

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: «Підвищення працездатності свердл за рахунок використання
зносостійких покриттів»

КГМ 133ГМмз_21.02.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за освітньо-професійною програмою
*Машина і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва»*
*спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»*
ступеня вищої освіти *магістр*
групи *133ГМмз_21*
ГРАБОВЕЦЬ Олександра

Керівник: канд. техн. наук, доцент
БІЛОВОД Олександра

Полтава – 2025 року

ВСТУП

Актуальність теми. Свердління отворів є однією з найпоширеніших операцій механічної обробки в сучасному виробництві. Процес свердління відбувається в складних умовах, пов'язаних з ускладненням тепловідведенням і відведенням стружки із зони обробки. Одночасна робота великої кількості ріжучих крайок і наявність поперечної кромки, яка зминає метал, ускладнюють процес стружкоутворення під час свердління та викликають інтенсивний потік інструменту. Підвищення ефективності процесу свердління можна досягти шляхом нанесення на контактні площадки свердел зносостійких покриттів, які знаходять дуже широке застосування [1].

Незважаючи на певні успіхи, досягнуті в області розробки та застосування зносостійких покриттів для ріжучого інструменту, невирішеними залишаються питання, пов'язані з впливом покриттів на функціональні процеси різання при свердлінні, не розкрито вплив покриттів на тепловий стан спіральних свердел з покриттям. Також не розкрито вплив покриттів на контактні процеси при свердлінні та інтенсивність зношування спіральних свердел.

Враховуючи, що на даний момент відсутні методи оцінки теплового стану спіральних свердел з покриттям, що враховує особливості процесу свердління, і рекомендації щодо формування архітектури та конструкції багат шарових зносостійких покриттів, а саме – товщини шарів і їх взаємного розташування, загальної товщини багат шарового покриття, можна стверджувати, що дане дослідження, присвячене підвищенню працездатності спіральних свердел шляхом розробки та застосування багат шарових зносостійких покриттів, є актуальним.

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення працездатності спіральних свердел шляхом розробки та застосування багат шарових зносостійких покриттів.

Об'єктом досліджень є процес свердління спіральними свердлами із зносостійкими покриттями.

Предметом досліджень є закономірності взаємозв'язку складу і конструкції зносостійких покриттів з функціональними параметрами процесу свердління і працездатністю спіральних свердел.

Для досягнення мети роботи виділено наступні завдання:

1. Виявлено частки деформаційно-силового навантаження, що припадають на головні та допоміжні ріжучі кромки і поперечну кромку для свердел без покриття і зі зносостійкими покриттями різного складу.

2. Розроблено методику розрахунку теплових полів у ріжучих клинах спірального свердла, що враховує частку деформаційно-силового навантаження, яке припадає на різні кромки свердла.

3. Досліджено структурні параметри та механічні властивості зносостійких покриттів, обраних як функціональні шари багат шарових покриттів, та встановлено вплив складу зносостійких покриттів на функціональні параметри процесу свердління.

4. На основі комплексної оцінки результатів чисельного моделювання теплового стану ріжучого інструменту, впливу складу зносостійких покриттів на функціональні процеси при свердлінні, механічних властивостей зносостійких покриттів та інтенсивності зношування спіральних свердел визначено вимоги, що пред'являються до покриттів, та запропоновано архітектури багат шарових покриттів для спіральних свердел.

5. На основі виявлених взаємозв'язків структурних параметрів і механічних властивостей покриттів для спіральних свердел і зносостійких покриттів та інтенсивності зношування свердел розроблено конструкції багат шарових покриттів для спіральних свердел та технологічні режими їх нанесення.

6. Експериментально показано підвищену працездатність свердел з розробленими багат шаровими покриттями, підтверджену дослідно-промисловими випробуваннями в умовах діючого виробництва.

Методи дослідження. Реалізація мети та поставлених завдань у роботі забезпечується застосуванням сучасних методів досліджень, що базуються на основних положеннях технології машинобудування, теорії різання, матеріалознавства, математичного моделювання і підтверджується коректним співвідношенням результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

На захист виносяться наступні основні положення, що складають наукову новизну:

1. Методика розрахунку теплових полів у ріжучих клинах спірального

свердла, що враховує частки деформаційно-силового навантаження, які припадають на головні та допоміжні ріжучі та поперечні кромки.

2. Результати чисельного моделювання теплового стану спірального свердла, які дозволили виявити вплив зносостійких покриттів на процес теплоутворення на ріжучих і поперечних кромках.

3. Закономірності впливу конструкції багатошарових покриттів на параметри структури, механічні властивості та інтенсивність зношування спіральних властивостей.

4. Математичні моделі періоду стійкості спіральних свердел з розробленими багатошаровими покриттями.

Практична цінність роботи полягає в наступному.

1. Рекомендації щодо формування архітектури багатошарових покриттів спіральних свердел, співвідношення товщини шарів і загальної товщини покриття, що забезпечують високу працездатність інструменту.

2. Технологічні параметри процесу нанесення багатошарових покриттів, компоновальні схеми, час осадження шарів, опорна напруга, струм дуги, струм фокусуємих колушок.

Достовірність отриманих результатів. Робота виконана з використанням основних положень теорії різання металів, математичних методів моделювання та статистичної обробки експериментальних даних. Теоретичні положення роботи підтверджені лабораторними дослідженнями та виробничими випробуваннями, а також співставні з результатами інших авторів за аналогічними дослідженнями.

Апробація результатів дослідження. Основні результати роботи доповідалися на XX Міжнародній науково-практичній конференції «Молодь і технічний прогрес в АПК», 26-27 листопада 2025 року, м. Харків та на VIII Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування», 4 грудня 2025 року, м. Полтава.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Технології формування отворів у сталевих заготовках спіральними свердлами

Свердління – це один з найбільш поширених способів отримання глухих і наскрізних циліндричних отворів в суцільному матеріалі. Свердла застосовуються для отримання отворів в суцільному матеріалі, розсвердлювання вже наявних отворів, свердління конічних поглиблень для центрів, свердління під різьбу, висвердлювання і т.д. Залежно від конструкції та призначення свердла можна класифікувати таким чином [2, 3]:

- перові, що використовуються в основному для свердління отворів малого діаметру в неметалевих матеріалах і глибоких отворів;
- центральні спеціальні ($2\varphi = 60^\circ$ і $2\varphi = 120^\circ$) одно- та двосторонні;
- спіральні звичайні швидкорізальні та монолітні твердосплавні з пресованими або вицвіфуваними канавками;
- для глибокого свердління (перові, рушничні, гарматні, шнекові, ежекторні, кільцеві);
- спеціальні (з пластмасовим хвостовиком, спіральні з різними заточками, для свердління та висвердлювання отворів у листових матеріалах, під нарізання різьби, під заклепки тощо).

Оскільки 80-90% всіх свердильних робіт виконуються спіральними (гвинтовими) свердлами, то саме на їх прикладі і будемо розглядати особливості процесу різання.

Процес свердління здійснюється при двох спільних рухах (рис. 1.1): обертанні свердла або деталі навколо осі отвору (головний рух D_T із швидкістю v) і поступальним рухом свердла вздовж осі (рух подачі D_S із швидкістю v_s). При роботі на свердильному верстаті свердло здійснює обидва рухи – обертальний навколо своєї осі і поступальний вздовж осі; заготовка закріплюється нерухомо на столі верстата.

При роботі на токарних і револьверних верстатах, а також на токарних автоматах обертається оброблювана заготовка, а свердло здійснює переміщення вздовж осі [4].

Процес різання при свердлінні багато в чому аналогічний точінню, але має і ряд особливостей [5]. Наприклад, такі фізичні явища як: укосення стружки і її завивання, виділення тепла, наростутворення, зміщення поверхневого шару (наклеп), тертя стружки об поверхню гвинтової канавки, тертя задньої поверхні об поверхню різання та ін. Поряд з цим, процес різання при свердлінні протікає в інших, більш важких умовах. Перш за все, наявність поперечної кромки, яка не ріже, а мнє метал, викликаючи значні сили опору на цій ділянці свердла; в процесі різання беруть участь дві головні ріжучі кромки і дві допоміжні ріжучі кромки.

У порівнянні з точінням вихід стружки при свердлінні більш обмежений, підведення мастильно-охолоджуючої рідини в зону різання також ускладнене. Крім того, ріжучі кромки свердла на протязі від периферії до центру мають змінний передній кут. Змінюється також і швидкість різання по довжині ріжучої кромки, що, в свою чергу, позначається на зміні деформації в суміжних елементах по всій довжині ріжучої кромки: деформація стружки до центру свердла збільшується.

Рисунок 1.1 – Елементи рухів у процесі різання при свердлінні [5]:

1 – напрямок швидкості результуючого руху різання; 2 – напрямок швидкості головного руху різання; 3 – робоча площа P_s ; 4 – розглянута точка ріжучої кромки; 5 – напрямок швидкості руху подачі.

Поперечна кромка, маючи кут різання більше 90° , працює в важких умовах [6]: вона ще більше деформує метал, створює підвищені напруги на цій ділянці ріжучого інструменту, що викликає посиленій знос поперечної кромки свердла. До того ж частина ріжучих крайок, що прилипають до перемички, при більш обмежених умовах виходу стружки має швидкість різання, близьку до нуля.

Направляючі стрічки, не маючи заднього кута, створюють при свердлінні значне зношування поверхні оброблюваного отвору, в результаті чого сильно зношуються.

Розглянемо коротко вплив різних параметрів свердла і операції свердління на осьову силу P_o і обертальний момент різання $M_{об}$ [7, 8].

Вплив діаметра свердла D і подачі S . Із збільшенням D і S збільшується площа перетину зрізу, що припадає на головну ріжучу кромку, внаслідок чого осьова сила P_o і обертальний момент $M_{об}$ збільшуються. Однак так само, як і при точінні, S і D впливають на P_o і $M_{об}$ неоднаково. Якщо S впливає на осьову силу і обертальний момент приблизно однаково, то діаметр свердла впливає на $M_{об}$ значно більше, ніж на P_o .

Вплив кута нахилу гвинтової канавки свердла ω . Із збільшенням ω відповідно зростає γ , що призводить до зниження роботи деформації, отже до зниження осьової сили P_o і обертального моменту $M_{об}$. Експериментально встановлено, що збільшення ω більше $25... 35^\circ$ істотного впливу на сили різання не чинить.

Вплив кута при вершині 2ϕ . Вплив 2ϕ на P_o і $M_{об}$ при свердлінні аналогічно впливу кута ϕ на сили P_x і P_z під час точіння. При збільшенні кута 2ϕ зменшиться сила P_z на головній ріжучій кромці і, як наслідок, величина $M_{об}$. Так само, як і при точінні, збільшення кута 2ϕ призводить до збільшення кута між головною ріжучою кромкою і напрямком руху подачі, що збільшує осьову складову P_z на ріжучій кромці і, отже, осьову силу P_o .

Вплив довжини перемички l_1 і кута її нахилу. Поперечна ріжуча кромка має від'ємне значення переднього кута γ , отже, з її збільшенням осьова сила буде зростати, оскільки при цьому збільшується опір врізання. На і цей фактор

істотного впливу не має, оскільки довжина поперечної ріжучої кромки вкрай мала порівняно з довжиною головних ріжучих кромок.

Вплив мастильно-охолоджуючої рідини. Дослідженнями встановлено позитивний вплив рідини на величину осьової сили P_o і обертальний момент $M_{об}$. Застосування при свердлінні рідин, і особливо поверхнево-активних, сприяє зменшенню осьової сили і моменту: на 10...35 % при обробці пластичних металів (сталей); 10... 18 % при обробці чавуну; 30...40 % при свердлінні алюмінієвих сплавів у порівнянні з обробкою насухо.

Вплив якості оброблюваного металу. Зі зміною механічних і фізико-хімічних властивостей оброблюваних металів змінюється і їх опір свердлінню. Характеристиками якості оброблюваного металу, від яких залежить величина сили різання при свердлінні, є: при обробці сталі – межа міцності σ_B ; при обробці чавуну і бронзи – твердість HB.

У процесі свердління ріжуча частина свердла з часом зношується. Свердла зношуються в результаті тертя задніх поверхонь об поверхню різання, стружки об передню поверхню, направляючих стрічок об оброблену поверхню і змицання поперечної кромки.

Зношення свердла по задній поверхні відбувається нерівномірно: біля поперечної кромки знос менше, ніж біля периферії. Найбільш небезпечним видом зношення у свердел є зношення по гугах, утворених головними ріжучими кромками і стрічками [9].

У роботі [10] досліджувалася стійкість окремих ділянок ріжучої кромки свердла і вплив її геометрії на загальну стійкість. Відзначається, що основний внесок у зміну, а отже, у вирівнювання стійкості точок ріжучої кромки вносить вирівнювання швидкості різання. Отримані результати показали, що підвищення загальної стійкості свердла може бути досягнуто шляхом підвищення стійкості найбільш навантаженої ділянки ріжучої кромки, що, в свою чергу, забезпечується виготовленням свердла не з прямолінійною ріжучою кромкою, а з криволінійною.

У роботі [11] досліджувалася ефективність плазмової поверхневої обробки спіральних свердел із швидкорізальної сталі, проводилися випробування на стійкість даного інструменту. За результатами роботи були виявлені переваги

свердел після плазмової обробки в порівнянні зі свердлами, обробленими за класичною технологією:

- підвищення твердості матеріалу свердла, що дозволило підвищити продуктивність і ефективність свердління;
- підвищення стійкості свердла за рахунок створення поля стискаючих залишкових напружень;
- зниження зношування задньої поверхні свердла за рахунок сплавлення виступів мікронерівностей і зменшення шорсткості.

У роботі [12] були досліджені характеристики та експлуатаційна стійкість дифузійних захисних шарів, отриманих методом низькотемпературної нітроцементації швидкорізальних сталей. Проведено вимрювання таких важливих для характеристики процесу різання при свердлінні параметрів, як величина крутного моменту і осьової складової сили різання при свердлінні, величини зносу по задній поверхні і стрічці. Було встановлено, що низькотемпературна нітроцементація свердел з швидкорізальної сталі позитивно позначається на параметрах процесу різання - величині крутного моменту і осьової складової сили різання при свердлінні зменшилися відповідно в 1,4 і 1,5 рази, експлуатаційна стійкість інструменту в порівнянні зі стандартним неукріпленим інструментом підвищилася в 1,7... 1,9 рази, підвищилася експлуатаційна стійкість в 2,2 рази.

У роботі [13] зазначається, що основними причинами високої інтенсивності зносу головних задніх поверхонь свердла є похибки поверхневого шару при заточуванні інструменту, а також великі контактні напруги на спочатку малій ширині майданчика зносу. Автор пропонує, як один з основних шляхів підвищення стійкості, а отже, і ефективності свердел, підвищення зносостійкості стрічок і куточків, наприклад за допомогою застосування зносостійких покриттів.

Аналізуючи технічну літературу, можна зробити висновок про те, що зміна та оптимізація конструктивних параметрів свердла, режимів різання, а також інструментальних матеріалів (швидкорізальна сталь, твердий сплав) у питаннях підвищення ефективності та продуктивності свердління практично вичерпали себе.

