,
професор Зарубицький Є.У.

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор Зинов'єв М.І.
- кандидат технічних наук, доцент Гладушин В.В.

Провідне підприємство - Виробниче об'єднання
"Луганськтепловоз" -

Захист відбудеться "22" березня 1994 року на
засіданні спеціалізованої Ради К 068.44.02
в Східноукраїнському державному університеті,
348034 м.Луганськ, кв.Молодіжний, 20а.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці
університету.

Відгук на автореферат в 2-х примірниках, завірений
печатком установи, просимо направляти по указаній
вище адресі на ім'я вченого секретаря спеціалізованої
Ради.

Автореферат розіслано "15" лютого 1994 року.

Вчений секретар
спеціалізованої Ради
к.т.н., доц.

Л.А.РЯБИЧЕВА

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00777778 (0)

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність. Термофрікційна обробка (ТФО) належить до нових продуктивних методів обробки матеріалів різанням з застосуванням концентрованого високотемпературного нагріву зони різання, що сприяє зниженню характеристик міцності оброблюваного матеріалу, за рахунок теплоти роботи тертя між зрізуваним шаром та поверхнями інструмента - різального диска (РД), виготовленого з конструкційної сталі, котрий примусово обертається з коловою швидкістю 45...60 м/с.

Широкі застосування у промисловості цього прогресивного виду різання стримується недостатньою кількістю досліджень що до рішень цілого ряду важливих задач технології, які визначають продуктивність та себівартість обробки та задовольняють умовам сучасного виробництва.

Актуальність даної роботи полягає у підвищенні ефективності ТФО на основі досліджень фізичних процесів, які проходять в зоні різання з позиції теорії високошвидкісного пластичного деформування.

Данна робота є частиною науково-технічної програми робіт, які проводяться кафедрою "Металорізальні верстати" в напрямку дослідження та впровадження процесів ТФО

Ціль роботи. Теоретико-експериментальне дослідження закономірностей стружкоутворення при ТФО плоских поверхонь та одержання на їх основі залежностей для розрахунку геометричних параметрів різання, кінематичних та силових характеристик процесу, а також оптимальних режимів різання.

Методика дослідження. Загальна методика дослідження базується на використанні основних положень теорії різання, опіру матеріалів, теорії пластичності, теорії машин та механізмів, а також статистичних методів обробки результатів експериментів.

Наукова новизна. Вперше для процесу ТФО зроблена спроба постановки та наближеного рішення задачі стружкоутворення з позиції положень теорії пластичності. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена правомірність застосування діаграм Море для визначення поля деформації та напружень навколо матеріальної точки, яке розташована в будь-якому місці пластичного контакту, та відповідає умові монотонності та однорідності деформації; отримані аналітичні залежності, які в сполученні з експериментальним визначенням довжини пластичного контакту вогнища деформації, дозволяють розрахувати головні компоненти деформованого стану в точці, яка розгля-

дається, та інваріантні характеристики – параметр Лоде та кут сколювання, які функціонально зв'язані з коефіцієнтом усадки, геометричні параметри та умови утворення зливної хвилястої стружки, яка характерна для ТФО. Аналіз напруженого стану у зрізаному шарі, з урахуванням закономірностей деформованого стану, дозволив внести розрахункові залежності для встановлення величини контактних напружень та силових параметрів ТФО, які використовуються для розробки науково обгрунтованої системи оптимізації процесу різання.

Практична цінність. На основі проведених досліджень розроблені пропозиції, які підвищують техніко-економічні показники процесу та сприяють подальшому широкому запровадженню ТФО у промисловості. Розроблені практичні рекомендації по встановленню оптимальних параметрів різання (режимів, силових характеристик та характеристик потужності), необхідних для проектування технології, устаткування, оснащення та інструменту.

Реалізація і впровадження. Результати досліджень та запропоновані технічні рішення впроваджені на Красноріченському верстатобудівному заводі (Луганської обл.) та Луганському автоскладальному заводі. Загальний річний економічний ефект, підтверджений актами впровадження Красноріченського верстатобудівельного заводу, складає 53 тис.крб. (за станом на грудень 1991 року). Технологічна документація на ТФО передавалася на запит ряду підприємств різних міністерств та відомств.

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на всесоюзній та республіканських конференціях, а також науково-технічних конференціях Луганського машинобудівного інституту у період з 1985 по 1993 р.

За участь в розробці спеціалізованого верстата для ТФО автор був удостоєний диплома ВДНХ УРСР та диплома II ступеня ВДНХ СРСР. У 1988 році верстат демонструвався на весняному ярмарку в Лейпцизі.

Публікації. З теми дисертації опубліковано 8 друкованих робіт, одержано позитивне рішення на видачу патента (заявка № 4906084/27/009609 от 31.01.91 р.)

Структура і об'єм роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 6 глав, загальних висновків, списку літератури з 131 найменування, об'єм 187 сторінок машинописного тексту, 60 малюнків, 17 таблиць, доплатків з розрахунками економічного ефекту, актами впровадження та результатами розрахунку на 30М параметрів ТФО.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, сформульована наукова новизна та визначено основний напрямок роботи. Показано, що для оптимізації параметрів ТФО з цілю підвищення її ефективності необхідні глибокі дослідження процесів, які проходять у пластично деформованій зоні стружкоутворення.

Глава I. Стан питання та задачі дослідження. Суттєві особливості ТФО, які обумовлені високотемпературним нагрівом матеріалу у контактній зоні та швидкісними характеристиками, ускладнюють проходження процесу стружкоутворення, закономірності котрого ще замало вивчені та потребують подальших досліджень на основі положень теорії та практики механічної обробки, у розвитку котрих великий внесок зробили вчені М.М.Зорев, В.Ф.Бобров, Г.І.Грановський, В.Д.Кузнецов, В.А.Кудінсв, Г.Л.Куфарев, Т.М.Лоладзе, О.Д.Макаров, В.А.Остаф'єв, А.Н.Резніков, О.М.Розенберг, П.Р.Родін, С.С.Сілін, М.В.Талантов, О.В.Якімов, П.І.Ящерицин та ін. Значні дослідження важливих та конкретних задач технології сучасного машинобудівного виробництва провели Л.І.Бондаренко, О.П.Гавриш, Є.У.Зарубицький, М.І.Зинов'єв, В.М.Оробинський, Б.О.Перепелиця, С.П.Радзевич, О.А.Розенберг, Н.С.Равська, Ю.В.Тимофійєв та ін. Вирішення задачі пластичного течіння металу у зоні стружкоутворення, яка базується на фундаментальних положеннях теорії пластичності, стало можливим завдяки працям С.І. Губкіна, Е.П.Унксова, О.О.Ілюшина, О.І.Целікова, Є.О.Попова, Г.О.Смирнова-Аляєва, М.В.Сторожева, В.М.Розенберга, В.М.Лещинського, М.А.Аранзона, В.І.Дорошко, М.І.Могильного, Р.І.Рея та ін.

