

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра прикладної математики та моделювання складних систем

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ПМ та МСС

_____ Коплик І.В.
(підпис)

«__» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «бакалавр»
спеціальність 113 «Прикладна математика»
освітньо-професійна програма «Прикладна математика»

тема роботи

**«МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ТА ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В
БАГАТОШАРОВИХ НАНОКОМПОЗИТНИХ ТОНКОПЛІВКОВИХ
СИСТЕМАХ»**

Виконавець

студент факультету ЕЛІТ

Негреба Євгеній Юрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник

професор, доктор фіз.-мат. наук
(науковий ступінь, вчене звання)

Гончаров Олександр Андрійович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Суми – 2023 р.

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет **електроніки та інформаційних технологій**
 Кафедра **прикладної математики та моделювання складних систем**
 Рівень вищої освіти **перший (бакалаврський)**
 Галузь знань **11 Математика та статистика**
 Спеціальність **113 Прикладна математика**
 Освітня програма **освітньо-професійна «Прикладна математика»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ПМ та МСС

Коплик І.В. _____

«__» _____ 2023 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Негребі Євгенію Юрійовичу

1. Тема роботи Моделювання теплових та деформаційних процесів в багатошарових нанокompозитних тонкоплівкових системах/ Modeling of thermal and deformation processes in multilayer nanocomposite thin film systems.

Керівник роботи Гончаров О.А., професор, доктор фіз.-мат. наук

затверджено наказом по факультету ЕЛІТ від «__» _____ 202_ р. № _____

2. Термін подання роботи студентом «11» червня 2023р.

3. Вихідні данні до роботи 1) Метод скінчених елементів, метод фазової площини; 2) Теоретичні та експериментальні відомості про теплові та деформаційні процеси при обробці металів різанням.

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити) Дослідження теплових та деформаційних полів в середині ріжучої пластини без захисного покриття та з захисними покриттями. Побудова фізичної та математичної моделі задачі дослідження. Створення комп'ютерної програми на основі математичної моделі.

5.Перелік графічного матеріалу:

- 1) Температурне поле ріжучої пластини без покриття, з одношаровими та багатошаровими покриттями;
- 2) Фазові портрети пластичної деформації ріжучої пластини без покриття, з одношаровими та багатошаровими покриттями.

6. Консультанти до проекту (роботи), із значенням розділів проекту, що стосується їх

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «17» квітня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування роботи, заходи	Термін виконання	Примітка
1	Провести аналіз літератури за темою «Моделювання теплових та деформаційних процесів в багатошарових нанокompозитних тонкоплівкових системах».	15.05-22.05	Виконано
2	Побудувати фізичну модель, що описує теплові та деформаційні процеси в ріжучій пластині.	23.05-30.05	Виконано
3	Побудувати математичну модель	31.05-05.06	Виконано

	теплових та деформаційних полів в ріжучій пластині без захисного покриття та з різними видами захисних покриттів, врахувавши задані граничні умови.		
4	На основі математичної моделі створити комп'ютерну програму. Провести оцінку отриманих результатів.	06.06-11.06	Виконано

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Негреба Є.Ю.

Керівник роботи

(підпис)

Гончаров О.А.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 47 с., 15 рис., 3 табл., 27 джерел.

Мета роботи: розробка математичної моделі для аналізу температурних та деформаційних процесів, які відбуваються на поверхні ріжучої пластини. Особлива увага приділяється впливу захисних покриттів, які наносяться на пластину.

Об'єкт дослідження: зміна теплового та деформаційного стану пластини під впливом захисних покриттів.

Предмет дослідження: комп'ютерна модель, яка описує теплові та деформаційні поля в пластині без захисного покриття та з різними типами захисних покриттів.

Методи дослідження: для досягнення поставленої мети використовуються метод скінчених елементів та метод фазової площини.

Результати досліджень дають змогу порівняти температурні поля та фазові портрети пластичної деформації ріжучої пластини з різними типами захисних покриттів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ, ГРАНИЧНІ УМОВИ, ЗАХИСНЕ ПОКРИТТЯ, РІЖУЧА ПЛАСТИНА, ДЕФОРМАЦІЯ, ФАЗОВИЙ ПОРТРЕТ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1.....	8
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	8
Висновки до 1-го розділу.....	18
Постановка задачі.....	19
РОЗДІЛ 2.....	20
ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ.....	20
2.1 Теплоутворення під час обробки металів різанням. Тепловий баланс.....	20
2.2 Теплове поле різального інструменту.....	22
2.3 Деформація та тертя в контактній зоні.....	24
Висновки до 2-го розділу.....	27
РОЗДІЛ 3.....	28
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЯ.....	28
1.1 Математична модель.....	28
3.2 Метод скінчених різниць.....	30
3.3 Обчислення фазових портретів за допомогою методу фазової площини.....	33
3.4 Результати роботи програми.....	36
ВИСНОВКИ.....	41
СПИСОК ВИКРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	42
ДОДАТОК А.....	45

ВСТУП

Машинобудування відіграє важливу роль у прискоренні науково-технічного прогресу в промисловості. Серед різноманітних технологій, що використовуються в машинобудуванні, обробка різанням є одним з основних способів отримання точних деталей машин.[1] Покращення ефективності обробки різанням в першу чергу залежить від зниження собівартості виготовлення виробу. Головне зниження собівартості досягається за рахунок підвищення довговічності інструменту та його зносостійкості. Одним із методів підвищення стійкості ріжучого інструменту є нанесення на його робочі поверхні захисних покриттів. Дослідження ефективності термозахисної функції багатосарових покриттів є актуальною науково-практичною задачею.

Різання металу можна розглядати як процес, де великі деформації сильно зосереджені в невеликій області. На процес пластичної деформації впливає температурне поле всередині ріжучого інструмента, яке залежить, в свою чергу від покриття нанесеного на робочу поверхню. Експериментально оцінити ефективність захисних покриттів надзвичайно витратно і складно. Тому для оцінки впливу захисних покриттів доцільно провести моделювання відповідної системи «заготовка-різець».

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Процеси механічної обробки вважаються одними з найважчих для моделювання. В різанні металу виникають складнощі, пов'язані зі значною пластичною деформацією та екстремальними трибологічними умовами, що присутні в інтерфейсі між інструментом та заготовкою.[2] На сьогоднішній день науковці активно впроваджують математичне моделювання теплових та деформаційних процесів разом з експериментальними методами, використовуючи комп'ютерні інформаційні технології. Ці дослідження отримали значний науковий інтерес і були відображені в численних наукових працях. [2-10].

Одним з ефективних шляхів підвищення працездатності різального інструменту являється нанесення на його робочі поверхні зносостійких захисних покриттів.[3] Результати проведених досліджень свідчать, що наноструктуровані плівкові покриття демонструють значно вищі фізико-механічні характеристики порівняно з аналогічними масивними матеріалами. Це дає можливість успішно використовувати такі покриття для підвищення зносостійкості ріжучих інструментів.[4]

В даний час поєднання різних матеріалів, таких як TiAlN/TiN, TiCN/TiSiN/TiAlN та багато інших використовується для багатошарових покриттів. Ці багатошарові комбінації створюють характерні механічні та трибологічні властивості, що залежать від температурного поля всередині ріжучого інструменту та механічного навантаження робочої поверхні [5].

Досліджено [6] пластичну деформацію твердосплавних різальних інструментів з покриттям. Сформовані методом кінцевих елементів поле тиску та температурне поле всередині ріжучого інструменту представлені на рис.1, 2. Розроблено методи випробувань для експериментального визначення міцності

твердого сплаву при високих температурах (міцність при стиску, опір повзучості). Нормальний розподіл напруги на поверхні інструменту оцінювали за вимірними силами різання та довжиною контакту інструмента зі стружкою.

Ці дані разом із вимірними даними високотемпературної міцності цементованого карбїду були введені в модель кінцевих елементів (ANSYS). Збіг між прогнозованою деформацією та результатами експерименту був прийнятним. Різниця між змодельованою та вимірною шириною бока на деформованих ріжучих кромках становила приблизно 15%. Було продемонстровано, що чисельні методи (FE) дають можливість кількісно та систематично описати вплив умов різання та властивостей інструментального матеріалу на поведінку інструменту[7].

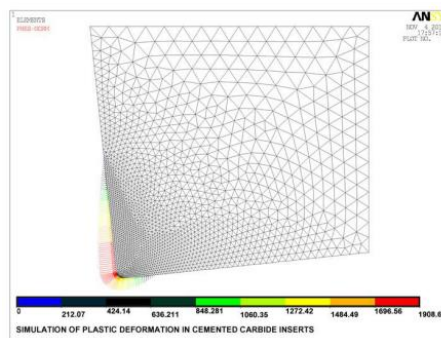


Рис. 1 Застосований тиск уздовж передньої частини та флангу[6]

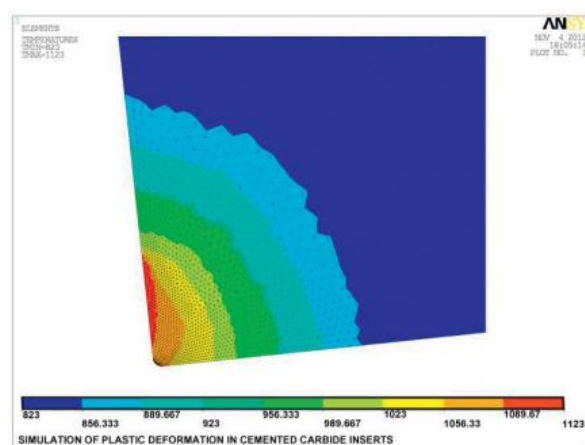


Рис. 2 Розподіл температури всередині інструменту[6]

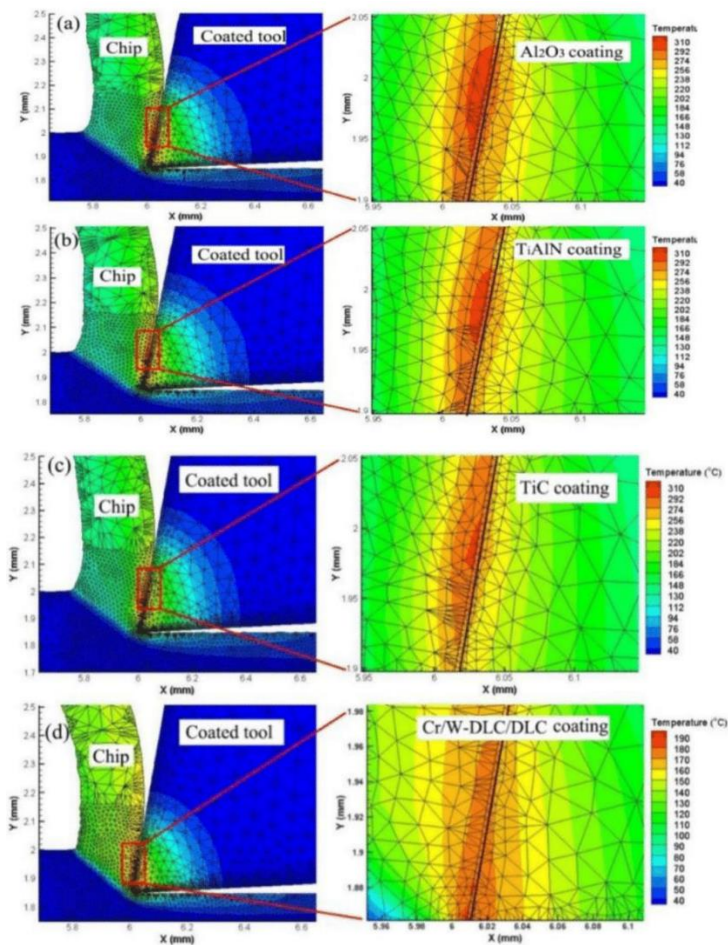


Рис.3. Температурне поле різання інструментів з різним покриттям [8]

У цьому дослідженні [8] інструменти з покриттям Cr/W-DLC/DLC порівнювали з трьома іншими видами інструментів з покриттям (TiC-, TiAlN-, Al₂O₃-), щоб дослідити ефективність різання при обробці сплаву Al-Si. Моделювання відповідного температурного поля для різних покриттів представлено на рис. 3. Було вивчено вплив інструментів із покриттям Cr/W-DLC/DLC на продуктивність різання при різних швидкостях різання. Силу різання, температуру різання, коефіцієнт теплового розподілу, швидкість деформації різання, пластичну деформацію обробленої поверхні, температуру межі розділу та напругу досліджували чисельно за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ).