1.2 Фізико-технічні особливості процесу різання спіральними свердлами із зносостійкими покриттями

У процесі різання в результаті взаємодії оброблюваного та інструментального (твердосплавного) матеріалів контактні площадки на передній і задній поверхні ріжучого інструменту зношуються. На задній поверхні інструменту утворюється фаска зносу розміром A_3 , розмір якої може бути різним. Зношування ріжучого інструменту може мати різну фізичну природу, і можуть існувати різні механізми зношування, що визначається фізико-механічними властивостями оброблюваного та інструментального матеріалу, видом контактної взаємодії, контактними температурами, контактними напруженнями, можливістю протікання дифузійних процесів через межу «оброблюваний матеріал – інструментальний матеріал» тощо [14]. Одним з основних чинників зменшення зношення, збільшення стійкості, форсування режимів різання, тобто підвищення ефективності свердел як економічного фактора процесу свердління є нанесення і застосування зносостійких покриттів [15, 16].

При роботі інструменту з покриттям характерне зміщення залежності «інтенсивність зношення – швидкість різання» в область більш високих швидкостей. Тобто значення оптимальної швидкості різання u_c (швидкість, при якій інтенсивність зносу мінімальна) зміщується в бік більших її значень [16].

Зсув пов'язаний зі зменшенням термомеханічної напруженості ріжучої частини твердосплавного інструменту з покриттям за рахунок зниження рівня діючих контактних напруг і температур. Виникнення тріщин насамперед пов'язане з дією двох типів джерел дислокацій: поверхневих і об'ємних [17]. У сплавах з покриттями, що не містять η -фазу (отриманими за технологією ФОР), при низьких швидкостях різання (температура контакту не більше 0,2 температури плавлення кобальту) і високих контактних напруженнях швидкість і щільність дислокацій, викликаних поверхневими джерелами, значно більші, ніж об'ємними.

Покриття, що працюють в умовах безперервного різання (зокрема, свердління), повинні, в першу чергу, забезпечувати високу опірність процесам

утворення і розвитку тріщин, з іншого боку – мати високу міцність зчеплення з інструментальною основою.

У роботах [18, 19] показано, що для ріжучого інструменту з покриттям зношування на передній поверхні починається з утворення поздовжніх тріщин у матеріалі покриття на деякій відстані від ріжучої кромки. Одночасно з утворенням поперечних тріщин в матеріалі покриття на передній поверхні інструменту спостерігається утворення тріщин в інструментальній основі вздовж ріжучої кромки на відстані від неї, що дорівнює в середньому (в залежності від режиму різання) $(0,08 - 0,1) C_{\gamma}$. Подальше руйнування ріжучого інструменту з покриттям відбувається так само, як і для інструменту без покриття.

Додаткове легування зносостійкого покриття другим елементом призводить до зміни періоду кристалічної решітки α і підвищення напівширини рентгенівської лінії β_{111} , що свідчить про збільшення ступеня мікродеформацій кристалічної решітки і зміну фізико-механічних властивостей. Додаткове легування двокомпонентних інструментальних матеріалів змінює залишкові стискаючі напруження $\sigma_{\text{залишок}}$ (рис. 1.2). Використання в якості легуючих елементів заліза і алюмінію підвищує міцність зчеплення інструментального матеріалу з інструментальною основою, про що свідчить зниження коефіцієнта відшарування K_0 (рис. 1.2). Багатоелементні покриття на основі модифікованого титану мають вищу мікротвердість H_{μ} , модуль Юнга E , межу текучості σ_T , у порівнянні з базовими двокомпонентними нітридними зносостійкими покриттями.

Рисунок 1.2 – Вплив вмісту другого легуючого елемента Me_2 на фізико-механічні властивості покриття $TiZrAlN$.

У роботі [20] показано, що додаткове легування покриття призводить до збільшення довжини контакту стружки C_γ з передньою поверхнею інструменту, коефіцієнта вкорочення стружки K_L , складових сили різання (P_X, P_Y, P_Z). У той же час більше збільшення довжини контакту C_γ порівняно зі зростанням сили різання знижує середні нормальні q_N і дотичні q_F питомі навантаження на передню поверхню ріжучого інструменту. При цьому більше зниження величин q_N і q_F викликає легування покриттів кремнієм, алюмінієм і цирконієм.

Більш істотне зростання величини C_γ порівняно з потужністю теплового потоку $Q_{\text{п}}$ на передній поверхні ріжучого інструменту призводить до зменшення інтенсивності теплового потоку $q_{\text{п}}$. При цьому змінюється потужність Q_3 і його інтенсивність $q_{\text{п}}$ на задній поверхні інструменту. Збільшення $Q_{\text{п}}$ спричиняє зростання середніх температур на передній $T_{\text{пер}}$ і задньої $T_{\text{зсп}}$ поверхнях інструменту. При цьому для всіх типів покриттів більшу зміну температур викликає наявність у покритті хрому, заліза і молібдену, меншу – кремнію, алюмінію і цирконію. Для різального інструменту з багатоеlementними покриттями спостерігається зміщення ізотерм від задньої поверхні і ріжучої кромки, що пов'язано зі збільшенням C_γ , і в бік, протилежній передній поверхні, що пояснюється прогріванням інструменту через збільшення $Q_{\text{п}}$. Все це разом взяте приводить до зниження зношування ріжучого інструменту.

Отже, складне легування покриттів на основі штриха титану двома елементами дозволяє отримати покриття з більш високими механічними характеристиками, що сприяє підвищенню зносостійкості інструменту.

У роботі [21] для зниження зношування ріжучого інструменту з швидкорізальної сталі пропонуються конструкції багат шарових покриттів з перехідними адгезійними шарами. Наявність перехідних адгезійних шарів незначно змінює мікротвердість покриття в цілому (рис. 1.3), збільшення якої становить не більше 11 %, але істотно підвищує міцність адгезійного зв'язку покриття з інструментальною основою, про що свідчить зниження коефіцієнта відшарування на 55 – 79 % у порівнянні з відповідним одношаровим покриттям.

Рисунок 1.3 – Вплив товщини перехідного шару $TiFeN$ в багатошаровому покритті $TiFe - TiFeN - TiN$ на залишкові напруги в покритті σ_0 (1), мікротвердість покриття (2) і коефіцієнт відшарування покриття K_0 (3) [22].

Застосування покриття з перехідними адгезійними шарами дозволяє знизити зношування і підвищити період стійкості інструменту з швидкорізальної сталі Р6М5К5 в 1,4 – 4,2 рази у порівнянні з ріжучим інструментом з одношаровим покриттям TiN , при цьому коефіцієнт підвищення стійкості визначається конструкцією покриття, оброблюваним матеріалом і режимом різання.

Найширші перспективи зниження інтенсивності зношування ріжучого інструменту відкривають багатошарові покриття. Найцікавішим є принцип, запропонований у роботі [23], що враховує механізм руйнування ріжучого інструменту під час переривчастого різання в результаті дії змінних теплосилових навантажень. Згідно з цим принципом [24] багатошарове покриття повинно включати як мінімум два шари зносостійких матеріалів: зовнішній шар, призначений для зниження термовиділення і амплітуди термоциркуляції; внутрішній (прилеглий до основи) шар, що має високі залишкові стискаючі напруги, що стримує процеси тріщиноутворення [25].

На основі досліджень теплового та напруженого стану автором роботи [25] запропоновано конструкцію з верхнім шаром із TiN і нижнім шаром із $TiCN$. Використання шару TiN забезпечує найбільше зниження температури та амплітуди її коливання. Нижній шар $TiCN$, що має високі стискаючі залишкові напруги, стримує процеси утворення і зростання тріщин. Дослідження даної динаміки

показали ефективність запропонованої конструкції багат шарових покриттів.
(рис. 1.4).

Рисунок 1.4 – Вплив складу багат шарового покриття на час T_2 до утворення поперечних тріщин на ділянці пластичного контакту стружки з передньою поверхнею [26]: $a - v = 150$ м/хв, $S = 0,3$ мм/об, $b - v = 200$ м/хв, $S = 0,1$ мм/об, 1 – TiN , 2 – $TiN - TiCN$, 3 – $TiN - TiZrN$, 4 – $TiN - TiAlN$, 5 – $TiN - TiCN - TiZrN$

Рисунок 1.5 – Кількість циклів роботи пластин МК8 до утворення сітки тріщини на передній поверхні (а) і руйнування багат шарового покриття (б) [27]: $v = 247$ м/хв, $S_f = 0,4$ мм/зуб, $t = 1,5$ мм, $B = 20$ мм; 1 – TiN , 2 – $TiCN$, 3 – $TiCN - TiN$

Незважаючи на велику кількість робіт в області застосування зносостійких покриттів для підвищення ефективності ріжучого інструменту, всі відомі роботи присвячені вивченню впливу покриттів в основному на операціях точіння і фрезерування, і тільки невелика частина - для свердління. Можна припустити, що для специфічних умов різання при свердлінні необхідні зносостійкі покриття спеціального складу і конструкції.

Висновки до розділу 1

1. З огляду літератури в області дослідження проблеми створення та експлуатації свердел з покриттям видно, що нанесення зносостійких покриттів на робочі поверхні інструменту є ефективним способом підвищення його працездатності. Покриття можуть наноситися різними методами, найбільшими перевагами володіє метод ФОГ, як за номенклатурою нанесених покриттів, так і матеріалів інструментальної основи.

2. Встановлено, що покриття істотно зменшують окислювальні зношування, а також знижують термомеханічну напруженість ріжучої частини інструменту. Руйнування ж самого покриття в процесі різання відбувається в результаті утворення в ньому тріщин, викликаних пружнопластичними деформаціями ріжучих клинів і в результаті дії дотичних напружень на передній поверхні інструменту.

3. Найбільш широке застосування в промисловості мають одношарові одноелементні покриття. Подальшим шляхом вдосконалення інструментів з покриттям є створення багатшарових композиційних покриттів, що мають властивості, відмінні від властивостей кожного шару окремо. Однак на даний час практично відсутні дані щодо ефективності застосування багатшарових і багатокомпонентних зносостійких покриттів для свердел, не виявлено механізм впливу покриття на тепловий стан інструменту, не сформульовано вимог, яким повинні відповідати багатшарові покриття для забезпечення максимальної ефективності свердління. Крім того, відсутні рекомендації щодо кількості шарів багатшарового покриття, загальної товщини зносостійкого покриття і товщини окремих шарів, а також їх складу. У той же час можливість широкого варіювання

властивостей багатошарових покриттів за рахунок зміни кількості шарів, їх складу і товщини, а також великий спектр оброблюваних і інструментальних матеріалів значно ускладнюють створення ефективних композицій «покриття інструментальний матеріал» шляхом проведення експериментальних досліджень.

Таким чином, видно, що проблема підвищення ефективності застосування свердел з швидкорізальної сталі та твердого сплаву зі складними покриттями вимагає подальшого розвитку.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1 Шляхи та засоби розробки високоефективних зносостійких покриттів спіральних свердел

Нанесення на робочі поверхні інструменту зносостійких твердих покриттів є ефективним способом підвищення працездатності інструменту. З урахуванням специфіки протікання процесів формування зміцнюючих покриттів існуючі методи можна розділити на три основні групи (рис. 2.1).

Рисунок 2.1 – Класифікація методів нанесення покриття [18]

До першої групи відносяться методи, де формування покриття здійснюється переважно за рахунок дифузійних реакцій між насичуючими елементами та

інструментальним матеріалом. До другої групи відносяться методи, де покриття утворюються в результаті хімічних реакцій, що протікають між компонентами покриття на поверхні інструментального матеріалу. В третій групі об'єднуються методи, де покриття утримується на поверхні інструментальної основи в основному за рахунок механічного зв'язку.

Найбільш широке промислове застосування знайшли методи хімічного осадження покриттів з парогазової фази (методи ХОП), що мають у своїй назві *CVD (Chemical Vapor Deposition)* та методи фізичного осадження покриття (методи ФОП), що мають міжнародну аббревіатуру *PVD (Physical Vapor Deposition)*. Ці методи значно ефективніші за методи хіміко-термічного утворення покриття як за продуктивністю, так і з точки зору стійкості ріжучого інструменту [28].

Розглянемо детальніше методи ХОП і ФОП. Нанесення покриттів методом ХОП дозволяє підвищити стійкість твердосплавного ріжучого інструменту в 3 – 5 разів. Рекомендовані області застосування покриття, що наноситься методами ХОП - це чистова і напівчистова обробка заготовок зі сталей і чавунів при високих швидкостях з малими і помірними подачами. Методами ХОП наносять покриття тільки на змінні пластини і молотінний ріжучий інструмент з вольфрамівих твердих сплавів [29].

Можливість широкого варіювання температурою в зонах нанесення покриття дозволяє використовувати методи ФОП як універсальні методи для нанесення покриття на ріжучий інструмент з твердих сплавів і швидкорізальної сталі. Ці методи є універсальними і з точки зору можливості отримання широкої гами одношарових, багатошарових і композиційних покриттів на основі нігريدних, карбідних, карбоішридних, оксидних, боридних сполук тугоплавких металів IV – VI груп періодичної системи. Застосування методів ФОП значно розширює технологічні можливості ріжучого інструменту з покриттям за рахунок більш ефективного, ніж для методів ХОП, управління процесами отримання покриття і їх властивостями, а також спрямованого впливу на геометричні, кристалохімічні та фізико-механічні дефекти поверхневих шарів інструментального матеріалу. Процес КІВ можна представити у вигляді двох послідовних процесів – іонного бомбардування і конденсації покриття. Для досягнення великих щільностей

іонного потоку використовують спеціальні плазмооптичні пристрої, які мають назву «холловськими ерозійно-плазмовими прискорювачами» [30], які дозволяють ефективно керувати як швидкістю, так і плазмос-фізичними характеристиками іонного потоку. Найбільшого поширення в промисловості набули установки з плазмооптичною системою керування плазмовим потоком, принципова схема яких показана на рис. 2.2.

Рисунок 2.2 – Принципова схема установки для нанесення покриттів методом КІЗ з плазмооптичною системою:

1 – корпус камери; 2 – катод-випарник; 3 – джерело живлення дуги; 4 – система запалювання дуги (тример); 5 – електромагніт; 6 – подача реакційного газу; 7 – різучий інструмент; 8 – джерело подачі опорної (прискорювальної) напруги на інструмент

Область застосування інструменту з покриттями, що наносяться методами ФОП - це напівчистове і чорнове точіння, точіння з ударом, по кірці, а також обробка заготовок із загартованих сталей; чистове точіння протяжних поверхонь, до точності яких висуваються підвищені вимоги, розточування, напівчергове і чорнове фрезерування, нарізання різьби, різання жароміцних сплавів. Методами ФОП покриття наносяться на змінні пластини як з вольфрамових, так і

безвольфрамових твердих сплавів, на твердосплавні пластини напайного ріжучого інструменту, цілісний твердосплавний інструмент особливо з малим радіусом заокруглення ріжучої кромки, а також, завдяки низькій температурі процесу, на інструмент з швидкорізальної сталі.

