

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**БІЛОУС ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ**

УДК 536.2.02, 536.42, 539.37

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Процеси теплоперенесення та напружено-деформаційні поля у  
багат шарових наноструктурних системах**

Спеціальність – 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»

Галузь знань – 10 Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня  
доктора філософії в галузі природничих наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Д. О. Білоус

Наукові керівники:

Гончаров Олександр Андрійович,  
доктор фізико-математичних наук, професор

Хоменко Олексій Віталійович  
доктор фізико-математичних наук, професор

Суми 2025

## АНОТАЦІЯ

*Білоус Д. О.* Процеси теплоперенесення та напружено-деформаційні поля у багатошарових наноструктурних системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». – Сумський державний університет, Суми, 2025.

В дисертаційній роботі розглядаються питання дослідження інтенсивності та динаміки процесів поширення теплового поля, вивчення еволюції та кінетики напружено-деформованого стану багатошарових наноструктурних покриттів ріжучих інструментів.

В рамках поставлених задач комплексного дослідження процесів теплоперенесення, формування деформаційно-напружених полів, що виникають в ріжучому інструменті із нанесеним багатошаровим покриттям, були застосовані наступні методи: аналіз літературних джерел; метод скінченних елементів в дослідженні температурного поля; метод змінних напрямів (поздовжньо-поперечна схема); метод фазового простору в дослідженні термодформаційних, термонапружених та напружено-деформаційних полів, графоаналітичний метод.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дисертаційної роботи, висвітлено мету, вказано об'єкт, предмет та сформульовані завдання дослідження, узагальнено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, перераховано кількісні показники виконаної роботи – перелік публікацій, із зазначенням особистого внеску автора, та відомостей про наукові публікації, в яких представлено апробацію результатів дослідження.

Перший розділ «Термофізичний вплив багатошарового покриття на тепловий та напружено-деформаційний стан різальної пластини (літературний огляд)» присвячений аналізу інформації щодо досліджень, які проведені науковцями в рамках вказаного напрямку дисертаційної роботи. Розглядалось моделювання теплових та деформаційно-напружених процесів у різальній пластині із нанесеним багатошаровим покриттям під час дії теплового та механічного

навантаження. Проведений аналіз методів та результатів дослідження поширення теплового потоку, особливостей формування деформаційно-напружених полів, впливу складу багат шарової структури на термозахисні функції покриття. Подані результати аналізу переваг та недоліків методів та моделей відповідних досліджень. Зроблені висновки щодо ефективності застосування вибраних методів дослідження. Встановлено, що моделювання та дослідження таких процесів неможливо провести ідеально через дуже складні механічні, термодинамічні та трибологічні взаємодії, що існують в деформаційних зонах із термонавантаженням.

Другий розділ «Методика проведення досліджень та формування математичних моделей» присвячений методам, що використані для моделювання та дослідження процесів поширення теплового поля, графоаналітичному представленню деформаційно-напружених полів. Математичне моделювання теплових процесів в досліджуваному об'єкті базувалось на застосуванні рівняння теплопровідності у двохвимірному просторі із сформованими граничними умовами. Метод скінченних елементів та метод змінних напрямів (поздовжньо-поперечна схема) дозволив встановити значення температури у відповідних точках температурного поля ріжучої пластини. Графоаналітичний результат представлений для пластини без покриття, з одношаровими покриттями TiAlN та TiN, двошаровими TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/42CrMo4, та тришаровим покриттям TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN.

Для дослідження напружено-деформованого стану покриття був використаний високоінформативний графоаналітичний метод – метод фазового простору. Він був застосований для вивчення еволюції та кінетики напружено-деформаційних процесів, які відбуваються в багат шаровому покритті. Представлені основні теоретичні положення цього метода. Сформовані співвідношення, що дозволяють адекватно описати напружено-деформований стан системи.

Третій розділ дисертаційної роботи «Процес поширення теплового поля в пластині із нанесеним покриттям» представляє результати дослідження

температурного поля пластини із TiAlN та TiN, двошаровими TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/42CrMo4, та тришаровим покриттям TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN. Аналіз результатів показав термозахисні функції покриттів, що пов'язано із зниженням інтенсивності теплового потоку при віддаленні від поверхні пластини за рахунок зміни трибологічних характеристик в нанесених покриттях. Результати показують, що при віддаленні від поверхні структури на глибину, яка відповідає товщині першого нанесеного шару покриття, температура знижується на 36%. В той же час, при віддаленні від поверхні на аналогічну глибину, яка відповідає вже товщині двошарового покриття, температурний вплив зменшується на 60%.

Порівнюючи структури із нанесеним покриттям, можна зробити висновок про те, що найбільша зона високої температури, яка близька до поверхні, отримується для TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, оскільки TiCN виявляє найвище значення теплопровідності серед досліджуваних покриттів. TiAlN і двошаровий TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> дають найнижчі розрахункові температури в різальній пластині з покриттям і не відрізняються суттєво в розрахованих температурних полях. Обидва покриттєві матеріали характеризуються однаковими значеннями теплопровідності. Встановлено, що температура в цілому знижується у напрямку до внутрішньої частини різальної пластини. Температура контактної поверхні є найвищою для підкладки, яка покрита TiAlN /  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, тоді як найнижча – для різальної пластини без покриття, з різницею майже 100 К. У другому ряду елементів значно падає температура для всіх трьох підкладок з покриттям. Температура знижується через два ряди елементів (тобто 7 мкм) на > 150 К для TiAlN та TiAlN /  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, тоді як для покриття TiCN /  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> вона знижується на 80 К. Температура в матеріалі підкладки на глибині 7 мкм знижується на 30 К.

Порівняння результатів показало, що розраховані температури в зоні контакту є найнижчими для підкладки без покриття. Встановлено, що температурне поле має більшу глибину поширення вглиб від поверхні для об'єктів без покриття, ніж для об'єктів з покриттями. Зроблено висновок про те, що наявність покриття на різальній пластині зменшує частину теплоти, яка

передається вглиб матеріалу. З'являється можливість зменшення теплового навантаження на пластину за допомогою багатошарового покриття, яке буде містити шар з низькою теплопровідністю, наприклад, як  $Al_2O_3$ . Але, наявність шару з низькою теплопровідністю не суттєво впливає на теплове навантаження пластини при безперервному впливі теплового потоку.

За результатами дослідження напружено-теплових процесів представлено фазові портрети для поверхні без покриття та поверхні із покриттям. У докритичній області, де  $T_e \leq T_c$ , це дало стійкий вузол в рамках методу фазової площини. Стійкий фокус характерний для пластин без покриття і з одношаровим покриттям. Пластини з двошаровим або тришаровим покриттям характеризуються збільшенням густини матеріалу та зменшенням теплового потоку від тертя в зоні впливу. Збільшення густини дислокацій у поверхневому покритті призводить до помітного ефекту релаксації напружень. Результати свідчать про те, що зростання параметра  $\tau = \tau_T/\tau_\varepsilon$  призводить до закручування траєкторій навколо особливої точки.

Порівняльний аналіз фазових портретів різальних пластин без покриття, з одношаровим та багатошаровими покриттями показав взаємозв'язок між підвищенням температури джерела тепла та полем деформацій. В розділі показано, що для структури без покриття та з одношаровим покриттям спостерігається відносно повільна зміна температури та швидка зміна напружень. Зростання густини дислокацій у поверхневому двошаровому або тришаровому покритті приводить до відчутного впливу релаксації напруження.

В четвертому розділі роботи «Деформаційно-напружений стан багатошарових систем» представлені дослідження напружено-деформаційних полів методом фазового простору. Сформовані фазові портрети, які показали, що у відповідній системі напруження та деформація набувають сталої величини, а відповідні фазові траєкторії системи описують зміну напружено-деформованого стану досліджуваних об'єктів навколо стаціонарної точки – вузла системи.

Підвищення температури до показників пластичної деформації в багатошаровій системі покриття формує фазовий портрет, що відноситься до

стаціонарного тертя ковзання. При дослідженні стаціонарного значення напружень і деформації встановлена зміна пластичних характеристик покриття із часом при реалізації різних переривчастих етапів температурного та механічного впливу.

Дослідження кінетики системи, аналіз еволюції деформації і швидкості її зміни показали, що швидкість зміни деформації залежить від характеристик механічного впливу на покриття, відповідних характеристик напруження та деформації. Наявність двох ділянок (пружної та пластичної деформації) на відповідному фазовому портреті деформаційно-напруженого стану системи встановлює характеристики переходу системи від одного стану до іншого і дозволяє передбачити відповідні деформаційні процеси у покритті.

У фазовому портреті напружено-деформованого стану системи показано варіювання впливом напруження в ріжучій пластині на деформаційні показники. Встановлено, що при повільній зміні напруження деформація структури зменшується дуже швидко для початкових значень. В іншому стані системи, верхня область фазового портрета демонструє конфігураційну точку, яка спочатку рухається по пластичній ділянці, а далі, із ростом значень напруження, спостерігається її рух по пружній траєкторії залежності. Вона показує умови переходу від пружних до пластичних деформацій в багат шаровій системі покриття різальної пластини.

Кінетику зміни деформаційних характеристик системи вивчено шляхом відслідковування еволюції деформацій і дослідження швидкості їх зміни. Подано фазовий портрет, сформований при умові, що температура поверхонь тертя ріжучої пластини (контактних поверхонь) нижче критичної  $T_c$ . Фазові траєкторії системи показують, що відбувається переривчастий характер термічного впливу на відповідну структуру покриття під час проведення операції різання.

**Ключові слова:** теплове поле, напружено-деформований стан, багат шарові покриття, метод фазової площини, тертя, рівняння теплопровідності, динаміка теплового поля.

## ABSTRACT

**Bilous D. O.** Heat transfer processes and stress-strain fields in multilayer nanostructured systems. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 105 “Applied Physics and Nanomaterials”. – Sumy State University, Sumy, 2025.

The scientific work is devoted to the study of the intensity and dynamics of thermal field propagation processes in multilayer nanostructured coatings of cutting tools based on TiN and TiCN, and the study of the stress-strain state of these structures. Within the framework of the tasks of a comprehensive study of heat transfer processes, the formation of deformation-stress fields that arise in plates with a multilayer coating, the following methods were applied: analysis of literary sources; finite element method in the study of the temperature field; method of alternating directions (longitudinal-transverse scheme); phase space method in the study of thermal deformation, thermal stress and stress-strain fields, graph-analytical method.

The introduction substantiates the relevance of the chosen topic of the dissertation, highlights the goal, indicates the object, subject and formulated tasks of the research, summarizes the scientific novelty and practical value of the results obtained, lists the quantitative indicators of the work performed - a list of publications, indicating the personal contribution of the author and information about scientific publications in which the test results of the research are presented.

The first section "Thermophysical effect of multilayer coating on thermal and stress-strain state of cutting insert (literature review)" is devoted to the analysis of information on research conducted by scientists within the specified direction of the dissertation work. The modeling of thermal and deformation-stress processes in a plate with a multilayer coating applied during the action of thermal load was considered. The methods and results of the study of the propagation of heat flux, the features of the formation of deformation-stress fields, the influence of the composition of the multilayer structure on the thermal protective functions of the coating were analyzed. The results of the analysis of the advantages and disadvantages of the methods and models of the relevant studies are presented. Conclusions are drawn regarding the

effectiveness of the application of the selected research methods. It was established that modeling and research of such processes cannot be carried out ideally due to the very complex mechanical, thermodynamic and tribological interactions that exist in deformation zones with thermal loading.

The second section "Methodology of research and formation of mathematical models" is devoted to the methods used for modeling and research of the processes of propagation of the thermal field, the graph-analytical representation of deformation-stress fields. Mathematical modeling of thermal processes in the studied object was based on the application of the heat conduction equation in two-dimensional space with the formed boundary conditions. The finite element method and the method of variable directions (longitudinal-transverse scheme) allowed us to establish the temperature values at the corresponding points of the temperature field of the plate. The graphoanalytic result is presented for an object without coating, with a single-layer coating of TiAlN and TiN, two-layer coatings of TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/42CrMo4, and a three-layer coating of TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN. To study the deformation process, a highly informative graphoanalytic method was used - the phase space method of studying the deformation system, establishing the dynamic amount of heat entering the plate material. The phase space method was applied in the study of thermal deformation, stress-strain fields.

The third section of the dissertation work "Study of the thermal field propagation process in a coated plate" presents the results of the study of the temperature field of a plate with TiAlN and TiN, two-layer TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/42CrMo4, and a three-layer TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN coating. Analysis of the results showed the thermal protective functions of the coatings, which is associated with a decrease in the intensity of the heat flow into the plate due to changes in the tribological characteristics of the applied coatings. The results show that when passing through a single-layer coating, the temperature decreases by 36%, while when passing through a two-layer coating of similar thickness, the temperature load decreases by 60%, which allows to significantly reduce the temperature load on the plate material. Comparing the structures with the applied coating, it can be concluded that the largest high-temperature



zone close to the surface is obtained for TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. This is expected, since TiCN exhibits the highest thermal conductivity value among the studied coatings. TiAlN and two-layer TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> give the lowest calculated temperatures in the coated substrate and do not differ significantly in the calculated temperature fields. Both coating materials are characterized by the same thermal conductivity values. It is established that the temperature generally decreases towards the inner part of the studied structure. The contact surface temperature is the highest for the TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated substrate, while the lowest is for the uncoated substrate with a difference of almost 100K. In the second row of elements, the temperature drops significantly for all three coated substrates. The temperature decreases through two rows of elements (i.e. 7  $\mu$ m) by >150K for TiAlN and TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, while for the TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating it decreases by 80K. The temperature in the substrate material at a depth of 7  $\mu$ m decreases by 30K. A comparison of the results showed that the calculated temperatures in the contact zone are the lowest for the uncoated substrate. It was found that the higher temperatures inside the tool are greater for the uncoated tools than for the coated tools. It was found that for the TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coated tool, the largest high temperature zone is observed, which is close to the surface of the corresponding structure.

The results of the study showed that a coating with low thermal conductivity can be used as a heat shield. It was concluded that the presence of a coating on the plate reduces part of the heat that is transferred into the depth of the material. It is possible to reduce the thermal load on the plate using a multilayer coating that will contain a layer with low thermal conductivity, for example, such as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. However, the presence of a layer with low thermal conductivity does not significantly affect the thermal load of the plate under continuous exposure to heat flux. As a result of the study of stress-thermal processes, phase portraits for the stress considered for the surface without coating and the surface with coating are presented. In the subcritical region, where  $T_e \leq T_c$ , this gave a stable node within the framework of the phase plane method. A stable focus is characteristic of plates without coating and with a single-layer coating. Plates with a two-layer or three-layer coating are characterized by an increase in material density and a decrease in heat flux from friction in the zone of influence.

The increase in the dislocation density in the surface coating leads to a noticeable effect of stress relaxation. The results indicate that the increase in the parameter  $\tau = \tau_T/\tau_\epsilon$  leads to twisting of the trajectories around a singular point. Comparative analysis of the phase portraits of the plates without coating, with single-layer and multilayer coatings showed the relationship between the increase in the temperature of the heat source and the strain field. The section shows that for the surface without coating and with single-layer coating, a relatively slow change in temperature and a rapid change in stresses are observed. The increase in the dislocation density in the surface two-layer or three-layer coating leads to a noticeable effect of stress relaxation.

The fourth section of the work “Study of the deformation-stress field in multilayer systems by the phase space method” presents the study of stress-strain fields by the phase space method. Two isoclines of phase portraits formed the state of the system in which stress and strain acquire a constant value, and the corresponding phase trajectories of the system describe the change in the stress-strain state of the studied objects around the stationary point - the node of the system. Different forms of phase portraits characterized the influence of the parameters of mechanical impact on the coating material. Increasing the temperature to the indicators of plastic deformation in a multilayer coating system forms a phase portrait related to stationary sliding friction. When studying the stationary value of stresses and strains, a change in the plastic characteristics of the coating with time was established during the implementation of various intermittent stages of temperature and mechanical impact. The stationary point in the system characterizes the behavior of the material without a coating.