В рамках моделі ортогонального різання (FEM) температура навколишнього середовища деталі та ріжучого інструменту встановлюється на

рівні 20°C. Довжина заготовки 6 мм, а висота 2 мм. Планується, що під час симуляції різання ріжучий інструмент фіксується в X і Y напрямках, і деталь налаштована на рух у позитивному напрямку X із відносною швидкістю різання до інструменту, тоді як напрямком Y фіксований. Інструмент врізається в заготовку з початкового положення. Коефіцієнт тертя між покриттям інструменту із твердого сплаву та сплавом з високим вмістом Al-Si встановлений як 0,1. Модель тривимірного моделювання різання перетворюється на двовимірну імітаційну модель різання, щоб скоротити час моделювання (показано на рис. 3.). Як показано на рис. 5, використана топологія елемента є 6-вузловим елементом трикутника з трьома кутами та трьома вузлами середнього розміру. Робиться вихідна сітка яка спотворюється після певної довжини розрізу, і він буде повторно розшарований у цьому районі, щоб утворити звичайну сітку знову. У цьому дослідженні сітка наконечника інструмента та області деформації різання зашифровані належним чином, а інші частини розділені більшою сіткою. Максимальний і мінімальний розміри інструменту розмір сітки становить 0,1 мм і 0,02 мм відповідно. Параметр поділу сітки встановлено на 0,4.

В роботі [8] досліджувався вплив швидкості різання на пластичну деформацію обробленої поверхні. Сила тертя між ріжучим інструментом і матеріалом заготовки в зоні вторинної деформації та зоні третинної деформації збільшується зі збільшенням швидкості різання. З одного боку, збільшення сили тертя інструмента і заготовки призводить до збільшення сили різання. З іншого боку, більш висока швидкість різання спричинить швидку пластичну деформацію та ковзання зсуву в основній зоні деформації різання. Ця швидка деформація та ковзання при зсуві також призведе до збільшення сили різання. Збільшення сили різання і сили тертя призводить до підвищення температури різання.

Існує дві причини пластичної деформації обробленої поверхні. З одного боку, під різальним шаром перед кінчиком інструменту в процесі різання буде

зона негативного зсуву. У зоні негативного зсуву матеріал заготовки вироблятиме пластичне ковзання зсуву та деформацію згину, що призводить до пластичної деформації обробленої поверхні. З іншого боку, тертя виникає між боковою поверхнею інструменту та обробленою поверхнею в третій зоні деформації, що призведе до залишкової напруги та наклепу на оброблену поверхню. Пластична деформація поверхні після різання є важливим фактором, який впливає на цілісність поверхні та механічні властивості обробленої заготовки. Висока пластична деформація обробленої поверхні призведе до високого залишкового напруження та зміни зернистої структури, що вплине на втомну міцність і довговічність заготовки. Величина пластичної деформації обробленої поверхні зменшується зі збільшенням глибини матеріалу від обробленої поверхні у вертикальному напрямку. Параметри різання в процесі різання є одним із факторів, що впливають на пластичну деформацію обробленої поверхні. На рис.6 показано глибину пластичної деформації при різних швидкостях різання. Принципова схема вимірювання глибини пластичної деформації наведена на рис. 6 (а). Зі значень на рис. 6 (б) видно, що швидкість різання має великий вплив на товщину пластичної деформації обробленої поверхні. Збільшення швидкості різання призведе до зменшення товщини шару пластичної деформації на обробленій поверхні при незмінних інших параметрах різання. Максимальна глибина пластичної деформації обробленої поверхні становить 0,16 мм при швидкості різання 400 м/хв. Глибина пластичної деформації обробленої поверхні зменшується до 0,05 мм при швидкості різання 2000 м/хв. Це пояснюється тим, що час контакту між інструментом і матеріалом заготовки зменшується зі збільшенням швидкості різання, а часу контакту між двома матеріалами недостатньо для підтримки пластичної деформації обробленої поверхні матеріалу заготовки.

Результати дослідження[8] показують, що інструмент із покриттям Cr/W-DLC/DLC мав найкращу продуктивність різання серед цих чотирьох видів інструментів з покриттям. Зі збільшенням швидкості різання сила різання та

температура різання показали тенденцію до зростання, тоді як глибина пластичної деформації обробленої поверхні та розподіл тепла в ріжучому інструменті продемонстрували тенденцію до зменшення під час обробки інструментом із покриттям Cr/W-DLC/DLC[9].

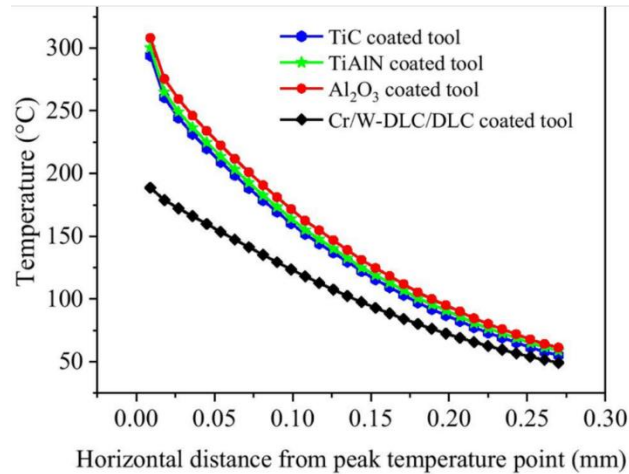
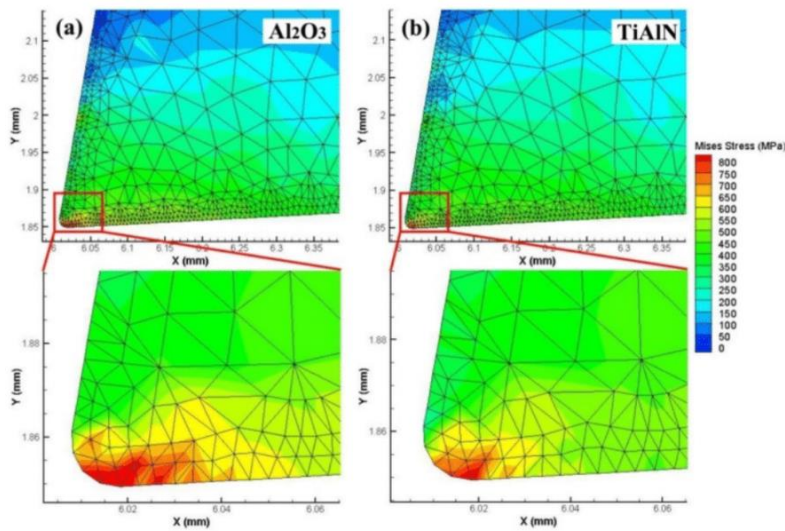


Рис.4. Горизонтальна відстань зміни температури при різних покриттях[8]



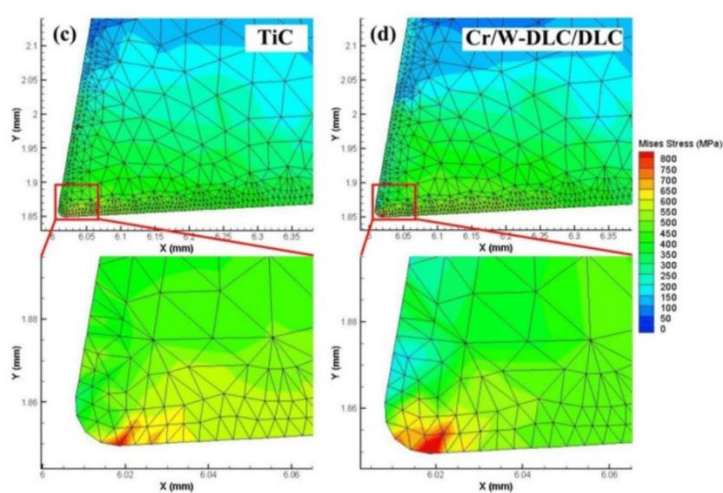


Рис.5. Поля напруження інструмента з різним покриттям[8]

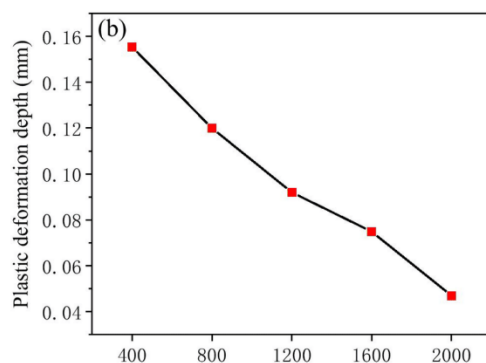
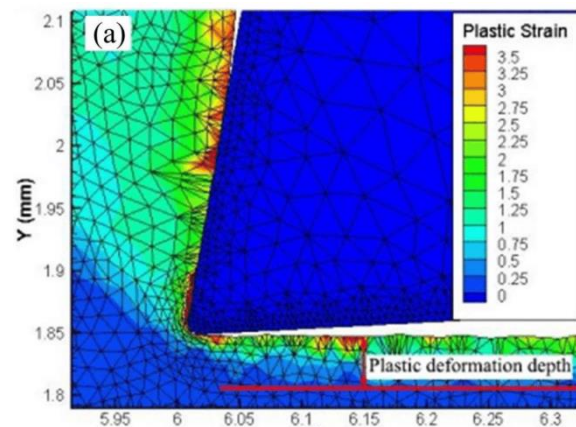


Рис.6. а) принципова схема глибини пластичної деформації; б) вплив швидкості різання на глибину пластичної деформації[8]

В даній роботі[10] наведені результати експериментальних досліджень, що стосуються процесів, які відбуваються на поверхні тертя в жорстких трибологічних умовах. Виконано аналіз профілів напруження та температури на поверхні тертя за допомогою кінцево-елементного моделювання.