В даний час більшого застосування знаходять багат шарові покриття. Найбільшою ефективністю володіють зносостійкі покриття загальною товщиною 8 мкм. При цьому в залежності від виду обробки ефективність багат шарових покриттів різної конструкції не однакова. Так, на режимі попередньої обробки ($v = 160$ м/хв, $S = 0,3$ мм/об) найменшу інтенсивність зношування ріжучого інструменту забезпечують покриття з товщиною верхнього шару, що становить 35...60% від загальної товщини покриття, а на режимі остаточної обробки ($v = 200$ м/хв, $S = 0,1$ мм/об) – 50...80%.

При цьому інтенсивність зношування інструменту з багат шаровим покриттям і верхнім шаром з $TiZrN$ в 1,5 – 2 рази менше інтенсивності зношування покриттів з верхнім шаром з $TiCN$. Наявність у тришаровому багат шаровому покритті додаткових меж між шарами збільшує час до утворення тріщин на 6,5...18% порівняно з двошаровим покриттям $TiN - TiZrN$ в залежності від режиму обробки. Результати випробувань твердосплавних пластин МК8 з багат шаровими покриттями наведені на рис. 2.3.

Рисунок 2.3 – Вплив швидкості різання v (а) і подачі на оборот S (б) на період стійкості T інструменту з багат шаровими покриттями при токарній обробці заготовок зі сталі 5ХНМ. а – $S = 0,11$ мм/об, б – $v = 210$ м/хв; 1 – TiN , 2 – $TiN - TiCN$, 3 – $TiN - TiZrN$, 4 – $TiN - TiAlN$, 5 – $TiN - TiCN - TiZrN$

У роботі [23] досліджувалася ефективність нанесення тонких зносостійких вакуумних іонно-плазмових покриттів TiN на роботу частину спіральних свердел зі сталі Р6М5. За результатами досліджень було складено графік зношування (рис. 2.4). З аналізу графіка видно, що при однаковій величині зносу на рівні $\sim 1,1$ мм стійкість свердел з покриттями становить 84 хв, що в порівнянні зі свердлами без покриттів (48 хв) в 1,75 рази більше.

Рисунок 2.4 – Середнє зношування свердел в залежності від тривалості свердління

Причому було відзначено, що свердла з покриттями при такій величині зношування ще зберігають свою працездатність на відміну від свердел із заводським заточуванням, які при величині зношування більше 1,0 мм втрачають працездатність. Збереження працездатності свердел з покриттями пояснюється більш рівномірним зносом по довжині ріжучої кромки на відміну від свердел без покриттів, оскільки порушуються геометричні параметри ріжучої частини свердел за рахунок сильного зносу периферійних ділянок ріжучих кромки.

З огляду на те, що процес свердління має свої особливості, розробка зносостійких покриттів вимагає проведення додаткових досліджень щодо впливу покриттів на характеристики процесу різання, щодо оцінки теплового стану різних елементів свердла. Разом з цим, можна припустити, що для таких специфічних умов необхідні зносостійкі покриття спеціального складу і конструкції.

2.1 Теоретичні основи експериментальних досліджень

Для дослідження контактних характеристик процесу свердління та працездатності ріжучого інструменту зі зносостійкими покриттями використовували свердла з однокарбідного твердого сплаву виробництва фірми «DORMER» (Німеччина) стандартної геометрії (таблиця 2.1). Діаметр свердел становив 5 мм, діаметр серцевини 0,8 мм.

Таблиця 2.1 Фізико-механічні властивості інструментального матеріалу

| Інструментальний матеріал | Межа міцності на згин $\sigma_{згин}$, МПа | Межа міцності на стиск $\sigma_{стиск}$, МПа | Коефіцієнт термічного розширення α , K^{-1} | Модуль Юнга E , ГПа |
|---------------------------|--|--|---|--------------------------|
| ВК6 | 1500 | 3800 | $5,0 \cdot 10^{-6}$ | 610 |

При проведенні експериментальних досліджень використовували заготовки з нормалізованої конструкційної легованої сталі 30ХГСА (ГОСТ 4543-71), (таблиця 2.2).

Осадження зносостійких покриттів проводили на вакуумно-плазмовій установці «Булат – 6», компоновальна схема якої представлена на рисунку 2.5.

Таблиця 2.2 Фізико-механічні властивості опрацьованих матеріалів

| Опрацьований матеріал | Межа міцності при розтягуванні σ_B , МПа | Межа текучості σ_T , МПа | Твердість, НВ |
|-----------------------|--|------------------------------------|------------------|
| 30ХГСА | 1470 | 1270 | 220-300 |

Інструмент установлювали в пристосування, яке оберталося з частотою 8 об/хв, що гарантувало рівномірний прогрів пластин.

Рисунок 2.5 – Схема установки:

1 – камера; 2 – катод-випарник; 3 – фокусуюча котушка; 4 – зразок;
5 – вакуумні насоси; 6 – система подачі робочого газу; 7 – мікрометр

Підготовка поверхонь пластин включала наступні етапи:

- промивання в бензині Б-70 (БР-1) або розчиннику;
- промивання в ультразвуковій установці типу УЗУ-0,25 із застосуванням мильного технічного засобу КМ – 1 у концентрації 60 – 80 г/л при температурі 60 – 80°C протягом 15-20 хв;
- промивання в дистильованій воді;
- протирання тканиною, змоченою етиловим спиртом;
- сушіння при температурі 120 – 140°C протягом 15-20 хв.

Іонне очищення проводили за таких режимів: струм дуги $I_D = 110$ А, струм фокусуючої котушки $I_F = 0,4 - 0,6$ А, залишковий тиск $p_0 = 6,65 \cdot 10^{-3}$ Па, напруга $U = 1000$ В, час іонного очищення $\tau_0 = 6 - 10$ хв при температурі 550 – 650 °С. Процес осідання зносостійкого покриття відбувався під тиском $p_0 = 3,9 \cdot 10^{-1}$ Па, температура пластин підтримувалася в межах 560 – 580 °С. Після осідання покриття проводили витримку ріжучого інструменту у вакуумі. Камера

установки розгерметизувалася при досягненні температури 150 – 200 °С на різучому інструменті, після чого відбувалося вилучення інструменту.

Експериментально температуру пластин із твердого сплаву визначали оптичним мікропірометром ВІПМ – 015М. При осадженні нітридних покриттів в якості робочого газу застосовували азот. Для катодів-випарників застосовувалися такі матеріали: технічний титан марки ВТ 1-0; складові катоди з корпусом з ВТ 1-0 і вставками з *Cr*, *Zr*, *Nb* і литі катоди зі сплаву *Ti* і *Al*.

Товщину покриттів визначали на зламі пластини з твердого сплаву за допомогою скануючого електронного мікроскопа Phenom proX (FEI). Хімічний склад зносостійких покриттів визначали методом кількісного рентгеноспектрального аналізу на установці MAP – 4.

Структурні дослідження зразків з покриттями проводили методами рентгенівської дифрактометрії. В якості параметрів структури покриттів були обрані: період кристалічної решітки a , нм; напівширина рентгенівської лінії β_{111} , град, характеризує міру дефектності структури покриттів; залишкові напруження першого роду σ_0 , МПа, параметр текстури J_{111} , відносно мікрореформації кристалічної решітки $\Delta a/a$ і розміри блоків областей когерентного розсіювання (ОКР) D розраховували за методиками.

Вимірювання мікротвердості H_μ покриттів проводили пірамідою Кнуппа при навантаженні 0,98 Н на мікротвердомірі *Mitutoyo NH-125*. До проведення вимірювань виконували підполірування поверхні пластин з покриттям алмазною пастою. Вимірювання відбитків, які мали крихке руйнування і спотворення, не виконували.

Визначення модуля Юнга покриттів проводили згідно з методикою, запропонованою в роботі [29]. Вимірювання відбитків індентора Кнуппа проводили при навантаженні 0,98 Н на мікротвердомірі *Mitutoyo NH – 125*.

Значення модуля пружності розраховували за формулою:

$$E = \frac{H_\mu \cdot \alpha}{\frac{b_1}{d_1} - \frac{b}{d}}, \quad (2.1)$$

де H_{μ} – мікротвердість за Кнуппом, МПа;

α – коефіцієнт ($\alpha = 0,45$);

b і d – довжини меншої і більшої діагоналей відбитка, мм;

$$\frac{b_1}{d_1} = 0,1406.$$

Для оцінки тріщин стійкості композиції «зносостійке покриття – інструментальна основа» проводили вимірювання довжини радіальних тріщин у відбитках для визначення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень. Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень визначали згідно з методикою, запропонованою в роботі [10] методом впровадження в зразок індентора Віккерса при навантаженні 600 Н на твердомірі ТК-2М.

Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень визначається з формули:

$$K_{1C} = \frac{0,075 \cdot P}{C^{3/2}}, \quad (2.2)$$

де P – навантаження, яке надається індентору, Н,

C – середня довжина радіальних тріщин, яка вимірюється від центру відбитку, мм.

Міцність адгезії покриття з інструментальною основою оцінювали методом безперервного впровадження в зразок індентора Роквелла при навантаженні 1000 Н на твердомірі ТК-2М. Адгезійну міцність визначали за коефіцієнтом відшарування [41]:

$$K_0 = \frac{S_1}{S_2}, \quad (2.3)$$

де S_1 – площа відшарування покриття навколо відбитку індентора, мм²;

S_2 – площа відбитку індентора, мм².

Випробування ріжучого інструменту проводили під час свердління заготовок на вертикально-свердильному верстаті 2Н135. Вимірювання швидкості різання

здійснювалося тахометром годинникового типу ТЧ – 10Р (з безпосереднім визначенням швидкості різання в м/хв).

Режими різання: $v = 9,8 - 25$ м/хв і $S_0 = 0,02 - 0,136$ мм/об.

Вимірювання осьової сили різання P_0 і обертового моменту $M_{об}$, проводили за допомогою динамометра УДМ – 600 і багатоканального цифрового осцилографа, підключеного через аналогово-цифровий перетворювач.

При обробці сталей за обмежуючий приймається зношування на задній поверхні h_3 , який відбувається нерівномірно: більше на периферії свердла і менше в центрі. Це пояснюється тим, що на периферії свердла швидкість різання найбільша, що викликає найбільше тепловиділення і швидкість відносного ковзання точок свердла відносно поверхні різання [12].

Граничне значення зношування по задній поверхні h_3 приймалося значення 0,1 – 0,15 мм. Вимірювання величини фаски зношування здійснювали на інструментальному мікроскопі БМІ-Щ з точністю 1 мкм.

Оцінку працездатності свердел при визначенні раціональної конструкції багат шарового зокриття проводили шляхом розрахунку інтенсивності зношування, на ділянці сталого зношування, яка визначалася за формулою:

$$J = \frac{h_3}{t \cdot v} \cdot 10^{-3}, \quad (2.4)$$

де h_3 – величина фаски зношування по задній поверхні, мм;

t – час роботи ріжучого інструменту до моменту фіксування величини h_3 , хв;

v – швидкість різання, м/хв.

Працездатність спіральних свердел при вартісних випробуваннях оцінювали за періодом стійкості при досягненні зношування по задній поверхні 0,2 мм.

Статистична обробка результатів експериментальних досліджень полягала у визначенні необхідної кількості дослідів за довірчою ймовірністю, оцінці точності вимірювань, істотності відмінності порівнюваних величин [23]. У процесі обробки

результатів експериментів використовували пакети прикладних програм з обробки чисельних величин Mathcad 7.0 Professional і Microsoft Excel.

Визначення кількості паралельних дослідів виконували за [14]. Перевірку однорідності дисперсій відтворюваності паралельних дослідів проводили за G-критерієм Кохрена, оцінку значущості коефіцієнтів регресійної залежності проводили за критерієм Стюдента, гіпотезу про адекватність отриманих поліноміальних моделей з усіма значущими коефіцієнтами регресії перевіряли за допомогою критерію Фішера.

На основі отриманих рівнянь регресії визначали оптимальне (мінімальне або максимальне) значення виходу і відповідні йому значення факторів. При дослідженні впливу елементів режиму різання на період стійкості ріжучого інструменту з покриттям використовували метод планування повного факторного експерименту.

Таблиця 2.3 Матриця планування, що включає 4 досліди

| № | Матриця планування | | | |
|---|--------------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| | X ₀ | Планування | | |
| | | X ₁ | X ₂ | X ₁ X ₂ |
| 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| 3 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 1 |

В результаті дослідження ефективності ріжучого інструменту з різними складами покриттів отримали математичні моделі періоду стійкості ріжучого інструменту T вигляду:

$$T = \frac{C_{\tau}}{v^x \cdot S^y}, \quad (2.5)$$

де v – швидкість різання, м/хв; S – подача, мм/об; t – глибина, мм;

C_{τ} – коефіцієнт; x , y – показники степенів.

2.3 Дослідження параметрів структури та механічних властивостей одношарових зносостійких покриттів

При розробці зносостійких покриттів для ріжучих інструментів важливим етапом є дослідження їх структурних параметрів і фізико-механічних властивостей, що дозволяє прогнозувати ефективність розроблених зносостійких покриттів. Досліджено параметри структури та механічні властивості одношарових одноелементних зносостійких покриттів TiN , $TiAlN$ і $TiAlCrN$.

Результати досліджень структурних параметрів представлені в табл. 2.4. Як видно з табл. 2.4, період кристалічної решітки a має тенденцію до зменшення при додатковому легуванні покриття TiN елементами Al і Cr . Досліджувана тенденція пов'язана з тим, що атомарні радіуси легуючих елементів Al і Cr у багатоелементних покриттях $TiAlN$ і $TiAlCrN$ менші, ніж у TiN . Так, атомарний радіус елемента Al становить $1,43 \text{ \AA}$, елемента Cr – $1,25 \text{ \AA}$, а елемента Ti – $1,45 \text{ \AA}$.

Зміна періоду кристалічної решітки a при легуванні покриттів одним або декількома елементами свідчить про зростання ступеня створення кристалічної решітки, що проявляється в підвищенні значення напівширини рентгенівської лінії β_{111} . Так, для покриття $TiAlN$ збільшення β_{111} склало 23% порівняно з покриттям TiN , а для покриття $TiAlCrN$ – 29%.