Аналіз літератури показав, що на цей час немає єдиного погляду що до фізичних основ різання металів з додатковим нагрівом, як процесу високошвидкісного пластичного деформування. Надто суперечливі дані про вид деформованого стану та форму і розміри пластично деформованої зони. Практично відсутні дані про схеми напружено-деформованого стану зрізаного шару, коли діють високі температури. Все це стало підставою для проведення досліджень по установленню закономірностей стружкоутворення відповідно до ТФО плоских поверхонь різанням. Для цього стало необхідним рішення слідуєчих основних задач:

1. Теоретичне дослідження напружено деформованого стану зрізаного шару з виводом аналітичних залежностей для розрахунку параметрів стружкоутворення та силових характеристик різання у функції основних технологічних факторів.

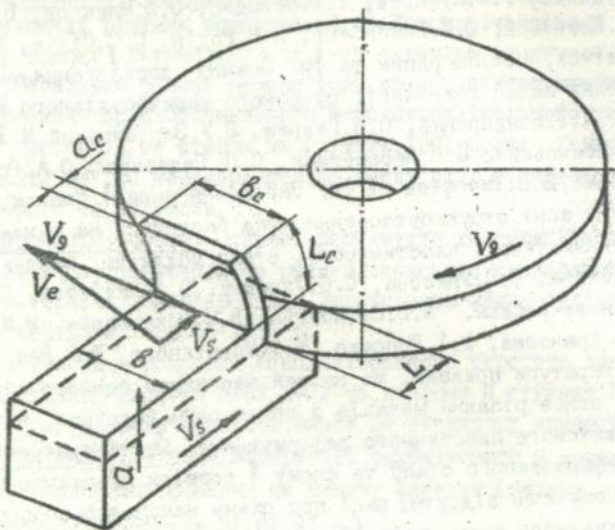
2. Експериментальна перевірка результатів теоретичного

дослідження з використанням сучасних статистичних методів планування та обробки результатів експериментів.

3. Дослідження елементів технології ТФО – кінематики різання, спрацювання та стійкості РД, якості та стану поверхневого шару обробленої деталі.

4. Оптимізація режимів ТФО на основі одержаних результатів досліджень, розробка практичних рекомендацій що до впровадження ТФО у виробництво.

Глава 2. Основні характеристики стружкоутворення при термофрикційному різанні. Суть ТФО міститься у вилученні з оброблюваного тіла припуску, який попередньо нагріто до температури $900 \dots 1200^{\circ}\text{C}$, з утворенням зливної стружки (сталі, сплави, ковкий чавун), або стружки надламу (сірий чавун) (мал. I). Нагрів, який сприяє росту



Мал. I. Схема термофрикційної обробки

пластичності та зменшенню опору деформації у зоні різання, здійснюється за рахунок теплоти роботи тертя між передньою поверхнею леза, котра і переміщується в дотичному напрямі з коловою швидкістю V_g не менш, як 45 м/с , та зрізуванням шаром заготовки, який здійснюється рух зі швидкістю різання V_s у напрямі, який є перпен-

дикулярним до вектора \vec{V}_g у вершині колового ріжучого леза, кожна точка якого здійснює відносне переміщення у напрямі сумарного вектора швидкості $\vec{V}_e = \vec{V}_g + \vec{V}_g$.

Запропонована модель стружкоутворення, яка передбачує вільне косокутне різання інструментом з примусовим дотичним переміщенням прямолінійної різальної кромки, в усіх точках якої забезпечується постійність швидкісних та геометричних параметрів.

Для визначення ступеня деформації стружки використано коефіцієнт усадки, величину котрого для прийнятої моделі можна визначити по формулі:

$$K_L = \frac{L}{L_c} = K_H \frac{\sin \rho}{\sin \xi} = \frac{e \cos \lambda_K \sin \rho}{e' \cos \nu \sin \xi}, \quad (1)$$

де K_H - коефіцієнт усадки у напрямі нормальному до різальної кромки РД; e, e' - шлях різання та довжина зрізуваного шару;

λ_K - кінематичний кут нахилу різальної кромки; ν - кут сходження стружки; ξ - кут нахилу різальної кромки до вектора \vec{V}_g ;

ρ - кут орієнтації стружки, обмовлений дотичним переміщенням різальної кромки:

$$\rho = \alpha \operatorname{arctg} \left(\frac{B}{e' \cos \nu \sin \xi} - \operatorname{tg} \nu \right).$$

Кут зсуву у нормальному перерізі

$$\Phi_H = \alpha \operatorname{arctg} \frac{\cos \gamma_H}{K_H - \sin \gamma_H} = \alpha \operatorname{arctg} \frac{\cos \gamma_H}{K_a - \sin \gamma_H}, \quad (2)$$

де $K_a = \alpha_c / \alpha$ - коефіцієнт потоншення стружки.

Площа поперечного перерізу стружки

$$f_c = \alpha_c B_c = \alpha B K_H \sin \rho / \sin \xi = \alpha B K_L. \quad (3)$$

Параметри поверхні зсуву можна встановити на базі використання значень K_H та Φ_H .

