

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерно-технологічний  
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

*магістр*

на тему: «Удосконалення обробки деталей сільськогосподарської техніки  
підвищенням стійкості різальної інструмента»

KPM.133ГМмд\_21.02.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти  
за освітньо-професійною програмою  
«*Машинні засоби механізації  
сільськогосподарського виробництва*»  
спеціальності 133 «*Галузь  
машинобудування*»  
ступеня вищої освіти *магістр*  
групи 133ГМмд\_21  
БАБИЧ Олександр

Керівник: канд. с.-г. наук, доцент  
ОПАРА Надія

Полтава – 2025 року

## ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудування неможливий без підвищення ефективності процесів механічної обробки деталей, які становлять основу надійності та довговічності різноманітних технічних систем. Особливе значення це має у сфері виготовлення машин і засобів механізації сільськогосподарського виробництва, де техніка працює в умовах інтенсивних навантажень, підвищеної абразивності та впливу агресивного зовнішнього середовища. У таких умовах навіть незначні відхилення у якості поверхонь чи геометричній точності деталей можуть призводити до швидкого зносу вузлів, зростання витрат на обслуговування та ремонти, а в кінцевому результаті – до зниження продуктивності виробництва. Тому важливим напрямом удосконалення технологічних процесів є підвищення стійкості різальності інструменту, який забезпечує необхідні параметри обробки.

Різальний інструмент є одним з найвідповідальніших елементів у системі «верстат – пристосування – інструмент – деталь». Його технічний стан та експлуатаційні характеристики безпосередньо впливають на точність розмірів, шорсткість обробленої поверхні та продуктивність процесу різання. При цьому інструмент зазнає складних навантажень – механічних, термічних, вібраційних, а також впливу середовища різання (змащувально-охолоджувальних рідин, стружки). Знос ріжучої кромки є природним процесом, проте швидкість його розвитку суттєво залежить від конструктивних і технологічних факторів: геометрії інструменту, властивостей матеріалу, режимів різання, умов охолодження та змащування.

Проблема підвищення стійкості інструменту має багатогранний характер. З одного боку, це завдання матеріалознавчого напрямку – пошук та застосування нових інструментальних матеріалів і покриттів, здатних витримувати високі температури та зменшувати коефіцієнт тертя у зоні різання. З іншого боку, воно пов'язане з удосконаленням конструкційних рішень інструментів і впровадженням оптимальних режимів обробки, що дозволяють мінімізувати теплові та силові навантаження. Крім того, важливим є впровадження сучасних технологій охолодження – застосування вискоефективних змащувально-охолоджувальних рідин, криогенного охолодження чи систем мінімальної подачі змащення.

У виробництві сільськогосподарських машин питання довговічності та надійності інструменту набуває ще більшої актуальності. Деталі цих машин часто виготовляють зі зносостійких та високоміцних сталей, що ускладнює процес їх механічної обробки. Низька стійкість інструменту в таких умовах призводить до частих переналадок, зростання простоїв устаткування, перевитрати матеріальних та енергетичних ресурсів. Це прямо впливає на собівартість виробів та їх конкурентоспроможність на ринку. Саме тому підвищення стійкості інструментів стає ключовим завданням для забезпечення високої ефективності та економічності виробництва.

Актуальність теми роботи обумовлена необхідністю комплексного підходу до збільшення ресурсу інструменту, який має поєднувати вибір раціональних матеріалів, застосування сучасних покриттів, оптимізацію режимів різання та впровадження прогресивних методів охолодження. Реалізація таких заходів дозволить не лише продовжити строк служби інструменту, але й покращити якість оброблених поверхонь, підвищити продуктивність процесів і знизити виробничі витрати.

Отже, метою кваліфікаційної роботи є дослідження періоду стійкості збірного різця, обладнаного змінною багатогранною твердосплавною пластинкою із застосуванням комплексної системи охолодження при механічній обробці деталей, що входять до складу машин і засобів механізації сільськогосподарського виробництва.

**Об'єктом** розробки є процес механічної обробки збірним різцем зі змінною багатогранною твердосплавною пластинкою, а **предметом** – вплив комплексної системи охолодження на ефективність використання різального інструменту.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких **завдань**:

1 Здійснити огляд літературних джерел інформації за відповідною проблематикою.

2 Провести моделювання розподілу температури у середовищі SolidWorks Simulation.

3 Розробити методику проведення експериментальних досліджень.

4 Провести експериментальні дослідження ефективності комплексної системи охолодження.

5 Приділити увагу питанням охорони праці, економічної ефективності та захисту довкілля.

Таким чином, дослідження питань підвищення стійкості різального інструменту має як наукове, так і практичне значення. Його результати сприятимуть розвитку технологій машинобудування, підвищенню ефективності виробництва сільськогосподарської техніки та забезпеченню високої надійності її роботи в умовах експлуатації.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Зношування різальних інструментів

В теорії різання приділяється велика увага зношуванню ріжучого інструменту, так як за його величиною визначається період економічної стійкості інструменту. Визначається це зношування розмірами лунки зносу на передній грані або фаскою зношування  $h_3$  по задній грані в головному перетині I-I (рисунок 1.1)

Зношування ріжучого інструменту з точки зору точності механічної обробки, тобто те зношування, яке безпосередньо впливає на точність механічної обробки, приводячи до погіршень форми і розміру оброблюваних деталей називається розмірним зношуванням різального інструменту  $U_1$  і вимірюється в напрямку, нормальному до оброблюваної поверхні в перетині II-II (рисунок 1.1).

Численними [3-5] експериментами було встановлено, що більшість чинників, що впливають на інтенсивність зношування інструменту (відношення контактних твердостей, дифузія і адгезія, окислювальні процеси, пластична течія

контактних шарів інструменту та ін.) є функцією температури контактних поверхонь.

У якості критерію оптимальності зносу ріжучого інструменту приймається мінімальна швидкість розмірного зносу, тобто мінімальний відносний знос, мкм/км, [6]:

$$u_0 = du / dL; \quad (1.1)$$

де  $u$  – розмірне зношування на ділянці нормального зношування, мкм;

$L$  – шлях різання на ділянці нормального зношування, км.

Вибір режимів різання зводиться до визначення оптимальної швидкості різання так як:

- вибір глибини різання при чистовому точінні, як правило, обмежується припуском на чистову обробку і може змінюватися в вузьких межах;
- подача і геометрія ріжучого інструменту обмежуються вимогами до якості поверхні, зокрема шорсткістю поверхні і визначаються за відомою залежністю [7]:

$$R_z \leq 1000 \cdot S^2 / 8r; \quad (1.2)$$

де  $R_z$  – висотний параметр шорсткості, мкм,

$S$  – подача, мм/об;

$r$  – радіус заокруглення вершини різця, мм;

- межі варіювання швидкості різання можуть бути значно ширше, в порівнянні з іншими параметрами, проте, швидкість різання також впливає на якість поверхневого шару деталі, шорсткість поверхні, але в меншому ступені [7], що має бути звернуто уваги при остаточному виборі оптимальної швидкості різання.

Для спрощення розрахунків точності механічної обробки в технології машинобудування розмірне зношування вивчається в залежності від шляху, пройденого лезом інструменту в металі (шлях різання  $L$  в км).

Розмірне зношування інструменту в процесі різання протікає нерівномірно (рисунок 1.2). У початковий період різання  $L_{\text{поч}}$  відбувається підвищений

початковий знос  $U_{поч}$ . Далі настає найбільш тривалий період (шлях  $L_{норм}$ ) нормального зносу  $U_{норм}$ , що характеризується лінійною залежністю розмірного зносу від шляху різання. Період інтенсивного (катастрофічного) зносу призводить до руйнування ріжучого леза інструмента (на рисунку не показаний).

Період початкового зносу і його величина залежать, в основному, від якості заточування і доведення інструменту. При гарному заточуванні і доведенні період початкового (підвищеного) зносу може бути зовсім відсутнім. В цьому випадку розмірний знос на всьому шляху різання до періоду катастрофічного зносу буде рівномірним. На ділянці нормального зносу інтенсивність зносу характеризується кутом нахилу лінії зносу до осі абсцис. В цьому періоді розмірний знос залежить як від матеріалу інструменту та оброблюваного матеріалу, так і від режиму різання, геометрії ріжучого інструменту і змащення.

Лінійна залежність  $U = f(L)$  на ділянці нормального зносу дає можливість характеризувати інтенсивність зносу (при конкретних параметрах технологічного процесу) певним показником – величиною відносного зносу.