Дослідження проводилися на багат шаровому покритті, де верхній шар складався з глиноземної кераміки, яка була нанесена на підкладку з карбіду WC/Co методом CVD (хімічне осадження з парової фази). Детальний аналіз процесу зношування був здійснений за допомогою 3D-оцінки зношування. Ці дослідження[10] розкривають зв'язок між багатомасштабними процесами самоорганізації та явищами на поверхні, що виникають в результаті зношування, в умовах важкого трибологічного навантаження, пов'язаного з утворенням скупчень.

Під час різання металу сильна пластична деформація матеріалу заготовки відповідає за зростання температури/напруги, що призводить до важких трибологічних умов. Однією з головних проблем моделювання профілів температури/напруги в зоні різання під час обробки нержавіючої сталі у вологих умовах є складність процесів обробки. Слід зазначити, що цей підхід, заснований на кінцевих елементах, є досить новим. У цьому випадку моделювання механічної обробки металу під час точіння вимагає фундаментального розуміння умов деформації у відповідних зонах деформації, а також швидкості деформації та умов тертя на межі інструмент/деталь. Усе моделювання в цьому дослідженні проводилося за допомогою програмного забезпечення моделювання AdvantEdge™. Розроблено метод дослідження безперервного стружкоутворення для довжини різання 3 мм. Механічні властивості матеріалу заготовки (аустенітної нержавіючої сталі AISI 304) були отримані за допомогою бази даних програми FEM. Властивості матеріалу та охолоджуючої рідини, використані для введення моделі, а також для коефіцієнта тертя, наведені в таблиці 1[10].

Material Properties			
Property	Workpiece	Tool	Alumina
Thermal conductivity (W/m °C)	17	58	12
Heat Capacity (J/kg °C)	500	205	451
Density (kg/m ³)	8000	15,700	3980
Elastic Modulus (GPa)	195	640	413
Poisson Ratio	0.27	0.21	0.33
Coolant Properties			
Density (kg/m ³)	2800	-	-
Heat Transfer Coefficient (W/m ² K)	10,000	-	-
Coolant type	Flood	-	-
Coolant Initial Temperature (°C)	20	-	-
Friction			
Friction Coefficient	0.5	-	-

Таблиця 1 –Властивості матеріалу та охолоджуючої рідини.Коефіцієнт тертя[10]

Програмне забезпечення AdvantEdge поєднує в собі метод Лагранжа з можливостями адаптивного відновлення, щоб усунути нелінійності, спричинені високими швидкостями деформації та пластичною деформацією, властивою процесам обробки. Ріжучу кромку було визначено як ідеально жорстку відповідно до CNMG 120408 MSGrade KCM25 (Kennametal) вставки, використовувані в експериментах. Параметри різання та геометрія коду інструменту, що використовуються в моделюванні, перераховані в таблиці 2

На рис. 7 представлені дані кінцевих елементів (2D профілі напруги/температури) у зоні різання з утворенням наростів. (a) (b)[10]

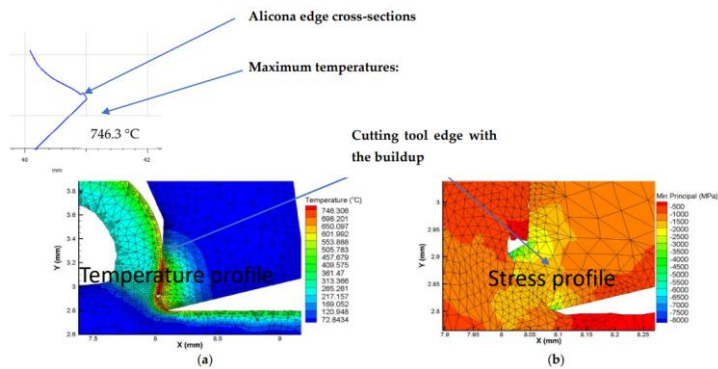


Рис. 7 – Дані моделювання методом FEM (напруження/температура) [10]

Параметри різання, використані в цій роботі, наведені в таблиці 2. Для випробувань на різання використовувалася ріжуча пластина з твердого сплаву CNMG120408-MP (відповідно до ISO 1832). Матеріалом заготовки, що аналізується в цій роботі, є аустенічна нержавіюча сталь AISI 304 (табл. 1). Були проведені випробування на напівчистове токарне різання.[10]

Table 2. Cutting parameters used in the experiments.

Cutting Data						
Machining Operation	Cutting Tool	Workpiece Material	Hardness HRC	Speed m/min	Feed mm/rev	Depth of Cut mm
Semi-finish turning, Wet machining	Kennametal CNMG 120408 Grade KCM25 turning inserts	Stainless Steel (UNS S 30400)	20–22	320	0.2	1

Таблиця 2 – Параметри різання, які використовуються в експериментах[10]

Усі випробування на токарній обробці проводилися при швидкості різання 320 м/хв, швидкості подачі 0,2 мм/об і глибині різання 1 мм у вологих умовах з використанням напівсинтетичної охолоджуючої рідини з концентрацією 7%. Мікромеханічні характеристики (твердість і знижений модуль пружності) покриттів і відповідних карбідних підкладок вимірювали за допомогою вимірювача твердості Fischerscope NM2000 (Fischer, Зіндельфінген, Німеччина) при навантаженні 20 мН. Для цього аналізу використовувалася геометрія індентора Віккерса. Щоб оцінити показники зношування під час випробувань на різання, були проведені прогресивні 3D-дослідження об'єму

зношування за допомогою фокусного варіаційного мікроскопа Infinite Focus G5 (Optimax, Alicona, Австрія). Поверхня та хімічний склад утвореної трибоплівки на поверхні різання аналізували за допомогою рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (XPS, AXIS Nova, KratosAnalytical Inc., Манчестер, Великобританія), спектрометра AXIS Supra, оснащеного напівсферичним аналізатором енергії та джерелом анода Al для генерації рентгенівського випромінювання. Монохроматичне джерело рентгенівського випромінювання Al K- α (1486,6 eV) працювало при напрузі 15 кВ. Базовий тиск системи не перевищував $1,0 \times 10^{-9}$ Торр, а робочий тиск не перевищував $2,0 \times 10^{-8}$ Торр.[10]

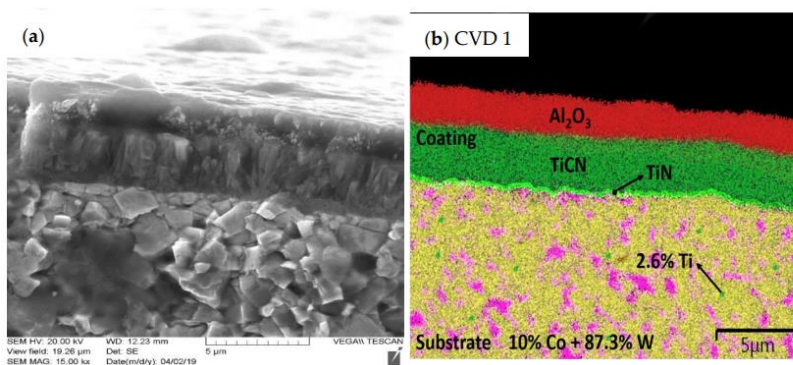


Рис. 8 Ділянка руйнування досліджуваного покриття CVD: (a)SEM зображення;(b)Дані EDS: Al_2O_3 —червоний; Ti—зелений; W—жовтий; Co—рожевий колір. [10]

Представлене дослідження виявляє взаємозв'язок між масштабними процесами самоорганізації та поверхневими явищами, що виникають внаслідок зношування, в екстремальних трибологічних умовах, пов'язаних з формуванням накопичень.

Висновки до 1-го розділу

Після проведення літературного огляду було встановлено, що вчені широко застосовують математичне моделювання як основний метод для вивчення теплових та деформаційних процесів, що відбуваються під час

механічної обробки металів різанням за допомогою різальних пластин з захисними покриттями. Це пояснюється складністю експериментального визначення характеристик тертя та зносу, а також оцінки змін, які відбуваються в різальному інструменті при використанні захисних покриттів.

Постановка задачі

Для того щоб описати зміни, які відбуваються в різальній пластині при нанесенні на неї захисних покриттів, необхідно змодельовати різець і заготовку. При моделюванні спочатку необхідно сформулювати постановку задачі, яка виглядає наступним чином:

1. Побудувати фізичну модель, яка описує теплові та деформаційні процеси в ріжучій пластині з захисними покриттями.
2. Розробити математичну модель, що враховує теплові та деформаційні поля в ріжучій пластині з різними типами захисних покриттів, враховуючи задані граничні умови.
3. Реалізувати комп'ютерну програму на основі математичної моделі і провести оцінку отриманих результатів.

А тепер перейдемо до побудови фізичної моделі задачі дослідження.

РОЗДІЛ 2

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ

2.1 Теплоутворення під час обробки металів різанням. Тепловий баланс

Процес обробки металів різанням супроводжується значним тепловиділенням. Підвищення температури має подвійний вплив на процес різання. З одного боку, інтенсивне теплоутворення полегшує деформацію шару матеріалу, що зрізується, унаслідок чого зменшується знос інструменту і підвищується якість обробленої поверхні. З іншого боку висока температура (800-1000°C) в зоні головної ріжучої кромки призводить до втрати ріжучих здібностей інструменту і прискореного зношування. Крім того, критичний нагрів інструменту і заготовки призводить до їх пластичної деформації, що так само впливає на точність обробки. Отже, тепловими явищами при різанні необхідно керувати так, щоб теплота полегшувала різання і не знижувала стійкість інструменту і точність обробки.

Тепловий баланс процесу різання виражається рівнянням:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \quad (2.1)$$

Основні джерелами виділення тепла позначені як Q_i ($i = 1, 2, 3$).

Робота сил тертя на передній поверхні інструмента може бути поділена на декілька областей. Перша область, позначена як Q_1 , включає місце контакту стружки з передньою поверхнею леза різця.

Механічна робота, що витрачається на пластичне деформування та руйнування металу, також може бути розподілена на різні області. Область з найбільшими пластичними деформаціями, відома як площина сколювання, позначена як Q_2 .

Нарешті, робота сил тертя на задній поверхні леза інструмента може бути виділена у третій області. Ця область (Q_3) включає місця контакту задніх поверхонь інструмента з поверхнями оброблюваної заготовки[11].