Площа поверхні зсуву

$$f_{c\phi} = \alpha B / (\sin \Phi_H \sin \xi).$$

Швидкість зсуву шарів металу уздовж поверхні зсуву

$$V_{c\phi} = V_e \frac{\cos \gamma_p}{\cos(\Phi_e - \gamma_p)}, \quad (4)$$

де γ_p - робочий передній кут

$$\gamma_p = \alpha \operatorname{arctg} (\sin \lambda_K \sin \alpha + \cos \lambda_K \cos \nu \sin \gamma_H).$$

Напрямок вектора $\vec{V}_{c\phi}$

$$\nu_{c\phi} = \alpha \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \lambda_K \cos(\Phi_H - \gamma_H) - \operatorname{tg} \nu \sin \Phi_H}{\cos \gamma_H}. \quad (5)$$

Сумарний відносний зсув можна визначити з формули

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_H^2 + \varepsilon_K^2}, \quad (6)$$

де ϵ_H - відносний зсув у нормальному перерізі

$$\epsilon_H = \frac{K_H^2 - 2K_H \sin \delta_H + 1}{K_H \cos \gamma_H};$$

ϵ_K - відносний зсув при переміщенні уздовж різальної кромки

$$\epsilon_K = \frac{K_H \tan \lambda_K - \tan \nu}{\cos(\Phi_H - \gamma_H)}.$$

Для ТФО, на відміну від традиційних, характерна наявність негативної усадки стружки, що указує на більш раціональні умови стружкоутворення відповідно зі зміною виду деформованого стану у зоні різання. Це підтверджується вивченням мікросліфів коренів стружок матеріалів, які випробувались (сталей 45, 95Х18 і сплава ХН70ВМТД). Дослідження показали, що початкова (умовна) границя зони стружкоутворення розташована до вектора швидкості під кутом склювання $\Phi > 45^\circ$.

Глава 3. Теоретичне дослідження напружено-деформованого стану зрізуваного шару у функції факторів ТФО. Запропановане рішення задачі пластичного деформування зрізуваного шару при ТФО, з використанням положень теорії пластичності, спрямоване на визначення деформацій (напружень) навколо матеріальної точки, розташованій на різальній кромці інструменту, у якій хід процесу формозмінювання елементарного обсягу задовольняє умовам однорідності і монотонності деформацій.

Рішення розглядається для вільного різання рівномірно нагрітого припуску у зоні стружкоутворення за схемою з єдиною площиною сколювання.

Експериментальний доказ відповідності кута виду деформації

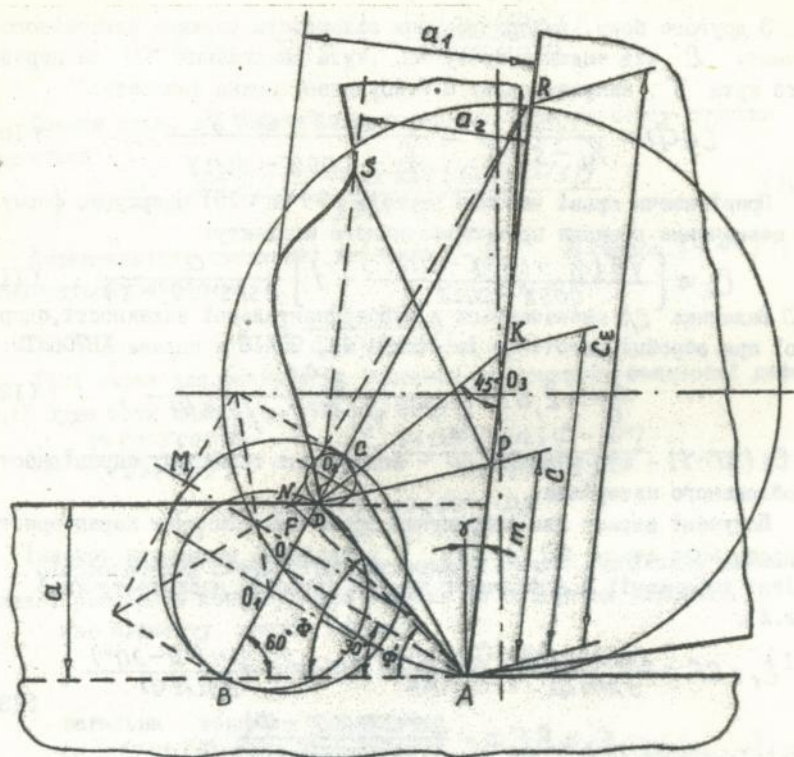
β_ϵ куту сколювання Φ при різанні дозволяє застосувати запропановану В.М.Розенбергом та Г.А.Смирнозім-Аляєвим геометричну інтерпретацію залежності інтенсивності і виду напруженого стану від головних напружень на основі утворення діаграми Мора, згідно якій інтенсивність напруженого стану виражається формулою:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (7)$$

На основі подібності діаграми Мора для напруженого і деформованого стану, запропановано графічне зображення (мал.2), де у момент повного закінчення процесу формоутворення єдиного елементу хвилі стружки убудована діаграма Мора з рівнобоким трикутником деформації АВС, боки якого визначаються як різниця головних деформацій $\epsilon_1 - \epsilon_3$

Інтенсивність деформацій чисельно рівна відрізку $ED = \frac{2}{3} AD$

і визначиться з виразу:



Мал.2. Зливна вихляста стружка з діаграмов Мора та трикутником деформації у момент повного завершення формоутворення чергового елемента хвилі

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} = \frac{2a}{3 \sin \Phi} \quad (8)$$

На підставі схеми (мал.2) одержана формула для кута скалювання Φ і функціонально зв'язаного з ним параметра Лоде ν_ε , який визначає вид деформованого стану:

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\sqrt{3}}{2 \frac{\nu_\varepsilon}{a} \sin(30^\circ - \gamma) - 1} = \frac{\sqrt{3}(1 + \nu_\varepsilon)}{3 - \nu_\varepsilon} \quad (9)$$

З другого боку, використовуючи залежність довжини пластичного контакту C від товщини зрізу a , кута скалювання Φ та переднього кута γ , запропановану Н.Г.Абуладзе, можна записати:

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma} = \frac{\cos \gamma - \sin \gamma}{\frac{C}{a} - \cos \gamma - \sin \gamma} \quad (10)$$

Прирівнюючи праві частини виразів (9) та (10) одержуємо формулу для визначення довжини пружнопластичного контакту:

$$C_E = \left[\frac{\sqrt{3} \left(\frac{C}{a} - \cos \gamma - \sin \gamma \right) + 1}{\cos \gamma - \sin \gamma} + 1 \right] \frac{a}{2 \sin (30^\circ - \gamma)} \quad (11)$$

Величина C/a визначається з експериментальної залежності, одержаної при обробці заготовок із сталей 45, 95X18 и сплава ХН70ВМТД:

$$\frac{C}{a} = 2,63 \frac{\delta^{0,122}}{V_5^{0,076} V_9^{0,162} (\omega/8)^{0,115}} \quad (12)$$

де $\delta = (90^\circ - \gamma)$ - кут різання, ω - коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріала.