Таблиця 2.4 Структурні параметри та механічні властивості одношарових покриттів

| № | Параметр | Покриття | | |
|----|---|----------|---------|-----------|
| | | TiN | $TiAlN$ | $TiAlCrN$ |
| 1. | Період кристалічної решітки a , нм | 0,4235 | 0,4224 | 0,4214 |
| 2. | Напівширина рентгенівської лінії β_{111} , град | 0,5 | 0,65 | 0,71 |
| 3. | Залишкова напруга σ_0 , МПа | -775 | -902 | -1472 |
| 4. | Мікродеформація кристалічної решітки $\Delta a/a \cdot 10^{-3}$ | 6,11 | 8,25 | 9,04 |

| | | | | |
|-----|--|-------|-------|-------|
| 5. | Розмір блоків областей когерентного розсіювання (ОКР) D , нм | 2,0 | 17,0 | 14,0 |
| 6. | Коефіцієнт відшарування K_0 | 1,1 | 0,907 | 1,25 |
| 7. | Мікротвердість H_μ , ГПа | 27,8 | 30,5 | 35,4 |
| 8. | Коефіцієнт інтенсивності напруг K_{σ} | 3,39 | 4,07 | 4,18 |
| 9. | Модуль пружності E , ГПа | 307 | 387 | 403 |
| 10. | Параметр H_μ/E | 0,090 | 0,079 | 0,087 |
| 11. | Параметр H_μ^3/E^2 , ГПа | 0,228 | 0,189 | 0,273 |

Як видно з табл. 2.4, стискаюча залишкова напруга σ_0 в матеріалі покриття зростає при переході від одноелементного покриття TiN до багатоелементних покриттів $TiAlN$ і $TiAlCrN$ в 1,16 і 1,9 рази відповідно, а це сприяє збільшенню часу роботи інструменту до утворення в покриттях тріщин, що позитивно відбивається на працездатності інструменту.

Зростання величин β_{111} і σ_0 свідчить про зміцнення матеріалу покриття і мікротвердості покриттів H_μ . Мікротвердість багатоелементних покриттів $TiAlN$ і $TiAlCrN$ у порівнянні з мікротвердістю одноелементного покриття TiN вища на 10% і 20% відповідно. Найбільшу мікротвердість має багатоелементне покриття $TiAlCrN$.

На рис. 2.6 представлені дифрактограми покриттів TiN , $TiAlN$ і $TiAlCrN$. Покриття $TiAlN$ і $TiAlCrN$ є однофазними. На дифрактограмах покриттів спостерігається дифракційний пік нітриду титану TiN , що відповідає кристалічній площині (111) кубічної структури. Як видно з рис. 2.6, дифракційні піки фази TiN розташовані практично під однаковими кутами (2θ) ковзання. Для покриттів $TiAlN$ і $TiAlCrN$ спостерігається невелике зменшення кутів 2θ в бік менших значень.

У табл. 2.5 - 2.6 представлено фазовий аналіз покриттів $TiAlN$ і $TiAlCrN$.

Дослідження коефіцієнта відшарування K_0 показало, що найбільшу міцність адгезії з інструментальною основою має покриття $TiAlN$ з $K_0 = 0,907$. Одноелементне покриття TiN і багатоелементне $TiAlCrN$ мають більшу величину

коефіцієнтів відшарування K_0 в порівнянні з покриттям $TiAlN$ на 17 % і 27 % відповідно.

Рисунок 2.6 – Фрагменти дифрактограм покриттів TiN (а), $TiAlN$ (б) і $TiAlCrN$ (в)

Легування покриттів TiN одним або декількома легуючими елементами істотно змінює його коефіцієнт інтенсивності напруги K_{1C} і модуль пружності E . Так, збільшення критичного K_{1C} при переході від одноелементного покриття TiN до багатоелементних покриттів $TiAlN$ і $TiAlCrN$ склало, відповідно, 20 % і 23 %, що свідчить про збільшення стору матеріалу багатоелементних покриттів крихкому руйнуванню. Модуль пружності E покриттів $TiAlN$ і $TiAlCrN$ вище в порівнянні з TiN на 26 % і 31 % відповідно. Більш високі значення модуля Юнга багатоелементних покриттів свідчать про підвищення енергії зв'язків між атомами і, отже, зростання міцності матеріалу покриттів.

Таблиця 2.5 Фазовий аналіз покриття $TiAlN$

| Кут дифракції 2θ , град | Міжплощинна відстань $d_{експер}$, Å | Відносна інтенсивність | НКЛ | Міжплощинна відстань $d_{табл}$, Å | Фази покриття | Фази основи |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------|------|-------------------------------------|---------------|-------------|
| 31,6 | 2,861 | 0,25 | 001 | 2,820 | | WC |
| 35,8 | 2,508 | 0,73 | 100 | 2,500 | | WC |
| 36,7 | 2,4487 | 1,00 | 111 | 2,4474 | TiN | |
| 43,0 | 2,1034 | 0,25 | 200 | 2,1195 | TiN | |
| 48,4 | 1,881 | 1,00 | 101 | 1,870 | | WC |
| 61,8 | 1,5012 | 0,19 | 220 | 1,4987 | TiN | |
| 64,1 | 1,453 | 0,25 | 1 10 | 1,450 | | WC |
| 65,9 | 1,417 | 0,09 | 002 | 1,418 | | WC |
| 73,2 | 1,293 | 0,24 | 111 | 1,290 | | WC |
| 75,6 | 1,258 | 0,15 | 200 | 1,255 | | WC |
| 77,2 | 1,236 | 0,27 | 102 | 1,231 | | WC |
| 78,3 | 1,2210 | 0,18 | 222 | 1,2237 | TiN | |

Таблиця 2.6 Фазовий аналіз покриття $TiAlCrN$

| Кут дифракції 2θ , град | Міжплощинна відстань $d_{експер}$, Å | Відносна інтенсивність | KL | Міжплощинна відстань $d_{табл}$, Å | Фази покриття | Фази основи |
|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------|-----|-------------------------------------|---------------|-------------|
| 31,6 | 2,861 | 0,27 | 001 | 2,820 | | WC |
| 35,7 | 2,515 | 0,89 | 100 | 2,500 | | WC |
| 36,7 | 2,4455 | 1,00 | 111 | 2,4474 | TiN | |
| 43,4 | 2,0849 | 0,08 | 200 | 2,1195 | TiN | |
| 48,4 | 1,881 | 1,00 | 101 | 1,870 | | WC |
| 64,0 | 1,455 | 0,27 | 110 | 1,450 | | WC |

Як видно з табл. 2.6, параметр H_{μ}/E , що характеризує здатність до опору абразивному зношуванню, і параметр H_{μ}^3/E^2 , що свідчить про збільшення опору пластичному опору, для багатоеlementних покриттів практично мало відрізняються в порівнянні з аналогічними параметрами покриття TiN . Можна відзначити невелике підвищення параметра H_{μ}^3/E^2 для трьохелементних покриттів $TiAlCrN$.

На підставі проведених досліджень встановлено, що при легуванні матеріалу покриття TiN додатковими елементами Al і Cr відбувається зміна періоду кристалічної решітки a , і подальше зростання напівширини рентгенівської лінії β_{111} і стискаючих залишкових напружень, що свідчить про зміцнення матеріалу покриття. Підтвердженням цього є зростання мікротвердості покриттів $TiAlN$ і $TiAlCrN$. Найбільшу міцність адгезії має покриття $TiAlN$, що підтверджується найменшим значенням коефіцієнта відшарування K_0 . Найбільшу мікротвердість, модуль Юнга і коефіцієнт інтенсивності напружень має трьохелементне покриття $TiAlCrN$.

2.4 Дослідження процесу різання свердлами з одностаровими зносостійкими покриттями

Дослідження функціональних параметрів процесу різання при свердлінні є однією з невід'ємних частин загального дослідження зносостійких покриттів, в тому числі з метою подальшої оцінки теплового стану ріжучого інструменту і в подальшому виборі оптимального складу багатостарового покриття і його архітектури. До функціональних параметрів процесу різання при свердлінні можна віднести осьову силу P_0 та обертовий момент $M_{об}$. Використовували свердла з покриттями TiN , $TiAlN$, $TiAlCrN$ і без покриття. Обробляли заготовки з нормалізованої сталі 30ХГСА. Свердління проводили на швидкостях різання $v = 10$ м/хв і $v = 25$ м/хв і подачах на оборот $S_0 = 0,1$ мм/об і $S_0 = 0,09$ мм/об, відповідно.

Дослідження проводилося при свердлінні заготовок спеціальної конструкції (рис. 2.7), встановлених в універсальний динамометр УДМ-600. Конструкція заготовок дозволяла визначити обертовий момент і осьову силу, що виникають при свердлінні, які діють на різних кромках свердла. Процес різання при цьому розбивали на три етапи: на першому етапі в роботі брали участь тільки головні ріжучі кромки свердла, на другому – головні ріжучі і допоміжні ріжучі кромки, на третьому – всі ріжучі кромки, включаючи поперечну кромку. Результати вимірювання величин осьової сили різання P_0 і обертального моменту $M_{об}$ показані на рис. 2.8. і в табл. 2.7.

Рисунок 2.7 – Конструкція заготовок для свердління

Рисунок 2.8 – Вплив зносостійких покриттів на обертальний момент $M_{об}$ і осьову силу різання P_0 , що діють на головну ріжучу кромку: $v = 25$ м/хв і $S_0 = 0,09$ мм/об

Аналіз результатів досліджень дозволяє показує, що найбільше зниження осьової сили P_0 і обертального моменту $M_{об}$ відбувається на допоміжній ріжучій кромці. У порівнянні зі свердлом без покриття осьова сила зменшилася в 2,9 – 3,1 рази, а обертальний момент – в 2-3 рази в залежності від складу покриття.

Таблиця 2.7 Вплив покриттів на осьову силу і крутлий момент

| Покриття | $M_{ос}, \text{Нм} / P_0, \text{Н}$ на кромках свердла | | | сумарні $M_{кр}, \text{Нм} / P_0, \text{Н}$ |
|----------------|--|------------------|------------------|--|
| | головні ріжучі | допоміжні ріжучі | поперечна кромка | |
| Без покриття | 0,22 / 392 | 0,06 / 107 | 0,13 / 214 | 0,41 / 713 |
| <i>TiN</i> | 0,18 / 320 | 0,02 / 35 | 0,11 / 190 | 0,31 / 545 |
| <i>TiAlN</i> | 0,18 / 328 | 0,02 / 36 | 0,11 / 200 | 0,31 / 564 |
| <i>TiAlCrN</i> | 0,18 / 332 | 0,03 / 36 | 0,12 / 210 | 0,33 / 578 |

Примітка: $v = 10 \text{ м/хв}$, $S_0 = 0,1 \text{ мм/об}$

На головній ріжучій кромці та поперечних кромках зниження зазначених параметрів істотно нижче. Так, на головній ріжучій кромці воно склало 18,2% для P_0 і 15,3 – 18,4% для $M_{об}$, на поперечній кромці – відповідно від 7,6% до 15,4% і від 2% до 11,2% в залежності від складу покриття і режиму різання.

Встановлено, що співвідношення величин обертального моменту $M_{об}$ і осьової сили P_0 , що діють на різних кромках свердла для свердел з покриттями і без покриття, практично залишається без змін. При цьому, найбільша частка $M_{об}$ і P_0 припадає на головні ріжучі кромки. Частки P_0 і $M_{об}$, що припадають на поперечну кромку, менші, ніж на головні ріжучі кромки. Для свердел без покриття частка P_0 дорівнює 32 %, $M_{об}$ – 30 %, для свердел з покриттями *TiN*, *TiAlN* і *TiAlCrN* частка осьової сили P_0 і обертального моменту $M_{об}$ становить (35 – 36) %.

Найменша частка P_0 і $M_{об}$ припадає на допоміжні ріжучі кромки. Для свердел без покриття частка осьової сили становить 14 %, обертального моменту – 15 %, для свердел з покриттями TiN , $TiAlN$ і $TiAlCrN$ частка P_0 становить від 6 до 9 %, $M_{об}$ – 6,5 %.

Таким чином, можна відзначити, що значне зниження осьової сили і обертального моменту на допоміжних ріжучих кромках призводить до істотного зменшення їх частки на даних кромках і невеликого підвищення на головній ріжучій кромці і поперечній кромці.

Дослідженнями виявлено тенденцію невеликого зростання осьової сили і обертального моменту при переході від одноелементного покриття TiN до багатоелементних $TiAlN$ і $TiAlCrN$, яка становить 6 % для P_0 і 3,5 – 6 % для $M_{об}$. Даний факт може бути пояснений більш високими значеннями коефіцієнта тертя багатоелементних $TiAlN$ і $TiAlCrN$ в порівнянні з покриттям TiN , що призводить до зростання ступеня пластичної деформації матеріалу і складових сили різання і відбивається на осьовій силі і обертальному моменті.

Таким чином, проведені дослідження показали, що нанесення покриттів змінює контактні характеристики процесу свердління заготовок. Менший вплив на контактні характеристики покриття мають на поперечній ріжучій кромці свердла, більший на допоміжних ріжучих кромках, що пов'язано з «обмеженими» умовами процесу різання.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено компоновані схеми нанесення одношарових зносостійких покриттів і технологічні параметри їх нанесення. Визначено хімічний склад багатоелементних покриттів $TiAlN$ і $TiAlCrN$.

2. Досліджено параметри структури зносостійких покриттів TiN , $TiAlN$ і $TiAlCrN$. Встановлено, що період кристалічної решітки a має тенденцію до зменшення при додатковому легуванні покриття TiN елементами Al і Cr. Значення напівширини рентгенівської лінії β_{111} для багатоелементних покриттів $TiAlN$ і

$TiAlCrN$ вище в порівнянні з покриттям TiN , склало 23% і 29%, відповідно. При переході до багатоелементних покриттів спостерігається зростання залишкових напружень до -902 МПа для покриття $TiAlN$ і -1472 МПа для $TiAlCrN$.

3. Досліджено механічні властивості зносостійких покриттів TiN , $TiAlN$ і $TiAlCrN$. Встановлено, що багатоелементні покриття, порівняно з покриттям TiN мають вищі механічні властивості. Мікротвердість H_{μ} багатоелементних покриттів $TiAlN$ і $TiAlCrN$ вища на 10% і 20%, модуль Юнга E вищий на 20% і 31%, коефіцієнт інтенсивності напружень $K_{1C} = 20\%$. Мінімальним коефіцієнтом відшарування K_0 володіє покриття $TiAlN$.

4. Дослідженнями функціональних параметрів процесів різання при свердлінні встановлено, що нанесення покриттів істотно змінює контактні характеристики процесу свердління заготовок. При застосуванні зносостійких покриттів відбувалося зменшення величини осової сили P_0 і обертового моменту $M_{об}$. Так, у порівнянні зі свердлом без покриття P_0 зменшилася в 2,9 – 3,1 рази, а $M_{об}$ – в 2 – 3 рази залежно від складу покриття. Також встановлено, що нанесення зносостійких покриттів призводить до зменшення частки обертового моменту і осової сили на допоміжних різучих кромках і поперечній кромці свердла.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Чисельне моделювання теплового стану робочих елементів спіральних свердел з одношаровими зносостійкими покриттями

Тепловий стан ріжучого інструменту характеризується контактними температурами і температурним полем в його ріжучому клині. Для визначення даних характеристик теплового процесу була взята за основу експериментально-аналітична методика визначення теплових явищ при свердлінні.

Згідно з цією методикою, свердло є одним із поширених різновидів багатолезових інструментів. Особливістю процесу свердління є неоднакове тепловиділення в різних точках кожної з ріжучих кромки інструменту (рис. 3.1). Інтенсивність тепловиділення на цих ділянках може бути розрахована за формулою:

$$q(d) = \frac{dQ(x)}{dx} = c_3 d \cdot \delta(d), \quad (3.1)$$

де $\frac{dQ(x)}{dx}$ – тепловиділення на будь-якій ділянці кромки dx , кал/см·с

$c_3 d$ – безрозмірний коефіцієнт; $\delta(d)$ – кут різання на ділянці кромки, град.