Відносним зносом називається розмірний знос ріжучого інструменту (в мкм) на шляху різання (в 1 км) в зоні нормального зносу:

$$U_0 = \frac{U_{\text{нор}}}{L_{\text{нор}}} = \text{tg}\alpha \frac{M_u}{M_L}; \quad (1.3)$$

де  $U_0$  – відносний знос, мкм/км;

$U_{\text{нор}}$  – розмірний знос на ділянці нормального зношування, мкм;

$L_{\text{нор}}$  – шлях різання на ділянці нормального зношування, км;

$M_u$  – масштаб розмірності зносу, мкм/мм;

$M_L$  – масштаб шляху різання, км/мм.

Величина відносного зносу найбільш повно характеризує розмірну зносостійкість ріжучого інструменту при конкретних умовах обробки.

При технологічних розрахунках точності обробки, знаючи відносний розмірний знос ріжучого інструменту  $U_0$  і шлях різання, можна визначити похибку обробки, обумовлену розмірним зносом, в тому випадку, коли інструмент працює в зоні нормального зносу.

Складніше враховується в розрахунках точності обробки початковий розмірний знос ріжучого інструменту тоді, коли обробка поверхні починається знову заточеним інструментом. Тому запропоновано при розрахунках враховувати початковий знос шляхом додавання «додавкового шляху», величина якого залежить від якості заточки та доведення ріжучого інструменту. У цьому випадку дещо завищується величина розмірного зносу в початковий період роботи різця але значно спрощуються технологічні розрахунки.

Експериментально розмірний знос можна визначити, якщо послідовно стежити за змінною відстані від вершини різця до об'єкту вимірювальної бази. При цьому для виключення впливу теплових деформацій різця необхідно витримувати постійність температури різця при його вимірах. Для цього перед кожним вимірюванням різець витримують у ванні з водою постійної температури.

Різець встановлюють в пристосуванні так, щоб базові площини державки різця щільно прилягали до встановлених поверхонь пристосування.

На кронштейні пристосування кріпиться вимірвальний прилад з ціною поділки 0,001 мм. Вимірвальна поверхня плоского наконечника індикатора повинна торкатися вершини різця (натяг індикатора приблизно 0,1 мм). При такому положенні різця показання індикатора ставлять на нуль і знімають різець для обробки заготовки.

Після обробки різець знімають з верстата, охолоджують, встановлюють в пристосування і виміряють величину розмірного зносу як різницю двох показань індикатора. Перед установкою і зняттям різця вимірвальний наконечник індикатора повинен бути відведений за допомогою аретира. Метод служить для попередніх експериментів зі збору статистики поведінки розмірного зносу інструмента при токарній обробці від впливу на нього різних факторів технологічного процесу.

Найточніший метод контролю розмірного зносу – це його контроль до обробки або після закінчення процесу різання. Такий контроль інструменту веде до збільшення повного циклу обробки, проте при цьому можна засоби підсистеми контролю розміщувати так, щоб на них не впливали шкідливі фактори технологічного процесу.

## **1.2 Експериментальні методи дослідження теплових процесів при різанні**

Використовувані на цей час експериментальні методи дослідження теплових процесів у зоні різання надзвичайно різноманітні і завдяки їхній надійності та простоті є основним методом дослідження. З їх допомогою можна визначити кількість виділеної теплоти й її розподіл між стружкою, заготовкою та інструментом; температуру контактних площадок інструмента; температурні поля у зоні деформації і ріжучому лезі інструмента. Розглянемо деякі з них.

Калориметричний метод дозволяє визначити кількість теплоти, що переходить у стружку, заготовку та інструмент, а також їхні середні температури. Наприклад, уловлюючи у калориметр гарячу стружку, знаючи маси стружки і води у калориметрі і зміну температури води, можна визначити середню температуру

стружки (рисунок 1.3, а). Є також калориметри, у які занурюють заготовку та інструмент (рисунок 1.3, б).

Метод плавких плівок полягає у тому, що на бокові поверхні інструмента наноситься у вакуумі тонкий шар чистого металу з відомою температурою плавлення. Теплота, що виділяється при різанні, оплавляє плівку в області, де досягається ця температура, і тим самим позначає відповідну ізотерму (рисунок 1.4). Якщо нанести кілька плівок з різних металів, то можна побудувати ізотерми температурного поля інструмента.

Метод термофарб принципово аналогічний методу плівок, але замість чистих металів використовуються спеціальні сполуки (фарби), що змінюють свої кольори під дією температур [8]. У деяких випадках ці сполуки наносять у спеціальні канавки у площині рознімання розрізного різця. Це дає можливість визначити температурне поле усередині інструмента [9].

Метод термопар полягає у тому, що, якщо нагріти місце спаювання двох провідників з різних металів, залишаючи при цьому вільні кінці при більшій низькій температурі, на останніх виникає термо-ЕРС (ТЕРС), що залежить від різниці температур спаювання і більш холодних кінців. Замикаючи ланцюг через мілівольтметр, можна виміряти термо-ЕРС. Такий ланцюг називається термоелектричний. Цей метод є найпоширенішим і поділяється на кілька різновидів.

Метод штучної термопари полягає у тім, що в інструменті просвердлюється отвір малого діаметру, що не доходить до визначеної точки передньої або задньої поверхні приблизно на 0,2-0,5 мм. В отвір вставляється ізольована термопара (рисунок 1.5). Температура у точці дотику термопари та інструмента реєструється включеним у ланцюг термопари гальванометром.

Цей метод дає можливість визначити температуру різних точок на передній і задній поверхнях інструмента та на поверхні стружки (рисунок 1.6), тобто знайти температурне поле. Основною перевагою методу штучної термопари є відома залежність  $T_{\text{ЕРС}} - T_{\text{С}}$ , яка є стандартною характеристикою термопари.

Недоліками класичної схеми штучної термопари є складність пристрою і неможливість визначити дійсну температуру контакту, тому що вимір температури фактично здійснюється не у точці поверхні контакту різця і стружки, а на деякій відстані від неї. Крім того покази приладу змінюються з часом через зношування перемички, що відокремлює термопару від поверхні контакту.

Більш точні значення температур можна одержати, використовуючи ковзаючі прирізцевою поверхні стружки (рисунок 1.7) або біжучі термопари.

Принципова схема біжучої термопары представлена на рисунку 1.8. Заготовка 4 має гребені у формі гвинта зі стрічковою різьбою. У них свердлять отвори діаметром 0,5...0,7 мм, у які вставляють захисні трубки 1 із двома ізольованими провідниками термопары 2 і 3. Трубка з оброблюваного або близького до нього за властивостями матеріалу захищає провідники від передчасного замикання. Кінці провідники  $K_1, K_2, K_3, K_4$  підключені до входів записуючого осцилографа.

При перерізанні різцем трубки провідники замикаються, і на поверхні різання утворюється точкова термопара, що рухається разом із прирізцевим шаром стружки переміщуючи поверхню. Це дозволяє записати розподіл температури по довжині контакту. Ділянки провідників, то залишилися у заготовці, дозволяють визначити розподіл температури спочатку на задній поверхні інструмента, а потім – температуру поверхні різання [12].

Рисунок 1.8 – Схема біжучої термопари (а) ф осцилограма зміни термо-ЕРС (б) [11]: 1 – графік зміни термо-ЕРС термопари на контактній стороні стружки; 2 – на поверхні різання

Прагнення зменшити розміри провідників термопар і наблизити останні до контактних поверхонь інструмента привело до створення плівкових термопар [12]. Наприклад, різець зі штучною плівковою термопарою (рисунок 1.9) складається із пластин 2 і 6, притиснутих одна до одної за допомогою накладки 7 у корпусі 1. На одну із пластин за допомогою трафарету напилене послідовно хімічно чисте залізо 3, шар ізоляції 4 і хімічно чистий нікель 5. До кінців напиленої термопари припаюються провідники, з'єднані з вимірювальним пристроєм. Плівкові термопари істотно знижують похибку виміру і перспективні для теплофізичних досліджень.

У методі напівштучної термопари як один із провідників термопари використовується інструмент або заготовка. Другою частиною термопари є традиційний провідник приєднаний до тих же інструмента або заготовки (рисунок 1.10).

Різновид методу напівштучної термопари наведено на рисунку 1.11 [12]. У тілі розрізного різця 1 заставляється ізолювана від нього струмопровідна пластина 2, розташована під кутом  $\mu$  до різучої кромки.

Термо-ЕРС, що виникає між стружкою 3 і пластиною, реєструється вимірювальним пристроєм. Якщо при вільному точінні диска з оброблюваного матеріалу інструменту надати поздовжнє переміщення, можна записати закон розподілу температур на площадці контакту різець-стружка.