Получені вирази для розрахунку трьох інваріантних характеристик деформованого стану Φ , ν_ϵ , ϵ_i дозволяють визначити головні лінійні деформації й деформації всуви (куткові) навколо точки А (мал.2).

$$\begin{aligned} \epsilon_1 = CF &= \frac{2a \cos \Phi}{3 \sin \Phi}; & \epsilon_2 = FD &= \frac{2a \sin (\Phi - 30^\circ)}{3 \sin \Phi}; \\ \epsilon_3 = BF &= -\frac{2a \cos (60^\circ - \Phi)}{3 \sin \Phi} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\gamma_{12} = CD = \epsilon_1 - \epsilon_2; \quad \gamma_{23} = BD = \epsilon_2 - \epsilon_3; \quad \gamma_{31} = BC = \epsilon_3 - \epsilon_1.$$

Направлення головних осей деформацій ϵ_2 й ϵ_3 відносно оброблюваної поверхні визначається кутами:

$$\xi = \arcsin \left(\frac{3}{5} \sin \Phi \right) - 45^\circ; \quad \varphi_3 = 45^\circ - \arcsin \left(\frac{3}{5} \sin \Phi \right) \quad (14)$$

Головна ось деформації ϵ_2 спрямована вздовж ширини зрізу й перпендикулярна ϵ_1 й ϵ_3 .

Механізм формування чергового елемента (хвилі) стружки відбувається у два етапи й починається з моменту, коли максимальні дотичні напруження у деформованому елементі досягають величини, при якій починається формування хвилі. В цьому випадку путь, який проходить ріжуча кромка, визначиться з виразу:

$$\Delta \ell = \varepsilon_i \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\cos \gamma} = \frac{2a \cos(\Phi - \gamma)}{3 \cos \gamma \sin \Phi} \quad (15)$$

Повний путь, до остаточного формоутворення елементу стружки рівняється:

$$\ell_p = \frac{5a \sin[\Phi - \arcsin(3 \sin \Phi / 5)]}{3 \sin^2 \Phi} \quad (16)$$

Інтенсивність швидкості деформації $\dot{\varepsilon}_i$, за часом $\tau = \Delta \ell / V_s$, визначається по формулі

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{V_s \cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma)} \quad (17)$$

Тоді вираз для визначання головних компонентів швидкості деформації буде мати вид:

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{V_s \cos \gamma \cos \Phi}{\cos(\Phi - \gamma)}; \quad \dot{\varepsilon}_2 = \frac{V_s \cos \gamma \sin(\Phi - 30^\circ)}{\cos(\Phi - \gamma)}; \quad (18)$$

$$\dot{\varepsilon}_3 = -\frac{V_s \cos \gamma \cos(60^\circ - \Phi)}{\cos(\Phi - \gamma)}$$

Запропанована схема стружкоутворення (мал.2) дозволяє визначити основні розміри й конфігурацію стружки із наступних виразів:

шаг елементу хвилі стружки

$$m = AP = \frac{a \sin(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi}; \quad (19)$$

$$a_1 = \frac{\text{загальна товща стружки}}{\sin \Phi} \left\{ \frac{5 \sin[\Phi - \arcsin(3 \sin \Phi / 5)]}{3 \sin \Phi} - \frac{2}{3} \cos(\Phi - \gamma) + \cos \Phi \cos \gamma \right\} \quad (20)$$

товща суцільної ділянки стружки

$$a_2 = \frac{a \cos(\Phi - \gamma)}{\sin \Phi} \quad (21)$$

Установлено критерій утворення чисто зливної стружки:

$$\frac{c}{a} = \frac{4}{5 \sin \gamma} + \frac{1}{5 \cos \gamma} \quad (22)$$

Як показали дослідження, при ТФ0 ця умова не дотримується і процес йде з утворенням зливної стружки, тобто з частковим порушенням суцільності матеріалу. Розрахунки показали, що в залежності від умов різання, при ТФ0 сталей 45, 95Х18 й сплава ХН20ВМТЮ кут скалювання змінюється у межах 58...45°; коефіцієнт усадки - 0,65...0,92; параметр Лодє - 0,9...0,54. При цьому подовження (потоншення) стружки складає 160...105%, а поширення - 8...2%.

Таким чином, можна вважати установленим наявність при ТФ0 ста-

лей і сплавів негативної усадки стружки. При цьому вид деформаційного стану, згідно значення параметра Лодє, являє собою стиснення з подальшим зрушенням попередньо стисненого елемента.

Аналіз напруженого стану навколо матеріальної точки на різальній кромці інструменту, з метою визначення силових характеристик процесу стружкоутворення проводився припускаючи, що напрям головних осей напруженого стану у розглядаємій матеріальній точці, згідно з умовою монотонності, збігається з головними осями результативної деформації, а вид напруженого стану відповідає виду кінцевої деформації.