Для стандартних свердел при відсутності підточування передньої поверхні $\delta(d) \approx \arctg D/d \cdot \sin \varphi / \operatorname{tg} \beta$.

Враховуючи це, інтенсивність тепловиділення q , кал/(см·с) можна визначити:

$$q(d) = c_3 d \cdot \arctg D/d \cdot \sin \varphi / \operatorname{tg} \beta, \quad (3.2)$$

де D – номінальний діаметр свердла, мм; d – змінний діаметр свердла на будь-якій ділянці кромки, мм; β – кут спіралі на периферії інструмента, град.

Разом з цим у роботі [18] показано, що з достатньою для практики точністю вираз (3.2) можна апроксимувати залежністю:

$$q(\psi) = q_0(1 - e^{-m\psi}), \quad (3.3)$$

де $\psi = d/D$ – безрозмірний параметр, m – коригувальний коефіцієнт.

Інтенсивність тепловиділення

$$q_0 = 3,74 \cdot 10^{-3} (nM_{об}/D), \quad (3.4)$$

де n – частота обертання свердла, об/хв; $M_{об}$ – обертальний момент під час свердління; D – номінальний діаметр свердла.

Похибка апроксимації (3.3) залежить від коригувального коефіцієнта. При $m = 2$ похибка апроксимації становить близько 14%, при $m = 3$ – майже 5%.

Рисунок 3.1 – Схема для опису закону розподілу сумарної інтенсивності теплоутворюючих потоків

На основі вищезазначеної методики та отриманих даних щодо величин обертального моменту $M_{об}$, було проведено розрахунок інтенсивності тепловиділення q_0 , Вт/м · 10⁻³ для головних, допоміжних ріжучих кромки і поперечної кромки свердла без покриття і з покриттями TiN , $TiAlN$, $TiAlCrN$ (табл. 3.1). Використовуючи залежність (3.3), встановлено характер розподілу інтенсивності тепловиділення $q(\psi)$ вздовж головних ріжучих кромки свердла l від центру свердла до його периферії (рис. 3.2).

Таблиця 3.1 Результати розрахунку інтенсивності тепловиділення

| Покриття | Інтенсивність тепловиділення на кромках свердла, q , $\text{Вт/м} \cdot 10^{-3}$ | | |
|----------------|---|--|---|
| | Головні ріжучі, q_0 , $\text{Вт/м} \cdot 10^{-3}$ | Допоміжні ріжучі, $q_{\text{доп}}$, $\text{Вт/м} \cdot 10^{-3}$ | Поперечна кромка, $q_{\text{опк}}$, $\text{Вт/м} \cdot 10^{-3}$ |
| Без покриття | 191,5 | 2,9 | 5,0 |
| <i>TiN</i> | 119,7 | 0,5 | 4,0 |
| <i>TiAlN</i> | 119,7 | 0,6 | 4,0 |
| <i>TiAlCrN</i> | 143,6 | 0,9 | 4,2 |

Примітка: $v = 10 \text{ м/хв}$, $S_0 = 0,1 \text{ мм/об}$

Рисунок 3.2 – Розподіл інтенсивності тепловиділення вздовж головних ріжучих крайок свердла від центру свердла до його периферії:

1 – без покриття; 2, 3 – *TiN* і *TiAlN*; 4 – *TiAlCrN*.

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що найбільша інтенсивність тепловиділення спостерігається на головних ріжучих кромках. Нанесення покриттів *TiN* і *TiAlN* знижує її на головних ріжучих кромках на 37%, покриття *TiAlCrN* – на 25%. Застосування зносостійких покриттів також

перерозподіляє інтенсивність тепловиділення між ріжучими кромками свердла, значно зменшуючи її на допоміжних ріжучих кромках. Так, при використанні покриття TiN вона зменшується в 4 рази, а при використанні покриттів $TiAlN$ і $TiAlCrN$ в 3,3 і 2,2 рази відповідно. Зменшення інтенсивності тепловиділення на поперечній ріжучій кромці менш виражене.

Розподіл інтенсивності тепловиділення вздовж головних ріжучих крайок свердла показує зростання величини $q(\psi)$ від центру свердла до його периферії. Разом з цим застосування зносостійких покриттів стримує це зростання. Найбільше зниження забезпечують покриття TiN і $TiAlN$.

Для побудови температурних полів у пакеті прикладних програм ANSYS була створена тривимірна модель спірального свердла, на контактні площадки якого накладалися інтенсивності тепловиділення. Схема накладання інтенсивностей теплових потоків на контактні майданчики свердла показана на рис. 3.3. Як видно з представленої схеми, теплові потоки накладалися на три контактні майданчики свердла, що характеризують теплові джерела при свердлінні.

На контактні майданчики головних ріжучих кромок (поз. 1, рис. 3.3) прикладали інтенсивність тепловиділення $q(\psi)$ вздовж головних ріжучих кромок свердла і від центру свердла до його периферії відповідно до стриманого розподілу (рис. 3.2). Ширина майданчика застосування $q(\psi)$ характеризується величиною довжини контакту стружки з передньою поверхнею S_γ . Через мале значення діаметра свердла величина S_γ незначно змінюється по довжині ріжучої кромки свердла. Тому з метою спрощення моделювання, величина S_γ була прийнята рівномірною по всій довжині. Повна довжина контакту стружки з передньою поверхнею визначалася експериментально.

На контактні майданчики допоміжних ріжучих кромок і поперечної кромки (поз. 2 і 3, рис. 3.3) прикладали інтенсивність тепловиділення $q_{\text{доп}}$ і $q_{\text{опк}}$ (табл. 3.1), які розраховували за вищевказаною методикою.

Рисунок 3.3 – Схема накладення інтенсивностей теплових потоків на контакти майданчики свердла

Одночасно з цим були прийняті межі майданчиків 2 і 3 додатка інтенсивностей тепловиділення. Майданчик 2 обмежений наступними параметрами $b_{стр}$ – шириною стрічки свердла і величиною, що дорівнює половині подачі на один оборот свердла – $\frac{S_0}{2}$. Площадка 3 обмежена половиною довжини поперечної кромки, визначеної з конструктивно-геометричних параметрів свердла і дорівнює половині діаметра серцевини свердла $\frac{d_c}{2}$ і так само, величиною, яка дорівнює половині осьової подачі на один оборот свердла – $\frac{S_0}{2}$.

3.2 Дослідження параметрів структури та механічних властивостей багат шарових покриттів

Дослідження структурних параметрів і механічних властивостей проводили на прикладі двошарового покриття $TiAlN - TiAlCrN$. В якості досліджуваних структурних параметрів були обрані період кристалічної решітки a , напівширина

рентгенівської лінії β_{111} , розміри блоків областей когерентного розсіювання (ОКР) D , відносну мікродеформацію кристалічної решітки $\Delta a/a$.

В якості механічних властивостей – мікротвердість H_{μ} , модуль Юнга E , коефіцієнт інтенсивності напруг K_{1C} , що характеризує тріщиностійкість, опір покриттів абразивному H_{μ}/E і пластичному H_{μ}^3/E^2 деформуванню і коефіцієнт відшарування K_0 , що характеризує міцність адгезії покриття.

Товщина нижнього функціонального шару двошарового покриття по відношенню до загальної товщини покриття становить 40%. Зважаючи це для визначення раціонального співвідношення товщин функціональних шарів покриття $TiAlN - TiAlCrN$ досліджували дві конструкції даного покриття із загальною товщиною 5 мкм і 6 мкм. Для кожної з конструкцій товщина нижнього шару по відношенню до загальної товщини покриття (Δ) змінювалася в межах від 33 до 66%.

Результати досліджень впливу конструкції двошарових покриттів на їх фазовий склад і структурні параметри представлені на рис. 3.4 і в табл. 3.3-3.4.

Як видно, двошарові покриття $TiAlN - TiAlCrN$, як і одношарові покриття $TiAlN$ і $TiAlCrN$ (див. табл. 3.3 – 3.4) є однофазними. На дифрактограмі двошарового покриття $TiAlN - TiAlCrN$ також присутня одна фаза нітриду титану TiN з переважною текстурою. Дифракційний пік нітриду титану TiN максимальної інтенсивності, що відповідає кубічній кристалічній решітці розташований під кутом $2\theta = 36,7^\circ$ як це мало місце для одношарових покриттів.

Таблиця 3.2 Технологічні режими нанесення двошарових покриттів $TiAlN - TiAlCrN$ та $TiAlN - TiAlZrN$

| Покриття | Шари | Товщина, мкм | | Технологічні параметри процесу конденсації | | | | | | | | | | |
|-------------------|-----------|-----------------|------|--|----------|-------------|-----------|----------|-------------|-----------|----------|-------------|-------------------|-------------------------|
| | | | | Катод № 1 | | | Катод № 2 | | | Катод № 3 | | | Опірна напруга | Час конден- сації |
| | | МП | шару | Матер | I_D, A | I_Φ, A | Матер | I_D, A | I_Φ, A | Матер | I_D, A | I_Φ, A | $U_{оп}, B$ | $T_K, хв$ |
| $TiAlN - TiAlCrN$ | $TiAlN$ | 6 | 2 | TiAl | 110 | 0,4 | - | 110 | 0,4 | TiAl | 110 | 0,4 | 160 | 18 |
| | $TiAlCrN$ | | 4 | TiAl | 110 | 0,4 | Ti - Cr | 110 | 0,4 | TiAl | 110 | 0,4 | 160 | 35 |
| | $TiAlN$ | 6 | 4 | TiAl | 110 | 0,4 | - | 110 | 0,4 | TiAl | 110 | 0,4 | 160 | 35 |
| | $TiAlCrN$ | | 2 | TiAl | 110 | 0,4 | Ti - Cr | 110 | 0,4 | TiAl | 110 | 0,4 | 160 | 18 |
| | $TiAlN$ | 6 | 3 | TiAl | 110 | 0,4 | - | 110 | 0,4 | TiAl | 110 | 0,4 | 160 | 27 |
| | $TiAlCrN$ | | 3 | TiAl | 110 | 0,4 | Ti - Cr | 110 | 0,4 | TiAl | 110 | 0,4 | 160 | 27 |
| $TiAlN - TiAlZrN$ | $TiAlN$ | 6 | 2 | TiAl | 110 | 0,4 | - | 110 | 0,4 | TiAl | 110 | 0,4 | 160 | 18 |
| | $TiAlZrN$ | | 4 | TiAl | 110 | 0,4 | Ti - Zr | 110 | 0,4 | TiAl | 110 | 0,4 | 160 | 35 |
| | $TiAlN$ | 6 | 4 | TiAl | 110 | 0,4 | - | 110 | 0,4 | TiAl | 110 | 0,4 | 160 | 35 |
| | $TiAlZrN$ | | 2 | TiAl | 110 | 0,4 | Ti - Zr | 110 | 0,4 | TiAl | 110 | 0,4 | 160 | 18 |
| | $TiAlN$ | 6 | 3 | TiAl | 110 | 0,4 | - | 110 | 0,4 | TiAl | 110 | 0,4 | 160 | 27 |
| | $TiAlZrN$ | | 3 | TiAl | 110 | 0,4 | Ti - Zr | 110 | 0,4 | TiAl | 110 | 0,4 | 160 | 27 |

Примітка: Іонна очистка: $I_D = 110 A, I_\Phi = 0,35 A, T = 10 хв$

Рисунок 3.4. Покрыття $TiAlN - TiAlCrN$

Аналіз фазового складу покриттів (табл. 3.5-3.6) показує, що в покриттях присутні фази нітриду титану TiN і карбиду вольфраму WC розташовані на приблизно однакових кутах ковзання і незначно відрізняються інтенсивністю. Слід зазначити, що фазовий склад двошарових покриттів $TiAlN - TiAlCrN$ з різним співвідношенням товщини функціональних шарів практично не відрізняється один від одного.

Таблиця 3.3 Фазовий аналіз покриття $TiAlN (4,0) - TiAlCrN (2,0)$

| Кут дифракції 2θ , град. | Міжплщинна відстань $d_{\text{експер}}$, Å | Відносна інтенсивність | HKL | Міжплщинна відстань $d_{\text{рабл}}$, Å | Фази покриття | Фази основи |
|---------------------------------|---|------------------------|-----|---|---------------|-------------|
| 31,7 | 2,823 | 0,27 | 001 | 2,820 | | WC |
| 35,7 | 2,515 | 0,85 | 100 | 2,500 | | WC |
| 36,8 | 2,4423 | 1,00 | 111 | 2,4474 | TiN | |
| 43,1 | 2,0988 | 0,15 | 200 | 2,1195 | TiN | |
| 48,4 | 1,881 | 1,00 | 101 | 1,870 | | WC |
| 64,2 | 1,451 | 0,42 | но | 1,450 | | WC |

Таблиця 3.4 Фазовий аналіз покриття $TiAlN$ (2,0) - $TiAlCrN$ (4,0)

| Кут дифракції 2θ , град. | Міжплощинна відстань $d_{\text{експер}}$, Å | Відносна інтенсивність | HKL | Міжплощинна відстань $d_{\text{табл}}$, Å | Фази покриття | Фази основи |
|---------------------------------|--|------------------------|-----|--|---------------|-------------|
| 31,6 | 2,861 | 0,29 | 001 | 2,820 | | WC |
| 35,8 | 2,508 | 0,76 | 100 | 2,500 | | WC |
| 36,7 | 2,4455 | 1,00 | 111 | 2,4474 | TiN | |
| 43,2 | 2,0941 | 0,14 | 200 | 2,1195 | TiN | |
| 48,4 | 1,881 | 1,00 | 101 | 1,870 | | WC |
| 64,1 | 1,453 | 0,44 | 110 | 1,450 | | WC |

Структурні параметри двошарових покриттів у порівнянні з одношаровими представлені в табл. 3.5. Аналіз даних табл. 3.5 показує, що параметри структури багатошарового покриття $TiAlN - TiAlCrN$ практично не відрізняються від одношарових покриттів $TiAlN$ і $TiAlCrN$. При цьому співвідношення товщини шарів практично не відбивається на параметрах структури. Результати дослідження механічних властивостей покриттів представлені в табл. 3.6 – 3.9 і на рис. 3.5 – 3.9.