The studies of the kinetics of the system, analysis of the evolution of deformation and the rate of its change showed that the rate of change of deformation depends on the characteristics of the mechanical effect on the coating, the corresponding characteristics of stress and deformation. The presence of two sections (elastic and plastic deformation) on the corresponding phase portrait of the deformation-stressed state of the system establishes the characteristics of the transition of the system from one state to another and allows us to predict the corresponding deformation processes in the coating. The phase portrait of the stress-strain state of the system shows the variation of the influence

of stress in the cutting insert on the deformation indicators. It is established that with a slow change in stress, the deformation of the structure decreases very quickly for the initial values. In another state of the system, the upper region of the phase portrait demonstrates a configuration point, which first moves along the plastic section, and then, with increasing stress values, its movement along the elastic trajectory of dependence is observed. It shows the conditions of transition from elastic to plastic deformations in the multilayer system of the cutting insert coating. The kinetics of the change in the deformation characteristics of the system was studied by tracking the evolution of deformations and studying the rate of their change. A phase portrait is presented, formed under the condition that the temperature of the friction surfaces of the cutting plate (contact surfaces) is below the critical  $T_c$ . The phase trajectories of the system show that there is an intermittent nature of the thermal effect on the corresponding coating structure during the cutting operation.

**Key words:** thermal field, stress-strain state, multilayer coatings, phase plane method, friction, heat conduction equation, thermal field dynamics.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

### Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

*Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, які індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science*

1. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, **D. Belous**, L. Vasilyeva, “Effect of a Protective Coating on the Temperature Distribution in a Revolving Cutting Tool and the Cutting Tool Lifetime”, *High Temperature Material Processes: An International Quarterly Journal of High-Technology Plasma Processes*, Vol. 22, № 4, 2018, P. 279-291. doi: 10.1615/HighTempMatProc.2018029411. (Scopus, Q3).

(Особистий внесок: підготовка літературного огляду, формування алгоритму роботи програми, проведення дослідження, отримання графічних результатів, участь в обговоренні отриманих результатів, написання статті).

2. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, L. Vasilyeva, **D. Belous**, “Effect of multilayer protective coating on the thermal field dynamics in the cutting tool during machining,” *High Temperature Material Processes: An International Quarterly Journal of High-Technology Plasma Processes*, Vol. 24, 2020, P. 81-90. doi: 10.1615/HighTempMatProc.2020033202. (Scopus, Q3).

(Особистий внесок: проведений аналіз методів дослідження динаміки поширення теплового поля у плівковій структурі, проведення дослідження із застосуванням математичних методів обробки результатів, реалізація дослідження, участь в обговоренні інтерпретації отриманих результатів).

3. **D. A. Belous**, A. Yu. Badalian, A. A. Goncharov, O. V. Khomenko, S. A. Goncharova, “Influence of Protective Nanocomposite Coatings on the State of Thermal and Strain Fields in Cutting Plate,” *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, Vol. 44, № 11, 2022, P. 1495-1508. doi: 10.15407/mfint.44.11.1495. (Scopus, Web of Science, Q3, фахове видання категорії A).

(Особистий внесок: підготовка літературного огляду, проведення дослідження, отримання графічних результатів дослідження, обговорення результатів, робота над написанням та оформленням статті).

4. A. Goncharov, **D. Belous**, A. Yunda, O. Khomenko, E. Mironenko, L. Vasilyeva, S. Goncharova, “Heat transfer processes in multilayer nanocomposites systems during cutting”, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, Vol. 20, № 2, 2022, P. 385-422. doi: 10.15407/nnn.20.02.385. (Scopus, Web of Science, Q4, фахове видання категорії A).

(Особистий внесок: проаналізовано існуючі методи дослідження термодеформаційних процесів, проведення дослідження та одержання результатів моделювання відповідного процесу; прийняв участь в написанні та оформленні статті).

5. **D. A. Belous**, A. Yu. Badalian, A. A. Goncharov, O. V. Khomenko, “Investigation of the Strain-Stress Field in Nanoscale Multilayer Systems by the Phase Space Method”, *Materials*, Vol. 17, № 10, 2024, P. 2466. doi: 10.3390/ma17102466. (Scopus, Web of Science, Q2).

(Особистий внесок: здобувач проаналізував існуючі методи та напрями дослідження термодеформаційних процесів, провів дослідження, проаналізував результати моделювання відповідного процесу, прийняв участь в написанні статті).

### ***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації***

6. A. A. Goncharov, A. N. Yunda, S. A. Goncharova, **D. A. Belous**, S. V. Koval, L. V. Vasilyeva, “Dependence of the thermal field in the coated cutting insert on the cutting conditions”, *2017 IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2017)*, Odessa, Ukraine, 2017, pp. 01FNC19-1 – 01FNC19-5. doi: 10.1109/nap.2017.8190209. (Scopus)

(Особистий внесок: підготував літературний огляд, провів дослідження, прийняв участь в обговоренні результатів, оформив тезу).

7. **D. A. Belous**, A. A. Goncharov, “Modeling of a thermal field in the cutting insert protected by multilayered coating”, *Міжнародна наукова конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика-2018»*, Львів, Україна, 15-17 травня 2018 р., С. 36. Available: [http://old.physics.lnu.edu.ua/confer/heureka2018/files/Heureka\\_program\\_2018.pdf](http://old.physics.lnu.edu.ua/confer/heureka2018/files/Heureka_program_2018.pdf) (accessed on: October 22, 2024)

(Особистий внесок: здобувач підготував літературний огляд, проаналізував результати, оформив тезу).

8. О. А. Гончаров, Є. В. Мироненко, А. М. Юнда, Л. В. Васильєва, С. В. Коваль, **Д. О. Білоус**, “Моделювання теплового поля в ріжучій пластині в залежності від режимів різання”, *II Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод» : ДДМА, Україна, 19–21 квітня 2018 р., С. 134-136. Available: [https://bmi.vntu.edu.ua/bioart/doc/SITZAE\\_2018\\_Cramatorsk.pdf](https://bmi.vntu.edu.ua/bioart/doc/SITZAE_2018_Cramatorsk.pdf)*

(Особистий внесок: здобувач проаналізував літературні джерела за тематикою роботи, здобувач прийняв участь в обговоренні матеріалів дослідження, сформулював висновки, оформив тезу).

9. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, “Моделювання поширення теплового потоку у різальній пластині з багатошаровим покриттям”, *Міжнародна науково-технічна конференція “Інформатика, математика, автоматика” (ІМА-2019)*. Суми, Україна, 23 - 26 квітня 2019 р., С. 202. Available: <https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/304/1/ІМА-2019.pdf> (accessed on: October 28, 2024)

(Особистий внесок: здобувач сформував мету, провів моделювання процесу поширення теплового поля, оформив тезу).

10. **D. Belous**, A. Goncharov, A. Yunda, A. Khomenko, L. Vasilyeva, S. Goncharova, “Influence of Protective Nanocomposite Coatings on the State of Heat Flow in the Cutting Insert”, *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP)*, Odesa, Ukraine, 9 -13 November 2020, pp. 01TFC22-1-01TFC22-3, doi: 10.1109/NAP51477.2020.9309548. (Scopus)

(Особистий внесок: здобувач провів аналіз існуючих методів дослідження, прийняв участь в обговоренні результатів, написав та оформив тезу).

11. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, “Вплив нанорозмірних багатошарових структур на динаміку температурного поля в зоні металообробки”, *Міжнародна науково-технічна конференція “Фізика, електроніка, електротехніка” (ФЕЕ - 2021)*, Суми, Україна, 19 - 23 квітня 2021 р., С. 127. Available:

[https://drive.google.com/file/d/1IvjIoYmUGQpfPd3estLVBKj\\_QPkL\\_3ep/view](https://drive.google.com/file/d/1IvjIoYmUGQpfPd3estLVBKj_QPkL_3ep/view)  
(accessed on: October 28, 2024)

(Особистий внесок: здобувач провів дослідження, прийняв участь в обговоренні результатів, оформив тезу).

12. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, С. А. Гончарова, Л. В. Васильєва, Т. Р. Кравченко, С. М. Пінчук, “Моделювання поширення теплового навантаження на ріжучу поверхню інструменту із нанесеним багатошаровим покриттям”, *V Всеукраїнська науково-практична конференція “Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод”*, Україна, 23-24 квітня 2021 р., С. 74-75. Available: [http://cit.dgma.donetsk.ua/materials/paper\\_citae\\_2021.pdf](http://cit.dgma.donetsk.ua/materials/paper_citae_2021.pdf) (accessed on: October 22, 2023).

(Особистий внесок: здобувач прийняв участь в обговоренні матеріалів дослідження, сформулював висновки, оформив тезу).

13. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, О. В. Хоменко, С. М. Пінчук, “Вплив покриття на коефіцієнт тертя між інструментом та стружкою і заготовкою”, *Міжнародна наукова конференція молодих учених “Інформатика, математика, автоматика” (ІМА-2022)*, Суми, Україна, 18 - 29 квітня 2022 р., С. 157. Available: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/87782/1/Conf\\_IMA\\_2022.pdf;jsessionid=E9D4D512889457FB79FF9FA5EC0966B2](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/87782/1/Conf_IMA_2022.pdf;jsessionid=E9D4D512889457FB79FF9FA5EC0966B2) (accessed on: October 22, 2024).

(Особистий внесок: здобувач прийняв участь в обговоренні отриманих результатів, оформив тезу).

14. О. В. Хоменко, О. А. Гончаров, А. Ю. Бадалян, Т. П. Кравченко, Р. Р. Чернущенко, **Д. О. Білоус**, М. В. Захаров, “Врахування деформаційного дефекту модуля зсуву матеріалу при інтенсивній пластичній деформації поверхні”, *Міжнародна наукова конференція молодих учених “Інформатика, математика, автоматика” (ІМА-2022)*, Суми, Україна, 18 - 29 квітня 2022 р., С. 156. Available: [https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/87782/1/Conf\\_IMA\\_2022.pdf;jsessionid=E9D4D512889457FB79FF9FA5EC0966B2](https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/87782/1/Conf_IMA_2022.pdf;jsessionid=E9D4D512889457FB79FF9FA5EC0966B2) (accessed on: October 22, 2024).

(Особистий внесок: здобувач прийняв участь в обговоренні матеріалів дослідження).

15. **D. Belous**, A. Goncharov, A. Badalian, O. Khomenko, “Study of Thermomechanical Properties of Multilayer Nanocomposite Film Systems“, *2023 IEEE 13th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2023)*, Bratislava, Slovakia, 10-15 September, 2023, pp. MTFC15-1-MTFC15-4, doi: 10.1109/NAP59739.2023.10310893. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10310893/metrics#metrics> (accessed on: October 22, 2024).

(Особистий внесок: здобувач провів літературний пошук, провів дослідження, прийняв участь в обговоренні результатів, оформив матеріали дослідження).

16. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, О. В. Хоменко, А. Ю. Бадалян, “Моделювання процесів пластичної деформації у ріжучих поверхневих шарах металообробного інструменту,” *Міжнародна науково-технічна конференція “Інформатика, математика, автоматика” (ІМА-2023)*, Суми, Україна - Астана, Казахстан, 24 - 28 квітня 2023, С. 292. Available: <https://drive.google.com/file/d/1YDGNhbgZY6dfsqwN6P0VcEpcq6CuCKmj/view> (accessed on: October 22, 2024)

(Особистий внесок: здобувач прийняв участь в обговоренні отриманих результатів, оформив тезу).



17. A. Badalian, A. Khomenko, O. Goncharov, **D. Belous**, O. Lytvynenko, A. Biesiedina, “Modeling of the Stress-Strain State in Multilayer Film Systems Depending on the Thermal Load”, *2024 IEEE 14th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2024)*, Riga, Latvia, 8-13 September, 2024, pp. 1-4, doi:10.1109/NAP62956.2024.10739692

(Особистий внесок: здобувач провів літературний пошук, дослідження, прийняв участь в обговоренні результатів, оформив матеріали дослідження).

***Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації***

18. Є. В. Мироненко, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, Л. В. Васильєва, С. В. Коваль, **Д. О. Білоус**, “Дослідження теплового поля твердосплавних пластин з багат шаровим покриттям”, *Вісник ДДМА*, № 2 (44), 2018, С. 214-218. Available: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/ddma/Herald\\_2\(44\)\\_2018/article/41.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/ddma/Herald_2(44)_2018/article/41.pdf) (accessed on: October 26, 2024)

(Особистий внесок: здобувач підготував літературний огляд, прийняв участь в обговоренні отриманих результатів, оформив матеріали статті).

19. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, “Багат шарові і покриття ріжучого інструменту в моделюванні теплових процесів”, *Всеукраїнська науково-практична конференція “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку”*, Черкаси, Україна, 15-21 березня 2019, С. 138-139 Available: [https://conference.ikto.net/pub/akit\\_2021\\_15-21march.pdf](https://conference.ikto.net/pub/akit_2021_15-21march.pdf) (accessed on: October 22, 2024)

(Особистий внесок: здобувач підготував літературний огляд, здобувач прийняв участь в обговоренні отриманих результатів, оформив тезу).

20. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, “Моделювання теплового поля у різальній пластині з багат шаровим покриттям”, *Всеукраїнська науково-практична конференція “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології*

у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку”, Черкаси, Україна, 11-17 березня 2019, С. 128. Available: [https://conference.ikto.net/pub/akit\\_2019\\_11-17march\\_black\\_cat.pdf](https://conference.ikto.net/pub/akit_2019_11-17march_black_cat.pdf) (accessed on: October 22, 2024)

(Особистий внесок: здобувач провів літературний пошук, провів дослідження, прийняв участь в обговоренні результатів, оформив матеріали роботи).

21. Д. О. Білоус, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, Л. В. Васильєва, С. А. Гончарова, Т. Р. Кравченко, С. М. Пинчук, “Моделювання поширення теплового навантаження на ріжучу поверхню інструменту із нанесеним багатошаровим покриттям”, *Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції “Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод: ДДМА, 2021 р.*, С. 74-75. Available: <http://dSPACE.dgma.donetsk.ua:8080/jspui/handle/DSEA/782> (accessed on: October 26, 2024).

(Особистий внесок: здобувач проаналізував літературні джерела за тематикою роботи, здобувач прийняв участь в обговоренні матеріалів дослідження, сформулював висновки, оформив тезу).

22. Д. О. Білоус, О. А. Гончаров, “Аналіз моделей тертя в зоні обробки матеріалів ріжучим інструментом із багатошаровим покриттям”, *IX Всеукраїнська науково-технічної конференція “Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2022)”*, Суми, Україна, 19-22 квітня 2022 р., С. 79. Available: <https://conf.teset.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/04/stpv-2022.pdf> (accessed on: October 22, 2024)

(Особистий внесок: здобувач підготував літературний огляд, здобувач прийняв участь в обговоренні отриманих результатів, оформив тезу).

23. Д. О. Білоус, О. А. Гончаров, “Деформаційні процеси у поверхневих структурах різальних інструментів“, *X Всеукраїнська науково-технічна конференція “Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2023)”*. Суми, Україна, 18-21 квітня 2023 р., С. 90. Available:

<https://conf.teset.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/stpv-2023.pdf> (accessed on: October 22, 2024)

(Особистий внесок: здобувач підготував літературний огляд, здобувач провів дослідження та взяв участь в обговоренні отриманих результатів, оформив тезу).