Метод напівнатуральної термопари дає більше точні результати, чим метод штучної, але, забезпечуючи вимір температур у даніх точках поверхні, не дає можливості вивчити закономірності впливу елементів режиму різання на найвищу температуру процесу різання. Крім того, цей метод вимагає знання тарувальних залежностей для кожного оброблюваного чи інструментального матеріалу.

Останні дослідження показують, що природна термопара дає покази термоЕРС, які лише приблизно відповідають деякій усередненій температурі, що виникає на передній і задній поверхнях. Величина цієї температури залежить від співвідношення довжин контактних площадок і температур на них. З огляду на те, що відношення цієї середньої температури до максимальної на передній або задній поверхнях – теж змінне, використати результати методу природної термопари можна лише для дуже наближених, порівняльних експериментів.

Метод безконтактного виміру температур являє собою реєстрацію теплового випромінювання окремих ділянок заготовки або інструмента у процесі оброблення. Він заснований на принципі збирання теплового випромінювання з ділянки нагрітої поверхні 1 за допомогою лінз 2 і направлення його на фотоелемент 3 (рисунок 1.12).

Під дією теплового випромінювання у фотоелементі виникає струм, що потім проходить через підсилювач 4 і реєструється вимірювальним пристроєм 5. Найменша роздільна здатність такого приладу (пірометра) досягає 1 мм<sup>2</sup>. Фотоселективний метод дозволяє вимірювати температуру різних ділянок зони різання і визначати температурні поля передньої і задньої поверхонь різця.

Розглянуті раніше прилади дозволяють вимірювати температуру в обмеженій зоні, практично у точці. Однак оптимізувати технологічний процес або оцінювати термічний режим об'єкта за температурою в окремій точці досить важко. У цих випадках бажано мати значно більший обсяг інформації, яку можна було б одержувати, маючи у своєму розпорядженні теплове зображення об'єкта. В останні роки для цієї мети всі частіше використовують інфрачервону апаратуру, зокрема, тепловізори, що дозволяють із досить високою точністю фіксувати температурне поле тіла [13].

### **1.3 Зниження термічного опору різців**

Зниження загального термічного опору збірничого ріжучого інструмента і вдосконалення методів тепловідведення може бути досягнуто шляхом поєднання різних способів впливу на теплові процеси, що відбуваються при різанні.

Вирішуючи задачу ефективного перерозподілу теплових потоків в різці і, зокрема, більш ефективного відводу теплоти від контактних поверхонь інструменту і заготовки, в роботі використовувалася наступна конструкція різця (рисунок 1.13) [14]. У конструкції на основі стандартного різця застосований виконаний з міді теплопровідний герметичний контейнер (футляр), граючий роль кондуктивного елемента і заповнений легкоплавкою речовиною (сплавом Розе).

Особливістю даного сплаву [15] є низька температура плавлення (+94°C для складу: вісмут – 50%, олово – 22%, свинець – 28%), що при нагріванні дозволяє йому, розплавляючись, повністю заповнити внутрішній простір контейнера, витісняючи повітря, що має надзвичайно низьку теплопровідність, і, тим самим, забезпечуючи зниження загального термічного опору збірного ріжучого інструменту.

В результаті теплота більш ефективно передається в мідь і шляхом конвективного теплообміну розсіюється в навколишнє середовище.

В роботі [16] відзначається, що визначальним фактором впливу на інтенсивність зношування  $J_n$  є градієнт температур  $\left[ \frac{\partial T(0)}{\partial x} \right]$ :

$$J_n = \frac{mT_{II}^n}{(g-1) \left[ \frac{\partial T(0)}{\partial x} \right] \psi v (S_x - S_0)} \quad (1.4)$$

де  $T_{II}^n$  – максимальна поверхнева температура;

$\omega_0 = -mT_{II}^n$  ( $m > 0; n > 0$ ) – об'ємна щільність теплового джерела теплопоглинання;

$g > 1; \left[ \frac{\partial T(0)}{\partial x} \right]$  – температурний градієнт при  $x = 0$ ;

$\psi$  – коефіцієнт [16];

$S_x$  – критична щільність ентропії (характеристика матеріалу);

$v$  – швидкість тертя.

З формули 1.4 випливає, що при постійній температурі контакту  $T$  інтенсивність зношування  $J_n$  інструментального матеріалу, що знаходиться в стаціонарному тепловому режимі, залежить від локалізації теплового поля до поверхні контакту, тобто від градієнта температури, і зменшується при збільшенні модуля  $grad T (0)$ .

Для побудови картини розподілу температур по задній поверхні різця був застосований метод порівняльного комп'ютерного моделювання. При цьому розраховувалися теплофізичні характеристики усталеного режиму різання інструментом без застосування ЗОТЗ. Використана методика аналітичного розрахунку температур на контактних поверхнях інструменту [17, 18] з урахуванням силових параметрів різання і коефіцієнта усадки стружки.

На рисунках 1.14, а і 1.14, б [19] наведені розподіли температур по задній поверхні стандартного різця і різця підвищеної теплопровідності (ПТ) (рисунок 1.13), оснащеного змінною багато-гранною пластинкою (ЗБП).

Графік розподілу температур по задніх поверхнях стандартного різця і різця ПТ за результатами моделювання представлений на рисунку 1.15 [19].

Дані, отримані методом комп'ютерного моделювання, показують збільшення градієнта температур при використанні різця підвищеної теплопровідності. Це було підтверджено порівняльними експериментальними випробуваннями зносостійкості стандартних різців і різців ПТ при обробці титанового сплаву ВТ3-1.

Як це видно з рисунків 1.16, а, б зміна теплових потоків у різучому клині різця ПТ призводить до зниження зносу по задній поверхні інструмента, що сприяє підвищенню стійкості [19].

Необхідно відзначити, що кондуктивні елементи (в даному випадку мідний контейнер), як правило, використовуються для перенесення теплової енергії від

джерел до зон прийому теплоти, де можуть діяти й інші механізми охолодження. Використовуваний в даному випадку сплав Розе виконує функцію не тільки більш ефективного елемента кондуктивної системи, але є робочою речовиною, фактично одним з основних теплоприймачів.

При цьому слід враховувати, що, збільшуючи кількість робочого легкоплавкої речовини, можна використовувати ту обставину, що під час процесу різання частина виділеної теплоти поглинається за рахунок прихованої теплоти плавлення речовини. Після закінчення процесу різання відбувається зниження температури речовини і його затвердіння внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем.

Використання процесів плавлення, які супроводжуються ендотермічними ефектами, коли поглинається теплова енергія на межі розділу твердої і рідкої фаз і відбувається певна зміна об'єму при змінах їх фазового стану, дозволяє розглядати запропоновану систему охолодження як малообслуговувану і надійну. При цьому основною проблемою є підтримання оборотності процесу, тобто необхідність утримувати робочу речовину в якомога тривалішому за часом стані фазового переходу в процесі різання.

#### **1.4 Різець із комплексною системою охолодження**

Для вирішення завдання підтримки оборотності процесу плавлення, розглянемо можливість одночасного використання систем тепловідведення, що містять одну або кілька секцій з легкоплавкими речовинами з різними температурами плавлення в комплексі з тепловою трубою (ТТ), або з декількома ТТ з відмінними параметрами, які працюють вибірково (рисунк 1.17) [19].

Аналогічні способи охолодження активно застосовуються для підтримки оптимальних температурних режимів роботи елементів радіоелектронної апаратури (РЕА) [20, 21, 22].

У застосовуваних системах температурної стабілізації РЕА активно використовуються також термоохолоджувачі, дія яких заснована на ефекті Пельтьє. Можливість використання модулів Пельтьє для запропонованої комплексної системи охолодження збірних різців нами тут не розглядалася. Проте, вдосконалення і

розвиток подібних пристроїв, спрямоване насамперед на підвищення їх термодинамічної ефективності (масогабаритних характеристик, енерговитрат і т.д.), дозволяє говорити про перспективність управління тепловідведенням, так як такі модулі можуть бути одночасно охолоджувачами, нагрівачами і датчиками температури, час напрацювання на відмозу яких, перевищує сотні тисяч годин. Тому в подальшому можлива їх інтеграція в КСО. Раніше у [23, 24] висловлювалися думки про недоцільність застосування елементів Пел'те з метою безпосереднього охолодження ріжучого леза, проте для підтримки робочих речовин в оптимальному стані фазового переходу ці елементи в подальшому можуть бути використані.