Таблиця 3.5 Фазовий аналіз покриття $TiAlN$ (3,0) – $TiAlCrN$ (3,0)

| Кут дифракції 2θ , град. | Міжплощинна відстань $d_{\text{експер}}$, Å | Відносна інтенсивність | HKL | Міжплощинна відстань $d_{\text{табл}}$, Å | Фази покриття | Фази основи |
|---------------------------------|--|------------------------|-----|--|---------------|-------------|
| 31,5 | 2,840 | 0,25 | 100 | 2,820 | | WC |
| 35,6 | 2,522 | 0,96 | 110 | 2,500 | | WC |
| 36,7 | 2,449 | 1,00 | 111 | 2,440 | TiN | |
| 42,9 | 2,108 | 0,19 | 200 | 2,116 | TiN | |
| 48,5 | 1,884 | 1,00 | 101 | 1,870 | | WC |
| 62,1 | 1,495 | 0,07 | 220 | 1,495 | TiN | |

Продовження таблиці 3.5

| | | | | | | |
|------|-------|------|-----|-------|------------|----|
| 64,0 | 1,455 | 0,27 | 110 | 1,450 | | WC |
| 65,8 | 1,419 | 0,16 | 002 | 1,418 | | WC |
| 73,2 | 1,293 | 0,29 | 111 | 1,290 | | WC |
| 75,3 | 1,262 | 0,22 | 200 | 1,255 | | WC |
| 77,1 | 1,237 | 0,26 | 102 | 1,231 | | WC |
| 78,2 | 1,222 | 0,15 | 222 | 1,221 | <i>TiN</i> | |

Таблиця 3.6 Структурні параметри покриттів

| N п/п | Покриття | a, нм | β_{111} , град | D, нм | $\Delta\alpha/\alpha \cdot 10^{-5}$ |
|-------|--|--------|----------------------|-------|-------------------------------------|
| 1 | <i>TiAlN</i> | 0,4224 | 0,65 | 17,0 | 8,25 |
| 2 | <i>TiAlCrN</i> | 0,4214 | 0,70 | 14,0 | 9,04 |
| 3 | <i>TiAlN</i> (2,0) – <i>TiAlCrN</i> (4,0) | 0,4212 | 0,68 | 14,0 | 8,67 |
| 4 | <i>TiAlN</i> (3,0) – <i>TiAlCrN</i> (3,0) | 0,4212 | 0,66 | 15,0 | 8,36 |
| 5 | <i>TiAlN</i> (4,0) – <i>TiAlCrN</i> (2,0) | 0,4213 | 0,64 | 15,0 | 8,09 |

Вимірювання мікротвердості проводили за методом Кнуппа на мікротвердомірі Mitutoyo HM-122 (Японія) з часом навантаження 4 с, витримки 10 с, розвантаження 4 с. На першому етапі дослідження було розглянуто питання про вибір величини сили навантаження для покриттів з різною товщиною шарів. Виходячи з рекомендацій, глибина впровадження індентора повинна становити не більше 10% від загальної товщини покриття для виключення впливу основи. Оскільки двошарові покриття мають функціональні шари товщиною 1,5 – 3 мкм, то виникає питання про вплив на величину мікротвердості товщини даних шарів і їх співвідношення. З цією метою були проведені вимірювання мікротвердості при різних навантаженнях, результати яких представлені в табл. 3.7.

Дослідження показали, що при навантаженні 100 г глибина впровадження індентора склала $(0,5 \div 0,7)$ мкм, при навантаженні 500 г – $(1,5 \div 1,6)$ мкм, а при

1000 г – (2,4 ÷ 2,5) мкм. Таким чином, залежно від навантаження індентор або впроваджується тільки у верхній шар покриття, або проникає і в нижній шар з відмінними від верхнього шару властивостями. Вимірювання показали, що співвідношення величин мікротвердості покриттів з різною товщиною шарів не змінюється при зміні навантаження. Для уточнення величини навантаження, при якій не проявляється вплив основи, було проведено порівняння результатів вимірювання при навантаженнях 100 г і 200 г. Вимірювання показали, що різниця значень мікротвердості знаходиться в межах похибки вимірювання і можна вважати, що вплив основи відсутній. Тому для всіх подальших вимірювань було використано навантаження величиною 100 г.

Таблиця 3.7 Залежність мікротвердості багатшарового покриття від сили навантаження індентора

| № п/п | $\Delta, \%$ | Мікротвердість по Кнушу H_{μ} ППа під час навантаження | | |
|-------|--------------|--|----------------|----------------|
| | | 100 г | 500 г | 1000 г |
| 1 | 33 | $37,1 \pm 2,7$ | $32,5 \pm 1,5$ | $27,2 \pm 1,0$ |
| 2 | 50 | $38,1 \pm 1,3$ | $33,6 \pm 1,9$ | $26,5 \pm 0,1$ |
| 3 | 66 | $37,8 \pm 2,0$ | $33,8 \pm 1,2$ | $25,9 \pm 0,9$ |

Як видно з табл. 3.7, зміна співвідношення товщини шарів двошарового покриття практично не впливає на величину мікротвердості. Різниця в значеннях мікротвердості для різних варіантів покриттів не перевищує 2,5 %.

Результати впливу співвідношення товщини шарів двошарового покриття на модуль пружності E , коефіцієнт інтенсивності напружень K_{1C} , опір абразивному зношуванню χ_p/E , пластичному деформуванню H_{μ}^3/E^2 , а також на коефіцієнт відшарування K_0 представлені в табл. 3.9.

Встановлено, що співвідношення товщини шарів двошарового покриття практично не впливає на його механічні властивості. У той же час, спостерігається тенденція деякого підвищення модуля пружності і коефіцієнта інтенсивності

напруги із зростанням товщини верхнього функціонального шару двошарового покриття.

Таблиця 3.8 Вплив співвідношення товщини шарів двошарового покриття на механічні властивості

| Δ , % | E, ГПа | H_{μ}/E | H_{μ}^3/E^2 , ГПа | K_{1C} , МПа · м ^{1/2} | K_{IC} |
|--------------|--------------|-------------|-----------------------|--------------------------------------|----------|
| 33 | 423,7 ± 29,1 | 0,087 | 0,284 | 4,57 | 0,23 |
| 50 | 419,9 ± 21,5 | 0,090 | 0,314 | 4,48 | 0,24 |
| 66 | 417,9 ± 23,8 | 0,090 | 0,309 | 4,47 | 0,31 |

Аналіз результатів досліджень показує, що найбільший вплив на мікротвердість, модуль пружності та коефіцієнт інтенсивності напруги має матеріал верхнього шару та його товщина. Як видно з табл. 3.8 і рис. 3.5, модуль пружності двошарових покриттів більший у порівнянні з одношаровими покриттями – на 9,5% у порівнянні з $TiAlN$, і на 5% у порівнянні з $TiAlCrN$. Отримані дані можна пояснити впливом межі шарів і великим спотворенням кристалічної решітки.

Рисунок 3.5 – Модуль пружності одно- і багатошарових покриттів

Результати досліджень показують, що найбільший вплив на модуль пружності має матеріал верхнього шару і його товщина. Двошарові покриття мають вищий

коефіцієнт інтенсивності напруги, що свідчить про їх вищу тріщиностійкість. Коефіцієнт K_{1C} двошарових покриттів у порівнянні з одношаровим покриттям $TiAlN$ вище на 12,3 %, у порівнянні з $TiAlCrN$ – на 9,3 %. Зміна розташування шарів у багатошаровому покритті призводить до зміни коефіцієнта, зокрема, K_{1C} покриття $TiAlN - TiAlCrN$ (верхній шар товщиною 3 мкм) на 6,5 % вищий, ніж у покриття $TiAlCrN - TiAlN$ (верхній шар товщиною також 3 мкм).

Дослідження показали, що двошарові покриття в порівнянні з одношаровими мають більш високу міцність адгезії, про що свідчать менші значення коефіцієнта відшарування. Наприклад, коефіцієнт відшарування двошарового покриття при товщині нижнього шару 2 мкм дорівнює $K_0 = 0,23$, тоді як для одношарових покриттів $TiAlN$ він дорівнює $K_0 = 0,23$, а для $TiAlCrN - 1,25$ (рис. 3.7, табл. 3.8).

Рисунок 3.6 – Коефіцієнт K_{1C} багатошарових покриттів у порівнянні з одношаровим

Як видно з рис. 3.7, для багатошарових покриттів $TiAlN - TiAlCrN$ характерна менша площа відшарування навколо індентора при визначенні коефіцієнта відшарування, в порівнянні з одношаровим покриттям $TiAlN$.

Рисунок 3.7 – Вплив товщини нижнього шару на міцність адгезії покриття $TiAlN - TiAlCrN$ (товщина двошарового покриття 5 мкм)

а)

б)

Рисунок 3.8 – Фотографії відбитків індентора на зразках з покриттями: а – $TiAlN$, б – $TiAlN - TiAlCrN$

Міцність адгезії визначається складом нижнього шару багатошарового покриття. Це підтверджують дані рис. 3.9. Під час використання в конструкції багатошарового покриття нижнього шару $TiAlCrN$, що має більші залишкові напруження, ніж верхній, міцність адгезії знижується майже в два рази в порівнянні з покриттям $TiAlN - TiAlCrN$.

Рисунок 3.9 – Коефіцієнт K_0 багатошарових покриттів у порівнянні з одношаровим

Дослідження впливу загальної товщини двошарового покриття на механічні властивості показали, що даний параметр практично не впливає на їх величину.

Висновки до розділу 3

1. На основі проведених досліджень сформульовано принцип формування та обрано склад функціональних шарів багатошарового покриття спіральних свердел. Запропоновано дві архітектури багатошарових покриттів для підвищення працездатності спіральних свердел. Розроблено компоновочні схеми установки та технологічні параметри нанесення двошарових покриттів.

2. Розроблено методикę розрахунку теплових полів у ріжучому клині спірального свердла, яка досить точно відображає фізичний процес операції свердління та закономірності розподілу деформаційно-силового навантаження на контактних майданчиках.

3. Зазначено, що тепловий стан ріжучого клина спірального свердла визначається зміною контактних характеристик процесу свердління при нанесенні покриттів. Виявлено закономірності впливу покриттів різного складу на тепловий

стан спірального свердла. Встановлено, що найкращий тепловий стан забезпечують багатоелементні покриття в порівнянні з одноелементними.

4. Встановлено, що нанесення покриття з сприяє зниженню температури в ріжучому кліші свердел, а застосування покриття $TiAlCrN$ найбільшою мірою зміщує ізотерми температури в напрямку від головної ріжучої кромки, тим самим розвантажуючи ріжучий клин і куточки спірального свердла. Кращий тепловий стан ріжучого клина спіральних свердел забезпечує триелементне покриття $TiAlCrN$.

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

4.1 Дослідження процесу свердління спіральними свердлами з багат шаровими покриттями

Дослідження функціональних параметрів процесу свердління проводили при свердлінні заготовок з нормалізованої сталі 30ХГСА. Визначали осьову силу P_0 і обертальний момент $M_{об}$. Використовували твердосплавні свердла з однокарбідного твердого сплаву виробництва фірми «DORMER» (Німеччина) діаметром $D = 5$ мм, діаметром серцевини $D_c = 0,8$ мм, стандартної геометрії з двошаровими покриттями $TiAlN - TiAlCrN$. Свердління проводили на швидкостях різання $v = 15$ м/хв і $v = 25$ м/хв і подачах на оборот $S_0 = 0,1$ мм/об і $S_0 = 0,09$ мм/об, відповідно. Результати досліджень функціональних параметрів процесу різання при свердлінні свердлами з багат шаровим покриттям $TiAlN - TiAlCrN$ представлені на рис. 4.1 і в табл. 4.1.

Рисунок 4.1 – Вплив зносостійких покриттів на обертальний момент $M_{об}$ і осьову силу різання P_0 , що діють на головній ріжучій кромці (а), допоміжній ріжучій кромці (б) і поперечній кромці (в): 1 – $M_{об}$, Н·м; 2 – P_0 , Н; $v = 15$ м/хв, $S_0 = 0,1$ мм/об

Таблиця 4.1 Вплив покриттів на осьову силу і крутний момент

| Покриття | $M_{об}$, Нм/ P_0 , Н на кромках свердла | | | Сумарні $M_{об}$, Нм/ P_0 , Н |
|---|---|------------------|------------------|----------------------------------|
| | Головні ріжучі | Допоміжні ріжучі | Поперечна кромка | |
| Без покриття | 0,16/260 | 0,04/46 | 0,1/178 | 0,3/484 |
| <i>TiN</i> | 0,1/187 | 0,01/17 | 0,08/152 | 0,19/356 |
| <i>TiAlN – TiAlCrN</i> | 0,15/190 | 0,018/25 | 0,089/170 | 0,257/385 |
| Примітка: $v = 25$ м/хв, $S_0 = 0,09$ мм/об | | | | |

Як видно з представлених даних нанесення двошарового покриття *TiAlN – TiAlCrN* викликає зниження осьової сили і обертального моменту порівняно з свердлом без покриття. На допоміжній ріжучій кромці зниження P_0 складає 1,8 – 3,1 рази, а $M_{об} - 2 - 2,7$ рази в залежності від режиму різання.

На головній ріжучій кромці та поперечних кромках зазначене зниження даних параметрів істотно нижче. Так, на головній ріжучій кромці воно склало 16 – 27 %

для P_0 і 18 – 25 % для $M_{об}$, на поперечній кромці – відповідно 4 – 7,3 % і 7,7 – 10 % в залежності від режиму різання. При аналогічному порівнянні багат шарового покриття $TiAlN - TiAlCrN$ з одношаровим покриттям TiN спостерігається незначне підвищення осової сили і обертового моменту на 3 – 7 %.

Таким чином, проведені дослідження показали, що нанесення багат шарового покриття $TiAlN - TiAlCrN$ змінює контактні характеристики процесу свердління заготовок. Менший вплив на контактні характеристики покриття має на поперечній ріжучій кромці свердла, більший на допоміжних і головних ріжучих кромках, що пов'язано з «обмеженими» умовами процесу різання.

4.2 Дослідження працездатності спіральних свердел з багат шаровими покриттями

Для оцінки ефективності розроблених багат шарових покриттів провели випробування на стійкість свердел при свердлінні заготовок з нормалізованої сталі 30ХГСА. Порівнювали ефективність твердосплавних свердел без покриття, з одношаровим покриттям зносостійкими TiN і розробленими багат шаровими покриттями $TiAlN - TiAlCrN$ і $TiAlN - TiAlZrN$.

За результатами досліджень були побудовані графіки залежностей періоду стійкості ріжучого інструменту з багат шаровими покриттями від швидкості різання рис. 4.2 а, і подачі рис. 4.2 б. Отримані математичні моделі періоду стійкості спіральних свердел (табл. 4.2). Як видно з отриманих даних, при свердлінні заготовок зі швидкістю різання від 10 до 25 м/хв і подачі верстата від 0,1 до 0,15 мм/об застосування двошарового покриття $TiAlN - TiAlCrN$ підвищує період стійкості свердел в 2,5 – 3,1 рази відносно свердел без покриття і в 1,57 – 1,87 рази відносно свердел з покриттям TiN в залежності від конструкції багат шарового покриття і режиму обробки. Вплив покриттів TiN , $TiAlN - TiAlCrN$ і $TiAlN - TiAlZrN$ на період стійкості T свердел показано на рис. 4.3.