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	22
ВСТУП.....	23
РОЗДІЛ 1 ТЕРМОФІЗИЧНИЙ ВПЛИВ БАГАТОШАРОВОГО ПОКРИТТЯ НА ТЕПЛОВИЙ ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМАЦІЙНИЙ СТАН РІЗАЛЬНОЇ ПЛАСТИНИ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД) .....	29
1.1. Процеси утворення та поширення теплових потоків в зоні механічного впливу .....	29
1.2. Особливості процесів тепловідведення.....	32
1.3. Теплофізика пластичної деформації та тертя при механічному впливі на покриття.....	34
1.4. Експериментальні та теоретичні дослідження теплових полів в різальних пластинах із захисним покриттям .....	39
1.5 Термофізичний вплив покриття.....	45
1.6. Деформаційні процеси в контактній зоні.....	51
Висновки до Розділу 1 .....	54
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ .....	56
2.1. Моделювання теплового процесу в пластині .....	57
2.2. Математичні основи розрахунку термодинамічних процесів.....	62
2.2.1 Дискретна модель в реалізації дослідження поширення температурного потoku .....	63
2.2.2 Метод кінцевих різниць в розв'язанні диференціального рівняння теплопровідності.....	64
2.2.3 Метод скінченних елементів та кінцевих різниць в дослідженні температурного поля .....	66
2.2.4 Метод мінімізації функціоналу у встановленні вузлових температурних показників структури .....	67

2.3 Метод фазового простору в дослідженні температурного впливу на характеристики напруження та деформації, особливості формування напружено-деформаційних полів.....	70
2.3.1 Фазовий перехід в дослідженні температурної залежності напруження...	72
2.3.2 Фазовий перехід в дослідженні температурної залежності деформації...	73
2.3.3 Фазовий перехід в дослідженні напружено-деформаційних полів.....	74
2.3.4 Кінетична характеристика системи в координатах $\dot{\epsilon} - \epsilon$ .....	75
Висновки до Розділу 2.....	76
<b>РОЗДІЛ 3 ПРОЦЕС ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ В ПЛАСТИНІ ІЗ НАНЕСЕНИМ ПОКРИТТЯМ.....</b>	<b>77</b>
3.1 Аналіз температурного поля пластини із одно- та двошаровим покриттям.....	78
3.2 Поширення теплового потоку в пластині із тришаровим покриттям TiCN/ $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN-П.....	81
3.3. Динаміка поширення теплового поля.....	86
3.4. Термодформаційні процеси у багатошарових структурах.....	92
Висновки до Розділу 3.....	100
<b>РОЗДІЛ 4 ДЕФОРМАЦІЙНО-НАПРУЖЕНИЙ СТАН БАГАТОШАРОВИХ СИСТЕМ.....</b>	<b>103</b>
4.1 Вплив температурного поля пластини на деформаційні процеси.....	104
4.2 Деформаційно-напружені поля різальної пластини.....	109
4.2.1 Встановлення координат особливих точок системи.....	111
4.2.2. Аналіз фазових траєкторій.....	112
4.3. Кінетика деформаційних процесів.....	118
Висновки до Розділу 4.....	120
ВИСНОВКИ.....	121
ПРИМІТКИ.....	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	124
ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації.....	146

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,  
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

$\varepsilon$  – ефективна пластична деформація;

$\varepsilon_0$  – стаціонарне значення зсувної деформації;

$\dot{\varepsilon}$  – швидкість деформації;

$T$  – температура;

$T_m$  – температура плавлення матеріалу заготовки;

$T_e$  – температура навколишнього середовища;

$\sigma = \sigma(\varepsilon)$  – напруження;

$\sigma^*$  – коефіцієнт жорсткості напруженого стану;

$\mu$  – коефіцієнт тертя;

$\lambda_i$  та  $\lambda_w$  – теплопровідність матеріалів інструменту та заготовки відповідно;

$\tau_\sigma, \tau_T, \tau_\varepsilon$  – час релаксації напружень, температури та деформації відповідно;

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  – оператор Лапласа

$h$  – коефіцієнт теплообміну.

## ВСТУП

### **Актуальність теми.**

Сучасні темпи розвитку промисловості вимагають нових технологічних рішень, які приводять до необхідності суттєвого покращення функціональних властивостей матеріалів та експлуатаційних характеристик приладів на їх основі за рахунок варіювання складу, структури та властивостей багат шарових покриттів.

Однією з основних задач прикладної фізики є вивчення впливу теплового навантаження на багат шарові наноструктурні покриття - важливого аспекту технологічних процесів в електроніці, техніці, металообробці та в багатьох інших галузях, який значно впливає на фізико-механічні характеристики елементів систем. Актуальним стає питання встановлення значень максимальних температур, які досягаються на різних ділянках пластин із нанесеними покриттями, інтенсивності поширення теплового поля, глибини проникнення теплової енергії тощо. Особливо важливим це питання стає при розгляді нітридних багат шарових покриттів на основі TiC і TiCN, що нанесені на контактуючу поверхню різальних інструментів. Визначення відповідних теплофізичних параметрів під час експериментальних досліджень пов'язано із складнощами: миттєвістю процесу поширення теплового потоку, наявністю широкого спектру градієнтів температур та великих значень швидкостей нагріву та охолодження. Тому, теоретичне дослідження цих аспектів постійно знаходиться в полі зору науковців.

Багатофакторність впливу, складні особливості еволюції системи не дозволяють сформулювати повну картину розподілу температурних полів. Це питання залишається актуальним, так як отримані результати дозволяють за допомогою розрахункових методів встановити характер теплових полів ще до проведення дослідів на реальних зразках і, як наслідок, скоротити витрати часу й ресурсів.

Слід відзначити, що поряд із тепловими полями на стан та фізико-механічні характеристики покриттів впливають напружено-деформаційні поля. В останні роки активно розвивається підхід до дослідження деформаційних процесів у

поверхневих шарах, заснований на концепції структурних рівнів деформації та руйнування твердих тіл, а також на розумінні в рамках цієї концепції особливої ролі поверхні та поверхневих шарів покриттів у зародженні та розвитку деформаційних процесів. Але він має свої недоліки та не формує повного уявлення про відповідні фізико-механічні процеси у багатошарових покриттях.

З появою нових матеріалів і технологій, навантаження у вузлах контакту поверхонь, постійно зростає, що, в свою чергу, приводить до підвищення температурного пливу та формування напружено-деформаційних полів. Дослідження, розрахунок напружено-деформованого стану структури із багатошаровим покриттям є дуже важливим, так як покриття є зоною ймовірної втрати міцності та руйнування конструкції. Тому, адекватне встановлення особливостей напружено-деформованого стану такої структури дозволить підвищити працездатність конструкції та збільшити ресурс роботи відповідного елемента, а в деяких випадках уникнути катастрофічних наслідків руйнування покриттів.

Для ефективного вирішення поставлених проблем необхідні результати теоретичного аналізу та прогнозування деформаційно-напружених процесів в багатошаровій системі покриттів під дією теплових навантажень, які б сформували відповідну фізичну картину того що відбувається в структурі. Тому, актуальним є проведення дослідження еволюції та кінетики зміни деформаційно-напружених характеристик системи пластини із нанесеним багатошаровим покриттям на основі TiC і TiCN під впливом теплового навантаження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі прикладної математики та моделювання складних систем Сумського державного університету. Результати дослідження отримані на основі ґрунтового аналізу деформаційних та теплових процесів, які відбуваються в багатошарових наноструктурних системах, мають змістовний характер та використовувались під час виконання держбюджетних науково-дослідних робіт:



- № держреєстрації 0117U002247 (2017-2019 рр.) “Технологічні основи синтезу наноструктурних нанокомпозитних та багатошарових покриттів тугоплавких сполук для застосування у машинобудуванні”, (виконавець);
- № держреєстрації 0121U112687 (2019-2021 рр.) “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” (виконавець);
- № держреєстрації № 0119U100787 (2019-2021 рр.) “Імплантація іонів низьких та високих енергій у багатокомпонентні та багатошарові покриття: мікроструктура та властивості”, (виконавець);
- № держреєстрації 0122U000776 (2020-2022 рр.) “Відпрацювання умов синтезу наноструктурних покриттів із заданим структурним станом” (виконавець).

**Мета роботи** полягала у вивченні фізичних процесів та встановленні закономірностей впливу структурного складу багатошарового покриття на температурні та деформаційні поля системи в різальних пластинах з одношаровими або багатошаровими покриттями із урахуванням граничних умов.

Для реалізації мети роботи були поставлені наступні **задачі**:

- змоделювати та провести аналіз температурного поля різальної пластини із одно- та двошаровою структурою;
- дослідити динаміку поширення теплового потоку у різальній пластині із тришаровим покриттям  $\text{TiCN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ -П;
- вивчити вплив теплофізичних характеристик матеріалу покриття на динаміку поширення теплового поля в різальній пластині;
- встановити взаємозв’язок теплових та деформаційних процесів у багатошарових системах;
- дослідити температурну залежність деформаційних процесів різальної пластини;
- вивчити деформаційно-напружені поля методом фазового простору;
- провести аналіз фазових траєкторій системи;

- дослідити кінетику деформаційних процесів у різальній пластині.

**Об'єкт дослідження** – багат шарові наноструктурні нітридні покриття, що нанесені на поверхню ріжучого інструменту.

**Предмет дослідження** – теплофізичні та напружено - деформаційні процеси, кінетика теплових і деформаційних процесів та напружено-деформаційний стан у багат шарових наноструктурних покриттях різальної пластини.

**Методи дослідження.** При виконанні дисертаційної роботи були застосовані такі методи: аналіз літературних джерел; метод скінченних елементів в дослідженні температурного поля; метод змінних напрямів (поздовжньо-поперечна схема); метод фазового простору в дослідженні термо-деформаційних, термо-напружених та напружено-деформаційних полів. Вперше застосовано метод фазової площини для формування фазових портретів системи термодформаційних, термонапружених, деформаційно-напружених полів для структури із нанесеним покриттям.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

У результаті дослідження представлені положення та висновки, що містять елементи наукової новизни, зокрема:

1. Вперше охарактеризована інтенсивність поширення теплового потоку в пластині без покриття, із одношаровим TiN/42CrMo4 та двошаровим TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/42CrMo4 покриттями. Визначена доля теплового потоку, яка втрачається при віддаленні від поверхні для одношарового та двошарового покриття відповідної товщини.

2. Вперше порівняно динаміку поширення температурного поля в ріжучій пластині без покриття і в пластині із тришаровим покриттям TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN.

3. Вперше, методом фазового простору, вивчений стан багат шарової структури ріжучої пластини в рамках моделі в'язко-пружного середовища, що володіє теплопровідністю. Подано фазовий портрет, що описує динаміку термонапруженого стану структури. Встановлені умови переходу пружної деформації до пластичної при варіюванні параметрами термонапруження у багат шаровому покритті.

4. Представлено фазовий портрет напружено-деформованого стану системи. Показано кінетику зміни деформаційних характеристик системи шляхом відслідковування еволюції деформацій і дослідження швидкості їх зміни.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати дослідження теплового поля, динаміки поширення теплового потоку, еволюції та кінетики зміни деформаційно-напружених характеристик системи у різальній пластині із нанесеним багат шаровим покриттям під впливом теплового навантаження структури можуть бути використані для прогнозування параметрів і характеристик функціональних матеріалів елементів металообробного обладнання, розробки технологічних процесів підготовки ріжучих інструментів та формуванні рекомендацій щодо оптимізації структури нанесених покриттів.

**Особистий внесок здобувача.** Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку і аналізі літературних джерел, формуванні математичних моделей, встановленні граничних умов, пошуку методів дослідження, проведенні наукових досліджень, оформленні наукових публікацій. Автор особисто провів обробку та інтерпретацію отриманих результатів. Постановку задач досліджень і узагальнення результатів зроблено разом із науковими керівниками доктором фіз.-мат. наук, проф. О. А. Гончаровим та доктором фіз.-мат. наук, проф. О. В. Хоменком. В обговоренні результатів досліджень брали участь кандидат фіз.-мат. наук Г. Ю. Бадалян та кандидат фіз.-мат. А. М. Юнда. Автором особисто підготовлено текст тез доповідей [120, 122, 123, 134, 135, 136, 141], а також окремі розділи статей [121, 140, 161, 162, 169]. Основні наукові результати доповідались особисто автором на наукових семінарах і конференціях. Усі наукові положення і висновки, що винесені на захист, належать авторові дисертації.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Міжнародних наукових конференціях та форумах, а саме: 7-й Міжнародній науковій конференції «Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2017)» (Одеса, Україна, 2017 р.); Міжнародній науковій конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Єврика-2018» (Львів, Україна, 2018 р.);

Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2019)» (Суми, Україна, 2019 р.); 10-й Міжнародній науковій конференції «Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2020)» (Одеса, Україна, 2020 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ -2021)» (Суми, Україна, 2021); 13-й Міжнародній науковій конференції «Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2023)» (Братіслава, Словачія, 2023 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2023)» (Суми, Україна - Астана, Казахстан, 2023 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку» (Черкаси, Україна, 2019 р., 2021 р.); ІХ Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2022)» (Суми, Україна, 2022 р.), Х Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2023)» (Суми, Україна, 2023 р.); 14-й Міжнародній науковій конференції «Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2024)» (Рига, Латвія, 2024 р.)

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковані у 23 працях, з них: 5 статей у вітчизняних та закордонних виданнях, які індексуються наукометричною базою даних Scopus, 4 статті у матеріалах конференцій, які індексуються наукометричною базою даних Scopus та 14 наукових праць у матеріалах Міжнародних та Всеукраїнських конференцій.

**Структура і зміст роботи.** Робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел із 174 найменувань на 22 сторінках. Дисертацію викладено на 150 сторінках, із них 100 сторінок основного тексту; робота містить 32 рисунка і 3 таблиці, 1 додаток.

## РОЗДІЛ 1

### **ТЕРМОФІЗИЧНИЙ ВПЛИВ БАГАТОШАРОВОГО ПОКРИТТЯ НА ТЕПЛОВИЙ ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМАЦІЙНИЙ СТАН РІЗАЛЬНОЇ ПЛАСТИНИ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)**

Одним із сучасних напрямків зміни властивостей поверхневих шарів металевих елементів електроніки, атомної техніки, металообробного обладнання тощо є нанесення на відповідну поверхню покриттів різного складу. Особливу увагу привертають наноструктурні, багатошарові покриття завдяки тому, що із зміною складу та способу нанесення можлива достатньо широка варіація теплових та механічних властивостей цих структур. Особливо важливим є розподіл температурного поля на поверхні різального інструменту, який впливає на зносостійкість та тривалість роботи таких об'єктів. Дослідження характеру, швидкості та особливостей градієнту розподілу тепла в області із нанесеними покриттями присвячено багато наукових теоретичних і практичних робіт різних дослідників [1-6]. Зв'язок теплових, напружених та деформаційних процесів є актуальним питанням дослідження прикладної фізики, інженерії поверхні у зв'язку із особливостями процесів, що відбуваються [7, 8] в поверхневих структурах під дією теплових та механічних навантажень.

#### **1.1 Процеси утворення та поширення теплових потоків в зоні механічного впливу**

Підвищення стійкості поверхні, на яку впливають теплові потоки, можна реалізувати шляхом нанесення покриттів із захисною функцією. За результатами досліджень [9-11] встановлена відмінність у фізико-механічних характеристиках наноструктурних поверхневих покриттів та відповідних масивних зразках цих самих матеріалів. Крім того, комбінація шарів у покритті надає таким матеріалам нові теплові та деформаційні характеристики, що дозволяє використання таких

об'єктів з метою підвищення характеристик зносостійкості контактуючих поверхонь інструментів металообробки [12-16].

Найпоширенішими в даний час вважаються багат шарові захисні покриття, в яких за основу взятий нітрид, карбід або карбонітрид титану: TiN, TiC, TiCN і TiAlN, а також Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Відомо, що характерною властивістю оксиду алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> є спадання характеристики теплопровідності з підвищенням показників температури. Встановлено [4, 6], що покриття мають вплив та формують фізико-механічні властивості поверхневої структури інструменту металообробки.

Дослідження теплових процесів у відповідних структурах показали результати, з яких випливає протиріччя в способі формування, наслідках впливу та напрямку еволюції теплових та деформаційно-напружених полів, що, скоріше за все, пов'язано із багатофакторністю впливу складу покриттів, варіацією градієнту температурного поля, зміною теплофізичних та механічних властивостей матеріалів поверхневої структури. Частина науковців вказує [5, 17, 18] на значний вплив багат шарових покриттів на термозахисну функцію поверхні. Так, в роботі [7] науковці представили результати, за якими температура в області покриттів на основі TiAlN/підкладка, TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/підкладка та TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/підкладка значно знижувалась, тим самим підтверджуючи термозахисну функцію покриття. Показано зменшення температури більш ніж на 130 К для поверхневих структур TiAlN/П і TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/П, та > 80К для поверхневих структур на основі TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/П.

Результати зниження інтенсивності температурного поля при проході через багат шарові покриття підтверджені в роботах [19, 20]. Поряд з тим, в роботі [21] показаний тільки слабкий ефект багат шарового покриття як бар'єру для теплового потоку у різальному інструменті. За результатами робіт [6, 22] можна зробити висновок про те, що на розподіл температури в зоні контакту різальної пластини із нанесеним покриттям TiAlN+TiN із поверхнею що обробляється, взагалі не впливає нанесене покриття, і температурне поле змінюється в залежності від величини швидкості впливу.

Деякі науковці [23, 24] пов'язують зменшення величини теплового потоку, якій проходить вглиб багат шарової структури покриття різця, зовсім не з її термозахисним показником, а із зміною величини коефіцієнта тертя, в результаті чого відбувається зменшення потоку тепла, що поширюється вглиб різальної пластини. Висновки про відсутність теплоізолюючого ефекту представлені у роботі [11], і підтверджують гіпотезу про те, що термозахисний ефект нанесеної структури покриттів зовсім не відчувається.