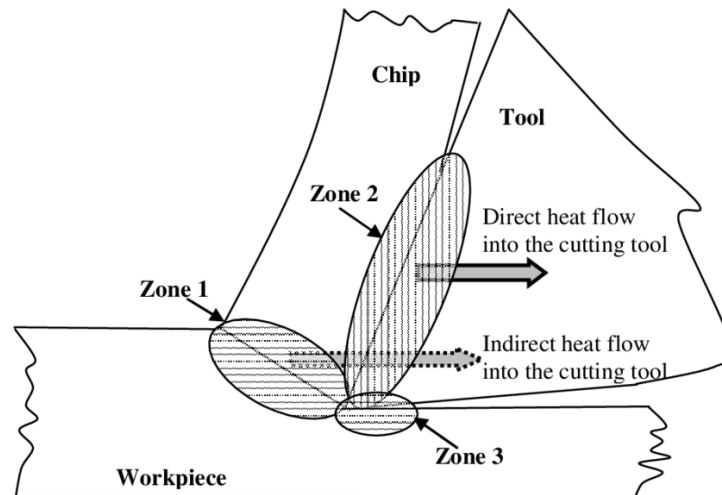


Рис. 10 – Зони теплоутворення при утворенні стружки [12].

Оскільки процес різання зазвичай є тривалим і стійким, теплота, що безперервно виділяється протягом роботи, також безперервно відводиться з зони різання(рис. 10) .

Головними джерелами відведення тепла (q_i) є:

1. Частка теплоти, що йде у заготовку, позначена як q_1 . Це менша частина теплоти Q_1 , яка передається заготовці.
2. Частка теплоти, що йде у стружку, позначена як q_2 . Це більша частина теплоти Q_1 , яка передається стружці.
3. Кількість теплоти, що нагріває стружку, позначена як q_3 . Це складова теплоти Q_2 , яка використовується для нагріву стружки.
4. Підсумковий потік теплоти, що нагріває ріжучу частину різця і поширюється по його об'єму, позначений як q_4 . Це складова теплоти Q_2 .
5. Підсумковий потік теплоти, що нагріває ріжучу частину різця, позначений як q_5 . Це складова теплоти Q_3 .
6. Кількість теплоти, що проникає в заготовку і нагріває її, позначена як q_6 . Це складова теплоти Q_3 .

Аналіз співвідношення цих складових витрат теплоти[13] показує, що найбільшу значимість мають складові $q_1 + q_2$, оскільки основну частину теплоти виносить стружка. Сума складових $q_3 + q_4$, що відводиться в тіло різця, зменшується при збільшенні швидкості різання і становить невелику частку від загальної кількості відведеної теплоти. З іншого боку, третя складова $q_5 + q_6$, яка виражає кількість теплоти, що передається в заготовку, збільшується зі зростанням швидкості різання.

2.2 Теплове поле різального інструменту

Частина теплоти, яка надходить до різця, розподіляється між підвищенням температури ріжучого леза і поширенням по всьому тілу різця. Швидкість поширення теплового потоку залежить від таких основних факторів: теплопровідність, маса, температура ріжучої частини і корпусу різця. Температурне поле в різці можна графічно зобразити у вигляді ряду ізотерм.

Нагрівання різального леза відбувається нерівномірно. Найвищу температуру спостерігають на передній поверхні інструмента, а по мірі наближення до вершини ріжучої частини температура поступово зменшується. Віддаляючись від передньої поверхні, температура в різальному лезі змінюється повільніше, ніж в стружці.(див. рис. 11).

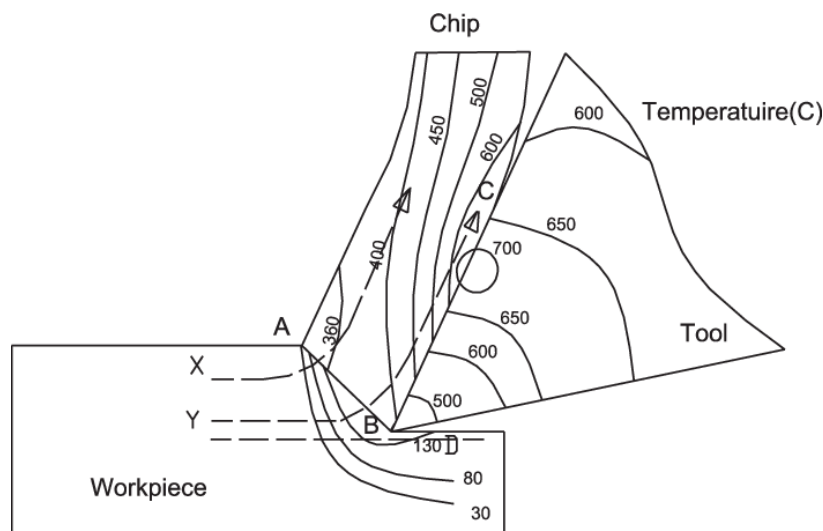


Рис. 11 – Типові розподіли температури в зоні різання[14].

Температурне поле на передній поверхні різця на рисунку 11, згідно з результатами аналізу І.Лазоглу, зображено на рисунку 12. [15].

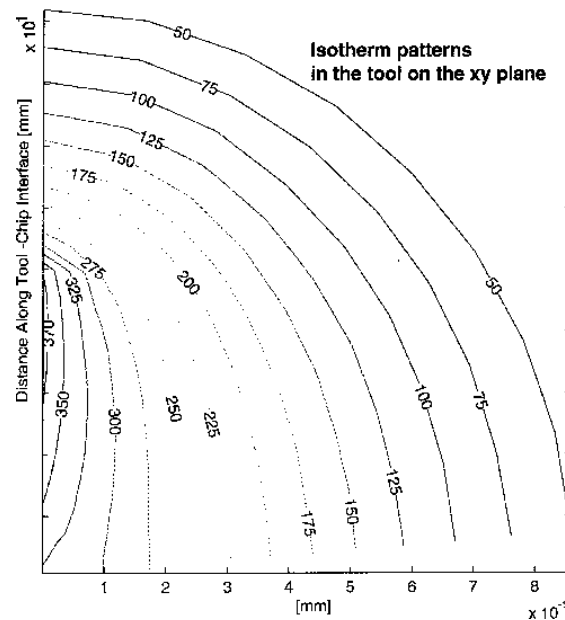


Рис. 12 – Температурне поле на передній поверхні різця[15].

Під впливом високих температур матеріали інструменту поступово втрачають свою міцність, твердість та зносостійкість. Значення температуростійкості, при якому спостерігаються ці процеси, залежить від хімічних та структурних властивостей матеріалу і є унікальним. Високі температури призводять до зменшення зносостійкості матеріалу, збільшення інтенсивності зношування та скорочення періоду експлуатації інструменту.

Аналізуючи результати досліджень, можна зробити висновок, що найбільший вплив високих температур спостерігається на передній поверхні леза та прилеглому граничному шарі. У цих областях збігаюча стружка інтенсивно зношує лезо при надвисоких температурах, що прискорює його зношування. Задня поверхня леза менше піддається дії високих температур, але з часом роботи різця вона також нагрівається, а в кінці періоду стійкості може перевищити температуростійкість інструменту. Високі температури скорочують термін експлуатації різця.

2.3 Деформація та тертя в контактній зоні

Під час різання металу виділяються дві основні зони деформації: в місцях зсуву робочого матеріалу та поблизу ріжучої кромки, де спостерігаються високі швидкості деформації та температури. Крім того, поблизу ріжучої кромки та контакту інструмент-стружка утворюється зона вторинного зсуву. Поведінка робочого матеріалу під час деформації в цих первинних і вторинних зонах дуже чутлива до умов різання. В околицях місць розподілу "інструмент-стружка" та навколо ріжучої кромки можуть виникати високі напруження та температури, що в певних умовах різання призводить до швидкого зносу та пошкодження інструменту.

Для поліпшення якості оброблюваних поверхонь, підвищення зносостійкості інструменту та загальної продуктивності використовують моделювання методом скінчених елементів (FE). Цей метод дозволяє визначити оптимальні умови різання, точно прогнозувати зміну напруження та температури, вибрати матеріал інструменту, геометрію кромки та покриття [16].

Найбільш поширеною моделлю для моделювання високошвидкісної деформації є модель Джонсона-Кука. Згідно з даною моделлю, залежність напружень $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ пластичної деформації від деформації ε , швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$ та температури T може бути описана наступним співвідношенням [17]:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 - C \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - T^{*m}], \quad (2.2)$$

де ε – ефективна пластична деформація; A, B, C, n, m – емпірично визначені параметри моделі; $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ – безрозмірна швидкість пластичної деформації ($\dot{\varepsilon}_0 = 0.1 \text{ s}^{-1}$); $T^* = \frac{T-T_e}{T_m-T_e}$ є гомологічною температурою, де T_m – температура плавлення матеріалу заготовки, T_e – температура навколишнього середовища.

Процес деформації руйнування може бути визначений співвідношенням [18]:

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 + D_5 T^*), \quad (2.3)$$

де $D_i (i=1, \dots, 5)$ – параметри матеріалу; σ^* – коефіцієнт жорсткості напруженого стану.

Модель руйнування описує історію пошкодження кожного елемента за допомогою параметра пошкоджуваності $D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_f}$. Коли $D > 1$ елемент руйнується.

Через дуже високий нормальний тиск на поверхні, в зоні контакту між інструментом та стружкою впливають різні фактори, такі як: швидкість різання, швидкість подачі, кут нахилу та інші. Оцінка тертя на межі інструмент-стружка є складною задачею. Вона може бути виражена як залежність між нормальним і фрикційними напруженнями на ріжучій поверхні інструменту. Найкращим способом визначити характеристику тертя на контакті інструмент-стружка є безпосереднє вимірювання напружень під час фактичного процесу різання металу. Однак цей метод є складним і може забезпечити лише приблизний розподіл напружень. Тому метод скінчених елементів може бути використаний для отримання реальної залежності нормальних напружень та тертя на інтерфейсі інструмент-стружка під час сухого ортогонального різання. Цей метод дозволяє отримати більш точні результати і враховувати різноманітні фактори, що впливають на тертя на межі контакту.

Аналіз існуючих досліджень механічної обробки показав, що напруження тертя, τ_f , на поверхні різальної грані інструменту вважається пропорційним

нормальним напруженням, σ_n , з коефіцієнтом тертя μ , на основі кулонівського тертя(2.4).

$$\tau_f = \mu \sigma_n \quad (2.4)$$

Умови тертя на інтерфейсі інструмент-стружка в ранніх моделях FE різання металу були в основному проігноровані або вважалися постійними з постійним коефіцієнтом тертя на основі закону Кулона.

Середній коефіцієнт тертя між інструментом та стружкою при ортогональному різанні, як правило, обчислюється на основі вимірених сил різання, як подано в рівнянні (2.5) [19]:

$$\mu = \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c - F_t \tan \alpha} \quad (2.5)$$

Дослідники [20] вивели емпіричне рівняння характеристики напружень як модель тертя на контакті інструмент-стружка, як подано в рівнянні (2.6) :

$$\tau_f = k [1 - e^{-(\mu \sigma_n / k)}], \quad (2.6)$$

де k – напруга зсувного потоку місцевого робочого матеріалу, а коефіцієнт тертя, μ , отримується в результаті експериментів для різних комбінацій матеріалу заготовка-інструмент.