а) б)

Рисунок 4.2 – Вплив швидкості (v) різання (а) і подачі (S) на оборот (б) на період стійкості (T) свердел:

1 – без покриття, 2 – TiN , 3 – $TiAlN - TiAlCrN$, 4 – $TiAlN - TiAlZrN$;

а – $S = 0,12$ мм/об, б – $v = 20$ м/хв

а

б

Рисунок 4.3 – Вплив покриття TiN , $TiAlN - TiAlCrN$ і $TiAlN - TiAlZrN$ на період стійкості T свердел: а – $v = 15$ м/хв і $S = 0,15$ мм/об, б – $v = 25$ м/хв і $S = 0,12$ мм/об.

При цьому, зі збільшенням швидкості різання і подачі на оборот ефективність спіральних свердел з покриттями $TiAlN - TiAlCrN$ і $TiAlN - TiAlZrN$ збільшується, що проявляється в підвищенні коефіцієнта підвищення періоду стійкості.

Таблиця 4.2 Математичні моделі періоду стійкості спіральних свердел

| Покриття | Оброблюваний матеріал |
|-------------------|--|
| | 30ХГСА |
| Без покриття | $T = 10,028 \cdot v^{-0,127} \cdot S^{-0,522}$ |
| $TiAlN - TiAlCrN$ | $T = 26,54 \cdot v^{-0,115} \cdot S^{-0,488}$ |
| $TiAlN - TiAlZrN$ | $T = 31,02 \cdot v^{-0,110} \cdot S^{-0,481}$ |

Для дослідно-промислових випробування спіральних свердел без покриття, з одношаровим покриттям $TiAlCrN$ та багатшаровим покриттям $TiAlN - TiAlCrN$

здійснювалося свердління отворів діаметром 5 мм і глибиною 13 мм в заготовках з нормалізованої сталі 30ХГСА твердістю 30... 32 за шкалою HRC.

Порівнювали кількість отриманих отворів до настання граничного зносу свердел і визначали коефіцієнт підвищення стійкості. Результати випробувань представлені в табл. 4.3. Як видно з наведених даних застосування одношарового покриття підвищило кількість отриманих отворів до 95, застосування багатшарового покриття до 118 у порівнянні зі свердлами без покриття, коефіцієнт підвищення стійкості склав 1,9 і 2,36 відповідно.

Таблиця 4.3 Результати дослідно-промислових випробувань

| № | Покриття | Режими різання | Кількість отворів | Коефіцієнт підвищення стійкості |
|---|-------------------|---|-------------------|---------------------------------|
| 1 | Без покриття | $n = 3184$ об./хв, $v = 50$ м/хв, $s = 0,445$ мм/об, $t = 13$ мм | 50 | 1 |
| 2 | $TiAlCrN$ | | 95 | 1,9 |
| 3 | $TiAlN - TiAlCrN$ | | 118 | 2,36 |

Висновки до розділу 4

1. Визначено вплив багатшарових покриттів $TiAlN - TiAlCrN$ і $TiAlN - TiAlZrN$ на функціональні параметри процесу різання при свердлінні. Встановлено, що багатшарові покриття змінюють контактні характеристики, а саме спричиняють зниження осьової сили P_0 і обертального моменту $M_{об}$ на допоміжних ріжучих кромках у порівнянні зі свердлом без покриття залежно від режиму різання в 1,8 - 3,1 і 2 - 2,7 рази.

2. Встановлено, що застосування розроблених багатшарових покриттів $TiAlN - TiAlCrN$ і $TiAlN - TiAlZrN$ підвищує період стійкості свердел в 2,5 рази по відношенню до свердел без покриття і в 1,7 - 1,8 рази по відношенню до свердел з покриттям TiN в залежності від режиму обробки.

РОЗДІЛ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

5.1 Екологічна експертиза

Процеси механоскладального виробництва є невід'ємною частиною сучасної промисловості, однак вони часто супроводжуються значним техногенним навантаженням на навколишнє середовище. У цьому контексті, будь-яка ініціатива, спрямована на оптимізацію виробничих операцій, зокрема підвищення працездатності інструменту, повинна проходити ретельну екологічну експертизу. Підвищення працездатності свердл, наприклад, через застосування нових типів покриттів, режимів охолодження або модифікації технологічних рідин, не лише покращує економічні показники за рахунок зменшення часу простою та витрат на інструмент, але й має прямі та опосередковані екологічні наслідки, які потребують систематичного аналізу та оцінки. Основним завданням екологічної експертизи є запобігання негативному впливу виробничої діяльності, що модифікується, на компоненти довкілля, включаючи повітряний басейн, водні ресурси, ґрунти та біологічне різноманіття, а також на здоров'я персоналу.

Екологічна експертиза в даному випадку має зосереджуватися на кількох ключових аспектах. По-перше, необхідно оцінити зміни у складі та обсязі відходів, які генеруються внаслідок підвищення працездатності свердл. Наприклад, використання нових змащувально-охолоджувальних рідин (ЗОР), що потенційно забезпечують довший термін служби інструменту, може мати інший клас небезпеки або вимагати інших методів утилізації порівняно з традиційними. Триваліший термін служби свердла може зменшити обсяг твердих промислових відходів (відпрацьований інструмент), проте необхідно проаналізувати матеріал покриття свердла, якщо воно використовується, на предмет його токсичності або складності переробки. По-друге, слід провести аналіз зміни енергоспоживання. Хоча підвищення ефективності свердління теоретично може знизити загальне енергоспоживання на одиницю продукції, зміна режимів різання або використання більш потужного обладнання для нанесення покриттів чи регенерації інструменту

може, навпаки, призвести до збільшення викидів парникових газів та інших забруднюючих речовин від енергетичних джерел.

Ключовим об'єктом уваги є якість повітря робочої зони та атмосферного повітря. При інтенсифікації процесів механічної обробки часто зростає дисперсія аерозолів та мікрочастинок, що містять компоненти ЗОР, металевий пил та продукти зносу інструменту. Експертиза має включати моделювання розповсюдження забруднюючих речовин та порівняння їхньої концентрації з встановленими гранично допустимими концентраціями (ГДК). У разі використання високотоксичних компонентів у нових ЗОР має бути передбачена модернізація систем вентиляції та очищення викидів. Крім того, шумове та вібраційне забруднення також є екологічним фактором, який може зростати при оптимізації режимів різання, і потребує відповідних санітарно-гігієнічних та технічних заходів контролю та зниження. Важливим елементом є також контроль якості стічних вод, особливо якщо нові технологічні рідини потрапляють у каналізаційну систему. Вони можуть містити важкі метали, емульгатори або інші біодіодні речовини, що вимагають попереднього локального очищення.

Проведення екологічної експертизи є законодавчою вимогою, яка гарантує збалансований розвиток і дотримання екологічної безпеки. В Україні основоположним документом, що регулює відносини у сфері екологічної оцінки, є Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» [31], який встановлює процедуру виявлення, аналізу та врахування екологічних наслідків планованої діяльності. Відповідно до цього законодавчого акту, будь-які суттєві зміни у виробничих процесах, які можуть мати транскордонний або значний локальний вплив, підлягають обов'язковій оцінці. За результатами експертизи формується звіт, що містить вичерпну інформацію про впливи, заходи щодо їх мінімізації, а також моніторингову програму для забезпечення постійного контролю за станом довкілля.

Таким чином, підвищення працездатності свердл має розглядатися не лише як техніко-економічна задача, а як комплексний проект, який вимагає обов'язкової інтеграції екологічних критеріїв на всіх етапах планування та впровадження.

Успішне проходження екологічної експертизи підтверджує соціальну відповідальність підприємства та його здатність забезпечувати екологічно прийнятне виробництво.

5.2 Охорона праці

Проблема підвищення працездатності (стійкості) різального інструменту, зокрема свердл, є ключовою для оптимізації виробничих процесів, зниження собівартості продукції та забезпечення стабільної якості обробки в умовах механоскладальних цехів (МСЦ), проте збільшення швидкості та режимів різання, використання новітніх інструментальних матеріалів та покриттів, а також впровадження високопродуктивного обладнання нерозривно пов'язані з підвищенням виробничих ризиків та зміною умов праці.

Підвищення стійкості свердл може бути досягнуто різними шляхами, включаючи оптимізацію геометрії різальної частини, використання інструментальних сталей та твердих сплавів нового покоління, застосування зміцнюючих покриттів та вдосконалення подачі МОР, проте кожен із цих методів створює специфічні чинники ризику, зокрема, фізичні фактори: зростання швидкості різання часто корелює зі збільшенням рівня шуму та вібрації, які можуть призводити до професійних захворювань, тому необхідне використання сертифікованих засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) органів слуху та контроль загальної та локальної вібрації робочих місць відповідно до Державних санітарних норм та правил; підвищення продуктивності супроводжується інтенсивнішим утворенням та відведенням стружки, яке при високих швидкостях різання може набувати високі температури та швидкості викиду, а поломка більш крихких свердл із твердих сплавів становить особливу небезпеку, що вимагає забезпечення цілісності та блокування захисних екранів верстатного обладнання, використання автоматизованих систем віддалення стружки та контролю її форми; тепло, що виділяється при інтенсивному різанні, може спричинити опіки при контакті зі

щойно обробленими деталями або гарячою стружкою; при обробці деяких матеріалів на високих швидкостях може вичикати інтенсивне тепло- та світловипромінювання, що вимагає застосування спеціальних захисних окулярів або світлофільтрів у захисних екранах. До хімічних факторів належить використання високошвидкісного свердління, яке, особливо при подачі МОР під високим тиском, призводить до утворення дрібнодисперсних аерозолів та парів МОР, які можуть містити шкідливі хімічні компоненти, а вдихання цих аерозолів може спричинити захворювання дихальних шляхів та алергічні реакції, тому необхідне обов'язкове використання припливно-витяжної вентиляції, локальних системи очищення повітря над верстатами та контроль гранично допустимих концентрацій (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Щодо ергономічних факторів, то при впровадженні нових технологій та автоматизації зростає частка робіт із контролю та налаштування, що може призводити до зорової напруги та нервово-психічних перевантажень, тому організація раціонального режиму праці та відпочинку та вдосконалення організації робочого місця є важливими для мінімізації цих ризиків.

Заходи ОП повинні бути інтегровані в процес планування та впровадження технологічних інновацій для підвищення стійкості свердл, що охоплює технічні та організаційні заходи: експлуатація верстатів, на яких застосовуються високопродуктивні режими різання, повинна відповідати вимогам Технічного регламенту безпеки машин та забезпечуватися планово-запобіжним ремонтом (ППР), а захисні пристрої мають бути надійно закріплені та мати блокувальні пристрої, що виключають роботу верстата з відкритими захистами; впровадження систем моніторингу стану інструменту та обладнання дозволяє прогнозувати поломку свердла та автоматично змінювати режими або зупиняти процес, запобігаючи аварійним ситуаціям та викиду осколків; необхідна установка колекторів та конвеєрів стружки, які виключають ручне видалення під час роботи, а для боротьби з аерозолями МОР слід застосовувати локальні витяжні установки та електрофільтри; для операторів обов'язковим є забезпечення антивібраційними рукавичками, захисними окулярами або щитками з високою механічною міцністю

та протишумовими навушниками або вкладками. Дотримання вимог законодавства є фундаментальною основою ОП: згідно із Законом України «Про охорону праці» [32] роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці умови праці відповідно до вимог нормативно-правових актів, а також забезпечити функціонування системи управління охороною праці (СУОП), що включає організацію навчання та інструктажів з питань безпечного ведення робіт та проведення атестації робочих місць за умовами праці. Особлива увага повинна приділятися необхідності використання справного та заточеного інструменту, що прямо пов'язано з його підвищеною стійкістю та безпекою, а також забороняється використання свердл із пошкодженим хвостовиком.

5.3 Економічне обґрунтування розробки

При виборі ручного інструменту з покриттями необхідно враховувати величину витрат, пов'язаних з нанесенням даного типу покриття. Для їх розрахунку використовували методику [33]. В основу даної методики закладені всі поточні витрати, пов'язані з підготовкою інструменту до нанесення покриття, технологічним процесом осадження покриття і з експлуатацією та обслуговуванням установок. Величину поточних витрат можна визначити за формулою:

$$S_{б/ч} = \frac{S}{\Phi}, \quad (5.1)$$

де $S_{б/ч}$ – поточні витрати, віднесені до однієї години роботи, грн/год; S – сумарні поточні витрати, що припадають на рік роботи установки, грн; Φ – річний фонд часу роботи установки, год.

Калькуляція сумарних витрат, пов'язаних з нанесенням покриттів, буде подаватися у вигляді:

$$S = S_0 + S_B + S_{TP} + S_{ЗП} + S_E + S_P, \quad (5.2)$$

де S_0 – вартість основних осаджуваних матеріалів, грн; S_B – вартість допоміжних матеріалів, інструменту та технологічного оснащення, грн; S_{TP} – транспортно-заготівельні витрати, грн; $S_{ЗП}$ – заробітна плата робітників і службовців, грн; S_E – вартість електроенергії, грн; S_P – витрати на поточний ремонт та амортизацію обладнання і приміщень, грн.

Результати розрахунку додаткових витрат, пов'язаних з нанесенням покриття, наведені в табл. 5.1 стосовно установки «Булат – 6Т». Видно, що вартість однієї години роботи установки при нанесенні багат шарових покриттів $TiAlN$ – $TiAlCrN$ і $TiAlN$ – $TiAlZrN$ практично не відрізняється від покриття $TiAlN$, різниця становить не більше 2,1%.

Таблиця 5.1 Результати розрахунку витрат, пов'язаних з нанесенням покриттів

| Покриття | Статті витрат, тис. грн. | | | | | | $S_{б/ч}$ |
|-------------------|--------------------------|-------|----------|----------|-------|-------|-----------|
| | S_0 | S_B | S_{TP} | $S_{ЗП}$ | S_E | S_P | |
| TiN | 16,2 | | | | | | 0,268 |
| $TiAlN - TiAlCrN$ | 24,5 | 10,3 | 75,8 | 174,6 | 134,8 | 176,3 | 0,272 |
| $TiAlN - TiAlZrN$ | 23,3 | | | | | | 0,271 |

Додаткові витрати, пов'язані з нанесенням покриттів на конкретний інструмент, визначаються за формулою:

$$S_{\Pi} = \frac{S_{б/ч} \cdot \tau_{ч}}{N_i}, \quad (5.3)$$

де $\tau_{ч}$ – час одного циклу нанесення покриття, год.; N_i – кількість інструментів у камері установки, штук.

Результати розрахунку $S_{\text{п}}$ при нанесенні покриття на пластини НІЗА фірми «Sandvik Coromant» представлені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 Результати розрахунку $S_{\text{п}}$

| Покриття | TiN | TiAlN – TiAlCrN | TiAlN – TiAlZrN |
|----------------------|-----|-----------------|-----------------|
| $S_{\text{п}}$, грн | 222 | 240 | 250 |

При розрахунку собівартості обробки однієї деталі з використанням ріжучого інструменту з покриттям скористаємося методикою [52].