Особливу роль в процесі механічної обробки відіграють явища, що пов'язані із процесом формування та поширення теплового поля. При механічній обробці деталей виділено [25-27] три основні області, в яких при взаємодії під час контакту (процесу різання) і деформацій під час механічного навантаження спостерігається формування та поширення теплового поля (див. рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Формування та поширення теплового поля в області механічного впливу [27]

Аналіз процесу теплового поширення енергії [27] показав декілька джерел виділення теплоти, серед яких проаналізовані наступні: механічна робота ( $Q_1$ ), яка впливає на пластичну деформацію та іноді призводить до руйнування металу під час механічного зрізання металевих пластин; робота сил тертя ( $Q_2$ ), що впливають на передню поверхню різальної пластини. Ця робота генерує теплоту в результаті

контакту поверхонь елементів металу та відповідної передньої частини різальної пластини. На думку авторів [27] робота трибологічного впливу (сил тертя) ( $Q_3$ ) приводить до утворення теплоти в зоні контакту задньої поверхні частини різця і матеріалу заготовки.

## 1.2 Особливості процесів тепловідведення

Відомо, що процес обробки металів достатньо тривалий і стійкий. Під час цього процесу відбувається дві дії: теплота безперервно виділяється за час роботи; теплота безперервно відводиться із зони різання (див. рис. 1.2) [28]. Теплота  $Q_1$  поширюється вглиб заготовки на яку проводиться тепловий вплив, що призводить до її нагріву. Ця частина теплоти позначається  $q_1$ . В той же час, велика частина теплоти  $Q_1$  нагріває стружку і разом із частиною нагрітого таким чином метала виноситься за межі зони різання (позначимо  $q_2$ ). Теплота  $Q_2$  впливає на нагрів металу ріжучої частини інструменту і поступово проникає по всьому об'єму (позначимо  $q_4$ ). Тепловий потік  $Q_3$  поширюється на матеріал різця (позначимо  $q_5$ ). Теплова енергія  $Q_3$  проникає в метал заготовки та витрачається на її нагрів (позначимо цю відведену теплоту  $q_6$ ).

Процес формування та поширення теплового потоку описується рівнянням теплового балансу представленим формулою (1.1) [28]:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6. \quad (1.1)$$

З (1.1) можна зробити висновок, що із зміною умов та параметрів механічного впливу змінюється співвідношення між частинами теплоти, що формуються або відводяться під час проведення операції різання. Зміна величини суми частин теплоти  $q_1$  та  $q_2$ , показує, що основна кількість теплоти відходить із зрізаними зайвими частинами металу. Теплова енергія  $q_3 + q_4$  видаляється з області контакту та переміщується в тіло різця, формує незначну частину



теплого балансу, при цьому її величина зменшується при збільшенні показників інтенсивності впливу.

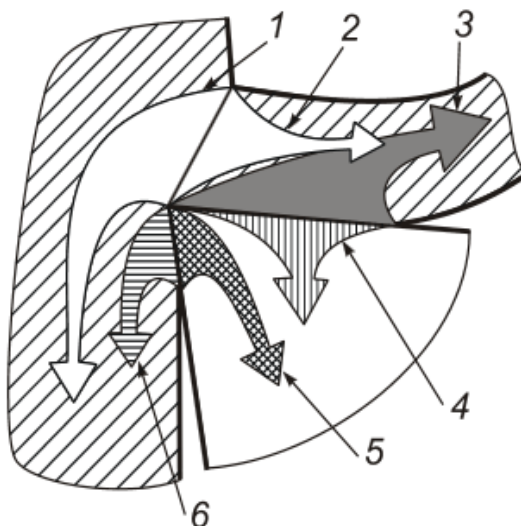


Рисунок 1.2 – Рух теплових потоків [28]: 1 – частина деформаційної теплоти  $q_1$ , яка переходить в заготовку; 2 – частина деформаційної теплоти  $q_2$ , яка відводиться з частиною металу; 3 – теплота  $q_3$ , що утворюється в результаті тертя між частиною металу заготовки та передньою частиною ріжучого інструменту; 4 – тепловий потік  $q_4$ , що утворюється внаслідок теплообміну між поверхнею впливу з частиною різальної пластини; 5 – тепловий потік  $q_5$ , який з'являється під час теплообміну між поверхнею впливу та задньою поверхнею різця; 6 – кількість теплоти  $q_6$ , яка виникає в результаті тертя

Третя сума в рівнянні теплового балансу  $q_5+q_6$ , яка позначає кількість відведеної теплоти, зростає зі збільшенням швидкості впливу механічного або теплового навантаження.

Поширення температурного поля [29-31] у різальній пластині із багат шаровим покриттям описано сукупністю ізотерм. Графічно (див. рис. 1.3, рис. 1.4) температурне поле зони впливу представлено рядом ізотерм, що формують уявлення про наявність та напрям температурних градієнтів в пластині.

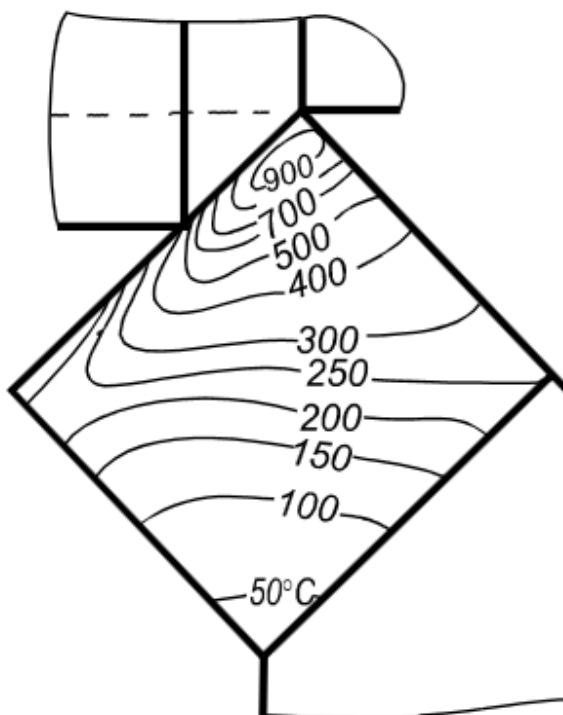


Рисунок 1.3 – Зміна температури в зоні дії теплового навантаження системи [30]

Встановлено, що найбільш нагрітою стає частина передньої поверхні. Можна бачити (рис. 1.3, 1.4), що на деякій відстані від передньої поверхні величина температури змінюється дещо повільніше, ніж температура у інших частинах.

### **1.3. Теплофізика пластичної деформації та тертя при механічному впливі на покриття**

Деформаційні процеси під час механічного впливу спостерігаються в області зсуву матеріалу та навколо контактної зони різальної пластини, в зоні спостереження високих швидкостей зміни деформації та температури [28-32]. Як правило, виділяють дві основні області зсуву.

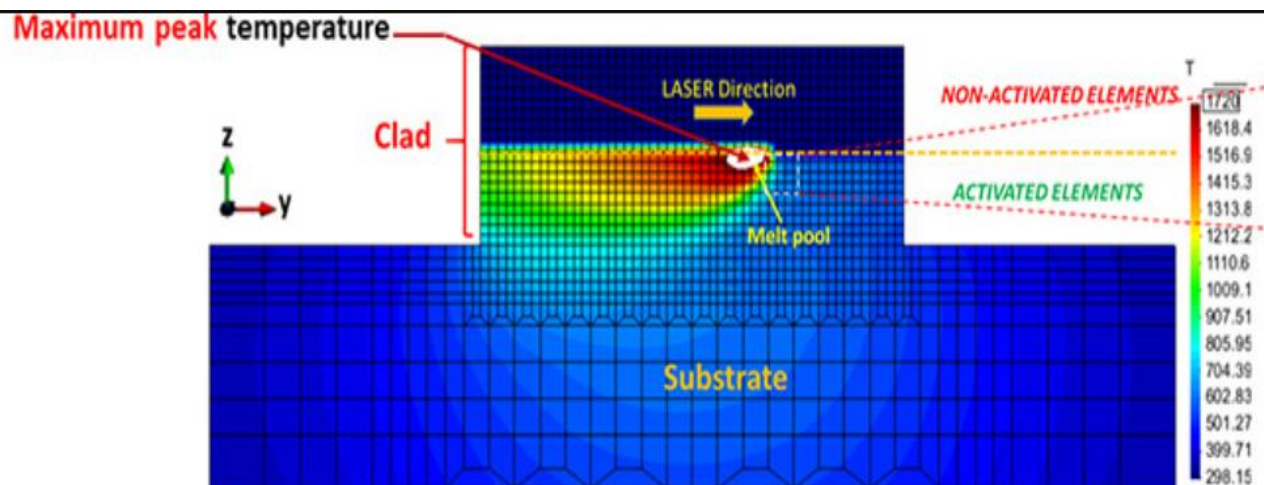


Рисунок 1.4 – Схема розташування температурних ліній рівня в області впливу теплового потоку [29]

Деформаційні процеси у матеріалі при розгляді первинних і вторинних областей впливу залежать від умов проведення контактної операції. Дуже складними вважаються трибологічні умови між поверхнями різальної пластини та матеріалу.

Автори [30] вважають, що напруження та температура в різці та навколо контактної зони набувають достатньо високих значень при відповідних умовах та характеристиках, що приводить до надмірного зносу, а іноді, і до руйнації багат шарової структури.

Однією з найпоширеніших моделей в описі процесу високошвидкісної деформації, вважається модель Джонсона-Кука [31, 32]. В рамках цієї моделі залежність напружень  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$  від деформації, напружень  $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$  від деформації  $\varepsilon$ , швидкості зміни деформаційних процесів  $\dot{\varepsilon}$  та температури  $T$  має вигляд [32]:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \cdot [1 - C \ln \dot{\varepsilon}^*] \cdot [1 - T^{*m}] \quad (1.2)$$

де  $\varepsilon$  – показник ефективної пластичної деформації;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$ ,  $m$  – емпіричні параметри в рамках моделі Джонсона- Кука;  $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$  – безрозмірна величина

швидкості зміни величини пластичної деформації ( $\dot{\varepsilon}_0 = 0,1 \text{ c}^{-1}$ );  $T^* = \frac{T - T_e}{T_m - T_e}$  – гомологічна температура;  $T_m$  – температура плавлення;  $T_e$  – температура, що задає параметри навколишнього середовища.

Деформацію руйнування можна визначити за відповідним співвідношенням [32]:

$$\varepsilon_f = (D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)) (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) (1 + D_5 T^*), \quad (1.3)$$

де  $D_i$ , ( $i=1, \dots, 5$ ) – параметри, які описують характеристики матеріалу;  $\sigma^*$  – коефіцієнт жорсткості.

Результати досліджень [30-32] показали, що напруження тертя ( $\tau_f$ ), яке визначається на поверхневій частині ріжучого інструменту, як правило, є пропорційним нормальному напруженню ( $\sigma_n$ ). Коефіцієнт пропорційності є коефіцієнтом тертя  $\mu$ , який зв'язує відповідні параметри на основі кулонівського тертя за співвідношенням у вигляді :

$$\tau_f = \mu \sigma_n. \quad (1.4)$$

Кулонівська модель тертя ефективно описує процес тільки при низьких швидкостях під впливом умов, що сформувались в контактній області. Вважається [32], що швидкість показників зносу структури покриття сильно залежить від відповідних умов під час контакту елементів.

Міжфазне тертя описується функцією нормального розподілу напружень та тертя. В роботі [33], нормальне напруження набуває найбільшого значення у крайній точці, а потім, із віддаленням поступово зменшує значення до нуля в точці, в який стружка відокремлюється від контактної пластини (дивись рис. 1.5). На рисунку позначені:  $l_p$  – довжина області контакту тертя;  $l_c$  – довжина контакту стружки на інструменті.

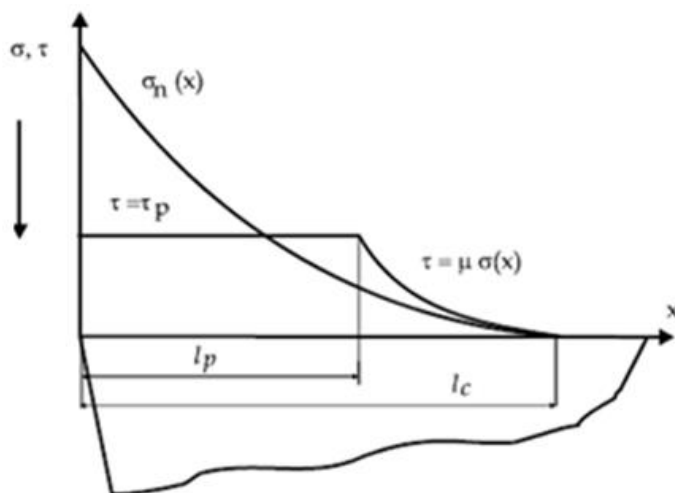


Рисунок 1.5 – Графіки залежностей нормального розподілу напруг і тертя в різальній пластині [33]

Розподіл нормального напруження та напруження зсуву, які спостерігаються на ділянці передньої частини поверхні інструменту можна представити двома способами у вигляді [33]:

$$\begin{aligned} \tau_f(x) &= \tau_p : \mu\sigma_n(x) \geq \tau_p, \quad 0 < x \leq l_p, \\ \tau_f(x) &= \mu\sigma_n(x) : \mu\sigma_n(x) < \tau_p, \quad l_p < x \leq l_p. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Дослідження показують [30-33], що в представлених моделях умови тертя в зоні контакту різця і матеріалу при дослідженні відповідного процесу, як правило, вважалися постійними, із постійним коефіцієнтом тертя, які можна було описати законом Кулона.

В той же час, середній коефіцієнт тертя як правило, обчислюється на основі вимірних сил впливу за співвідношенням (1.6) [33]:

$$\mu = \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c - F_t \tan \alpha}. \quad (1.6)$$

де  $F_t$ ,  $F_c$  – сили впливу;  $\alpha$  – кут між вектором сили та віссю.

Авторами роботи [34] введено емпіричне рівняння характеристики напружень в рамках моделі тертя в області контакта, яке представлено у вигляді:

$$\tau_f = k[1 - e^{-(\mu\sigma_n/k)}], \quad (1.7)$$

де  $k$  – коефіцієнт напруження робочого матеріалу;  $\mu$  – коефіцієнт тертя.

Значення коефіцієнта тертя встановлено в результаті проведених експериментів для різних комбінацій матеріалів. При низьких показниках нормальних напружень вираз (1.7) зводиться до рівняння (1.4). Причому, коефіцієнт тертя стає рівним напруженню зсуву частини робочого матеріалу за умови високих нормальних значень показників напружень.

Роботи [35, 36] представили модифікації моделі, шляхом множення коефіцієнта пропорційності  $k$  на введений фактор тертя  $m$ , причому  $0 < m < 1$ , і ввівши у вираз (1.7) показник ступеня  $n$  [35]:

$$\tau_f = mk[1 - e^{-(\mu\sigma_n/mk)^n}]^{1/n}. \quad (1.8)$$

За результатами дослідження встановлено, що на поверхні в області тертя відбувається процес тепловідведення із значенням питомої потужності  $q_f = \tau_f v_c$ , де  $v_c$  – швидкість різання [35].

Характер розподілу тепла встановлюється за допомогою коефіцієнта теплового розподілу –  $R$ , за допомогою якого визначається відсоток теплової енергії, яка надходить у частину матеріалу. Величина обчислюється за формулою:

$$R = \frac{1}{1 + h(\lambda_t/\lambda_w)\sqrt{\alpha_w/\alpha_t}}, \quad (1.9)$$

де  $\lambda_t$  і  $\lambda_w$  – показники теплопровідності матеріалів інструменту та заготовки;  $\alpha_t$  та  $\alpha_w$  – температуропровідності цих об'єктів, відповідно;  $h$  – коефіцієнт, який згідно [30] дорівнює 1.

В роботі [31] представлений аналіз моделі тертя при прогнозуванні термонапружених процесів шляхом моделювання з метою порівняння теоретичних та експериментальних результатів.

Застосування метода кінцевих елементів [31] дозволило змодельовати та врахувати всі розподіли напружень в різальній пластині із нанесеним покриттям (дивись рис. 1.6). На рисунку 1.6 *а* представлений приклад ефективного розподілу напружень, сформований в рамках моделі змінного зсувного тертя при умові, що швидкість різання складала 150 м/хв. Аналіз процесу дозволяє провести розподіл температури при однакових умовах впливу, що представлений на рисунку 1.6 *б*. Крім того, автори [31] проаналізували та узагальнили вплив на процес формування полів деформацій та температур наявність захисного покриття. Результати дослідження представлені на рисунку 1.7.