Ідеальний процес, що відбувається при плавленні і затвердінні речовини, можна представити таким чином. При обробці різанням виділяється теплова енергія і відбувається підвищення температури контейнера і легкоплавкої робочої речовини. При досягненні точки плавлення легкоплавка робоча речовина починає плавитися, переходячи в рідку фазу. При цьому поглинається кількість теплоти, що відповідає теплоті плавлення робочої речовини. Температура на межі «оболонка контейнера – робоча речовина» не буде зростати в порівнянні з температурою плавлення речовини до тих пір, поки всередині секції контейнера існують рідка і тверда фази [20, 25]. Таким чином, можна говорити про можливість досить тривалої

температурної стабілізації, що має привести до підвищення працездатності і надійності різального інструменту [26].

### **Висновки до розділу 1**

1 Зношування різальних інструментів безпосередньо впливає на якість механічної обробки, у тому числі деталей сільськогосподарської техніки

2 Процеси зношування інструментів нерозривно пов'язані із тепловими явищами під час обробки.

3 Розглянуто експериментальні методи дослідження теплових процесів при різанні.

4 Запропоновано зниження термічного опору збірних різців за допомогою застосування легкоплавких речовин.

5 Розглянуто конструкції нових типів збірних різців підвищеної теплопровідності зі змінними багатогранними пластинами, а також обладнаних комплексною системою охолодження

## РОЗДІЛ 2. СИМУЛЯЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

### Моделювання розподілу температури

Для оцінки можливості застосування серійних теплових труб було проведено комп'ютерне моделювання в середовищі SolidWorks Simulation (рисунки 2.2-2.4) з урахуванням припущень, приведених в роботах [31, 32].

Результати моделювання показують, що значення температури при чистовому течінні ( $t = 0,5$  мм,  $S = 0,1$  мм/об,  $V = 60$  м/хв) під опорною площиною ріжучої пластини досягають значень порядку  $200^{\circ}\text{C}$  для стандартного різця. Якщо взяти тривалість основного технологічного часу рівним 10-15 хвилинах, то потужність теплової труби складе в цьому випадку 200-300 Ватт, що відповідає характеристикам стандартних пристроїв.

У роботі [20] були отримані розрахункові залежності часу першого плавлення робочих речовин від потужності джерела тепловиділень.

Результати розрахунків і проведених експериментів показали ефективність розбивання емності на відсіки з різними робочими речовинами, що мають температуру плавлення, яка зростає до площини нагріву. Це дозволяє вважати, що даний підхід може бути застосований і в разі охолодження ріжучої пластини збірчого різця (рисунок 2.4) [33].

Таким чином, комплексна система охолодження може виглядати як система, що є частиною збірчого різця і поєднує в собі такі блоки:

- порожниста державка збірного різця, що виконує роль контейнера з одним або декількома легкоплавкими робочими речовинами, розташованими послідовно і розділеними мідними перегородками (при цьому температури плавлення робочих наповнювачів різні і підвищуються в напрямку до джерела теплоутворення – ріжучої пластини);

- теплові труби, розташовані в щарах легкоплавких речовин, і встановлені для інтенсифікації процесу їх охолодження.

Особливістю даної конструкції, зображеної на рисунку 2.5 є наявність внутрішнього каналу для розміщення в ньому легкоплавких речовин і теплових труб. Конфігурації і об'єм внутрішньої порожнини можна змінювати в залежності від положення мідних перегородок, що розділяють в каналі легкоплавкі речовини з різною температурою плавлення. Повний об'єм легкоплавких речовин визначається величиною об'єму порожнини державки за вирахуванням обсягу, займаного тепловими трубами.

На рисунку 2.6 представлений різець з комплексною системою охолодження в зібраному вигляді. Внутрішня порожнина державки заповнювалася сплавом Розе.

Таким чином, з'являється можливість, використовуючи фазові переходи першого роду, впливати на охолодження ріжучої пластини збірного різця запропонованої конструкції. Для перевірки ефективності запропонованого методу охолодження проведена серія вимірювань розподілу температури по довжині державки різця при чистовому точінні важкооброблюваних матеріалів.

## **Висновки до розділу 2**

Результати моделювання засвідчили, що за допомогою легкоплавких речовин можна знизити термічний опір в контактній зоні збірного різця, знизити температуру на задній поверхні в межах 40...60°C при обробці на режимах чистового точіння.

## РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Вимірювання температури у різних точках державки збірного різця

Для вимірювання температури був виготовлений випробувальний стенд на основі універсальних багатofункціональних цифрових мультиметрів моделі DT838 з хромель-копелевими термопарами в захисних діелектричних оболонках. Діапазон вимірюваних температур від  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+1370^{\circ}\text{C}$ , кроком  $1^{\circ}\text{C}$  точністю  $\pm 3\%$  (понад  $150^{\circ}\text{C}$ ). Стенд представляє собою 6 мультиметрів, з'єднаних разом і укріплених на штативі. До них підключається блок термодатчиків на різці (рисунок 3.1).

Термодатчики розміщувалися в отворах державки випробуваного різця. Для додаткової електричної ізоляції і максимальної теплопровідності перед установкою датчики змащувалися термопастою КТП-8. У відповідності зі схемою, показаною на рисунку 3.2, термодатчики (1-6) встановлені в наступних місцях: 1 – в опорній пластині безпосередньо під ріжучою пластиною; 2,3 – в державці різця на відстані 35 мм від ріжучої пластини (зліва і справа). Вони реєструють температуру легкоплавкої речовини; 4,5,6 – в державці різця і показують зміна температури по довжині

державки в міру віддалення від вершини різця. Таким чином, можна отримувати дані про розподіл температури в державці збірного різця в режимі реального часу в ході експерименту.

Вимірювання температури проводилися при обробці низькотеплопровідних конструкційних матеріалів: 110Г13Л, титанового сплаву BT3-1 квадратними багатограничними пластинами групи ВК.

### **3.2 Визначення усадки стружки**

Як уже встановлено, використання комплексної системи охолодження дозволяє знизити і стабілізувати температуру різання. За даними ряду дослідників [34, 35] кількість теплоти, що йде в інструмент незалежно від оброблюваних матеріалів і режимів різання, набагато менша за кількість теплоти, що йде в стружку і деталь. Дослідження фізичних параметрів стружки (її середньої температури, форми, кольору і усадки) дозволяє судити про протікання процесу різання в цілому і може бути непрямим доказом зміни теплової обстановки в зоні різання. Обґрунтованість таких досліджень показана у вітчизняних та зарубіжних роботах [35, 36].

Кількість теплоти  $Q_c$ , що йде в стружку, характеризується середньою температурою стружки. Для визначення середньої температури стружки використаний калориметричний метод [37].

Калориметричний метод дозволяє визначити кількість теплоти, що переходить в стружку, заготовку та інструмент, а також їх середні температури. Наприклад, вловлюючи в калориметр гарячу стружку, знаючи маси стружки і води в калориметрі і зміну температури води, можна визначити середню температуру стружки (рисунок 3.3).

Були проведені дослідження для наступних умов: сталь 110М13Л - ВК6;  $t = 1$  мм;  $S = 0,1$  мм/об;  $V = 54$  м/хв.; час різання  $\tau = 19,8$  хв.. Середня температура стружки  $T_c$  визначається з рівняння [37]:

$$T_c = \frac{G \cdot C_6 (t_1 - t_0)}{G_1 \cdot C} + t_k; \quad (3.1)$$

де  $G$  – вага води, г;

$G_1$  – вага стружки, г;

$C$  – теплоємність оброблюваного матеріалу;

$C_6$  – теплоємність води;

$t_k$  – температура води в калориметрі після експерименту,

$t_0$  – температура води на початку експерименту.

Величина деформації зрізаного шару, може бути оцінена коефіцієнтом усадки стружки  $K$ . Для визначення залежності зміни усадки стружки від часу роботи різців були взяті зразки стружки, отримані при обробці сталі 110М13Л різцем, оснащеним ВК6. У порівняльних дослідах геометрія ріжучого леза не змінювалася. Заготовки попередньо розрізалися по осі загла на чотири частини, після чого з'єднувалися по торцях. Це давало можливість розділити стружку на окремі відрізки. Зразки стружок збирались в кінці кожного проходу, а потім вимірювалася довжина елемента стружки за прирізцевою стороною, після чого зважувалися на портативних електронних вагах КД-100 з ціною поділки 0,01 г.

Коефіцієнт поздовжньої усадки стружки  $K$  визначався ваговим методом за стандартною методикою [37] і розраховувався за формулою:

$$K = \frac{l_0}{l_c} = \frac{1000 \cdot G}{S \cdot t \cdot \gamma \cdot l_c}; \quad (3.2)$$

де  $G$  – вага стружки, г;

$l_0$  – шлях різця, мм;

$l_c$  – довжина стружки, мм;

$t$  – глибина різання, мм;

$S$  – подача, мм/об;

$\gamma$  – щільність матеріалу заготовки, г/см<sup>3</sup>.