Зв'язок головних напружень з головними деформаціями при відомому куті сколювання виражається рівностями:

$$\sigma_1 = \frac{2}{3} \sigma_c \cos \Phi - \rho; \quad \sigma_2 = \frac{2}{3} \sigma_c \sin(\Phi - 30^\circ) - \rho; \quad \sigma_3 = \frac{2}{3} \sigma_c \cos(60^\circ - \Phi) - \rho. \quad (23)$$

Гідростатичний тиск:

$$\rho = -\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}. \quad (24)$$

Нормальне та дотичне напруження у будь якій точці пластичного контакту на передній поверхні інструменту можна визначити:

$$\sigma_{nx} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_{ix} \cos(\Phi - 30^\circ) \cos^2 \varphi_{nx}; \quad (25)$$

$$\tau_{nx} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_{ix} \cos(\Phi - 30^\circ) \sin 2\varphi_{nx}, \quad (26)$$

де σ_{ix} - інтенсивність напруженого стану, визначається по інтенсивності деформації;

φ_{nx} - кут тертя, відповідно схеми (мал.3)

$$\varphi_{nx} = 45^\circ + \gamma - \chi, \quad (27)$$

де χ кут, який визначає напрям дії максимальних дотичних напружень:

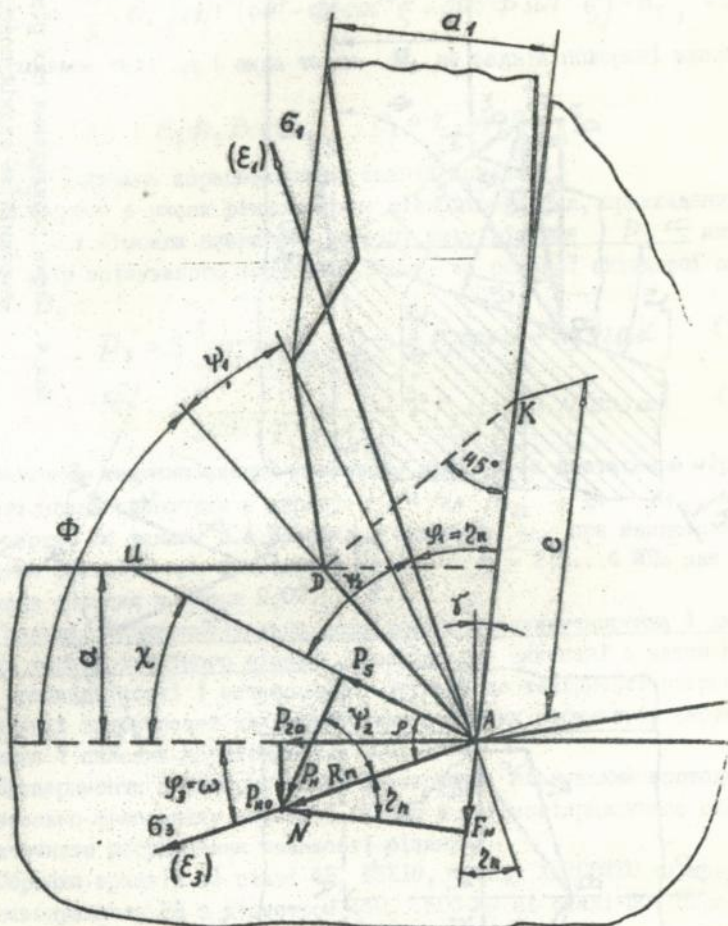
$$\chi = \arcsin(3 \sin \Phi / 5).$$

Нормальна сила N_n та сила тертя F_n на передній поверхні РД (мал.3) розраховуються рівностями:

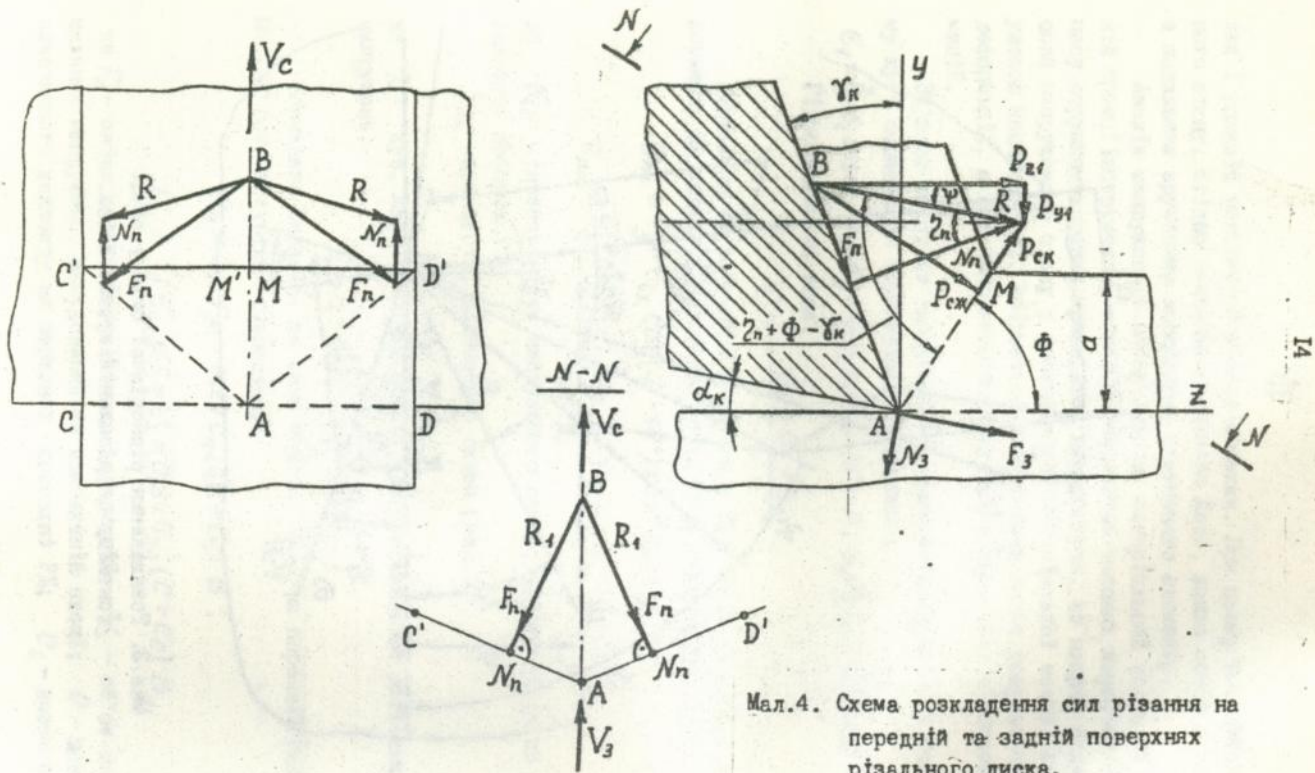
$$F_n = \tau_n F_K = 0,24 \tau_{nL} (C + C_E) \cdot B; \quad (28)$$

$$N_n = \iint_F \sigma_{nx} dF = V_3 = 0,24 \sigma_{nL} (C + C_E) \cdot B, \quad (29)$$

де F_K - площа пластичного вогнища деформації; V_3 - об'єм епюри нормальних напружень, побудований на контактній площі; C - довжина пластичного контакту на передній поверхні РД; C_E - довжина



Мал.3. Розкладання рівнодіючої сили у точці контакту на різальній кромці диска.