#### **1.4. Експериментальні та теоретичні дослідження теплових полів в різальних пластинах із захисним покриттям**

Процес поширення теплового потоку в різальних пластинах, на які нанесено багатошарове покриття, постійно знаходиться в полі зору науковців. Найпопулярнішими вважаються покриття на основі титану, такі як TiN, TiC, TiCN і TiAlN та інші. Другий найпоширеніший тип покриттів є покриття на основі глинозему, наприклад, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Такі покриття мають високу хімічну стійкість і твердість під впливом високих температур у порівнянні із іншими твердими покриттями. Покриття TiAlN часто використовується в якості заміника оксиду алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> під час обробки матеріалів в режимі перерваного різання (методом фрезерування поверхні).

Значний внесок в дослідження багат шарових покриттів в якості термозахисного бар'єру при поширенні теплового потоку представлено у [2, 19, 20, 36-44].

Тонкі шари, включаючи TiC, TiN та шари Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, що нанесені на матеріал основи ISO P20 розглядались в процесі ортогонального впливу на металевий зразок в роботі [19]. Розглядались покриття з багат шаровою структурою TiC/TiN-P20 та TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC-P20 товщиною шарів 1 мкм/3 мкм/6 мкм відповідно.

Закон Кулона, як правило, лежить в основі теорії представлення механізму тертя між елементами контакту (коефіцієнт тертя обирається  $\mu=0,5$ ). В роботі [19] представлений висновок про те, що більша частина тепла переходить в матеріал контактної зони. Особливо помітним такий ефект стає для тришарового покриття складом TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN. Зроблений висновок про те, що частина теплоти, при переході в пластину із покриттям є меншою в разі інструменту без покриття.

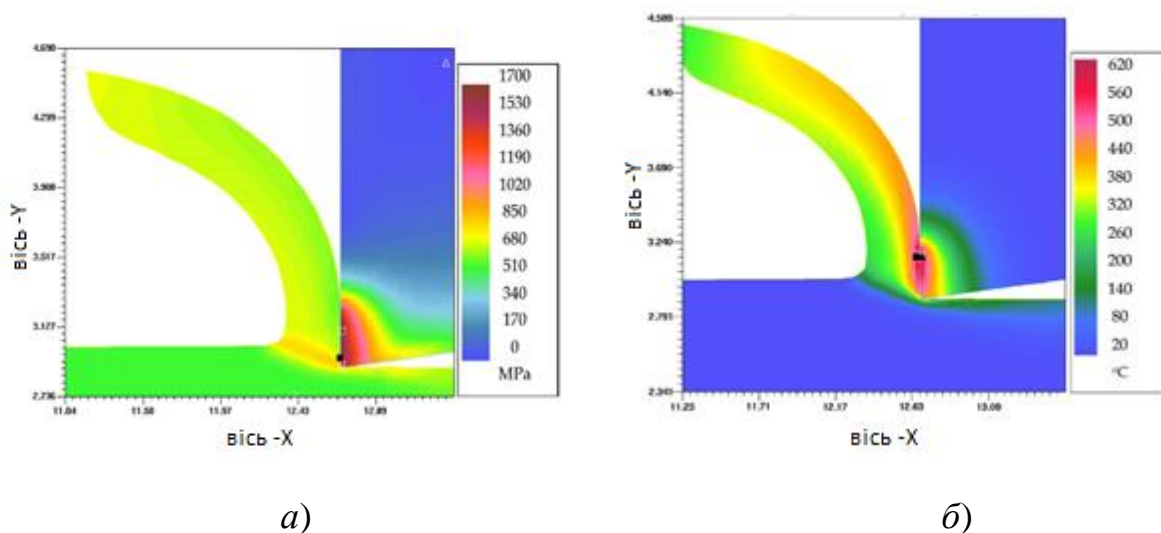


Рисунок 1.6 – Результати моделювання ефективного розподілу в рамках моделі змінного зсувного тертя: *a)* – напружень; *б)* – температури [31]



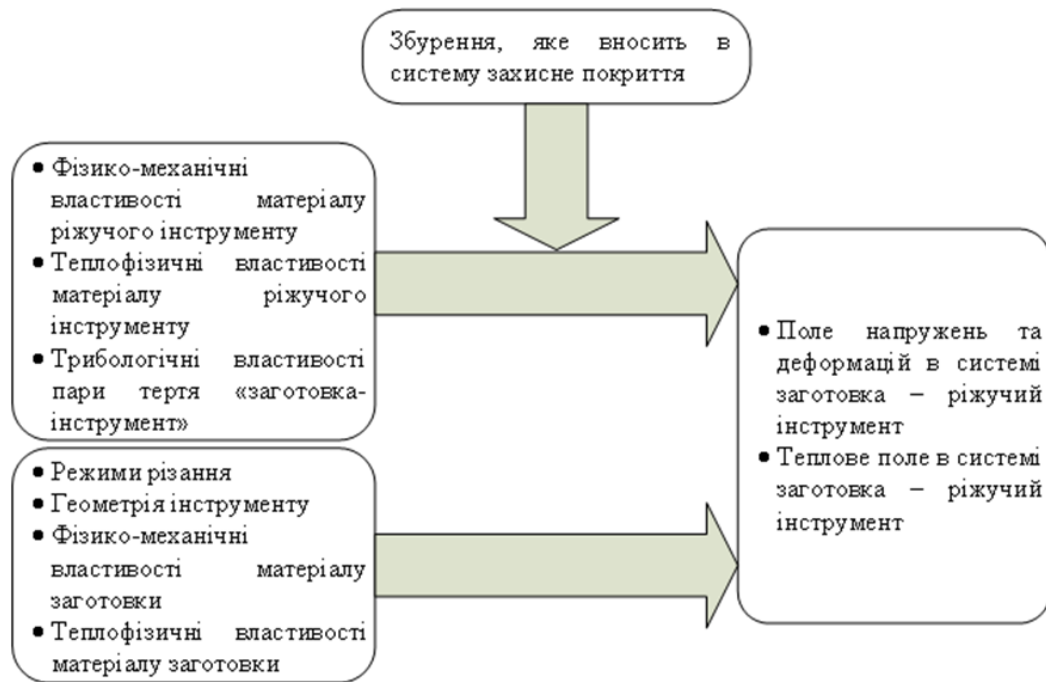


Рисунок 1.7 – Результати аналізу багатофакторного впливу на деформаційні, температурні та поля напружень [31]

Робота [20] показала наявність термоекрануючого впливу багат шарового покриття з структурою  $TiC/Al_2O_3/TiN$  із сумарною товщиною всіх шарів близько 10 мкм, які нанесені на карбідну підкладку марки ISO P20. Така особливість значно вплинула на термомеханічні характеристики об'єкту.

Вплив температури на деформаційні процеси в області різання постійно знаходяться в полі зору науковців. Автори [41-47] проводили теоретичні розрахунки процесу пластичної та пружної деформації в зоні підвищених механічних навантажень. Так, з метою розрахунку величини підвищення температури внаслідок процесів пластичної деформації, в дослідженні [41] були представлені розрахунки, що склались з трьох етапів. На першому етапі був проведений розрахунок термічного числа  $R$  (коефіцієнта теплоізоляції матеріалу) за формулою роботи [45]. Протягом наступних двох етапів обчислень були проведені розрахунки в рамках теорії подібності, яка представлена та обґрунтована в роботі [46].

Величину приросту температури, який виникає внаслідок дії джерела тертя та формування теплового потоку, встановлювали на основі [47] та [29]. В рамках теоретичних розрахунків [40], моделювання поширення теплового поля під час контактного процесу було проведено з використанням одношарового покриття TiAlN (товщина 2 мкм) та одного багатшарового покриття TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN (сумарна товщина 10 мкм). Розглянута модель процесу металообробки з інструментом без нанесеного покриття та з нанесеним одношаровим покриттям узгоджувалась в рамках результатів відповідних розрахунків на основі співвідношень [47]. Зроблено висновок, що такі моделі задовільно описують результати для інструментів з багатшаровими покриттями, які містять проміжний шар з окислу алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [41].

Автори роботи [6], представили обґрунтування відповідного висновку, про те, що неможливо ідеально змоделювати процес механічної обробки металу через дуже різноманітні та складні трибологічні, механічні та термодинамічні фактори впливу на процес, що виникають при різанні, особливо в зоні вторинної деформації.

Робота [18] представляє модель поширення теплового потоку, яка базується на методі кінцевих елементів в рамках механічної обробки деталей дослідженні цієї операції з використанням нанесених на різальний інструмент твердих металевих покриттів. В роботі працювали над трьома покриттями, а саме: одношаровим TiAlN, двошаровим TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та двошаровим TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. З метою порівняння результатів використовувалась модель, в якій інструмент досліджувався без нанесеного покриття. Підтверджено, що покриття з низькими показниками теплопровідності виконують функцію теплового екрану, і, тим самим, підвищують температуру на поверхні різального інструменту. В той же час, температура в області підкладки значно знижує свої показники.

Зниження показників пластичної деформації в межах підкладки вважається достатньо важливим фактором для збільшення терміну придатності та подовження якісної служби різального інструменту. Покриття, що мають структуру TiAlN та TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> відзначені як найкращі теплові екрани [18].

Графічне представлення полів розподілу температур в ріжучому інструменті після часу обробки, що становив 8,5 мс показані на рис. 1.8. Так, напруження фон Мізеса (еквівалентні або ефективні напруження), температурне поле пластини та накопичена еквівалентна пластична деформація досліджені як функції від часу в точці А. Чорні лінії на рис. 1.8а являють собою шляхи *a* та *b*, уздовж яких розподіли температури в інструменті побудовані на рис. 1.9.

При порівнянні теплових профілів в інструментах з покриттям, можна побачити, що для  $\text{TiCN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  отримано найширшу зону з високою температурою. Зроблений висновок про те, що одношарове покриття  $\text{TiAlN}$  і двошарове покриття  $\text{TiAlN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  мають найнижчі показники розрахункової температури в підкладці для інструментів з покриттям. Автори [18] зробили висновок, про те, що покриття з низькою теплопровідністю мають високі теплозахисні властивості, які приводять до зниження температури в матеріалі підкладки, що добре узгоджується з літературою [19, 41, 44, 48].

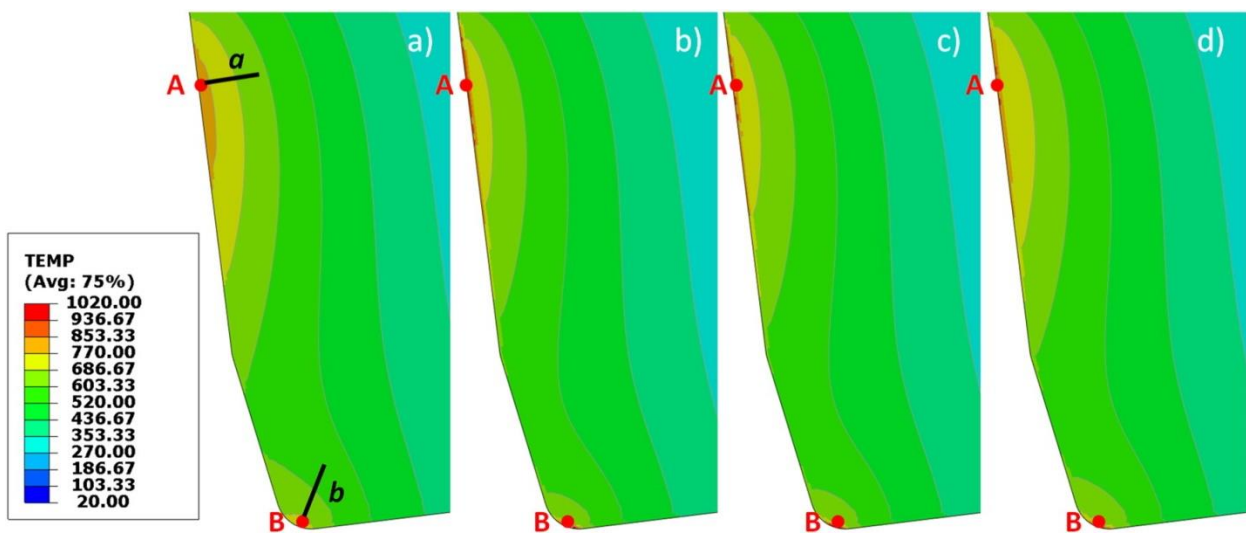


Рисунок 1.8 – Розподіл температурного потоку в пластині (при проведенні механічного впливу протягом 8,5 мс: *a*) – без покриття; *б*) – з одношаровим покриттям  $\text{TiAlN}$ ; *в*) двошаровим покриттям  $\text{TiAlN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ; *г*) – з двошаровим покриттям  $\text{TiCN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  [18]

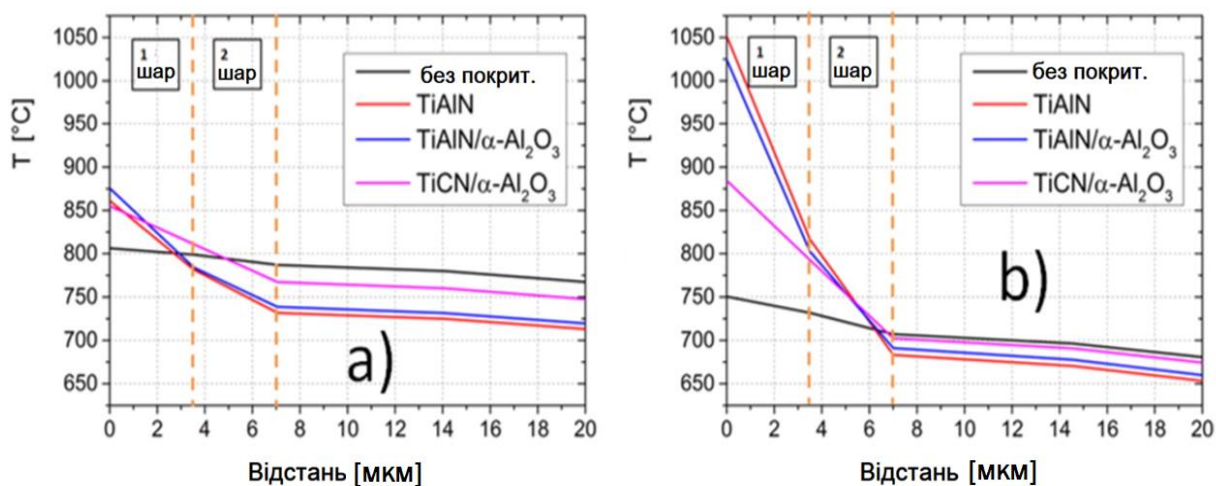


Рисунок 1.9 – Теплові профілі внутрішньої частини структури покриття [18]

Автори [8] встановили, що максимальне зниження інтенсивності теплових потоків під час механічної обробки забезпечується покриттями з багатошаровою структурою. Найкраще тепловий стан системи підтримує структура із нанесеним покриттям за схемою підкладка -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5 мкм) -  $\text{TiN}$  (5 мкм).

Так, порівнюючи з двошаровою структурою, підкладка -  $\text{TiN}$  (5 мкм) -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5 мкм) перша показує більший теплоекрануючий ефект. Максимальний тепловий ефект в зоні рішення відчувається від тришарової системи підкладка -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5 мкм) -  $\text{TiCN}$  (5 мкм) -  $\text{TiN}$  (5 мкм), що пояснюється вдалим поєднанням шарів багатошарової структури покриття.

На думку [5] покриття  $\text{TiAlN}$  та  $\text{TiAlN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  на поверхні ріжучого інструмента поведуться як найкращі теплозахисні екрани матеріалу. Встановлено, що температурне поле зменшує свої показники при проході через покриття  $> 150$  К для  $\text{TiAlN}$  та  $\text{TiAlN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . В той же час, покриття на основі  $\text{TiCN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  знижують показники температури тільки на 80 К. Коефіцієнт тертя, на думку вчених [50], змінюється в залежності від температури. Цей факт пов'язаний із з тим, що покриття окислюється, що призведе до зміни властивостей поверхні під впливом високих температур. При розрахунку параметрів тертя в рамках запропонованої моделі, коефіцієнт тертя обирався рівним  $\mu = 0,65$ .

## 1.5 Термофізичний вплив покриття

При дослідженні термофізичних процесів, що відбуваються у підкладці із покриттям з багат шаровою структурою, особливу увагу привертає вплив температури в зоні різання на зміну напружено-деформаційних полів.