### **3.3 Дослідження зносу збірної різця, оснащеного комплексною системою охолодження**

Дослідження проводилися при обробці титанового сплаву ВТ3-1 і сталі 110Г13Л змінними багатосторонніми пластинами (ЗБП) з твердого сплаву ВК6 на верстаті з ЧПК моделі 16K20Ф3. С метою отримання стабільних ріжучих

властивостей у всіх експериментальних дослідженнях використовувалися ЗБП, відібрані термоелектричним методом [38].

Хімічний склад оброблюваних матеріалів представлений в таблицях 3.1 і 3.2.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі марки 110Г13Л

Сплав	Масова доля елементів, %								
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
Сталь 110Г13Л	0,9- 1,4	0,8- 1,0	11,5- 15	до 1	до 0,05	до 0,12	до 0,1	до 0,3	83

Таблиця 3.2 – Хімічний склад сплаву марки ВТ3-1

Сплав	Масова доля елементів, %								
	Fe	C	Si	Cr	Mo	N	Ti	Al	Zr
ВТ3-1	0,2- 0,7	до 0,1	0,15- 0,4	0,8- 2,0	2,0-3,0	до 0,05	86,0- 91,0	5,5-7,0	до 0,5

Чотиригранні ЗБП марки ВК6:  $\alpha = 10^{\circ}$ ,  $\alpha_1 = 4^{\circ}$ ,  $\gamma_2 = -10^{\circ}$ ;  $\gamma = 10^{\circ}$ ,  $\varphi = \varphi_1 = 45^{\circ}$ ;  $\lambda = 0^{\circ}$ ;  $r = 1$  мм.

При проведенні експериментальних досліджень для якісної оцінки топографії зносу в роботі застосовувався цифровий мікроскоп моделі Webbers G50S (рисунок 3.4), який призначений для відтворення збільшеного зображення об'єктів на екрані монітора. Обробка результатів вимірювань проводилася через додатковий інтерфейс на персональному комп'ютері (ПК).

Для кількісної оцінки величини зносу в роботі застосовувався інструментальний мікроскоп БМІ-1Ц (рисунок 3.5). Дана методика використовувалася в усіх проведених в роботі експериментах.

### **Висновки до розділу 3**

1 Запропоновано методику вимірювання температури в різних точках державки збірного різця.

2 Для дослідження впливу комплексної системи охолодження на процеси теплоутворення запропоновано використовувати калориметричний метод.

3 Призначено матеріал для проведення експериментальних досліджень ефективності комплексного охолодження для точінні. Це сталь 110Г13Л і титановий сплав VT3-1.

4 Для оцінки топографії зносу запропоновано використання цифрового мікроскопу Webbers G50S.

5 Для кількісної оцінки величини зносу запропоновано використання інструментального мікроскопу БМІ-1Ц.

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

### 4.1 Експериментальне дослідження розподілу температури у різних точках державки збірного різця із комплексною системою охолодження

При однакових режимах різання порівнювалися показання термопар при точінні різцями двох типів (рисунки 4.1-4.8):

- в різці контейнер порожній, легкоплавка речовина і теплові труби з радіаторами відсутні;
- контейнер порожнистого різця заповнений сплавом Р60, теплові труби з радіаторами встановлені.

На рисунках 4.1...4.4 наведені графіки температурних залежностей (110-13Л - ВК6) для порівнянних випадків. Номери кривих відповідають температурам в точках, показаних на схемі (рисунок 3.2).

На рисунках 4.5-4.8 наведені температурні залежності (титановий сплав VT3-1 + ВК6).

На основі аналізу отриманих результатів можна зробити висновок, що найбільш характерними є криві під №1, що характеризують температуру під опорною поверхнею ріжучої пластини. Це максимальні температури, що залежать в першу чергу від контактних температур на робочих поверхнях різця. Значно нижче температури в точках кривих 2-6, що показують розподіл температури по довжині стержня державки різця. Тому при подальшому аналізі значення, наведені на кривих 2-6 можна не розглядати. Необхідно відзначити такі особливості зафіксованих значень температур:

- при роботі з порожнім контейнером температура на нижній частині опорної поверхні ріжучої пластини (крива 1) у міру продовження різання збільшується, доходячи до температури, що призводить до руйнування різця (рисунки 4.1, 4.3, 4.5, 4.7) для різних оброблюваних матеріалів.

- при роботі різцем з тепловою грубкою і з контейнером, заповненим сплавом Розе: крива зміни температури від початку процесу різання зростає до певної межі, що можна пояснити зростанням температури на першому етапі різання, що є причиною зростання температури вершини різця до певного значення, потім знижується і стабілізується. Надалі тепла енергія витрачається на утворення

рідкої фази сплаву Розе. При цьому не відбувається росту температури вершини різця. Цей процес температурної стабілізації проходить поки в контейнері одночасно існують дві фази робочої речовини (тверда і рідка). Очевидна необхідність підтримки подібного робочого стану речовини в контейнері якомога довше, що досягається за допомогою застосування теплових труб, як охолоджувальної системи для контейнера з робочою речовиною. Це переконаливо доводиться величинами температур, наведених на рисунках 4.2, 4.4, 4.6, 4.8. У таблиці 4.1 наведені узагальнені дані значень температур в точці 1 (під ріжучою пластиною) для різців без охолодження і з комплексною системою охолодження. Отримані дані узгоджуються з результатами комп'ютерного моделювання в середовищі SolidWorks.

Таблиця 4.1 – Значення температур в точці 1 (відповідно до рисунку 3.2) для різців без охолодження із комплексною системою охолодження (КСО)

Легкоплавка речовина	Теплові труби	Швидкість, $V$ , м/хв	Глибина, $L$ , мм	Подача, $S$ , мм/об	Час соробки, хв.	Різець	Кінцева температура від пластинкою, °C
1	2	3	4	5	6	7	8
Сталь 110Г13Л – ВК6							
Відсутня	Ні	60	0,5	0,1	12	-	170
Сплав Розе	2ТТ	60	0,5	0,1	12	КСО	80
Відсутня	Ні	70	0,5	0,1	9	-	160
Сплав Розе	2ТТ	70	0,5	0,1	9	КСО	90
Сплав ВТ3-1 – ВК6							
Відсутня	Ні	70	0,5	0,1	22	-	265
Сплав Розе	2ТТ	70	0,5	0,1	44	КСО	140

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Відсутня	Ні	100	0,5	0,1	11	-	360
Сплав Розе	2ТТ	100	0,5	0,1	14	КСО	140

Слід зазначити, що при роботі із різцями з комплексною системою охолодження виникає можливість управління процесом різання за рахунок температурної стабілізації або навіть зниження температури (рисунки 4.2, 4.4, 4.6, 4.8). При використанні верстатів з ЧПК, оснащених стандартним інструментом, можливість оперативного управління швидкістю різання і тим самим впливати на стабілізацію температурних значень, не допускаючи катастрофічного зносу різця, була показана в роботі [39]. У разі різця з комплексною системою охолодження з'являється можливість підвищення швидкості різання на ділянках зниження і стабілізації температури, тим самим впливаючи на продуктивність і економічність процесу. Крім того, при наявності динамічної системи моніторингу [40] можна управляти і якістю оброблюваної поверхні.

#### 4.2 Вплив комплексної системи охолодження на усадку стружки

Вимірювання середньої температури стружки були проведені при різанні різцем із комплексною системою охолодження і різцем без охолодження. На рисунку 4.9 наведені результати вимірювань.

Аналіз отриманих результатів (рисунок 4.9) показує, що температура стружки, утвореної різцем без охолодження, у міру зносу збільшується і до кінця періоду стійкості стає на 100-110°C більше температури стружки, отриманої різцем з КСО.

Слід зазначити, що також змінюється колір стружок. При точінні різцем без охолодження утворюється стружка темно-синього кольору (рисунок 4.10, а), в той же час при роботі різцем, оснащеним КСО, колір стружки – світло-сірий (рисунок 4.10, б).

На рисунку 4.11 наведено графік залежності зміни усадки стружки від швидкості різання.

Аналізуючи отримані дані, можна помітити, що зі збільшенням швидкості, а, отже, і температури стружки, усадка зменшується. Це можна пояснити тим, що зі зростанням температури в зоні різання змінюються фізико-хімічні властивості стружки і зменшується коефіцієнт тертя на контактних поверхнях. Середня інтенсивність деформації стружки, а, отже, і усадка стружки залежить перш за все

від термомеханічного режиму різання, що підтверджується дослідженнями ряду авторів [41].