Слід відзначити, що значення коефіцієнта тертя, що використовуються при аналітичному та чисельному моделюванні різання металу, зазвичай нижчі, ніж ті, що вимірюються в експериментах з ортогональним різанням. Моделі зазвичай використовують значення коефіцієнта тертя $\mu = 0-0,5$, тоді як експериментальні дані можуть показувати значення, що перевищують 1 або наближаються до 2 [21].

Моделювання методом скінчених елементів може прогнозувати розподіл напружень в інструменті, оскільки інструмент розглядається як пружне тіло. Це означає, що можна отримати докладні результати щодо напружень, що

виникають у різних ділянках інструменту під час різання металу. Застосування моделювання методом скінчених елементів дозволяє краще розуміти поведінку інструменту та виконати оптимізацію його конструкції для поліпшення якості різання та тривалості його роботи.

Висновки до 2-го розділу

У другому розділі було проведено аналіз теплових явищ, що виникають в різальній пластині під час обробки металів різанням. Побудовано рівняння теплового балансу. В результаті досліджень було визначено зони, які найбільше піддаються впливу високих температур та швидко деформуються. Найкраще дослідити зони деформацій і умови тертя можна за допомогою методу скінчених елементів. Цей метод дозволяє визначити оптимальні умови різання, прогнозувати зміну напружень та температури, вибирати матеріал інструменту, геометрію кромки та захисного покриття.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЯ

1.1 Математична модель

Давайте розглянемо пластину розміром $L_x \times L_y$ (рис. 13), яка використовується для різання матеріалу. Припустимо, що теплове навантаження Q розподіляється рівномірно вздовж однієї зі сторін пластини на ділянці T_k . На верхню сторону пластини нанесено i -те покриття, яке має товщину $h_1 = L_y - y_{i-1}^*$, $h_2 = y_{i-1}^* - y_{i-2}^*$, ..., $h_i = y_{i-1}^* - y^*$, де y^* - висота покриття. Припустимо, що інші сторони пластини є теплоізолюваними, а температурне поле не залежить від координати z . Сформулюємо математичну постановку задачі, враховуючи ці умови.

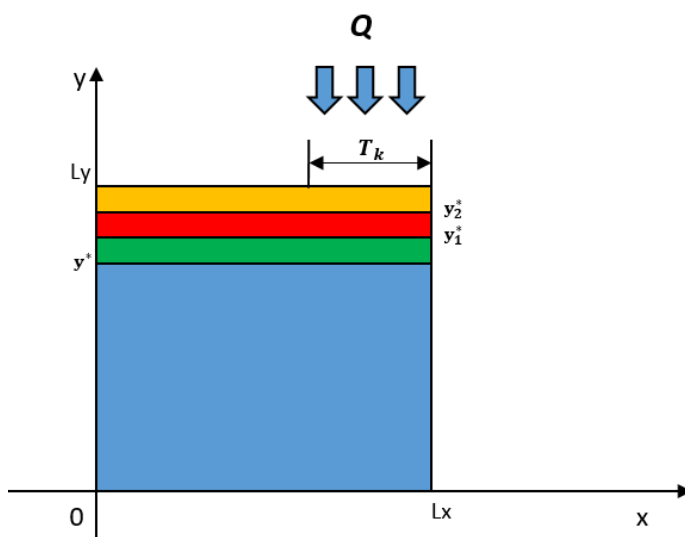


Рисунок 13. Приклад схематичного зображення пластини із тришаровим захисним покриттям що знаходиться під частковим впливом джерела тепла

Математична постановка задачі представлена наступною системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 < x < Lx \\ 0 < y < y^* \end{array} \right. \\ \dots \\ \rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 < x < Lx \\ y_{i-2}^* < y < y_{i-1}^* \end{array} \right. \\ \rho_{i+1} c_{i+1} \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{i+1} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad \left\{ \begin{array}{l} 0 < x < Lx \\ y_{i-1}^* < y < Ly^i \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (3.0.1)$$

де ρ_i , c_i та λ_i - густина, питома теплоємність та теплопровідність відповідно для кожного шару пластини.

Початкові умови визначаються таким чином:

$$t = 0: T = T_0, \quad 0 < x < Lx, \quad 0 < y < Ly \quad (3.0.2)$$

де T_0 - початкова температура (наприклад, 20°C).

Задаємо граничні умови задачі:

1. Умова теплового переносу з оброблюваної деталі до різця. Це гранична умова третього роду:

$$y = Ly: \frac{Lx}{2} < Lx, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k(T_k - T_0), \quad t > 0. \quad (3.0.3)$$

2. Умова постійної температури на державку різця. Це гранична умова першого роду:

$$y = 0: T = T_0, \quad t > 0. \quad (3.0.4)$$

3. Умова теплового переносу з навколишнім середовищем Це гранична умова третього роду.:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = 0, x = Lx \\ 0 < x < \frac{Lx}{2}, y = Ly^i \end{array} \right. -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = k(T_c - T_0), \quad t > 0, \quad k > 0. \quad (3.0.5)$$

де T_c - температура навколишнього середовища, k - коефіцієнт теплообміну між навколишнім середовищем і ріжучим інструментом.

4. Умова теплового переносу між шарами пластини. На границях y^* , y_1^* , ... та y_{i-1}^* використовуються граничні умови четвертого роду, оскільки це умови на поверхнях $i+1$ тіл, які мають різні коефіцієнти теплопровідності. Будемо вважати, що між пластиною та захисними шарами відбувається ідеальний контакт.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, y^*) = T_2(t, y^*) \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ T_i(t, y_{i-1}^*) = T_{i+1}(t, y_{i-1}^*) \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=y^*} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=y^*} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \\ -\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=y_{i-1}^*} = -\lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial y} \Big|_{y=y_{i-1}^*} \end{array} \right. \quad (3.0.6)$$

Таким чином, ми сформулювали математичну модель, що враховує рівняння теплопровідності та граничні умови для даної структури об'єкта.

3.2 Метод скінчених різниць

Для розв'язання даної задачі був обраний метод скінчених різниць, зокрема поздовжньо-поперечна схема. Цей метод дозволяє апроксимувати похідні різницевиими співвідношеннями і зводить задачу до системи алгебраїчних рівнянь.

Для апроксимації системи диференціальних рівнянь (3.0.1) за допомогою методу скінчених різниць вводиться просторово-часова сітка з вузлами:

$$x_i = (i - 1) * h_x, \quad y_i = (y - 1) * h_y, \quad t_n = n * \tau, \quad (3.0.7)$$

Крок сітки по координаті x позначається як h_x , крок сітки по координаті y - h_y , а крок по часу - τ .

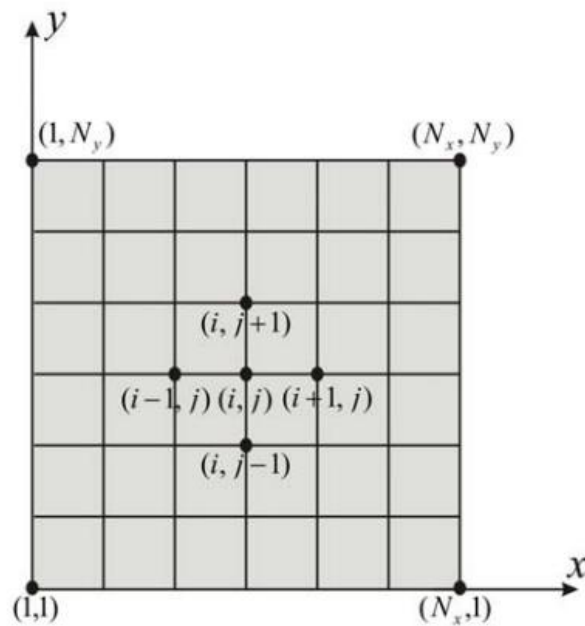


Рис. 14 – Різницева сітка поставленої задачі.

Введемо позначення:

$$T(x_i, y_j, t_n) = T_{i,j}^n. \quad (3.0.8)$$

Для дискретизації рівнянь застосовується одновимірна схема Самарського[22]. Ця схема передбачає дискретизацію рівняння за часовим кроком для вісі x , а потім аналогічні дії проводяться для вісі y . Таким чином, отримується поле температур на кожному часовому кроці.

Для заміни диференціальних операторів використовуються кінцево-різницеві аналоги:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^n}{\tau}, \quad (3.0.9)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_x^2}, \quad (3.0.10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau}, \quad (3.0.11)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1}}{h_y^2}. \quad (3.0.12)$$

Система дифференціальних рівнянь (3.0.1) перетвориться в систему алгебраїчних рівнянь(3.0.13-3.0.14):

$$\left\{ \begin{array}{l} p_i * c_i * \frac{T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^n}{\tau} = \lambda_i \left(\frac{T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_x^2} \right), \quad (3.0.13) \\ p_i * c_i * \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} = \lambda_i \left(\frac{T_{i+1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1}}{h_y^2} \right). \quad (3.0.14) \end{array} \right.$$

Рівняння (3.0.13) включає дискретизацію за часовим кроком і просторовою дискретизацією за віссю x. Це рівняння може бути розв'язане методом прогонки. Після розв'язання цієї системи переходимо до рівняння (3.0.14) з аналогічними перетвореннями.

Таким чином, застосування методу скінчених різниць дозволяє отримати чисельний розв'язок задачі шляхом розв'язання системи алгебраїчних рівнянь, що апроксимують початкову систему дифференціальних рівнянь.

3.3 Обчислення фазових портретів за допомогою методу фазової площини.

Згідно з синергетичною концепцією процесів пластичної деформації[23], деформаційні зміни, напруження та густина дефектів взаємодіють та самоорганізуються. Цю взаємодію можна описати системою диференціальних рівнянь, які містять нелінійні доданки. Графічне представлення розв'язків таких систем називається фазовими портретами.

У даному випадку була використана модель поверхневої плівкової структури для зміцнення та підвищення термічної стабільності різального інструменту. Для аналізу цієї моделі ми маємо систему рівнянь[24]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon + \sigma; \end{array} \right. \quad (3.1.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{\sigma} \frac{d\sigma}{dt} = -\sigma + g(T - 1)\varepsilon; \end{array} \right. \quad (3.1.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_T \frac{dT}{dt} = (T_e - T) - \sigma\varepsilon. \end{array} \right. \quad (3.1.3)$$

де введені часи релаксації напружень (τ_{σ}), температури (τ_T) та деформації (τ_{ε}). Температура (T_e) представляє температуру вдалині від поверхні різання (термостата), а стала (g) є значенням меншим за одиницю. Ці рівняння формально впливають з синергетичної системи Лоренца, де деформація виступає як параметр порядку, спряжене поле пов'язане з напруженням, а температура виступає як керуючий параметр.