Мал.4. Схема розкладення сил різання на передній та задній поверхнях різального диска.

загального упруго-пластичного контакту; B - ширина зрізу.

Нормальне σ_3 й дотичне τ_3 напруження на задній поверхні:

$$\sigma_3 = \frac{2\sqrt{3}}{3} \sigma_i [\sin(60^\circ - \phi) \cos^2 \xi - \sin \phi \sin^2 \xi]; \quad (30)$$

$$\tau_3^2 = \frac{4}{3} \sigma_i [\sin^2(60^\circ - \phi) \cos^2 \xi + \sin^2 \phi \sin^2 \xi] - \sigma_3^2, \quad (31)$$

Нормальна сила N_3 і сила тертя F_3 на задній поверхні визначаються:

$$N_3 = \sigma_3 h_3 B; \quad F_3 = \tau_3 h_3 B,$$

де h_3 - величина спрацювання по задній поверхні.

Виходяючи з умови рівноваження рівнодіючих сил, прикладених до стружки, (мал.4) можна визначити головну силу різання P_x , яка переборже опір зрізуваного шару руйнуванню, та осьової складової сили різання P_y :

$$P_x = 2 \left[\frac{N_n}{\cos(\phi + \rho_n - \gamma_k)} + F_3 \cos \alpha - N_3 \sin \alpha \right] \quad (32)$$

$$P_y = 2 \left[\frac{\tau_n}{\cos(\phi + \rho_n - \gamma_k)} + F_3 \sin \alpha + N_3 \cos \alpha \right] \quad (33)$$

Величину тангенціальної (колової) сили P_x з достатньою мірою точності можна визначити з виразу: $P_x = N_n \cdot m_\alpha$, де m_α коефіцієнт тертя. За даними В.А.Балакіна, значення m_α при швидкості скочування 20...100 м/с і питомого тиску $p_a = 2,5...4$ МПа для сталей й сплавів складає у металах 0,09...0,2.

Глава 4. Експериментальне дослідження стружкоутворення і динаміки процесу термофрікційного різання. Дослідження виконані з метою перевірки працездатності і встановлення ступені достовірності одержаних аналітичних залежностей для визначення основних параметрів стружкоутворення і силових характеристик ТФО.

Експерименти з використанням факторного планування проводились на консольно-фрезерному верстаті 6М13ПБ з пневмогідравличною системою автоматичного регулювання швидкості різання.

Обробка зразків зі сталі 45, 95Х18, сплаву ХН70ВМ10 та чавуну СЧ30 виконувалось РД з діаметром 450...500 мм зі сталі 50, переднім кутом $\gamma = 0^\circ$, заднім кутом $\alpha = 9^\circ$ та радіусом заокруглення різальної кромки $\rho = 0,1$ мм. Складові сили різання вимірювали динамометром УДМ-1200. Температуру у контактній зоні та поверховому шару вимірювали по спеціальній схемі штучними та напівштучними термометрами. Значення складових сил різання і температуру реєстрували шкальними приладами та осцилографами.

Усадку визначали відомими засобами по довжині й товщині стружки. Сколювання розраховували по формулі

$$\Phi = \alpha \chi c t g \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma} \quad (34)$$

По результатам ранжирування факторів, впливаючих на процес ТФО, цілені найбільш значні - швидкість різання V_3 , колова швидкість V_9 , параметри зрізуваного шару, що оцінюються величиною площі $F = aB$, коефіцієнт температуропровідності ω , що характеризується теплофізичними властивостями матеріалів. На основі попередніх досліджень і практичних міркувань прийняті межі варіювання факторів:

$$V_3 = 50 \dots 315 \text{ мм/хв}; \quad V_9 = 42 \dots 72 \text{ м/с}; \quad F = 50 \dots 300 \text{ мм}^2; \\ \omega = (3,6 \dots 8) 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Реалізація повного факторного експерименту (ПФЕ) - 2^4 і статистична обробка результатів з використанням ЗОМ дозволили одержати адекватні математичні моделі у вигляді ступенних залежностей для визначення коефіцієнта усадки стружки

$$K_L = \frac{9,738}{V_9^{0,358} V_3^{0,133} \omega^{0,267}}; \quad (35)$$

температури у контактній зоні

$$\theta = \frac{317,4 V_9^{0,208} V_3^{0,11} F^{0,042}}{\omega^{0,145}}; \quad (36)$$

складових сил різання

$$P_z = \frac{38,1 V_3^{0,77} F^{1,12}}{V_9^{0,61} \omega^{1,11}}; \quad P_y = \frac{19,6 V_3^{0,798} F^{0,985}}{V_9^{0,647} \omega^{1,07}}; \quad (37)$$

$$P_x = \frac{3,29 V_3^{0,77} F^{1,06}}{V_9^{0,57} \omega^{1,03}}$$

Встановлено, що збільшення швидкості різання та колової швидкості РД, в значній мірі, знижує величину усадки стружки. Цей ефект пояснюється із збільшенням температуропровідності матеріалу та практично не залежить від розмірів зрізуваного шару.

Значний вплив на параметри ТФО справляють теплофізичні властивості оброблюваних матеріалів. Чим вища теплопровідність матеріалу заготовки, тим більші ступені деформації можуть бути досягнуті при менших значеннях сил різання. Експериментально доказана правомірність використання одержаних залежностей для усіх сталей та сплавів, температуропровідності яких не виходить за межі експериментів.