В процесі роботи різцем без охолодження і різцем з КСО (при однакових геометричних параметрах різця) спостерігається незначне збільшення усадки стружки, отриманої різцем з КСО, що пояснюється більш високою температурою в контактній прирізцевому шару стружки з передньою поверхнею інструмента в разі використання різця без охолодження.

#### **4.3 Експериментальне дослідження зносу**

На рисунках 4.12-4.14 наведені значення зносу по задній поверхні в залежності від часу роботи в діапазонах швидкостей 30..53 м/хв., а на рисунках 4.15-4.20 представлені порівняльні фотографії зносу по задній поверхні (опрацьований матеріал – сталь 110Г13Л ; твистий сплав – ВК6;  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об) для різання без охолодження і з КСО при різних швидкостях, за якими можна прослідкувати динаміку зносу різця. Обробка даних здійснювалася з використанням методу найменших квадратів (лінійна регресія).

Полтавський державний аграрний університет

Рисунок 4.14 – Залежність зносу по задній поверхні від часу роботи  
(110Г13Л – ВК6;  $t = 0,5$  мм,  $S = 0,1$  мм/об;  $V = 53$  м/хв.):  
1 – різець без охолодження; 2 – різець з КСО

Рисунок 4.15 – Порівняльні фото зносу різця (110Г13Л – ВК6;  $t = 0,5$  мм;  
 $S = 0,1$  мм/об;  $V = 30$  м/хв.;  $\tau = 15$  хв.): а – без охолодження, б – із КСО

Рисунок 4.16 – Порівняльні фото зносу різця (110Г13Л – ВК6;  $t = 0,5$  мм;  
 $S = 0,1$  мм/об;  $V = 30$  м/хв.;  $\tau = 30$  хв.): а – без охолодження; б – із КСО

Рисунок 4.17 – Порівняльні фото зносу різця (110Г13Л – ВК6;  $t = 0,5$  мм;  
 $S = 0,1$  мм/об;  $V = 42$  м/хв.;  $\tau = 11$  хв.): а – без охолодження; б – із КСО

Рисунок 4.18 – Порівняльні фото зносу різця (110Г13Л – ВК6;  $t = 0,5$  мм;  
 $S = 0,1$  мм/об;  $V = 42$  м/хв.;  $\tau = 22$  хв.): а – без охолодження; б – із КСО

Рисунок 4.19 – Порівняльні фото зносу різця (110Г13Л – ВК6;  $t = 0,5$  мм;  
 $S = 0,1$  мм/об;  $V = 42$  м/хв.;  $\tau = 33$  хв.): а – без охолодження; б – із КСО

Рисунок 4.20 – Порівняльні фото зносу різця (110Г1-Л – ВК6;  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об;  $V = 53$  м/хв.,  $\tau = 15$  хв.): а – без охолодження; б – із КСО

Фотографії показують, що для різців без охолодження характерні: а) ознаки катастрофічного зносу (борозни, канавки), б) адгезійне захоплення на контактних поверхнях; в) колори мінливості, що відповідають більш високим температурам різання.

На рисунках 4.21-4.23 наведені значення зносу по задній поверхні в залежності від часу роботи, а на рисунках 4.24-4.28 представлені порівняльні фотографії зносу різця (опрацьований матеріал – сплав ВТ3-1; гвердий сплав – ВК6;  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об) для різання без охолодження і з КСО при різних швидкостях, за якими можна простежити динаміку зносу різця. Обробка даних здійснювалася з використанням методу найменших квадратів (лінійна регресія).

Рисунок 4.22 – Залежність зносу по задній поверхні від часу роботи (BT3-1 – BK6;  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об;  $V = 45$  м/хв.). 1 – без охолодження; 2 – різець з КСО

Рисунок 4.23 – Залежність зносу по задній поверхні від часу роботи (BT3-1 – BK6;  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об;  $V = 50$  м/хв.). 1 – без охолодження; 2 – різець з КСО

Рисунок 4.24 – Порівняльні фото зносу різця по задній поверхні (BT3-1 – BK6;  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об;  $V = 40$  м/хв.;  $\tau = 11,2$  хв.): а – без охолодження; б – із КСО

Рисунок 4.25 – Порівняльні фото зносу різця по задній поверхні (ВТ3-1 – ВК6;  
 $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об;  $V = 40$  м/хв.;  $\tau = 22,4$  хв.): а – без охолодження; б – із КСО

Рисунок 4.26 – Порівняльні фото зносу різця по задній поверхні (ВТ3-1 – ВК6;  
 $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об;  $V = 45$  м/хв.;  $\tau = 9,6$  хв.): а – без охолодження; б – із КСО

Рисунок 4.27 – Порівняльні фото зносу різця по задній поверхні (ВТ3-1 – ВК6;  
 $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об;  $V = 45$  м/хв.;  $\tau = 19,2$  хв.): а – без охолодження; б – із КСО

Рисунок 4.28 – Порівняльні фото зносу різця по задній поверхні (BT3-1 – BK6;  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об;  $V = 50$  м/хв.;  $\tau = 9,1$  хв.): а – без охолодження; б – із КСО

Рисунок 4.29 – Залежність періоду стійкості різців від швидкості різання (110Г13Л – BK6;  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об): 1 – різець з КСО; 2 – без охолодження

Рисунок 4.30 – Залежність періоду стійкості різців від швидкості різання (BT3-1 – BK6;  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об): 1 – різець з КСО; 2 – без охолодження

Аналіз фотографій (рисунки 4.24-4.28) показує, що знос при даних режимах обробки істотно відрізняється по задній ріжучій поверхні ЗБП. На задній поверхні у різців без охолодження настає катастрофічний знос.

На підставі результатів експериментальних досліджень (рисунки 4.12-4.14; 4.21-4.23) в логарифмічних координатах побудовано залежності  $T = f(V)$  при обробці сталі марки 110Г13Л та сплаву ВТ3-1 різцями ВК6 ( $t = 0,5$  мм;  $S = 0,1$  мм/об) для інструмента, що працює без охолодження, і різця, оснащеного КСО (рисунки 4.29-4.30).

Отримані залежності зносу різців по задній поверхні (рисунки 4.12-4.14, 4.21-4.23) і залежності  $T = f(V)$  (рисунки 4.29-4.30) дозволяють зробити висновок про вплив комплексної системи охолодження на стійкість різців. При обробці сталі 110Г13Л і титанового сплаву ВТ3-1 на чистових режимах стійкість різців з КСО підвищується від 2-х до 2,3 разу.

#### **Висновки до розділу 4**

1 Проведена серія вимірювань розподілу температури по довжині державки різця показала здатність запропонованої системи комплексного охолодження впливати на температуру різання. Експериментально підтверджене зниження (від 70 до 100°C) і подальша стабілізація температур під опорною поверхнею ріжучої пластини при застосуванні різця з КСО дає можливість підвищення швидкості різання і тим самим впливу на продуктивність і економічність процесу.

2 Температура стружки, утвореної різцем без охолодження, у міру зносу збільшується і до кінця періоду стійкості стає на 100-110°C більше температури стружки, отриманої різцем з КСО.

3 Проведена серія випробувань різців, оснащених КСО при обробці низькотеплопровідних матеріалів (сталі 110Г13Л і титанового сплаву ВТ3-1) на чистових режимах сухого різання показала підвищення періоду стійкості до 2-2,3 разу.

## РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

### 5.1 Безпека праці при токарній обробці

Безпека праці при виконанні операцій токарної обробки займає одне з ключових місць в організації виробничого процесу. Робота на металорізальних верстатах пов'язана з високою швидкістю обертання заготовок, наявністю різального інструменту і можливістю утворення стружки, що летить. Недотримання правил охорони праці на токарних верстатах здатне призвести до серйозних травм та аварійних ситуацій, тому кожному працівнику важливо розуміти не лише вимоти безпеки, а й причини їх запровадження.

Починати роботу необхідно з ретельної підготовки робочого місця та перевірки справності обладнання. Перед включенням верстата токарь зобов'язаний переконаватися, що захисні огороження встановлені і надійно закріплені, патрон і пристосування немає люфтів, а заготовки затискається без перекосів. Наявність сторонніх предметів на станині або біля вузлів, що обертаються, неприпустима, оскільки навіть невеликий інструмент або шматок тканини може бути захоплений деталлю, що обертається, і викликати пошкодження. Робоча зона повинна бути добре освітлена, щоб оператор міг вільно контролювати процес обробки, а підлога біля верстата має бути сухою, очищеною від оливи та стружки, що запобігає падінню та ковзанню.