Для визначення фазових портретів системи, використаємо метод фазової площини. Точний їх вигляд знаходиться шляхом числового інтегрування рівнянь методом Рунге–Кутти 4-го порядку точності [25]. Фактично, система рівнянь (3.1.1)–(3.1.3) є безрозмірною, але для зручності введемо введемо

масштаб часу за допомогою величини $\tau\varepsilon$. Оскільки $\tau\sigma \ll \tau\varepsilon, \tau T$, то можна підставити $d\sigma/dt = 0$ в рівняння (3.1.2), що дає зв'язок (3.1.4). Підстановка цього зв'язку в систему (3.1.1), (3.1.3) приводить до системи (3.1.5), (3.1.6).

$$\sigma = g(T - 1)\varepsilon, \quad (3.1.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_\varepsilon \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon + g\varepsilon(T - 1); \\ \tau_T \frac{dT}{dt} = (T_e - T) - g(T - 1)\varepsilon^2. \end{array} \right. \quad (3.1.5)$$

$$(3.1.6)$$

Введемо безрозмірний час $z = t/\tau\varepsilon$ і параметер $\tau \equiv \tau T/\tau\varepsilon$. Для визначення стійких станів системи за допомогою методу фазової площини, необхідно знайти координати особливих точок. Для цього розділимо (3.1.5) на (3.1.6) і отримаємо (3.1.7).

$$\frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{-\varepsilon + g\varepsilon(T - 1)}{\tau^{-1} [(T_e - T) - g(T - 1)\varepsilon^2]}. \quad (3.1.7)$$

З використанням (3.1.7) знайдемо особливі точки фазової площини, в яких напрям дотичної до фазової траєкторії $\varepsilon = \varepsilon(T)$ є невизначеним. Для цього напишемо систему рівнянь $d\varepsilon/dT = 0$, $d\varepsilon/dT = \infty$:

$$-\varepsilon [1 - g(T - 1)] = 0, \quad (3.1.8)$$

$$\tau^{-1} [(T_e - T) - g(T - 1)\varepsilon^2] = 0. \quad (3.1.9)$$

Розглянемо можливі випадки.

1) $\varepsilon = 0$. Підставимо $\varepsilon = 0$ в (3.1.9) і отримаємо $T = T_e$. Таким чином, перша особлива точка має координати $D(T_e, 0)$.

2) $\varepsilon \neq 0$. У цьому разі вираз зліва в (3.1.8) дорівнює нулю, якщо вираз у квадратних дужках дорівнює нулю. Одержимо критичну температуру різання $T_c = 1 + g^{-1}$. Підставимо її у (3.1.9) і отримаємо координати другої точки $O(T_c, \sqrt{T_c - T_c})$.

Знайдемо показники Ляпунова для особливих точок.

1) Для точки $D(T_c, 0)$ показник Ляпунова має вигляд:

$$\lambda_D = \frac{1}{2} [g(T_c - 1) - \tau^{-1} - 1] \left\{ 1 \pm \sqrt{1 + 4\tau^{-1} \frac{g(T_c - 1) - 1}{[\tau^{-1} - g(T_c - 1) + 1]^2}} \right\}. \quad (3.1.10)$$

2) Для точки $O(T_c, \sqrt{T_c - T_c})$:

$$\lambda_O = \frac{1}{2\tau} \left[(1 + g\sqrt{T_c - T_c}) \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - 8\tau \frac{g(T_c - T_c)}{(1 + g\sqrt{T_c - T_c})^2}} \right\} \right]. \quad (3.1.11)$$

Для визначення виду особливих точок необхідно визначити, за яких значень параметрів показники Ляпунова набувають комплексних, а за яких — дійсних значень.

Для точки D показники λ_D будуть дійсними, якщо підкореневий вираз в (3.1.10) буде невід'ємним:

$$1 + 4\tau^{-1} \frac{g(T_c - 1) - 1}{[\tau^{-1} - g(T_c - 1) + 1]^2} \geq 0. \quad (3.1.12)$$

Аналіз останнього виразу показує, що показники Ляпунова можуть мати лише дійсні значення, тобто точка D є вузлом. Для точки O показники Ляпунова

мають вигляд (3.1.11). Із співвідношення $\varepsilon = \sqrt{T_e - T_c}$, випливає, що точка реалізується лише при $T_e > 1 + g^{-1}$, оскільки ε — фізична величина, що не може набувати комплексних значень. Тобто точка O може бути лише фокусом.

Аналіз показників Ляпунова показує, що при значеннях $0 < T_e < T_c$ точка D є стійким вузлом. Оскільки при таких значеннях T_e точка O не реалізується, можна зробити висновок, що з плином часу система еволюціонує до стаціонарного теплового режиму, відповідного точці D . При $T_e > T_c$ одержимо стійкий фокус O .

3.4 Результати роботи програми

Дослідження було проведено з використанням середовища MATLAB для моделювання теплових та деформаційних процесів під час обробки плоскої пластини різанням. Були обчислені теплові та деформаційні поля для різних варіантів пластини, зокрема без покриття, з одношаровим покриттям TiN, з двошаровим покриттям TiCN/ α -Al₂O₃, з двошаровим покриттям TiN/ α -Al₂O₃ та з тришаровим покриттям TiN/ α -Al₂O₃/TiCN.

Розрахунки проводилися за допомогою математичних співвідношень, які були використані раніше. Код програми, використаний для обчислень, наведений в додатку А.

Для проведення розрахунків використовувалися відповідні термофізичні властивості матеріалу, які можна знайти в таблиці 3[26].

Таблиця 3

Temperature dependent mechanical and thermal properties of cutting tool system(900 °C)[26]

	AISI/SAE 1045	TiN	α -Al ₂ O ₃	TiCN
Density (ρ), kg/m ³	7844	5420	3780	4180
Specific heat capacity	873.6	857.6	1252	1810

(c), J/(kg·°C)				
Thermal conductivity (λ), W/(m·°C)	25.75	25.5	5.5	35

Аналізуючи фазовий портрет пластичної деформації, було виявлено наявність двох особливих точок для поверхні з покриттям і без покриття (рис. 15). Проведено розрахунки для різних значень параметрів $T_e = 2.5$, $T_e = 4$ та $T_e = 5$, при $g = 0.5$ та $\tau = 1$.

Спостерігається еволюція системи у точці $D(T_e, 0)$ в стаціонарному стані відповідно до графіка, наведеного на рис. 15 (а, б). У передкритичній області, де $T_e \leq T_c$, система демонструє стійкий вузол. Це спостерігається для пластини без покриття (рис. 15 а) та з одношаровим покриттям TiN (рис. 15 б). З графіків 15 (а, б) видно, що температурні поля і фазові портрети майже ідентичні, що свідчить про незначну зміну процесів теплопередачі при застосуванні моношарового нітридного покриття TiN порівняно з інструментами без покриття.

Пластини з двошаровими або тришаровими покриттями характеризуються збільшенням густини матеріалу і зменшенням теплового потоку від тертя в зоні різання. Збільшення густини дислокацій у поверхневому покритті призводить до помітного впливу релаксації напружень. При $T_e > T_c$ спостерігається стійкий фокус O (рис. 15 в, г, ґ). Це спостерігається для пластини з двошаровими покриттями TiCN/ α -Al₂O₃ (рис. 15 в), TiN/ α -Al₂O₃ (рис. 15 г) та з тришаровим покриттям TiN/ α -Al₂O₃/TiCN (рис. 15 ґ).

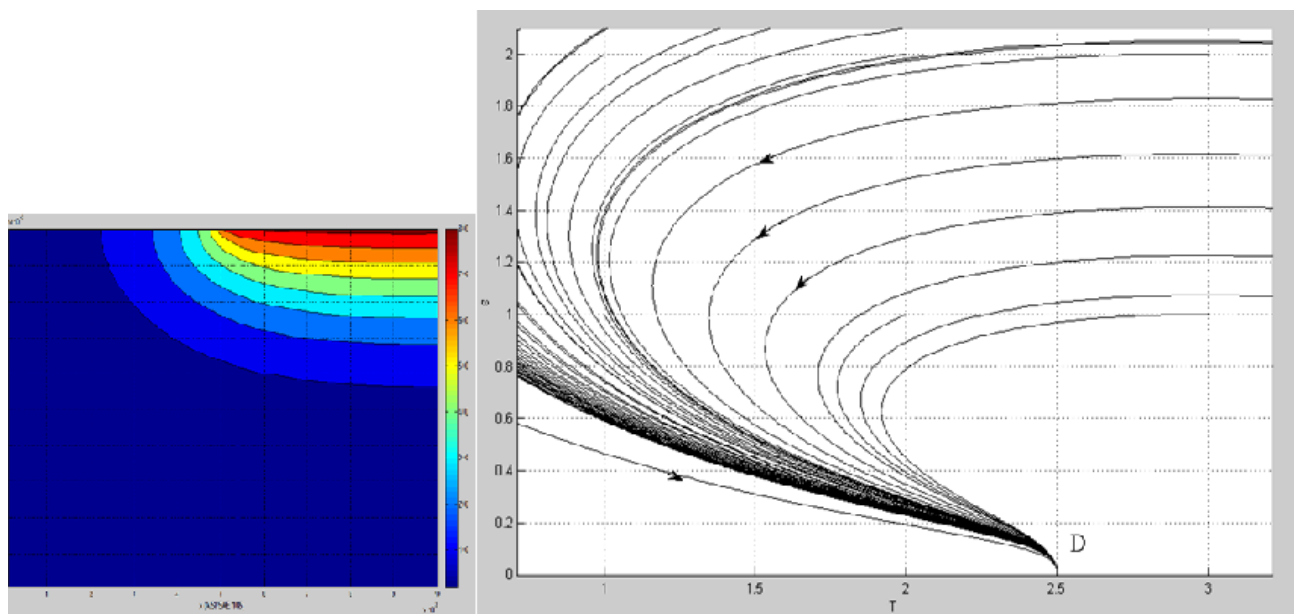
Результати показують, що зі зростанням параметра $\tau = \tau_T/\tau_e$ траєкторії обертаються навколо особливої точки. Цей стан відповідає повільній зміні температури та швидкій зміні напружень, що характерно для переривчастого режиму оброблення різанням. При малих або незначних зниженнях напружень

пластична деформація розвивається у режимі, подібному до плазучості (рис. 15 (а, б)), при цьому не відбувається втрата стійкості.