Значення ефективною потужності привода обертання РД та приводу

подач, на основі одержаних залежностей, визначається по формулам:

$$N_9 = 3,23 \cdot 10^{-4} \frac{V_s^{0,77} F^{1,06} V_9^{0,43}}{\omega^{1,03}}, \quad (38)$$

$$N_s = 6,23 \cdot 10^{-7} \frac{V_s^{1,77} F^{1,12}}{V_9^{0,61} \omega^{1,11}}. \quad (39)$$

Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень з використанням повірочних випробувань при заданій надійності $\alpha_n = 0,95$ показали, що відхилення значень коефіцієнта усадки й кута сколювання, що визначаються по аналітичним залежностям, не перевищує 10...12% від експериментальних значень, відхилення значень складових сил різання не перевищує 17%. Це дозволяє застосовувати одержані аналітичні залежності для інженерних розрахунків.

Глава 5. Дослідження елементів технології термофрікційного різання. Термофрікційне різання, що припускає використання обертаючого інструменту з круговою різальною частиною, відноситься до невідного різання з непостійністю кінематичних параметрів по довжині леза, вершина якого умовно поділяє дугу контакту на головну (активну) та допоміжну різальні кромки.

Принципова кінематична схема ТФО заснована на сполученні поступового V_s і обертаючого V_9 рівномірних рухів, виконаних у площині, перпендикулярній осі РД. При цьому усі точки різального леза рухаються по траєкторії, що уявляє укорочену циклоїду, параметри якої визначають значення переднього і заднього кінематичних кутів (γ_k, α_k) та кінематичного кута нахилу різальної кромки (λ_k). Величини цих кутів для будь яких точок різального леза, знаходяться з рівностей:

$$\gamma_k = \gamma_c - \arctg(\operatorname{tg} \alpha_y \cos \tau), \quad (40)$$

$$\alpha_k = \alpha_c + \arctg(\operatorname{tg} \alpha_y \cos \tau), \quad (41)$$

$$\lambda_k = \arctg\left(\operatorname{ctg} \xi - \frac{V_s}{V_9 \sin \xi}\right), \quad (42)$$

де α_y - кут нахилу осі РД, що застосовується з цілью покращення умов обробки ($\alpha_y \leq 3^\circ$); τ - кут нахилу різальної кромки у основній площині; ξ - кут між $\overline{V_s}, \overline{V_9}$.

Кінематичні кути справляють великий вплив на розміри і форму пластичного вогнища деформації, отже визначають температурно-силові умови деформування зрізуваного шару, ступінь деформації зрізуваної стружки та стійкість РД. При практично застосовуваних розмірах загробівка

режимів обробки статичні кути (кути заточки) рекомендується приймати у межах $\gamma_c = 0...5^\circ$; $\alpha_c = 5...12^\circ$.

Встановлено, що значення кута λ_k у процесі обробки не підвищують 10° та розподіляються по довжині робочої ділянки леза з переминою знаку у точці вершини. Таким чином, активна та допоміжна різальні кромки працюють в умовах косокутного різання.

У порівнянні із звичайним лезвийним інструментом, РД має більш вищу стійкість внаслідку постійного оновлювання активної пілянки різального леза та його інтенсивного охолодження потоком повітря. При обробці спостерігаються два основних вида спрацювання РД: підвищення радіуса заокруглення різальної кромки та адгезійне схоплювання, характерне при обробці важкооброблюваних сталей і сплавів.

При температурі у контактній зоні близької до температури плавлення пар, що труться, можливо оплавлення перелньої поверхні РД.

Дослідження виявляють, що підвищення у результаті спрацювання радіуса заокруглення різальної кромки вище 0,4...0,5 мм викликає почву вібрацій, різке підвищення втрат потужності та погіршення якості оброблюваної поверхні. Стійкість РД складає 600 хв. при обробці сталі 45 та 240...300 хв. при обробці сталі 95Х18 і сплаву ХН70ВМТД.

Висока температура нагріву ($500^\circ...700^\circ\text{C}$) і нерівномірність пластичних деформацій, обусловлюють розвиток термічних напружень та структурних змін у поверховому шарі оброблюваної заготовки, у результаті чого створюється дефектний шар (наклеп) товщиною 0,5...1 мм. На глибині вище 1 мм деталь має початкову структуру без будь-яких помітних змін.

Нормальна сила, діючи з боку РД викликає стиск поверхового шару, а сила тертя – пластичне розтягання. У зв'язку з тим, при обробці випробуваних сталей і сплавів, у поверхневому шарі, глибиною від 7 до 14 мкм, концентруються розтягуючі залишкові напруги з максимумом на поверхні зразку $\sigma_p = 450...1100$ МПа, котрі далі переходять у стискуючі $\sigma_{cm} = 200...750$ МПа та залягають на глибині

$y = 100...140$ мкм. Твердість поверхні підвищується до НВ 200...400 одиниць. Микротріщини відсутні. Шорсткість обробленої поверхні $R_z 80...R_z 40$. Микротвердість на глибині до 0,2 мм може підвищувати початкову у 1,3...1,5 рази, а на глибині вище 0,6 мм зберігається микротвердість основного металу. Подальша чистова обробка не утруднюється. Для можливості формування якості обробленої поверхні запропоновано РД з регульованим повітряним потоком.

Глава 6. Оптимізація процесу, практичні рекомендації та впровадження процесу ТФО. Дослідження закономірності стружкоутворення при ТФО та одержані на їх основі залежності для визначення температурно-силових характеристик і потужності використовуються як обмежувачі фактори для оптимізації режимів різання, котрі практично можуть бути реалізовані на існуючих металорізальних верстатах.

Виходячи з експериментально доказаного положення, що процес термофрікційного різання випробованих сталей і сплавів благоприємно протікає при температурі у зоні різання 900...1200°C і виключає її з числа параметрів, які оптимізують, розроблена математична модель з цільовою функцією $\Pi = V_s n_g \rightarrow \max$ з використанням алгоритмічного методу оптимізації – лінійне програмування з геометричною інтерпретацією результатів. Одержана модель дозволяє визначити оптимальні режими різання при ТФО сталей 45, 95Х18, сплавів ХН70ВМТД і чавуна СЧ30. Наприклад, при обробці заготовок із сталі 95Х18, $B = 70$ мм, $t = 3$ мм, оптимальні режими: $V_s = 120$ мм/хв; $n_g = 2000$ об/хв.