Робота [21] показує дослідження теплоізолюючого ефекту матеріалу покриття ріжучої кромки інструменту. Авторами представлено порівняння температури різання в поверхневому шарі для інструментів з покриттям TiN та без покриття. Термофізичний вплив покриття складом TiCN /Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ TiN на поширення теплового потоку розглядалось у [23]. Встановлена залежність, при якій температура на поверхні ріжучої грані інструменту без наявного покриття пропорційно підвищується відповідно до показників віддалення від зовнішньої поверхні багат шарової структури. Показано, що температурний максимум на ріжучому інструменті з покриттям Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, нижчий, ніж на інструменті з покриттям TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN.

Встановлено [51], що поряд із теплоекрануючими властивостями покриття TiAlN, коефіцієнт тертя між інструментом та металом заготовки знижується до значення  $\mu = 0,63$  при зростанні температури контактної поверхні до 1073 К. Значення коефіцієнта тертя  $\mu$  для у випадку інструменту без покриття становить  $\mu = 0,75$ . Завдяки тому, що теплопровідність покриття TiAlN та шару оксиду Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> мають менші значення ніж матеріал підкладки, зменшується теплота яка виділяється в процесі різання. В той же час, між результатами різних авторів, які працюють над дослідженням проблеми теплофізичних процесів у багат шарових покриттях, спостерігаються певні розбіжності. Так, в роботах [2] та [52] автори змоделювали тепловий ефект в зоні різання при механічній обробці методами кінцевих різниць та кінцевих елементів. Показано, що більш висока температура контакту, а саме 1368 К, що спостерігалась для тришарової структури покриття, обумовлена низькою теплопровідністю компонентів покриття. Цей висновок особливо відноситься до проміжного шару Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Аналогічні висновки

спостерігались і у авторів роботи [23] при порівнянні покритого відповідною термозахисною структурою та непокритого.

Розподіл температури в поверхневій структурі покриття [2] в процесі різання інструментом, на підкладки якого нанесена багатошарова структура, з шарів TiC, TiN та плівки Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> показав максимальну температуру поблизу кромки ріжучого леза інструменту. В структурі із тришарового покриття TiN/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / TiC - підкладка товщиною 1мкм/ 3мкм / 6 мкм відповідно цей ефект проявився дуже чітко. Автори [2] пов'язали такий ефект із зменшенням теплопровідності керамічного шару Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в структурі покриття TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN. В дослідженні встановлено, що частина теплової енергії, що передається в інструмент із покриттям в контактній зоні зменшує показники в порівнянні із не покритим інструментом.

У роботі [53] розглядалися ріжучі інструменти із покриттями на основі TiN та оксиду алюмінію – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Матеріали дослідження процесу теплопередачі показали, що покриття TiN та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не продемонстрували задовільних результатів під час безперервного різання деталей. В той же час, спостерігалось невелике зменшення теплового потоку в зоні обробки у ріжучому інструменті з нанесеним покриттям товщиною 10 мкм.

Температурні зміни [23], що спостерігаються у приповерхневих шарах ріжучих інструментів з нанесеним покриттям та без нього, при віддаленні від поверхні наведені на рисунку 1.10. Аналіз графічних залежностей (температурних профілів) показує лінійне підвищення температури при наближенні до поверхні пластини без покриття. В той же час, температура в зоні обробки показує більш різке падіння показників при віддаленні від поверхні інструмента з покриттям. Встановлено [23], що максимум температури, яка була виміряна на ріжучому інструменті з нанесеним покриттям оксиду алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, має нижчі показники, ніж максимальне значення температури на ріжучому інструменті, з тришаровим покриттям TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN. Аналогічний результат був отриманий під час досліджень [54].

Матеріал покриття суттєво впливає на механізм теплопередачі в області контакту при проведенні операції різання [7, 55]. Встановлено, що покриття з оксиду алюмінію  $Al_2O_3$  збільшує тепловий потік, що виводиться із зони обробки разом із стружкою та в тіло заготовки, що пов'язується із особливими властивостями теплопровідності цього матеріалу. Тому, температура в первинній деформаційній зоні збільшується, в той час як сила різання зменшує свої показники.

Підвищення показників швидкості різання та величини подачі привело до збільшення коефіцієнта напруження на поверхні інструменту. Так [55], в інструменті без покриття встановлена максимальне напруження, що встановлено на глибині 0,015–0,02 мм від ріжучої поверхні інструменту

Автори [54] представили модель поширення теплового потоку під час операції ортогонального різання інструментів виготовлених з твердосплавних матеріалів із декількома шарами нанесеного покриття. Так, розглядалось покриття, що сформовано за схемою:  $TiN/Al_2O_3/TiC$  з товщинами шарів 1 мкм-3 мкм-6 мкм відповідно.

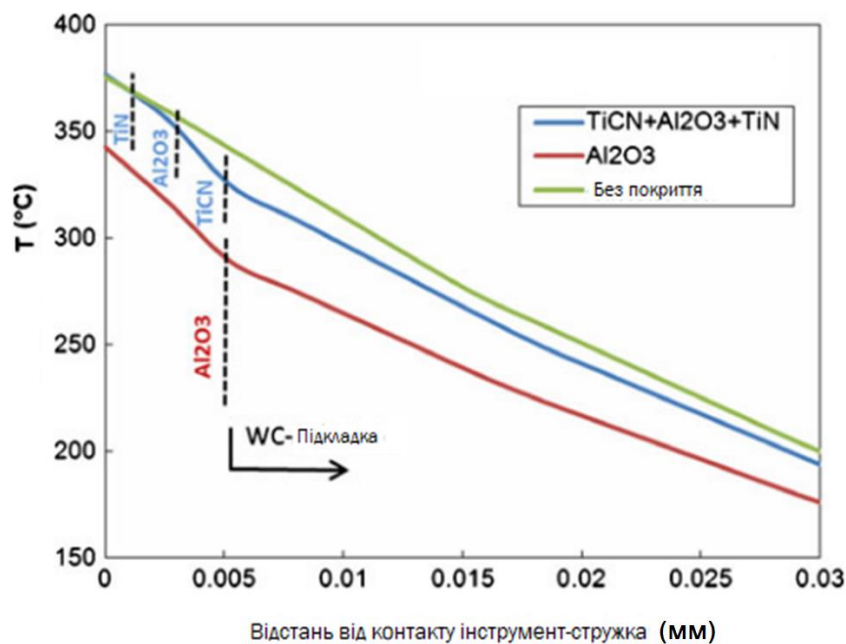


Рисунок 1.10 – Температурні профілі для інструменту з різними покриттями та без них [23]

Метод кінцевих елементів [54] з початковими даними: геометрією стружки, силою різання, температурою інструменту та показниками напруження, дозволив спрогнозувати процес поширення теплового та деформаційного поля.

Показано [54], що для інструменту без покриття швидкість зниження температури постійна по всій ділянці розглянутої глибини. При отриманні температурою інструменту стійкого стану, градієнт температури в покритті знижується більш ніж у п'ять разів при порівнянні із тимчасовим випадком та майже у два рази перевищує температурний градієнт основи. Такі висновки підтверджуються результатами експериментів та висновками в результаті моделювання, які були отримані в роботах [56-58]. Дослідники зробили висновки про те, що покриття інструменту не впливають суттєво на температурний розподіл між стружкою та підкладкою інструменту.

Двовимірною моделлю поширення теплового потоку вглибину ріжучого інструмента представлена в [59] в рамках метода скінченних елементів з врахуванням припущення про наявність та вплив звичайних деформацій. Термостабільним тілом розглядався ріжучий інструмент з покриттям та без нього. Товщина кожного шару покриття складала 5 мкм, і була вибрана з діапазону значень роботи [3]. Розподіл температури в шарах матеріалу всередині поверхні інструменту із покриттям, представлені на рис. 1.11 [59]. Результати [48] показують, що покриття впливають на розподіл температури поблизу ріжучої поверхні інструменту. Встановлено, що тепловіддача на межі розділу залежить від наявності покриттів.

В роботі [50] представлено дослідження теплового поля пластини з урахуванням зміни товщини покриття та величини інтенсивності теплового потоку. Досліджені ріжучі інструменти із покриттями TiN та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Встановлено, що покриття на основі TiN та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не продемонстрували задовільних результатів при проведенні безперервного різання. Вказано [50] про незначне зменшення величини теплового потоку при проході через відповідні покриття товщиною 10 мкм. Несуттєві зміни величини теплового потоку при поширенні вглиб ріжучої пластини інструменту з покриттям TiN товщиною 1 мкм.



Робота [54] показує, що під час різання, під впливом температурного навантаження, відбуваються структурно-фазові перетворення в поверхневих шарах матеріалів інструменту. Показано, що найбільша температура при проведенні операції різання спостерігається при обробці заготовки інструментом без покриття. Зроблений висновок про те, що найбільше зниження інтенсивності теплового поля забезпечують покриття із багатошаровою структурою.

Більший термозахисний ефект ріжучому інструменту забезпечує двошарова система – підкладка +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + TiN в порівнянні з двошаровою системою – підкладка + TiN +  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Одночасно, максимальне поліпшення теплового стану поверхневої структури ріжучої пластини інструменту надає тришарова система – підкладка +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + TiCN + TiN, що обумовлено сприятливою комбінацією шарів нанесеного покриття.

У таблиці 1.1 подано узагальнені результати досліджень науковців в рамках розглянутого питання, аналіз яких приводить до суперечливих висновків.

Вивчення цього питання показує, що поряд із висновками про наявність значного термозахисного ефекту при дослідженні покриттів різного складу, спостерігається інформація про відсутність такого термозахисного ефекту у покриттях.

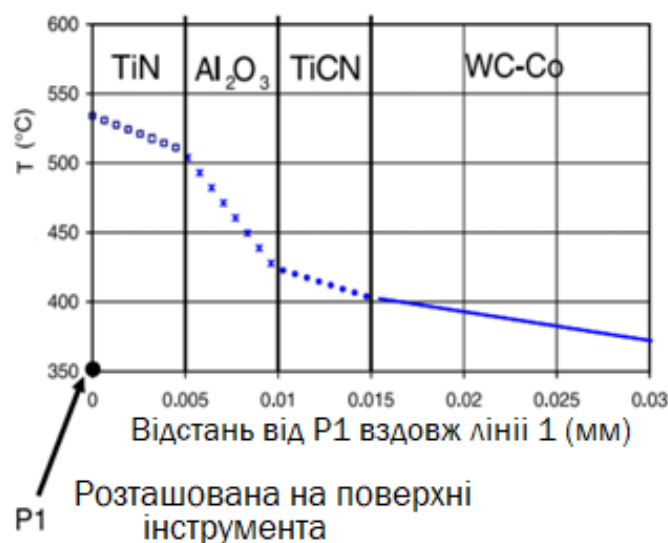


Рисунок 1.11 – Температурний профіль пластини з тришаровим покриттям [59]

Таблиця 1.1 – Узагальнені результати досліджень термофізичного впливу покриття

№	Покриття	Теплозахисний ефект	Коефіцієнт тертя, $\mu$
[18]	П-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / TiN П-TiN / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> П-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiC/ TiN	Температура більша для інструменту без покриття	-
[5]	TiAlN-П TiAlN/ $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -П TiCN/ $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -П	Присутній термозахисний ефект, T знижується >150°C для TiAlN-П, TiAlN/ $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -П, T знижується >80°C для TiCN/ $\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -П	-
[21]	TiN-П TiC-П та Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -П	Незначний термозахисний ефект	-
[23]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -П TiCN/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / TiN-П	T збільшується на поверхні на 38% без покриття, на 24% для покриття Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , на 35% для TiCN/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / TiN	-
[51]	TiAlN-П	T знижується на 10,68% з покриттям	$\mu=0,63$ при T=800°C з покрит., без покрит. $\mu=0,75$
[2]	TiC-П TiN / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / TiN-П	Помітний термоізолюючий ефект	0,5, $\mu=const$
[52]	TiN / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / TiN-П	Підвищення T на поверхні різання до 1368 К (з покриттям) з 1183 К за рахунок термоізоляції	-
[53]	TiN-П Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -П	Термоізолюючий ефект відсутній	-

## 1.6. Деформаційні процеси в контактній зоні

Сучасні дослідження про вплив багат шарових покриттів на деформаційні процеси, які відбуваються під дією теплових та механічних навантажень, а саме вплив захисних покриттів на коефіцієнт тертя ріжучої пластини, представлені в роботах [59-65].

Відомо, що на значення коефіцієнта тертя конструкційних матеріалів по інструментальним матеріалам значно впливає хімічний склад та фізико-механічні властивості контактуючих пар. Особливу роль відіграють контактні напруження на поверхнях, що дотикаються та відповідні швидкості ковзання.

У роботі [59] представлено дослідження зміни значення коефіцієнтів тертя в залежності від складу поверхневих шарів на основі TiN та (Ti, Al) для ріжучих інструментів з покриттями. Дослідження [59] показують, що покриття TiN має значно нижчий коефіцієнт тертя у порівнянні із відповідними показниками покриттів (Ti, Al) N. Наслідком цього факту є те, що енергія операції тертя, яка формується на межі розділу, вважається нижчою, тому і відповідно густина теплового потоку, що переходить в матеріал ріжучого інструменту через покриття знижується. Дослідження проблеми тертя в інструментах з покриттями TiN, TiAlN, AlCrN представлено в роботі [54]. Показано характеристики показників тертя в контактній зоні інструмент/покриття/заготовка під час операції різання.

При вивченні коефіцієнта тертя встановлено [53, 54] перевагу покриттів, які мають в своєму складі сполуки AlCrN і TiAlN. Вони мають однакові характеристики тертя і показують кращі властивості тертя. В той же час, покриття на основі TiN демонструє гіршу поведінку при високих тисках та низькій швидкості ковзання. Встановлено [54], що в інструментах без нанесеного покриття коефіцієнт тертя набуває набагато більші значення, ніж у інструменті з нанесеними структурами покриттів. На думку авторів, з механічної точки зору, підвищення швидкості різання призводить до зниження значення трибологічного коефіцієнта.

В робота [55] продемонструвала дослідження характеристик тертя в зоні контакту робочого інструменту та заготовки при обробці сплаву Inconel 718 різними твердосплавними інструментами з нанесеними багатошаровими покриттями.

Використання для опису фазових термодинамічних і кінетичних перетворень в нанесеному покритті на основі синергетичної системи [58-60] показало, що із зростанням величини напружень покриття руйнується в результаті збільшення відносної швидкості руху трибопар. Такій підхід дозволяє з простих початкових рівнянь сформувані синергетичний потенціал, який можна вважати аналогом вільної енергії.

З викладеного [58-63] видно, що структура поверхневих шарів відіграє ключову роль у процесі тертя. Тертя впорядкованих співрозмірних поверхонь показує переривчастий рух, одночасно, для характеристик неспіврозмірних і неупорядкованих поверхонь переривчастий режим різання не передбачається. Тому, для аналітичних та числових розрахунків [59, 60, 63] при врахуванні зовнішнього впливу були введені температури поверхневої структури та поверхонь тертя. Крім того, згідно з моделлю прослизання по межах зерен [63], яка базується на уявленні про локальне плавлення меж зерен при інтенсивному зовнішньому впливі, найбільший внесок в пластичну складову коефіцієнта тертя очікується в матеріалах покриття із дрібнозернистою структурою [63-67].

Дослідження [68-72] показали результати ефективності процесу різання з врахуванням теплових та деформаційних характеристик для інструментів з покриттями Cr/W-DLC/DLC в порівнянні з іншими видами інструментів з покриттями TiC-, TiAlN-, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-.

В роботі [72] показані результати дослідження фізико-механічних характеристик борвмісних покриттів Al-C-B на сталі С40, що характеризуються підвищеною твердістю та зносостійкістю. Представлено результати моделювання на основі системи Лоренца у вигляді фазових портретів системи в рамках кінетики досліджених процесів при різних показниках часу релаксації, внутрішньої напруги та температури структури. Сформовані фазові портрети

(дивись рис. 1.12, 1.13). Аналіз портретів системи надає інформацію про температурні межі в рамках яких відбувається процес та концентрацію атомів на поверхні. На думку авторів інформація дозволить контролювати технологічний процес отримання відповідного покриття.