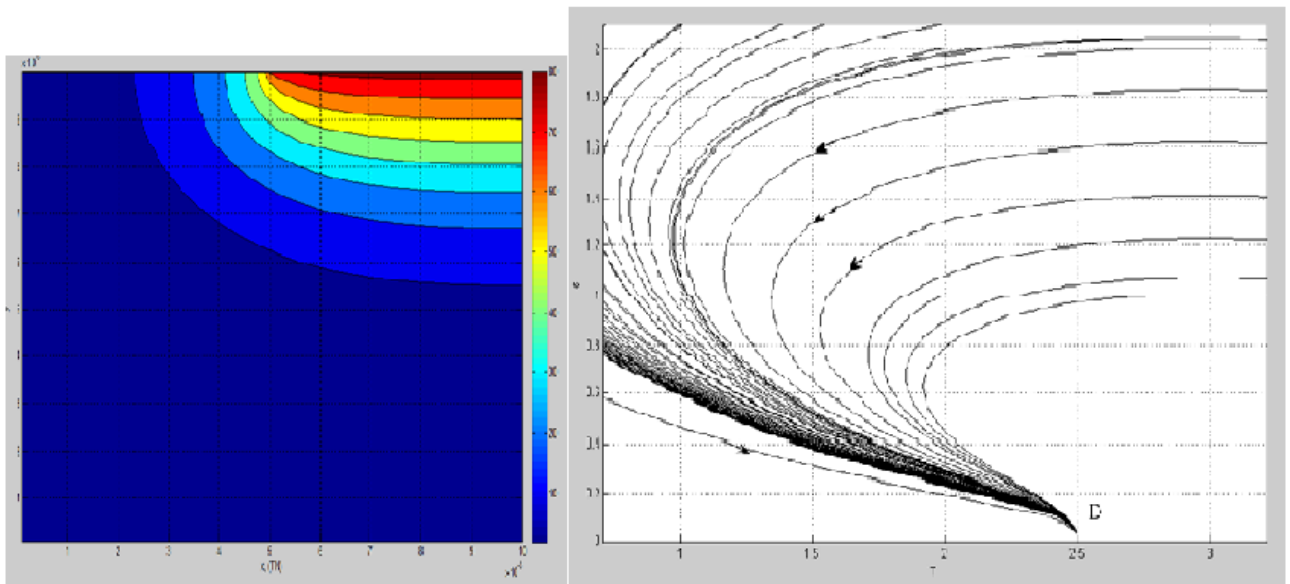
Зі зростанням густини дислокацій, що характерно для багат шарових покриттів, вони колективно впливають на поведінку ансамблю дефектів, і процеси релаксації напружень стають суттєвими [27].

Максимальний ефект на теплове і деформайне поле ріжучої твердосплавної пластини забезпечує тришарове покриття TiN/Al₂O₃/TiCN.

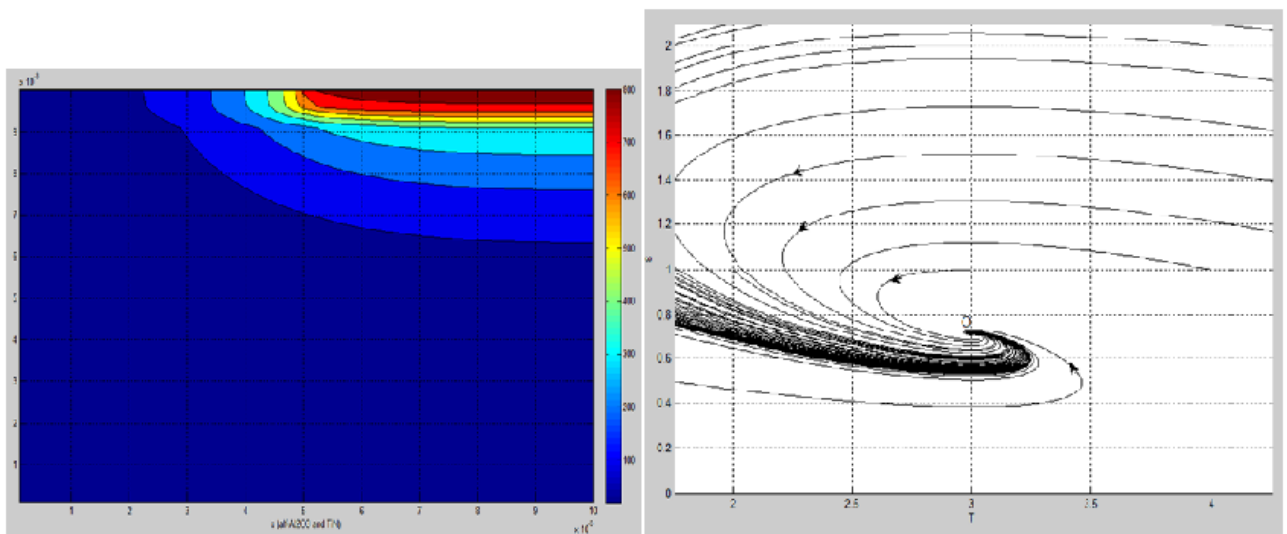
Рисунок 15. Температурне поле пластини і відповідний фазовий портрет пластичної деформації:



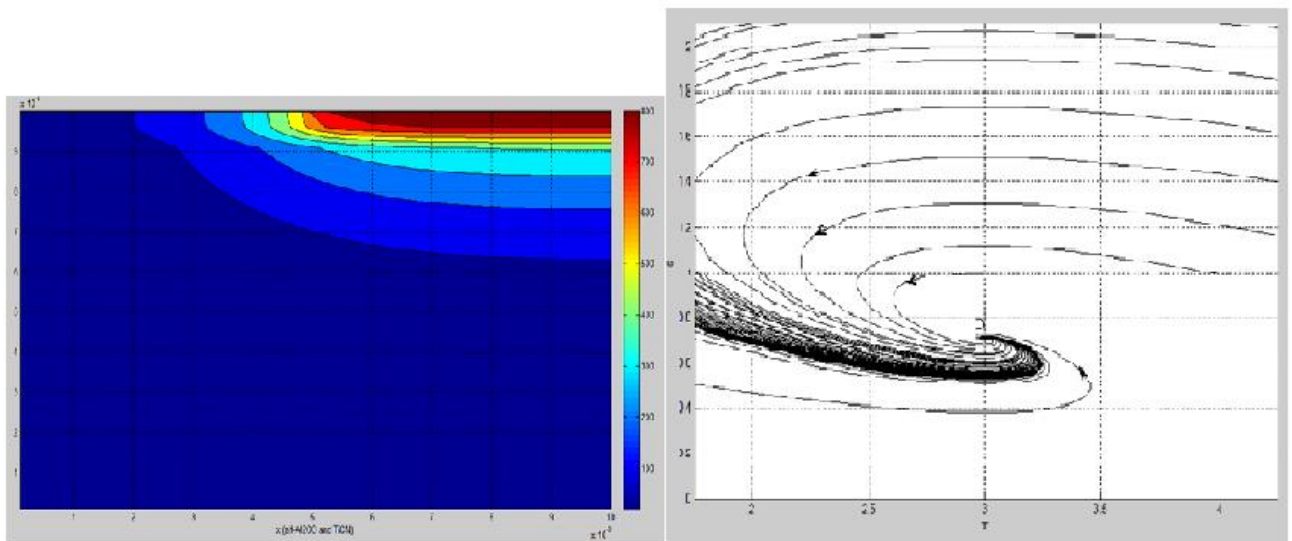
а) для пластини без покриття (AISI/SAE 1045); вхідні параметри (фазовий портрет): $T_e = 2.5$, $g = 0.5$, $\tau = 1$



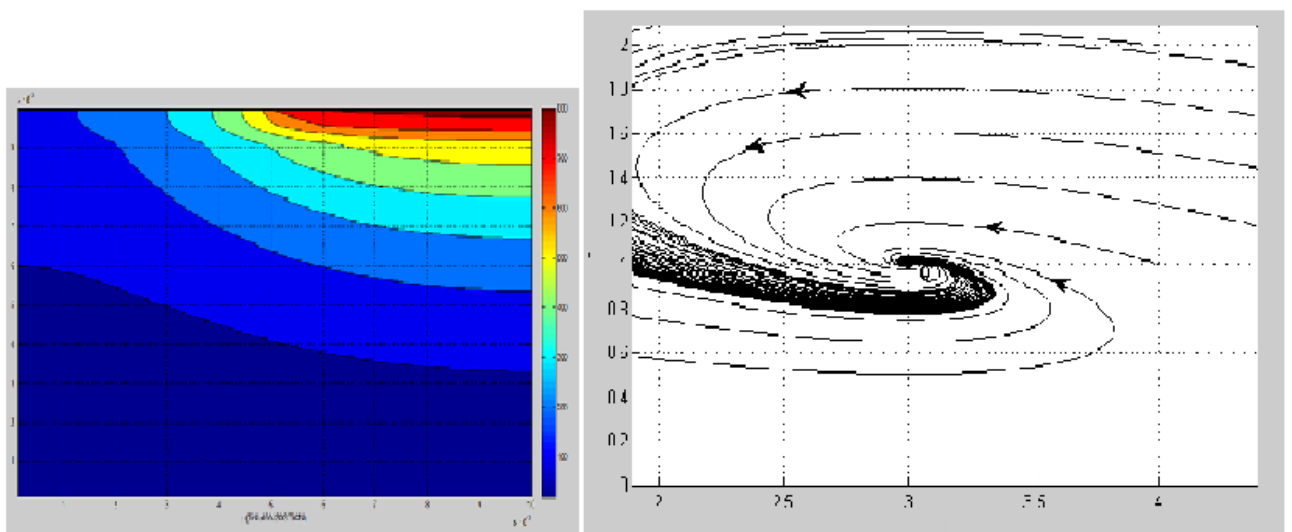
б) для пластини з одношаровим покриттям (TiN / AISI/SAE 1045); вхідні параметри (фазовий портрет): $T_e = 2.5$, $g = 0.5$, $\tau = 1$



в) для пластини із двошаровим покриттям (TiCN/ α -Al₂O₃ / AISI/SAE 1045); вхідні параметри (фазовий портрет): $T_e = 4$, $g = 0.5$, $\tau = 1$



г) для пластини із двошаровим покриттям ($\text{TiN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ / AISI/SAE 1045);вхідні параметри(фазовий портрет): $T_e = 4$, $g = 0.5$, $\tau = 1$



г) для пластини із тришаровим покриттям ($\text{TiN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ / TiCN/ AISI/SAE 1045);вхідні параметри(фазовий портрет): $T_e = 5$, $g = 0.5$, $\tau = 1$

ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу наукових досліджень з моделювання теплових та деформаційних процесів у багатошарових нанокompозитних тонкоплівкових системах було встановлено, що математичне моделювання є основним методом для вивчення впливу захисних покриттів на різальний інструмент. Дослідники провели моделювання теплових і деформаційних полів для різучої пластини з різними типами захисних покриттів і отримали важливі результати.
2. Описано фізичну модель задачі, що включала в собі рівняння теплового балансу, а також вивчення основних джерел виділення та відведення тепла з зони стружкоутворення. Була визначена зона максимального нагріву і деформаційних змін в різальній пластині з захисними покриттями.
3. Побудована математична модель теплових і деформаційних полів для пластини з різними типами захисних покриттів за допомогою методу кінцевих різниць та методу фазової площини відповідно.
4. Створено комп'ютерну програму, яка реалізує побудовану математичну модель. Результати роботи програми показали, що для підвищення зносостійкості різального інструменту найкраще використовувати тришарове захисне покриття $\text{TiN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCN}$.
5. Дослідження показали, що на поверхні без покриття та з одношаровим покриттям спостерігається повільна зміна температури та швидка зміна напружень. Однак, використання двошарового або тришарового покриття з високою густиною дислокацій суттєво впливає на релаксацію напружень.