Основні витрати, пов'язані з виготовленням однієї деталі, визначаються співвідношенням:

$$q = q_{\text{с}} + q_{\text{І}} + q_{\text{П}} + q_{\text{З}}, \quad (5.4)$$

де $q_{\text{с}}$, $q_{\text{І}}$, $q_{\text{П}}$, $q_{\text{З}}$ – відповідно витрати на верстат, інструмент, пристосування та заробітну плату робітників

Величини витрат можна визначити за формулами:

$$q_{\text{с}} = \frac{Q}{M}, \quad q_{\text{І}} = \frac{Q'}{N}, \quad q_{\text{П}} = \frac{Q_1}{\Pi}, \quad q_{\text{З}} = \frac{E}{\Pi}, \quad (5.5)$$

де Q – вартість верстата, грн.; M – термін окупності верстата, рік; Q' – вартість інструменту, віднесена до одного циклу, грн.; N – кількість деталей, оброблених за один цикл; E – заробітна плата, грн./рік; Q_1 – вартість пристосування, грн.; Π – продуктивність верстата, дет./год.

Перетворивши формулу (5.4) з урахуванням виразів (5.5), отримаємо:

$$q = \left(\frac{Q}{M} + Q_1 + E \right) \cdot \frac{1}{\Pi} + \frac{Q'}{T}, \quad (5.6)$$

Економічний ефект від застосування інструменту з розробленими багат шаровими покриттями визначався як різниця собівартості обробки інструменту без покриття і собівартості обробки інструменту з покриттям. Результати розрахунку економічного ефекту наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 Економічна ефективність застосування твердосплавного інструменту з багат шаровими покриттями в умовах реального виробництва

| Річний економічний ефект (на 1 верстат), грн. | | |
|---|------------------------|------------------------|
| <i>TiN</i> | <i>TiAlN – TiAlCrN</i> | <i>TiAlN – TiAlZrN</i> |
| 16234 | 31684 | 34355 |

Аналіз отриманих даних показав економічну перевагу використання ріжучих інструментів з багат шаровими покриттями в порівнянні з інструментом з двох шаровими покриттями і з покриттям *TiN* при обробці конструкційних сталей. Таким чином, видно, що максимального економічного ефекту від використання багат шарових покриттів можна досягти в умовах великосерійного, масового виробництва шляхом збільшення продуктивності операцій механічної обробки.

Висновки до розділу 5

1. Техніко-економічними розрахунками показано, що застосування спіральних свердел з розробленими МП дозволяє знизити собівартість операції свердління за рахунок зменшення витрат на інструмент. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження даних покриттів на одній операції свердління склав 34355 грн. на один верстат.

ВИСНОВКИ

Проведений комплекс досліджень дозволив визначити механізм впливу складу зносостійких покриттів на контактні процеси і тепловий стан ріжучого клину спіральних свердел. На основі отриманих результатів розроблені нові архітектури багатошарових покриттів. Встановлено взаємозв'язки складу і конструкції зносостійких покриттів з їх структурними параметрами, механічними властивостями та інтенсивністю зносу інструменту. Проведені дослідження показали високу ефективність розроблених багатошарових покриттів.

В результаті виконаної роботи отримано наступні наукові висновки та практичні результати.

1. Встановлено закономірності впливу зносостійких покриттів на осьову силу P_0 і обертальний момент $M_{об}$, що діють на головних допоміжних ріжучих кромках і поперечній кромці спірального свердла. Показано, що найбільше зниження осової сили і обертального моменту відбувається на допоміжних ріжучих кромках.

2. Виявлено частки осової сили та обертального моменту, що припадають на робочі елементи спіральних свердел без покриття та з різними зносостійкими покриттями, тенденцію невеликого зростання P_0 та $M_{об}$ при переході від одноелементних зносостійких покриттів до багатоелементних.

3. Розроблено методику розрахунку теплових полів у ріжучих клинах спірального свердла покриттями, що враховує частку силових навантажень, які припадають на різні кромки свердла, на основі якої проведено чисельне моделювання теплового стану робочих елементів спірального свердла в середовищі. Встановлено, що застосування зносостійких покриттів значно знижує температуру на контактних площадках спірального свердла, а застосування багатоелементних зносостійких покриттів призводить до зміщення ізотерм температури в бік від головних ріжучих кромки, тим самим покращуючи тепловий стан ріжучого клина.

4. Запропоновано принцип формування багатошарових покриттів спіральних свердел та обґрунтовано склади його функціональних шарів. Виявлено

закономірності впливу конструкції багат шарових покриттів на їх структурні параметри, механічні властивості та інтенсивність зношування спіральних свердел. Встановлено, що двошарові покриття в порівнянні з одношаровими покриттями $TiAlN$ і $TiAlCrN$ мають більш високу мікротвердість на 23...30 %, модуль пружності (на 5...9,5 %), коефіцієнт інтенсивності напружень (на 12,3 %) і міцність адгезії (коефіцієнт K_0 менше в 3,9 - 4,3 рази). Показано, що співвідношення товщин функціональних шарів впливає на міцність адгезії і практично не впливає, як і загальна товщина, на механічні властивості двошарових покриттів. Встановлено, що мінімальна інтенсивність зношування твёрдосплавних свердел забезпечується при товщині верхнього функціонального шару, що становить 60 - 70 % від загальної товщини двошарового покриття.

5. Встановлено, що застосування двошарових покриттів підвищує період стійкості свердел в 2,5 рази відносно свердел без покриття і в 1,7 - 1,8 рази відносно свердел з покриттям TiN залежно від режиму обробки. Ефективність розроблених багат шарових покриттів підтверджена дослідно-промисловими випробуваннями. Коефіцієнт підвищення періоду стійкості спіральних свердел з багат шаровими покриттями склав 1,25 порівняно зі свердлами з одношаровим зносостійким $TiAlCrN$ покриттям і 2,36 порівняно зі свердлами без покриття.

6. Техніко-економічними розрахунками показано, що застосування спіральних свердел з розробленими багат шаровими покриттями дозволяє знизити собівартість операції свердління за рахунок зменшення витрат на інструмент. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження даних покриттів на одній операції свердління склав 34355 грн. на один верстат.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Czarniak P., Szymanowski K., Panjan P., Górski J. Initial Study of the Effect of Some PVD Coatings ("TiN/AlTiN" and "TiAlN₂-C.N") on the Wear Resistance of Wood Drilling Tools. *Forests*, 2022. Vol. 13(2). Pp. 286. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13020286>
2. Vijayaraghavan A., Dornfeld D. A. Automated Drill Modeling for Drilling Process Simulation. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2007. Vol. 7(3). Pp. 276-282. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2768091>
3. Tolouei-Rad M., Amir M. Analysis of the Performance of Drilling Operations for Improving Productivity. *IntechOpen*. 2021. DOI: 10.5772/intechopen.96497.
4. Ma Y., Tang Z., Wan K., Cai R., Yi L., Li J., Wang F., Zhao X., Chen R., Wang X. Development of a New Micro Drilling Tool with H-Shaped Chisel Edge. *Metals*, 2023. Vol. 13(3). Pp. 608. <https://doi.org/10.3390/met13030608>
5. Beresnev V.M., Krimenko S.A., Toryanik I.N. Superhard coatings of the (Zr-Ti-Si)N and (Ti-Hf-Si)N systems produced by vacuum-arc deposition from a separated flow. *J. Superhard Mater.* 2014. Vol. 36. Pp. 29-34. <https://doi.org/10.3103/S1063457614010055>
6. Sankaya M., Güllü A. Multi-response optimization of minimum quantity lubrication parameters using Taguchi-based grey relational analysis in turning of difficult-to-cut alloy Haynes 25. *Journal of Cleaner Production*, 2015. Vol. 91. Pp. 347-357. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.020>.
7. Petrakov Y. V., Ohrimenko O. A., Sikailo M. O., Myhovich A. V. Cutting Forces Simulation for End Milling. *Journal of Engineering Sciences*, 2023. Vol. 10(2). Pp. A1-A10. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).a4](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).a4)
8. Smyrnova K., Sahul M., Haršani M., Pogrebnjak A., Ivashchenko V., Beresnev V., Stolbovoy V., Čaplovič L., Čaplovičová M., Vančo L., Kusý M., Kassymbaev A., Satrapinsky I., Flock D. Microstructure, Mechanical and Tribological Properties of Advanced Layered WN/MeN (Me = Zr, Cr, Mo, Nb) Nanocomposite Coatings. *Nanomaterials*, 2022. Vol. 12(3). Pp. 395. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano12030395>

9. Makee C., Kitkamthorn U., Mitsomwang P., Borrisutthekul R. Effects of drilling parameters on drill bit wear of ASTM A36 steel. *J Appl Res Sci Tech*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.60101/jarst.2024.258209>
10. Xiong L., Fang N., Shi H. A new methodology for designing a curve-edged twist drill with an arbitrarily given distribution of the cutting angles along the tool cutting edge. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2009. Vol. 49. Pp. 667-677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.01.005>.
11. Meddour I., Yallese M.A., Bensouilah H., Khellaf A., Elbah M. Prediction of surface roughness and cutting forces using RSM, ANN, and NSGA-II in finish turning of AISI 4140 hardened steel with mixed ceramic tool. *Int J Adv Manuf Technol*, 2018. Vol. 97, Pp. 1931-1949. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-0026-6>.
12. Chaabi A., Yallese M., Nouioua M., Meddour I., Mabrouki T., Girardin F. Modeling and optimization of turning process parameters during the cutting of polymer (POMC) based on RSM, ANN, and DF methods. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017. Vol. 94. Pp. 2267-2290. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9858-8>.
13. Varghese L., Aravind S., Shanmugesh K. Multi-Objective Optimization of Machining Parameters during Dry Turning of 11SMn30 Free Cutting Steel Using Grey Relational Analysis. *Materials Today: Proceedings*, 2017. Vol. 4. Issue 2, Part B. Pp. 4196-4203. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.122>.
14. Mohanta D.K., Sahoo B., Mohanty A.M. Experimental analysis for optimization of process parameters in machining using coated tools. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2024. Vol. 71 (38). <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00370-5>.
15. Mia M., Khan M.A., Dhar N.R. Study of surface roughness and cutting forces using ANN, RSM, and ANOVA in turning of Ti-6Al-4V under cryogenic jets applied at flank and rake faces of coated WC tool. *Int J Adv Manuf Technol*, 2017. Vol. 93. Pp. 975-991. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0566-9>.
16. Alajmi M.S., Almeshal A.M. Modeling of Cutting Force in the Turning of AISI 4340 Using Gaussian Process Regression Algorithm. *Appl. Sci.*, 2021. Vol. 11 (9). Pp. 40-55. <https://doi.org/10.3390/app11094055>.

17. Chowdhury M.S.I., Bose B., Yamamoto K., Shuster L.S., Paiva J., Fox-Rabinovich G.S., Veldhuis S.C. Wear performance investigation of PVD coated and uncoated carbide tools during high-speed machining of TiAl6V4 aerospace alloy. *Wear*, 2020. Vol. 446-447. Pp. 203168. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203168>.
18. Chao X., Wuyi C. Adhering layer formation and its effect on the wear of coated carbide tools during turning of a nickel-based alloy. *Wear*. 2011. Vol. 270 Issues 11-12. Pp. 895-902, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.02.018>.
19. Yaqoob S., Ghani J.A., Jouini N., Juri A.Z. Performance Evaluation of PVD and CVD Multilayer-Coated Tools in Machining High-Strength Steel. *Coatings*. 2024. Vol. 14(7). Pp.865. <https://doi.org/10.3390/coatings14070865>
20. Zerti A., Yallese M.A., Zerti O., Nouioua M., Khettabi R. Prediction of machining performance using RSM and ANN models in hard turning of martensitic stainless steel AISI 420. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2019. Vol. 233(13). Pp. 4439-4462. [doi:10.1177/0954406218820557](https://doi.org/10.1177/0954406218820557)
21. Kant G., Sangwan K. S. Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining. *Journal of Cleaner Production*, 2014. Vol. 83. Pp. 151-164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.073>.
22. Labidi A., Tebassi H., Belhadj S. Cutting Conditions Modeling and Optimization in Hard Turning Using RSM, ANN and Desirability Function. *J Fail. Anal. and Preven.* 2018. Vol. 18. Pp. 1017-1033. <https://doi.org/10.1007/s11668-018-0501-x>.
23. F.B. Patole, V.V. Kulkarni Optimization of Process Parameters based on Surface Roughness and Cutting Force in MQL Turning of AISI 4340 using Nano Fluid. *Materials Today: Proceedings*, 2018. Vol. 5. Issue 1. Part 1. Pp. 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.060>.
24. Safari H., Sharif S., Izma S., Jafari H., Kurniawan D. Cutting Force and Surface Roughness Characterization in Cryogenic High-Speed End Milling of Ti-6Al-4V ELI. *Materials and Manufacturing Processes*, 2014. Vol. 29(3). Pp. 350-356. <https://doi.org/10.1080/10426914.2013.872257>

25. Gekonde H. O., Subramanian S. V. Tribology of tool–chip interface and tool wear mechanisms. *Surface and Coatings Technology*, 2002. Vol. 149. Issues 2-3. Pp. 151-160. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01488-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01488-8).

26. Fox-Rabinovich G.S., Kovalev A.I., Aguirre M.H., Beake B.D., Yamamoto K., Veldhuis S.C., Endrino J.L., Wainstein D.L., Rashkovskiy A.Y. Design and performance of AlTiN and TiAlCrN PVD coatings for machining of hard to cut materials. *Surface and Coatings Technology*, 2009. Vol. 204. Issue 4. Pp. 489-496. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.08.021>.

27. Tkadletz M., Mitterer C., Sartory B., Letofsky-Papst I., Czettel C., Michotte C. The effect of droplets in arc evaporated TiAlTaN hard coatings on the wear behavior. *Surface and Coatings Technology*, 2014. Vol. 257. Pp. 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.01.010>.

28. Schalk N., Tkadletz M., Mitterer C. Hard coatings for cutting applications: Physical vs. chemical vapor deposition and future challenges for the coatings community. *Surface and Coatings Technology*, 2022. Vol. 429. Pp. 127949. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127949>.

29. Martinho R.P., Silva F.J.G., Martins C. Comparative study of PVD and CVD cutting tools performance in milling of duplex stainless steel. *Int J Adv Manuf Technol.*, 2019. Vol. 102. Pp. 2423–2439. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03351-8>

30. Sousa V.F.C., Da Silva F.J.G., Pinto G.F., Baptista A., Alexandre R. Characteristics and Wear Mechanisms of TiAlN-Based Coatings for Machining Applications: A Comprehensive Review. *Metals*, 2021. Vol. 11(2). Pp. 260. <https://doi.org/10.3390/met11020260>

31. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 26.06.91 р. № 1268-XII. Дата оновлення: 08.08.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text> (дата звернення: 17.10.2025).

32. Про охорону праці : Закон України від 14.10.92 р. № 2695-XII. Дата оновлення: 12.09.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 13.09.2025).

33. Тіхонов О. В., Рибалко І. М., Колпаченко Ч. М. Техніко-економічна оцінка конструкторської розробки пристосування : методичні вказівки до виконання практичної роботи студентам, які навчаються за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. Харків. нац. техн. ун-т сіл. госп-ва ім. П. Василенка, 2021. 22 с.