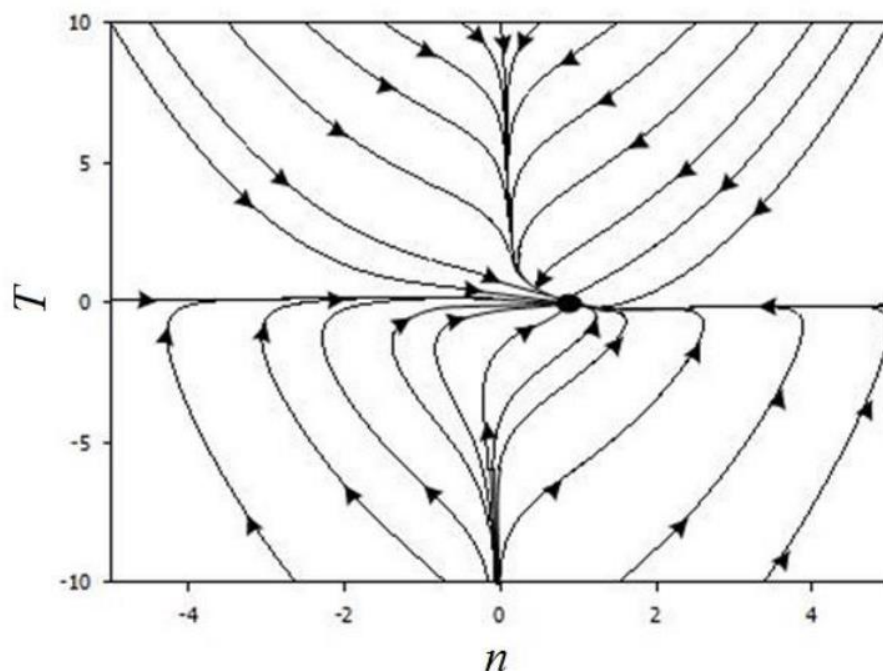


Рисунок 1.12 – Фазовий портрет системи при  $\tau_\sigma \ll \tau_T = \tau$ ,  $\sigma_0 = 0,5$  [72]

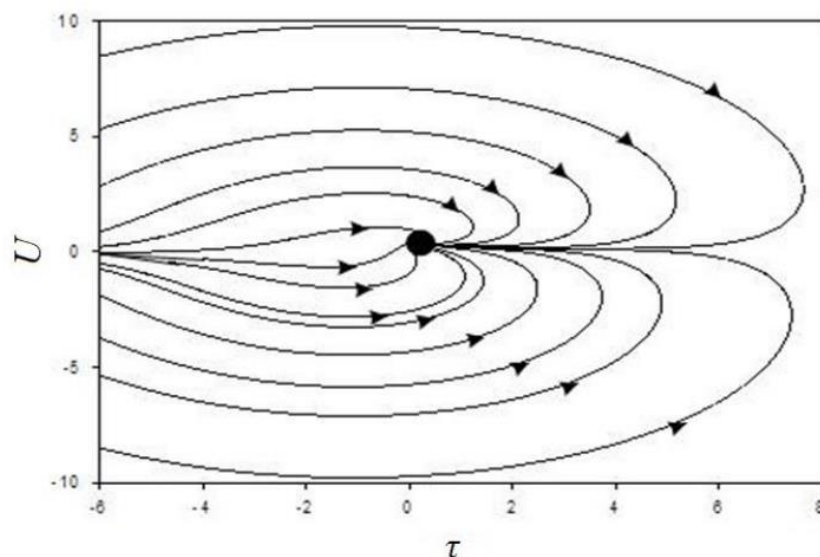


Рисунок 1.13 – Фазовий портрет системи при  $\tau \ll \tau_\sigma = \tau$ ,  $\sigma_0 = 0,5$ ,  $\varepsilon_m = 0,5$  [72]

Результати декількох досліджень [73-75] показали, що нижчу температуру операції різання інструменту з покриттям з матеріалом TiAlN під час процесу обробки металу різанням можна пояснити властивістю покриття зменшувати коефіцієнт тертя під час цього процесу. Високі температури, що виникають при різанні, та достатньо високі напруги, а також фізико-механічні характеристики поверхні формують унікальну трибосистему.

На даний час багато дослідників вивчають процеси тертя, деформаційні процеси, що відбуваються між інструментом і матеріалом заготовки, процеси в різальній пластині із нанесеними покриттями, зміни в багат шаровій структурі з поширенням теплового поля. Але, процес впливу на об'єкти операції механічної обробки є багатофакторним, тому деякі питання формування та кінетики теплових та деформаційних полів, еволюції напружено-деформованого стану структури покриттів залишаються невивченими і представляють значний інтерес для науковців .

### **Висновки до Розділу 1**

1. За результатами проведеного аналізу теоретичних та експериментальних результатів досліджень процесів теплоутворення та поширення теплових потоків в області впливу під час обробки матеріалів різальною пластинною із нанесеним багат шаровим покриттям встановлено, що частина питань потребує додаткових досліджень, а саме:

- встановлення закономірностей в процесі поширення теплового поля вглиб різальної пластини із нанесеними покриттями;
- вплив складу та структури покриття на його теплоізолюючі характеристики;
- дослідження особливостей швидкості поширення теплового потоку при проході через шари покриття вглуб структури;
- вплив захисних багат шарових покриттів на розподіл температурних полів в системі покриття-інструмент в залежності від режимів обробки матеріалів та їх трибологічних характеристик.

2. Для формування уявлення про особливості впливу покриття на деформаційні поля та поля напружень, що виникають у відповідній структурі із нанесеним покриттям, необхідно провести додаткові дослідження температурної залежності показників деформації та напруження, дослідження особливостей формування деформаційно-напруженого стану багатошарової структури, зв'язку між характеристиками напруження та деформації, кінетики деформаційних процесів.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Результати моделювання розподілу температурних полів, аналіз напружено-деформованого стану різальної пластини надає важливі додаткові відомості, які необхідні для конструювання та прогнозування властивостей інструментальних матеріалів, а також для оптимізації процесу різання.

Проведений аналіз літературних джерел показав, що найефективнішими методами дослідження процесів поширення та еволюції зміни теплових та деформаційних полів є аналітичні методи та математичні моделі, які сформовані на основі теоретичних співвідношень, що описують відповідні явища.

Метою цієї роботи є дослідження впливу та аналіз особливостей поширення температурного та деформаційно-напруженого поля в різучій пластині без нанесеного покриття, з одношаровим та багатшаровими покриттями з врахуванням заданих граничних умов.

Для реалізації мети роботи були використані теоретичні та експериментальні методи, а саме:

- метод скінченних елементів в моделюванні та дослідженні температурного поля;
- метод кінцевих різниць;
- метод змінних напрямків (поздовжньо-поперечна схема) в формуванні температурного поля структури із врахуванням її властивостей;
- метод виключення, при розв'язанні системи диференціальних рівнянь;
- метод фазового простору в дослідженні термдеформаційних та напружено-деформаційних полів.



## 2.1. Моделювання теплового процесу в пластині

Температурним полем вважають сукупність значень температур  $T$  у всіх точках площини у певний фіксований момент часу  $t$ . В моделюванні температурного поля різальної пластини розглядають нестационарне теплове поле, що залежить також і від часу  $T = f(x, y, z, t)$ . Градієнт температур є векторна величина, яка чисельно рівна похідній від температури у напрямку нормалі до ізотермічної поверхні

$$\text{grad } t \equiv \nabla T = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta T}{\Delta n} \right) = \frac{\partial T}{\partial n}. \quad (2.1)$$

Поле температурного градієнта є векторним полем, тому

$$\nabla T = \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) \cdot \bar{i} + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) \cdot \bar{j} + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \cdot \bar{k}, \quad (2.2)$$

де  $\frac{\partial T}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial T}{\partial y}$ ,  $\frac{\partial T}{\partial z}$  – координати градієнта (частинні похідні теплової функції поля);

$\bar{i}$ ,  $\bar{j}$ ,  $\bar{k}$  – одиничні вектори-орти координатних осей.

Тепловий потік – кількість теплоти  $Q$ , що передана в одиницю часу. Тепловий потік, віднесений до одиниці площі поверхні  $F$ , називається густиною теплового потоку або тепловим навантаженням поверхні нагріву, і обчислюється за формулою:

$$q = \frac{Q}{F}. \quad (2.3)$$

Вектор теплового потоку спрямований у бік, протилежний градієнту температур, оскільки тепла енергія самостійно поширюється лише у бік зменшення температури.

Основний закон теплопровідності (закон Фур'є), можна сформулювати наступним чином: щільність теплового потоку пропорційна градієнту температури

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } t = -\lambda \cdot \nabla T, \quad (2.4)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К), що дорівнює тепловому потоку через одиницю поверхні (1 м<sup>2</sup>) при градієнті температур, що дорівнює  $\text{grad } t = 1 \text{ K/м}$ .

Перенесення теплоти в твердому тілі відбувається шляхом теплопровідності. Тому, з врахуванням (2.4) та співвідношення  $\nabla q = -\nabla(\lambda \cdot \nabla T)$  рівняння теплопровідності приймає вигляд

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) + q_V. \quad (2.5)$$

Рівняння (2.5) виражає зв'язок між просторовими та тимчасовими змінами температури та дозволяє визначати температурне поле у твердому тілі. Його можна записати у вигляді

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_V}{c \cdot \rho} = a \nabla^2 T, \quad (2.6)$$

де  $a = \lambda / c \rho$  м<sup>2</sup>/с – коефіцієнт температуропровідності (характеризує швидкість поширення теплової енергії);  $\nabla^2 T = \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$  – оператор Лапласа.

Вираз (2.6) є диференціальним рівнянням теплопровідності Фур'є.

Формування моделей теплових процесів, з врахуванням відповідних умов зводиться, як правило, до розв'язання диференціального рівняння теплопровідності з встановленими відповідними граничними умовами [81-83]. Для однорідного ізотропного середовища, при відсутності внутрішнього джерела

тепла, рівняння теплопровідності для функції теплового нестационарного поля  $T = T(x, y, t)$  у двовимірному випадку набуває вигляду [84]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T, \quad x, y \in D, t > 0, \quad (2.7)$$

де  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  – диференціальний оператор Лапласа;  $c$  – питома теплоємність середовища;  $\rho$  – питома густина середовища;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності середовища;  $D$  – область дослідження;  $t$  – час.

Для отримання однозначного рішення рівняння (2.7), необхідно врахування наступних умов:

- геометричних, згідно з якими встановлюються форма та розміри твердого тіла;
- фізичних, що задаються фізичними властивостями тіла або їх залежностями від температури;
- початкових, що встановлюють розподіл температури тіла в початковий момент часу (тимчасова крайова умова)

$$T_n = T(x, y, z, \tau_0); \quad (2.8)$$

- умов переходу теплового потоку на межах різних шарів даного тіла

$$-\lambda_1 \cdot \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right) \Big|_{x_{i-0}} = -\lambda_2 \cdot \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right) \Big|_{x_{i-0}}; \quad (2.9)$$

- умов взаємодії тіла з навколишнім середовищем (просторова гранична умова). Граничні умови для розв'язання рівняння теплопровідності формуються в рамках задачі дослідження.

Задача розробки математичної моделі для різальної пластини із одношаровим та двошаровим покриттям та її реалізація одним з чисельних методів в двовимірному випадку постійно залишається в полі зору науковців [85-90].

Досліджуємо двовимірну пластину із нанесеним покриттям з  $i$  шарів розмірами  $L_x \times L_y$  (дивись рисунок 2.1). Вважаємо, що на одну ділянку з температурою  $T_k$  пластина відчуває тепловий вплив  $Q$  з рівномірною інтенсивністю. На пластину згідно рисунка 2.1 нанесено двошарове покриття товщиною шарів  $h_1 = L_y - y_1^*$ , та  $h_2 = y_1^* - y^*$  відповідно.

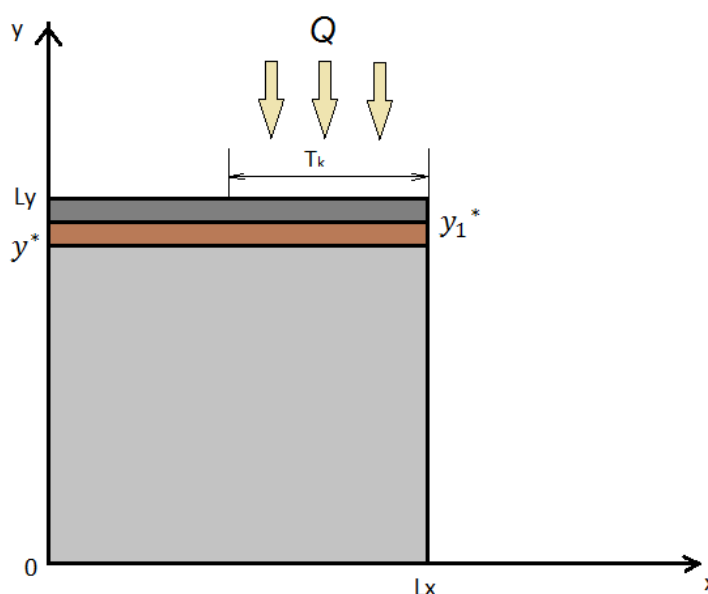


Рисунок 2.1 – Схема пластини із двошаровим покриттям

Система рівнянь (2.10) описує тепловий стан пластини:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 c_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad \begin{cases} 0 < x < Lx \\ 0 < y < y^* \end{cases} \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad \begin{cases} 0 < x < Lx \\ y^* < y < y_1^* \end{cases} \\ \rho_3 c_3 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad \begin{cases} 0 < x < Lx \\ y_1^* < y < Ly \end{cases} \end{array} \right. \quad (2.10)$$

де  $c_i$  – питома теплоємність матеріалу (Дж/кг·°К);  $\rho_i$  – густина (кг/м<sup>3</sup>);  $\lambda_i$  – теплопровідність (Вт/кг·°К).

Вважаємо, що в початковий момент часу температура пластини у всіх її точках дорівнює  $T_0 = 293$  К. Сформуємо початкові умови у вигляді:

$$t = 0, 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y: T = T_0, \quad (2.11)$$

З метою формування граничних умов задачі розміщуємо відповідну пластину в прямокутну систему координат. Причому, площа пластини у формі прямокутника обмежена прямими:  $y = 0, y = L_y, x = 0, x = L_x$ . На границі пластини  $L_y$  сформована контактна ділянка  $T_k$  довжиною  $L_x/2$ . Вважається, що ця ділянка відчуває вплив зовнішньої теплоти і через неї тепловий потік передається в матеріал пластини. Виконується гранична умова третього роду [91-92]:

$$t > 0, \frac{L_x}{2} \leq x \leq L_x, y = L_y: -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = k_1(T - T_k), \quad (2.12)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт теплообміну.

Граничні умови першого роду виникають на нижній границі пластини, тому що далі знаходиться матеріал пластини і температура вважається сталою. Умови наступні:

$$t > 0, y = 0: T = T_0, \quad (2.13)$$

Для всіх інших границь пластини, сформовані умови теплообміну з навколишнім середовищем, які представлені у вигляді:

$$\begin{cases} t > 0, k > 0, x = 0, x = L_x, \\ 0 \leq x < \frac{L_x}{2}, y = L_y \end{cases} : -\lambda \frac{\partial T}{\partial(x,y)} = k_2(T - T_0). \quad (2.14)$$

де  $k_2$  – коефіцієнт теплообміну.

На границях проміжних шарів  $y = y^*$  та  $y = y_1^*$  застосовуються граничні умови четвертого роду. Такі умови формуються на границі між тілами з різними коефіцієнтами теплопровідності.

Модель допускає припущення, в якому допускається ідеальний контакт між пластиною та захисними шарами. Такі умови можна сформулювати у вигляді співвідношень:

$$\begin{cases} T_1(t, y^*) = T_2(t, y^*), \\ T_2(t, y_1^*) = T_3(t, y_1^*), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=y^*} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=y^*}, \\ -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} \Big|_{y=y_1^*} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} \Big|_{y=y_1^*}. \end{cases} \quad (2.15)$$

Таким чином, представлена задача встановлення функції теплового поля  $T(x, y, t)$ , що задовольняє заданим рівнянням та граничним умовам для вказаної структури.

## 2.2 Математичні основи розрахунку термодинамічних процесів

Числове моделювання температурного поля ріжучої пластини під впливом теплового навантаження передбачає детальний розрахунок динаміки поширення теплового потоку вглиб структури. Нерівномірне нагрівання структури ріжучої пластини може призвести до безконтактної деформації, динаміки напружено-деформаційного стану системи в результаті впливу градієнта температур. Тому, питання комп'ютерного моделювання нестационарного температурного поля є актуальним. Моделювання такого процесу дозволяє одержати результати, які найбільш наближені до експерименту. У свою чергу, ефективне вирішення цього питання можливе тільки за умови формування адекватної математичної моделі та використання коректних методів її розв'язання.