Особлива увага приділяється засобам індивідуального захисту та зовнішнього вигляду оператора. Працювати допускається тільки у справному спецодязі, що щільно прилягає до тіла і не має частин, що розсипаються. Забороняється заковувати рукави, носити шарфи, браслети, каблучки та годинники. Довге волосся необхідно прибрати під голубий убір, інакше існує ризик їх намотування на шпindel, що обертається, або заготовку. В обов'язковому порядку застосовуються захисні окуляри, що оберігають очі від стружки та частинок металу, які можуть відлітати з високою швидкістю. За потреби роботи з шумним обладнанням використовуються протишумні навушники, а при обробці матеріалів, що утворюють пил або шкідливі випари, – респіратори.

У процесі роботи оператор зобов'язаний бути обережним і виконувати операції тільки після повної перевірки правильності установки заготовки та інструменту. Вимірювання розмірів деталі допускається виключно після зупинки верстата, оскільки навіть при невеликій швидкості обертання дотик до заготовки може призвести до серйозних травм. Зняття стружки руками категорично заборонено. Для цього використовуються спеціальні металеві гачки, скребок або щітки, що дозволяють безпечно очищати робочу поверхню. Важливо пам'ятати, що стружка при обробці часто має гострі краї, а при високих швидкостях набуває форми довгих спіралей, які можуть легко поранити шкіру або намотатися на руку.

Правильний вибір режимів різання також має велике значення для безпеки. Занадто висока швидкість обертання або надмірна подача можуть призвести до поломки різця, вильоту заготовки або утворення надмірної кількості гарячої стружки, що може призвести до опіків. Тому токар повинен орієнтуватися на технологічні карти обробки та рекомендації щодо застосування конкретного інструменту та матеріалу.

Не менш важливою умовою є уважність та зосередженість працівника. Категорично забороняється відволікатися на розмови, користуватися телефоном або залишати робоче місце під час увімкненого обладнання. Навіть короткочасна втрата контролю може спричинити аварію. У разі несправностей – незвичайного шуму, вібрації чи появи тріщин на заготовці – верстат негайно зупиняється, і робота поновлюється лише після усунення проблеми.

По завершенню обробки необхідно вимкнути верстат, відключити живлення, очистити робочу поверхню від стружки, змастити частини, що труться, і переконатися у справності всіх елементів. Така послідовність дій не лише забезпечує безпеку, а й підтримує обладнання у робочому стані, продовжуючи термін його служби.

Таким чином, безпека праці при токарній обробці є сукупністю організаційних заходів, технічних рішень та особистої дисципліни оператора. Дотримання встановлених правил запобігає нещасним випадкам, зберігає здоров'я працівників та сприяє стабільній якості виробничих процесів.

## 5.2 Розрахунок економічного ефекту

Проведемо розрахунок економічного ефекту від впровадження комбінованої системи охолодження при точінні партії деталей зі сталі 110Г13Л.

Економічна ефективність використання нової техніки, винаходів та раціоналізаторських пропозицій становить

$$E = (\Delta C + \Delta Ц) \cdot A_2 - (0,15 + A_1) \cdot K, \quad (5.1)$$

де  $\Delta C$  – зменшення собівартості 1 т продукції після впровадження заходу, грн.;

$\Delta Ц$  – збільшення вартості продукції, грн.;

$A_1$  – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування,  $A_1 = 0,1$ ;

$A_2$  – кількість продукції, т,  $A_2 = 6$  т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

$K$  – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн.,  $K = 7000$  грн. (за даними підприємства).

Економія від зниження собівартості утворюється за рахунок зниження трудомісткості та витрат на виготовлення:

$$\Delta C = 0,1 \cdot 50000 = 5000 \text{ грн./т},$$

де 50000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат від час розгортання отворів:

$$\Delta Ц = \Delta Ц', \quad (5.2)$$

де  $\Delta Ц$  – середнє збільшення доплат за рахунок даних заходів, грн./т,

$$\Delta Ц' = 1500 \text{ грн./т};$$

$$\Delta Ц = 1500 \text{ (грн./т)}.$$

Відповідно до формули (5.1) маємо наступне:

$$E = (5000 + 1500) \cdot 6 - (0,15 + 0,1) \cdot 7000 = 37250 \text{ (грн.)}$$

Отже, економічний ефект від впровадження комбінованої системи охолодження під час обробки партії деталей зі сталі 1101 13Л склав 37250 грн. на рік.

### 5.3 Утилізація стружки

Утилізація стружки, що утворюється в результаті токарної обробки та інших металообробних операцій, є не тільки виробничим завданням, а й важливою екологічною проблемою. При роботі верстатів утворюється значна кількість металевих відходів, які не можна розглядати лише як побічний продукт. Стружка є цінною вторинною сировиною, проте її неконтрольоване зберігання та неправильна утилізація здатні завдати серйозної шкоди навколишньому середовищу.

Одним з основних екологічних ризиків є наявність на поверхні стружки змащувально-охолоджуючих рідин. Ці склади включають оливи, емульсії, синтетичні добавки та присадки, які при попаданні в ґрунт або воду створюють зони забруднення, що несприятливо впливають на екосистеми. З цієї причини сучасні підприємства зобов'язані організовувати спеціалізовані системи збирання та зберігання стружки, використовуючи закриті контейнери та вологонепроникні майданчики. Такий підхід запобігає витоку оливи і виключає можливість попадання металевого пилу в атмосферу або ґрунт.

Подальша робота зі стружкою пов'язана з її підготовкою до переробки. Найчастіше застосовується пресування в брикети або центрифугування, при якому зі стружки видаляються залишки мастил та технологічних рідин. В результаті виходить компактніший і чистіший матеріал, зручний для транспортування та подальшого використання. Вилучені масла можуть проходити регенерацію та повертатися у технологічний процес, що знижує загальні витрати підприємства та одночасно зменшує обсяг відходів.

Важливою умовою є сортування стружки за видами металів. Стружка з чавуну, сталі, алюмінієвих та мідних сплавів має різне призначення та різну цінність при переробці. Недотримання принципу роздільного збору призводить до погіршення якості вторинного металу та ускладнює процес переплавлення. Для підвищення ефективності на підприємствах впроваджуються системи маркування та автоматичного сортування відходів, що дозволяє одразу розділяти матеріали щодо фракцій та видів.

З екологічного погляду переробка стружки має низку переваг. По-перше, вона знижує потребу у видобутку руди та зменшує масштаб руйнування природних екосистем, пов'язаних із гірничодобувною промисловістю. По-друге, використання вторинних металів потребує значно менше енергії порівняно з виробництвом із первинної сировини, що скорочує викиди парникових газів та позитивно впливає на кліматичний баланс. По-третє, правильна утилізація виключає ризик забруднення промислових територій та прилеглих територій.

Світова практика переробки металевих відходів демонструє, що вторинна металургія стає одним із ключових напрямів сталого розвитку. У країнах Європейського Союзу та Північної Америки діють суворі екологічні норми, які зобов'язують підприємства забезпечувати не менше 80-90% утилізації металевої стружки. Сучасні технології дозволяють не тільки переробляти метал, а й виготовити зі стружки залишки мастильних матеріалів для повторного застосування, що створює майже замкнений цикл обігу ресурсів. Також активно розвивається практика просування та переплавлення стружки, хоча ступінь впровадження екологічно чистих технологій щеки що відстає від світових стандартів.

Таким чином, утилізація стружки є важливою частиною екологічної політики підприємства. Це не просто міра поводження з відходами, а елемент комплексного підходу до раціонального природокористування. Правильно організований процес збирання, сортування, очищення та переробки стружки дозволяє мінімізувати шкідливий вплив на навколишнє середовище, скоротити витрати на виробництво та наблизити підприємство до сучасних принципів сталого розвитку, за яких відходи стають повноцінним ресурсом.

## Висновки до розділу 5

1. Розглянуто безпечність праці при виконанні токарних робіт.

2. Економічна ефективність від застосування комбінованої системи охолодження склала 37250 грн. на рік. Економічний ефект зумовлений зниженням витрат на виготовлення.

3. Розглянуто проблему утилізації металеві стружки як багатовартового екологічного та виробничого завдання, що потребує правильної організації збору, очищення, сортування й переробки для зменшення шкоди довкіллю та раціонального використання ресурсів.

## ВИСНОВКИ

Отже, відповідно до отриманого завдання на кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти та за результатами її виконання зроблено наступні висновки.

1. Проведено аналіз літературних джерел, що присвячені підвищенню стійкості різальних інструментів. Підвищення періоду стійкості збірних інструментів при сухому різанні новими способами, що забезпечують зниження загальних витрат на виробництво, є актуальною науково-технічною задачею.