СПИСОК ВИКРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. СОТНІКОВ, А. Сучасний стан машинобудівної галузі України та перспективи впровадження прогресивних систем управління. *Економічний аналіз*, 2013, 12 (4): 60-64.
2. КРАСОТА, М. В., et al. Дослідження методів обробки порошкових покриттів. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, 2011, 24 (2): 59-66.
3. БЕЗУМОВА, Ольга Олексіївна. Плазмове субмікро і наноструктурування різьбонарізного інструменту. 2021.
4. ПОГРЕБНЯК, Олександр Дмитрович, et al. Встановлення закономірностей взаємозв'язку між структурним станом, механічними можливостями і режимами іонно-плазмової обробки нанокомпозитних карбонітридних покриттів та розробка технологічних основ і обладнання для іонно-плазмового азотування матеріалів. Сумський державний університет, 2021.
5. КУБІЧ, Вадим Іванович, et al. Довідкове видання «Термінологічний словник-довідник з трибології, надійності та нанотехнологій». 2016.
6. Anders Nordgren*, Baktash Zargari Samanib, Rachid M'Saoubic
Experimental Study and Modelling of Plastic Deformation of Cemented Carbide Tools in Turning Selection and peer-review under responsibility of the International Scientific Committee of the 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting doi: 10.1016/j.procir.2014.03.021 Anders Nordgren et al. / Procedia CIRP 14 (2014) 599 – 604
7. HE, Xiaocong; GU, Fengshou; BALL, Andrew. A review of numerical analysis of friction stir welding. *Progress in Materials Science*, 2014, 65: 1-66.
8. Du, Jin & Hao, Tianmei & Zhang, Xue & Su, Guosheng & Zhang, Peirong & Sun, Yujing & Zhang, Jingjie & Xu, Chonghai. (2022). Finite element investigation of cutting performance of Cr/W-DLC/DLC composite coated

- cutting tool. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 118. 10.1007/s00170-021-08093-0.
9. NASR, Mohamed NA; NG, E.-G.; ELBESTAWI, M. A. Modelling the effects of tool-edge radius on residual stresses when orthogonal cutting AISI 316L. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47.2: 401-411.
 10. FOX-RABINOVICH, German, et al. The Relationship between Cyclic Multi-Scale Self-Organized Processes and Wear-Induced Surface Phenomena under Severe Tribological Conditions Associated with Buildup Edge Formation. Coatings, 2021, 11.8: 1002.
 11. АНТОНЮК, В. С.; КЛИМЕНКО, С. АН; КЛИМЕНКО, С. А. Теплові явища при обробці матеріалів різанням. 2014.
 12. FAHAD, Muhammad. A heat partition investigation of multilayer coated carbide tools for high speed machining through experimental studies and finite element modelling. The University of Manchester (United Kingdom), 2012.
 13. A.N. Reznikov, Thermal physics of processes of mechanical processing of materials (1981), p. 279.
 14. PALANISAMY, P., et al. Prediction of cutting force and temperature rise in the end-milling operation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2006, 220.10: 1577-1587.
 15. LAZOGLU, Ismail; ALTINTAS, Yusuf. Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining. International Journal of Machine tools and manufacture, 2002, 42.9: 1011-1022.
 16. T. Ozel, Int. J. Mach. Tools Manuf., 46: 518 (2006).
[doi:10.1016/j.ijmachtools.2005.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.07.001)
 17. SCHWER, Len. Optional Strain-rate forms for the Johnson Cook Constitutive Model and the Role of the parameter Epsilon_0. In: 6th European LS_DYNA Users' conference. 2007. p. 1-17.

- 18.G.R. Johnson, and W.H. Cook, *Engineering Fracture Mechanics*, 21: 31 (1985); [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9)
- 19.N.N. Zorev, *International Research in Production Engineering* (New York: ASME: 1963), p. 165.
- 20.E. Usui, and T. Shirakashi, *Proceedings of the winter annual meeting of the American Society Mechanical Engineers*, 7: 13 (1982).
- 21.N. Maharjan, W. Zhou, and N. Wu, *Surf. Coat. Technol.*, 385: 125399 (2020).
- 22.Самарський А. А. Теорія різницевих схем. М. 1977. – 656 с.
- 23.Haken, H (1978). *Synergetics :an introduction: nonequilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry, and biology*. Berlin New York: Springer-Verlag.
- 24.Khomenko, M. Khomenko, B. Persson, and K. Khomenko, *Tribology Letters*, **65**, No. 2: 71 (2017).
- 25.БІЛОУС, Д. О., et al. Вплив захисних нанокompозитних покриттів на стан теплових та деформаційних полів у різальній пластині. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*, 2022, 44.11: 1495-1508.
- 26.An investigation of multilayer coated (TiCN/Al₂O₃-TiN) tungsten carbide tools in high speed cutting using a hybrid finite element and experimental technique M Fahad*, P T Mativenga, and M A Sheikh School of Mechanical, Aerospace, and Civil Engineering, The University of Manchester, Manchester, UK The manuscript was received on 5 November 2010 and was accepted after revision for publication on 1 March 2011. DOI: 10.1177/0954405411404504
- 27.ВОЛЧОК, Іван Петрович, et al. Конспект лекцій «Фундаментальні основи нанотехнологій» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» за освітньою програмою (спеціалізацією)«Композиційні та порошкові матеріали, покриття» денної форми навчання. 2021.

ДОДАТОК А

```

%Температурне поле пластини
clear;
clc;

% Створення сітки
X_size = 0.01;
Y_size = 0.01;
T_total = 1;
h_step = 0.0001;
Tau_step = 0.0001;
Lx = X_size / h_step;
Ly = Y_size / h_step;
x = 0.0001:h_step:X_size;
y = 0.0001:h_step:Y_size;

lambda_1 = 46; %основа
ro_1 = 7800;
c_1 = 476;

lambda_2 = 5.5; % шар Al2O3
ro_2 = 3780;
c_2 = 1252;

% lamda2=(5.5+25.5)/2; шар TiN-Al2O3
% ro2=(3780+5420)/2;
% c2=(1252+857.6)/2;

lambda_3 = 35; % другий шар TiCN
ro_3 = 4180;
c_3 = 1810;

% lamda3=25.5; другий шар TiN
% ro3=5420;
% c3=857.6;

a_1 = lambda_1 / (ro_1 * c_1);
a_2 = lambda_2 / (ro_2 * c_2);
a_3 = lambda_3 / (ro_3 * c_3);

kap_1 = 100;
kap_2 = 100000;

t = 0:Tau_step:T_total;

Q = zeros(Lx, Ly);
Q1 = zeros(Lx, Ly);
Q2 = zeros(Lx, Ly);

T0 = 20;
Te = 20;
Tk = 900;

Q(:, :) = T0;
Q1(:, :) = T0;
Q2(:, :) = T0;

NN = 10;
zz = 50;
N1 = 100 - NN;
N2 = 100 - NN/2;

```

```

zag = 100 - zz;

alf = zeros(1, Ly);
bet = zeros(1, Ly);

time = 0;

while time < T_total
    % Прямий хід прогонки по осі OX

    % Нижня границя
    alf(1) = 0;
    bet(1) = Te;

    for i = 2:Lx
        if i <= N1
            ai = lambda_1 / (h_step * h_step);
            bi = 2 * lambda_1 / (h_step * h_step) + ro_1 * c_1 / Tau_step;
            ci = lambda_1 / (h_step * h_step);
            fi = -ro_1 * c_1 * Q2(i, j) / Tau_step;
        elseif i <= N2
            ai = lambda_2 / (h_step * h_step);
            bi = 2 * lambda_2 / (h_step * h_step) + ro_2 * c_2 / Tau_step;
            ci = lambda_2 / (h_step * h_step);
            fi = -ro_2 * c_2 * Q2(i, j) / Tau_step;
        else
            ai = lambda_3 / (h_step * h_step);
            bi = 2 * lambda_3 / (h_step * h_step) + ro_3 * c_3 / Tau_step;
            ci = lambda_3 / (h_step * h_step);
            fi = -ro_3 * c_3 * Q2(i, j) / Tau_step;
        end

        alf(i) = ai / (bi - ci * alf(i-1));
        bet(i) = (ci * bet(i-1) - fi) / (bi - ci * alf(i-1));
    end

    % Зворотній хід прогонки по осі OX

    Q1(Lx, :) = Tk;

    for i = Lx-1:-1:1
        Q1(i, :) = alf(i+1) * Q1(i+1, :) + bet(i+1);
    end

    % Прямий хід прогонки по осі OY

    for j = 1:Ly
        if j <= N1
            ai = a_1 / (h_step * h_step);
            bi = 2 * a_1 / (h_step * h_step) + ro_1 * c_1 / Tau_step;
            ci = a_1 / (h_step * h_step);
            fi = -ro_1 * c_1 * Q1(j, N1+1) / Tau_step;
        elseif j <= N2
            ai = a_2 / (h_step * h_step);
            bi = 2 * a_2 / (h_step * h_step) + ro_2 * c_2 / Tau_step;
            ci = a_2 / (h_step * h_step);
            fi = -ro_2 * c_2 * Q1(j, N1+1) / Tau_step;
        else
            ai = a_3 / (h_step * h_step);
            bi = 2 * a_3 / (h_step * h_step) + ro_3 * c_3 / Tau_step;
            ci = a_3 / (h_step * h_step);
            fi = -ro_3 * c_3 * Q1(j, N2+1) / Tau_step;
        end
    end
end

```

```

end

alf(j) = ai / (bi - ci * alf(j-1));
bet(j) = (ci * bet(j-1) - fi) / (bi - ci * alf(j-1));
end

% Зворотній хід прогонки по осі OY

Q2(:, Ly) = Tk;

for j = Ly-1:-1:1
    Q2(:, j) = alf(j+1) * Q2(:, j+1) + bet(j+1);
end

% Оновлення значень температур

Q(:, :) = Q2(:, :);
time = time + Tau_step;
end

% Візуалізація результатів
[X, Y] = meshgrid(x, y);
surf(X, Y, Q');
xlabel('x');
ylabel('y');
zlabel('Temperature');
title('Temperature Distribution');
%Залежність деформацій від температури
clear all;
figure;

dt = 0.01;
Tau = 1;
Te = 5; % для тришарового покриття, 4-для двошарового, 2.5-для одношарового
g = 0.5;
for i_val = 0 : 2
    for j_val = 0 : 20
        t = 0;
        epsilon = i_val;
        T = j_val;
        count = 0;
        X = [];
        Y = [];
        for t_val = 0 : dt : 100
            count = count + 1;
            X(count) = epsilon;
            Y(count) = T;
            X1 = epsilon + (-epsilon + g * epsilon * (T - 1)) * dt;
            X2 = T + (Tau^(-1)) * (Te - T - g * epsilon^2 * T - g * epsilon^2) *
dt;
            T = X2;
            epsilon = X1;
        end
        hold on;
        grid on;
        plot(Y, X, 'Color', 'black');
    end
end

axis([0 20 0 4.2]);
xlabel('T');
ylabel('\epsilon');

```