Випробування ТФО на модернізованих фрезерних верстатах третього типорозміру виконувалось на Красноріченському верстатобудівному заводі (Луганська область) і дозволило підвищити продуктивність різання у 1,2...1,4 рази і одержати економічний ефект 53 тис.крб. за станом на грудень 1991 року.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розкрита фізична суть процесу ТФО як процесу високошвидкісного пластичного деформування, розігрітого до температури 900...1200°C металу у зоні різання з утворенням зливної стружки або стружки надламу при обробці сірого чавуну.

2. Розроблена модель стружкоутворення. Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість визначення деформованого та напруженого станів зрізаного шару, який перетворюється у стружку, з використанням основних положень теорії пластичності.

3. Одержані аналітичні залежності, які описують поле деформації навколо будь якої матеріальної точки, розташованої у вогнищі пластичного деформування. Розраховані інваріантні характеристики та головні компоненти деформованого стану. Установлені умови утворення, конфігурація і геометричні параметри стружки.

4. Результати розрахунків показують, що при термофрікційному різанні сталей 45, 95Х18 та сплаву ХН70ВМТД величина кута сколювання змінюється у межах 58...45°, а величина зв'язаного з ним функціонально

параметра Лодє - 0,95...0,56. Вид деформованого стану у зрізаному шарі являє собою стиснення з наступним зсувом стисненого елемента. Утворюється зливна стружка з частковим порушенням суцільності у виді хвилі. Коефіцієнт усадки складає 0,65...0,92, поширення стружки 6...2% від ширини зрізаного шару. З підвищенням швидкості різання, колової швидкості РД та коефіцієнта температуропровідності, який характеризує теплофізичні якості оброблюваного матеріалу, усадка зменшується. Негативна усадка указує на більш раціональні умови деформування у зрізаному шарі у порівнянні з традиційним різанням.

5. На основі аналізу напруженого стану у зоні стружкоутворення виведені формули для теоретичного розрахунку величини контактних напружень, сил на контактних поверхнях РД та складових сил різання, які визначають ефективну потужність різання. Збільшення швидкості різання та розмірів зрізаного шару приводять до значного зростання сил, а збільшення колової швидкості РД та коефіцієнта температуропровідності до їх зниження. Відхилення теоретичних і експериментальних даних не перевершує 17%.

6. Для ТФО рекомендуються різальні лиски зі сталі 50 та 50Г. Встановлені оптимальні кути заточування: передній кут 0...5°, задній - 5...15°, відношення ширини заготовки до діаметру диска повинно бути не більше 0,2. Допустима спрацьованість РД по радіусу заокруглення різального леза 0,4...0,5 мм. Стійкість досягає 600 хв. при обробці сталі 45 і 240...300 хв при обробці сталі 95Х18 та сплаву ХН70ВМТД. Коли процес різання установився, температура на зовнішньому контурі РД не перевершує 50...60°C.

7. Поверхневий шар має деформовану структуру та дістає зміцнення (наклеп). Мікротвердість на глибині до 0,2 мм може перевищувати початкову в 1,3...1,5 рази, а на глибині 0,6 мм дорівнює початковій. Шорсткість поверхні з висотою мікронерівностей 40...80 мкм. Глибина наклепу - 0,5...0,6 мм, у поверхневому шарі формуються сприятливі стискувачі напруження.

8. Розроблена математична модель встановлення оптимальних режимів різання при обробці на фрезерних верстатах. Для сталі 95Х18 - $V_s = 120$ мм/хв, $n_g = 2000$ об/хв.

9. Результати роботи впроваджені на Красноріченському верстатобудівному заводі (Луганської області). Річний економічний ефект складає 53 тис.крб. за станом на грудень 1991 року. Намічені шляхи подальшого розвитку ТФО.

Основний зміст дисертації опубліковано в наступних роботах.

1. Зарубицкий Е.У., Плахотник В.А., Покинтелица Н.И. Исследование температурных параметров процесса термофрикционной обработки коррозионностойких сталей. /Повышение эффективности процесса резания материалов//Волгоград, 1987. - с.67-69.
2. Зарубицкий Е.У., Плахотник В.А., Дейнека И.Г. Обработка плоских поверхностей деталей из стали IXIВНІОТ//Инф.листок УкрНИИМТИ, 1984, № 84 001/10, 4 с.
3. Зарубицкий Е.У., Костина Т.П., Плахотник В.А. Выбор оптимальных условий резания при обработке плоских поверхностей дисками трения / Конструирование и производство транспортных машин//.Изд-во ХГУ, Х., 1987. - с.119-122.
4. Зарубицкий Е.У., Костина Т.П., Плахотник В.А. Модель стружкообразования при термофрикционном резании//Тез.докл.научно технич. конф. ИСМ. К., 1992.
5. Зарубицкий Е.У., Покинтелица Н.И., Плахотник В.А. Определение длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента при термофрикционном резании/Проблемы развития локомотивостроения //Тез.докл. научно технич.конф. Луганск, ЛМСИ, 1993. - с.65.
6. Зарубицкий Е.У., Костина Т.П., Плахотник В.А. Тепловые нагрузки и разгрузки элементов режущего клина при термофрикционном резании/Конструирование и производство транспортных машин//Изд-во ХГУ, Х., 1987. - с.95-99.
7. Зарубицкий Е.У., Плахотник В.А. Термофрикционная обработка плоских поверхностей деталей из стали IXIВНІОТ/Техн.и орг.пр-ва //1984, № 4, с.53.

Володимир Андрійович ПЛАХОТНИК

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСУ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПРИ ТЕРМО-
ФРИКЦІЙНІЙ ОБРОБЦІ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ РІЗАННЯМ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Підписано до друку 15.02.94 р. Формат I/16 60x84 Ум.друк.арк. 1
Зам.90 Тираж 100 прим.

Дільниця оперативної поліграфії Східноукраїнського державного
університету

348034 м.Луганськ, кв.Молодіжний, 20а.

10-11-11

11/10/11

AB 29.309