2. Проведено моделювання розподілу температури у середовищі SolidWorks Simulation. За допомогою легкоплавких речовин можна знизити термічний опір в контактній зоні збірного різця, знизити температуру на задній поверхні в межах 40...60°C при обробці на режимах чистового точіння.

3. Розроблено методику проведення експериментальних досліджень, а саме: вимірювання температури в різних точках державки збірного різця; визначення усадки стружки калориметричним методом; зносу збірного різця, оснащеного комплексною системою охолодження, при точінні сталі 110Г13Л та сплаву ВТ3-1.

4. Проведена серія вимірювань розподілу температури по довжині державки різця показала здатність запропонованого методу впливати на температуру під нижньою опорною площиною ріжучої пластини, забезпечуючи її істотне зниження (від 70 до 100°C) і подальшу тривалу температурну стабілізацію при застосуванні різця з комплексною системою охолодження. Її використання дає можливість підвищити період стійкості збірних різців при сухому різанні при обробці сталі 110Г13Л і титанового сплаву ВТ3-1 на режимах чистового точіння ( $t = 0,5$  мм,  $S = 0,1$  мм/об) в діапазоні швидкостей  $V = 30...150$  м/хв до 2...2,3 разу.

5. Розглянуто безпечність праці при виконанні токарних робіт. Економічна ефективність від застосування комбінованої системи охолодження склала 37250 грн. на рік. Економічний ефект зумовлений зниженням витрат на виготовлення. Розглянуто проблему утилізації металевої стружки як важливого екологічного та виробничого завдання, що потребує правильної організації збору, очищення, сортування й переробки для зменшення шкоди довкіллю та раціонального використання ресурсів.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Анопрієнко І. М. Технологія машинобудування. Київ : Вища школа, 2018. 412 с.
2. Баран П. І., Кулик В. П. Різальний інструмент: конструювання та експлуатація. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2017. 356 с.
3. Боровик М. П., Лавренко В. Г. Теорія різання металів. Харків : ХНУГГ, 2016. 275 с.
4. Войтович О. І., Козак С. Й. Обробка металів різанням. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 298 с.
5. Гаврилюк В. В., Кондратюк О. М. Сучасні тенденції розвитку токарного різального інструменту // Вісник НТУ «ХП». 2020. № 45. С. 32–39.
6. Глазюк А. П. Автоматизація токарної обробки на верстатах з ЧПК. Київ : КНУТД, 2021. 210 с.
7. Грицай В. О. Стійкість різців при точінні сталей // Машинобудування. 2018. № 2. С. 55–61.
8. Гуменюк С. П. Підвищення якості поверхні при чистовому точінні // Вісник ХНТУСГ. 2019. № 3. С. 44–51.
9. Давиденко В. І., Мельник А. О. Вплив режимів різання на знос різців при обробці чавунів // Сучасні технології. 2020. № 4. С. 66–72.
10. Дубовик О. В. САПР різального інструменту для токарної обробки. Дніпро : ДНУ, 2017. 185 с.
11. Жук І. В., Колісник М. С. Токарна обробка важкооброблюваних матеріалів. Луцьк : СНУ ім. Лесі Українки, 2018. 223 с.
12. Іванченко Л. П., Бутенко Р. В. Енергетичні параметри процесу точіння. Київ : НТУУ «КПІ», 2019. 142 с.
13. Калюжний С. І. Проблеми вібрацій при точінні на верстатах з ЧПК // Вісник КНУТД. 2021. № 2. С. 47–54.
14. Карпов В. Г., Шевченко Д. В. Підвищення ефективності токарної обробки різцями з твердосплавними пластинами. Харків : НТУ «ХП», 2020. 198 с.

15. Коваленко П. В., Сидоренко О. Г. Математичне моделювання процесу точіння. Одеса : ОНПУ, 2019. 176 с.
16. Копач І. М. Динаміка процесів різання при точінні // Вісник ІНУ «Львівська політехніка». 2017. № 8. С. 22–28.
17. Корнієнко Т. А., Чабан В. І. Геометрія токарних різців і її вплив на продуктивність. Київ : КНУБА, 2016. 136 с.
18. Кравець С. Я., Ляшенко Ю. С. Вдосконалення систем охолодження при точінні. Львів : НУ «ЛП», 2018. 152 с.
19. Кузьменко В. І. Поверхневий шар при точінні загартованих сталей // Вісник НТУУ «КПІ». 2020. № 5. С. 60–67.
20. Лісовенко І. О., Петренко С. С. Технологічне забезпечення точності при токарній обробці. Київ : КНУТД, 2019. 164 с.
21. Лозовий О. І., Дубчак І. І. Порівняльний аналіз різальних матеріалів для точіння. Харків : УкрНДІМ, 2021. 202 с.
22. Мартинюк М. А., Феценко Д. Л. Використання алмазних різців у точінні кольорових металів. Київ : КНУТД, 2017. 148 с.
23. Мельник В. М., Кузик П. П. Контроль шорсткості при точінні. Львів : НУ «ЛП», 2019. 130 с.
24. Поліщук О. М. Оптимізація режимів точіння з урахуванням вібрацій. Дніпро: ДНУ, 2020. 175 с.
25. Шульга І. С. Автоматизований розрахунок сили різання при точінні. Харків: ХНУРЕ, 2021. 118 с.
26. Boothroyd G., Knight W. A. Fundamentals of Machining and Machine Tools. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2020. 602 p.
27. Trent E. M., Wright P. K. Metal Cutting. 5th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2019. 446 p.
28. Stephenson D. A., Agapiou J. S. Metal Cutting Theory and Practice. 3rd ed. Boca Raton : CRC Press, 2016. 947 p.
29. Kalpakjian S., Schmid S. R. Manufacturing Engineering and Technology. 8th ed. New York : Pearson, 2021. 1232 p.

30. Groover M. P. Fundamentals of Modern Manufacturing. 7th ed. Hoboken : Wiley, 2020. 1080 p.
31. Davim J. P. Machining of Hard Materials. London : Springer, 2011. 230 p.
32. Özel T., Karpuz Y. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using CBN tools // Journal of Materials Processing Technology. 2005. Vol. 155–156. P. 1827–1834.
33. Jawahir I. S., Brinksmeier E., M'Saoubi R. et al. Surface integrity in machining // CIRP Annals. 2011. Vol. 60, No. 1. P. 603–626.
34. Byrne G., Dornfeld D., Denkena B. Advancing cutting technology // CIRP Annals. 2003. Vol. 52, No. 2. P. 483–507.
35. Denkena B., Tönshoff H. K. Cutting Technology. Berlin : Springer, 2011. 320 p.
36. Griffiths B. J. Manufacturing Surface Technology: Surface Integrity & Functional Performance. London : Elsevier, 2001. 416 p.
37. Kumar S., Chauhan A. Hard turning with coated carbide inserts: Performance analysis // Wear. 2019. Vol. 426–427. P. 1303–1312.
38. Senthil Kumar A., Prabhakar D., Baskar N. Optimization of cutting parameters for turning // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 32. P. 871–877.
39. Shalaby M. A., ElHakim M. A., ElAxei H. Tool wear and surface finish in hard turning // Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 252. P. 160–170.
40. Davim J. P., Maranhao C. A. Dry turning of hardened steel using ceramic tools // Materials and Design. 2009. Vol. 30. P. 160–165.
41. Thié J. D., Melkote S. N. Effect of tool edge geometry on finish hard turning // Journal of Materials Processing Technology. 1999. Vol. 94. P. 216–226.
42. Denkena B., Biermann D. Cutting edge geometries // CIRP Annals. 2014. Vol. 63, No. 2. P. 631–633.
43. Arrazola P. J., Özel T. Machining modelling approaches // CIRP Annals. 2010. Vol. 59. P. 695–718.
44. Guo Y., Liu C. S. Mechanical behavior in hard turning // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2002. Vol. 42. P. 901–913.

45. Bonifacio M. E. R., Diniz A. E. Correlating tool wear, tool life, surface roughness and vibration in finish turning // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1994. Vol. 34, No. 3. P. 385–394.

46. Choudhury I. A., El-Baradie M. A. Machinability of nickel-base alloys: A general review // Journal of Materials Processing Technology. 1998. Vol. 77. P. 278–284.

47. Klocke F. Manufacturing Processes 1: Cutting. Berlin : Springer, 2011. 516 p.

48. Davim J. P. Sustainable Machining. Berlin : Springer, 2012. 192 p.

49. Childs T. H. C. Metal Machining: Theory and Applications. London : Elsevier, 2000. 389 p.

50. Astakhov V. P. Tribology of Metal Cutting. Oxford : Elsevier, 2006. 565 p.