### 2.2.1 Дискретна модель в реалізації дослідження поширення температурного потоку

Метод скінченних елементів (МСЕ) був вибраний нами для реалізації ідеї апроксимації безперервної функції теплопровідності дискретною моделлю. Безперервною функцією вибрана температура, яка формується з множини кусково-неперервних функцій, визначених на скінченному числі елементарних областей, які називаються елементами [93, 94]. Перевагою метода МСЕ є можливість врахування різних властивостей матеріалу. Метод працює для різних елементів і дозволяє описувати процеси у геометрично складних фігурах, дозволяє провести аналіз тиску, деформації та температури для кожної точки схеми. Метод скінченних елементів базується на розбитті тіла на елементи.

Апроксимація диференціального рівняння різницеvim проведена із введенням просторово-часової сітки (див. рис. 2.2) з відповідними координатами

$$x_i = (i - 1) * h_x, \quad y_j = (j - 1) * h_y, \quad t_n = n * \tau, \quad (2.16)$$

де  $h_x, h_y$  – шаг сітки по абсцисі  $x$ , та ординаті  $y$  відповідно;  $\tau$  – шаг по часу;  $i = \overline{1, N_x}$ ;  $j = \overline{1, N_y}$ ;  $n = \overline{0, k}$ .

Всю область дослідження розбили на ділянки відповідними прямими (див. рис. 2.2).

Застосування чисельних методів для вирішення крайових задач теплопровідності завжди приводять до наближеного рішення, оскільки вони засновані на заміні безперервної математичної моделі, що описує процес поширення теплового потоку, на наближену дискретну модель. В той же час, числовий метод кінцевих різниць дає можливість вирішати складні крайові задачі, недоступні для аналітичного вирішення.

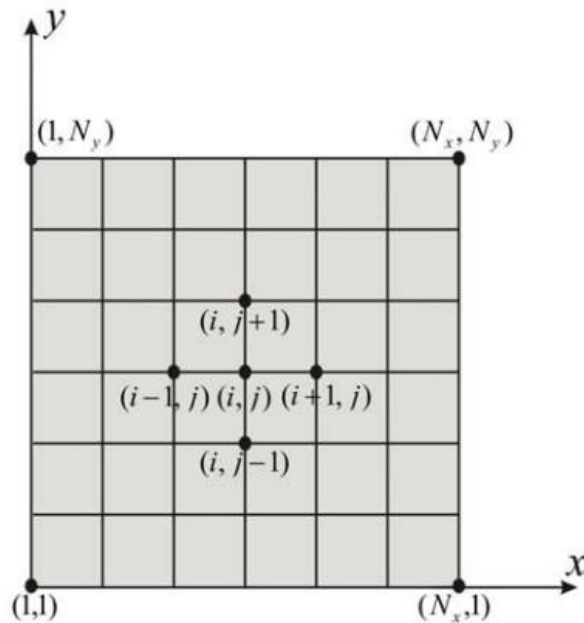


Рисунок 2.2 – Схема розбиття пластини просторово-часовою сіткою в рамках метода скінченних елементів

### 2.2.2 Метод кінцевих різниць в розв'язанні диференціального рівняння теплопровідності

Основа метода кінцевих різниць (метода сіток) базується на заміні частинних похідних відповідним наближеним значенням. Воно встановлюється, за означенням похідної, як відношення приросту функції (різниця значень функції в окремих точках - вузлах сітки) до приросту аргументу (шагу сітки). Диференціальне рівняння замінюється еквівалентним співвідношенням в кінцевих різницях і вирішується шляхом нескладних алгебраїчних операцій [95-97].

Позначимо

$$T(x_i, y_j, t_n) = T_{i,j}^n. \quad (2.17)$$

Проведемо заміну частинних похідних другого порядку в системі (2.10) на їх відповідні аналоги в рамках метода кінцевих різниць. Одержимо:



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

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2 * T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_x^2};$$

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

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - 2 * T_{i,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1}}{h_y^2};$$

Система (2.10) набуває вигляду:

$$\rho * c * \frac{T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^n}{\tau} = \lambda \left( \frac{T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2 * T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_x^2} \right), \quad (2.18)$$

$$\rho * c * \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} = \lambda \left( \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - 2 * T_{i,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1}}{h_y^2} \right), \quad (2.19)$$

Рівняння системи (2.19), (2.20) шляхом математичних перетворень зводимо до тридіагонального виду та розв'язуємо методом прогонки. Розглянемо рішення рівняння (2.19) методом [98-103] прогонки.

Перетворимо рівняння до виду

$$A_i T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_i T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_i. \quad (2.20)$$

В цьому рівнянні коефіцієнти  $A_i, B_i, C_i$  набувають вигляду:

$$A_i = C_i = \frac{\lambda}{h_x^2}, \quad B_i = \frac{2\lambda}{h_x^2} + \frac{\rho * c}{\tau}, \quad F_i = -\frac{\rho * c * T_{i,j}^n}{\tau}.$$

Рівняння (2.20) називають триточковими різницевиими рівняннями другого порядку [100, 102]. Система рівнянь (2.18), (2.19) має тридіагональну структуру. У зв'язку з тим, що розглядається нестационарна задача, систему рівнянь необхідно вирішувати на кожному кроці за часом.

### 2.2.3 Метод скінченних елементів та кінцевих різниць в дослідженні температурного поля

Нехай існують такі множини чисел  $\alpha_i$  та  $\beta_i$  ( $i = \overline{1, N-1}$ ) при яких виконується рівність

$$T_i^{n+\frac{1}{2}} = \alpha_i * T_{i+1}^{n+\frac{1}{2}} + \beta_i \quad (2.21)$$

Тобто триточкове рівняння другого порядку (2.20) перетворюється в двохточкове рівняння першого порядку (2.21). Зменшимо в рівнянні (2.21) індекс на одиницю, тоді вираз  $T_{i-1}^{n+1} = \alpha_{i-1} * T_i^{n+1} + \beta_{i-1}$  підставимо в рівняння (2.20). В результаті перетворень одержимо:

$$A_i T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_i T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i * \alpha_{i-1} * T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i * \beta_{i-1} = F_i.$$

З цього співвідношення виділяємо наступне:

$$T_i^{n+\frac{1}{2}} = \frac{A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}} T_{i+1}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{C_i \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}. \quad (2.22)$$

Вираз (2.23) набуває вигляду (2.22) і буде точно з ним співпадати при умові, якщо для всіх  $i = 2, 3, \dots, N-1$  виконуються твердження:

$$\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}, \quad \beta_i = \frac{C_i \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \alpha_{i-1}}. \quad (2.23)$$

Для встановлення значень  $\alpha_i$  і  $\beta_i$  у співвідношенні (2.23) необхідні  $\alpha_1$  і  $\beta_1$ . Встановлюючи  $T_{N,x,j}^{n+\frac{1}{2}}$  з правої граничної умови, встановлюємо температуру  $T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$  на проміжному часовому шарі за формулою (2.22).

Після цього приступаємо до вирішення рівняння (2.19). Підходи до вирішення рівняння (2.19) аналогічні рішення рівняння (2.18).

Перехід від  $n$ -го шару до  $(n+1)$ -го шару проходить у два етапи із кроками довжиною, яка дорівнює  $0,5 \tau$ .

$$\frac{u^{n+\frac{1}{2}} - u^n}{\tau} = \frac{1}{2} (\Lambda_1 u^{n+\frac{1}{2}} + \Lambda_2 u^n), \quad (2.24)$$

$$\frac{u^{n+1} - u^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} = \frac{1}{2} (\Lambda_1 u^{n+\frac{1}{2}} + \Lambda_2 u^{n+1}). \quad (2.25)$$

## 2.2.4 Метод мінімізації функціоналу у встановленні вузлових температурних показників структури

При розгляді стаціонарного теплового режиму, при якому температура в контактній зоні набуває максимального значення, диференціальне рівняння

теплопровідності (2.26) з врахуванням відповідних граничних умов теплообміну із зовнішнім середовищем (повітрям) (2.27) набувають вигляду (2.28):

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (2.26)$$

$$T = T_0, \quad (2.27)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} l_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} l_y + h_{1,2} (T - T_{e_{1,2}}) = 0. \quad (2.28)$$

Причому, значення коефіцієнтів  $l_x$  і  $l_y$  у формулі (2.28) вважаються напрямними косинусами вектора нормалі  $\mathbf{n}$  до відповідної поверхні.  $h_1$  – коефіцієнт теплообміну між шарами покриття та контактною пластиною;  $h_2$  – коефіцієнт теплообміну між навколишнім середовищем (повітрям) і пластиною;  $T_{e_1} = \theta$  – температура в зоні контакту, яка обчислюється за формулою (2.1); значення  $T_{e_2} = T_0$  – температура навколишнього середовища.

З позиції варіаційного числення рішення виразу (2.26) із встановленими відповідними умовами у вигляді співвідношень (2.27) і (2.28) вважаються еквівалентними визначенню мінімуму функціоналу [104]

$$\chi = \frac{1}{2} \int_V \lambda \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] dV + \frac{1}{2} \int_S h (T - T_e)^2 dS. \quad (2.29)$$

Функціонал (2.29) мінімізуємо із застосуванням множини функцій відповідних елементів. Одночасно, кожна з цих функцій визначена для окремого елемента та представлена виразом за допомогою відповідних вузлових значень [104].

З врахуванням того, що залежності від температури  $T$  не є неперервними величинами на всій області дослідження, замість них можна розглянути функції  $T^{(e)}$ , які вважаються визначеними на окремих елементах. Інтеграл в (2.29)

представляємо у вигляді інтегралів за окремими елементами. Отримаємо співвідношення:

$$\chi = \chi^{(1)} + \chi^{(2)} + \dots + \chi^{(E)} = \sum_{e=1}^E \chi^{(e)}, \quad (2.30)$$

де  $\chi^{(e)}$  – враховує внесок окремого елемента в  $\chi$ ;  $E$  – загальне число елементів.

З метою мінімізації функціоналу представленого формулою (2.30) з відповідними вузловими значеннями  $\{T\}$  виконується співвідношення:

$$\frac{\partial \chi}{\partial \{T\}} = \frac{\partial}{\partial \{T\}} \sum_{e=1}^E \chi^{(e)} = \sum_{e=1}^E \frac{\partial \chi^{(e)}}{\partial \{T\}} = 0. \quad (2.31)$$

Область дослідження була розбита на відповідні елементи прямокутної форми. При застосуванні цього метода враховувалась умова формування кожного елемента, в якому були встановлені чотири вузлові точки [105].

Вираз (поліном), що відповідає температурній функції, яка обчислюється в рамках двовимірного елемента прямокутної форми набуває вигляду:

$$T^{(e)}(x, y) = \alpha_1^{(e)} + \alpha_2^{(e)}x + \alpha_3^{(e)}y + \alpha_4^{(e)}xy, \quad (2.32)$$

де  $\alpha_i^{(e)}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) – коефіцієнти, які пов'язуються із вузловими значеннями температури для даного елемента.

На основі отриманих математичних співвідношень та відповідних схеми реалізації розроблена оригінальна комп'ютерна програма.

### **2.3 Метод фазового простору в дослідженні температурного впливу на характеристики напруження та деформації, особливості формування напружено-деформаційних полів**

Високі температури у поверхневій зоні різальної пластини під час впливу теплових навантажень призводять до деформаційних процесів, змінюють характеристики напруження. Тому, деформаційний процес в такій зоні достатньо складний, і на нього впливають багато факторів таких як: невизначеність динамічної кількості тепла, що поступає у покриття, складність закону розподілу тепла в структурі пластини із нанесеними покриттями, фізико-механічні та трибологічні характеристики матеріалів покриття та підкладки. На даний час питання дослідження деформаційних процесів в пластинах під впливом теплового потоку є актуальним і для відповіді на нього існують лише наближені методи аналітичного розрахунку відповідних параметрів [106-108].

Для вирішення питання встановлення характеристик впливу температури на деформаційно-напружені процеси в зоні термонавантаження використовуємо високоінформативний графоаналітичний метод – метод фазового простору. Він вважається одним з ефективних методів теоретичного та експериментального дослідження деформаційно-напружених процесів на основі аналізу фазових портретів фізичних явищ [109, 110].

Метод фазових траєкторій або метод фазової площини є графоаналітичним методом наближеного аналізу та дослідження нелінійних систем. Суть метода полягає в тому, що оцінюється поведінка системи на основі графічних результатів застосування метода – фазових портретів системи. Дослідження деформаційних ефектів методом фазових портретів дає найбільше повну інформацію і дозволяє оцінити та проаналізувати фізичний процес в цілому. Метод фазових траєкторій вважається ефективним методом розв'язку систем диференціальних рівнянь, що описують нелінійні системи. Структура сукупності фазових траєкторій формує особливості можливих змін в системі і демонструє ряд її найбільш характерних властивостей.

Досліджуємо модель, яка представлена поверхневою плівковою структурою що нанесена на поверхню різальної пластини для зміцнення та підвищення термічної стабільності. Розглядаємо взаємозв'язок температури, напруження та деформації. Сформуємо систему рівнянь моделі [111]:

Запишемо систему кінетичних рівнянь у вигляді:

$$\tau_\varepsilon \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon + \sigma; \quad (2.33)$$

$$\tau_\sigma \frac{d\sigma}{dt} = -\sigma + g(T-1)\varepsilon; \quad (2.34)$$

$$\tau_T \frac{dT}{dt} = (T_e - T) - \varepsilon\sigma. \quad (2.35)$$

де  $\tau_\sigma$ ,  $\tau_\varepsilon$ ,  $\tau_T$  – час релаксації напруження, деформації та температури відповідно;  $T_e$  – температура поверхні;  $\sigma$  – напруження;  $\varepsilon$  – деформаційний коефіцієнт;  $T$  – температура;  $g$  – стала величина, яка дорівнює  $g = G/G_0 < 1$ ;  $G$  – модуль зсуву (модуль пружності при зсуві) фізична величина, яка характеризує пружні властивості матеріалів та їх здатність чинити опір деформаційним процесам при зсуві;  $G_0 \equiv \eta_0 / \tau_\varepsilon$ ,  $\eta_0 \equiv \eta(T = 2T_c)$  – характерне значення зсувної в'язкості.

Зазначимо, що співвідношення (2.33) і (2.34) формують реологічну модель, тому що зводяться до диференціального рівняння другого порядку для функції величини напруження  $\sigma$  та деформації  $\varepsilon$  від температури. Одночасно, рівняння (2.35) описує теплопровідність структури при переході теплового потоку з поверхонь тертя у покриття. Система (2.33)–(2.35) збігається з синергетичною системою Лоренца [112-113]. В ній зсувні напруження вважаються параметром порядку, спряжене поле зводиться до зсувної деформації, а в якості керуючого параметру – температура.

Відомо, що ця система використовується для опису як фазових термодинамічних, так і кінетичних перетворень [113-117]. Для цього вводяться наступні параметри: час релаксації напруження; температура на відстані від поверхні контакту; таблиця величини  $g$ .

Використаємо метод фазового простору (фазових траєкторій), результатом якого будуть встановлені фазові портрети системи – графічні розв’язки диференціальних рівнянь. Форму фазових портретів знаходять шляхом проведення чисельного інтегрування відповідних рівнянь методом Рунге-Кутта 4-го порядку точності [63-65, 107, 110].

Вважаємо систему рівнянь (2.33) – (2.35) безрозмірною. Перетворення системи дозволяють розглянути залежності деформації, напруження від температури, провести дослідження залежності напруження від деформаційних процесів.

### **2.3.1 Фазовий перехід в дослідженні температурної залежності напруження**

Звернемось до математичних співвідношень (2.33) – (2.35), на основі яких сформуємо залежності, що описують температурний вплив на деформаційні процеси. Введемо шкалу  $\tau_\varepsilon$  для вимірювання часу. Оскільки  $\tau_\varepsilon \ll \tau_\sigma, \tau_T$  то в (2.33) можна покласти  $\dot{\varepsilon} = 0$ , що приведе до рівності

$$\varepsilon = \sigma. \quad (2.36)$$

Підставимо (2.36) в інші рівняння системи (2.34), (2.35), і переходимо до безрозмірної системи диференціальних рівнянь виду:

$$\tau_\sigma \frac{d\sigma}{dt} = -\sigma + g\sigma(T-1); \quad (2.37)$$



$$\tau_T \frac{dT}{dt} = \tau^{-1} [(T_e - T) - \sigma^2]. \quad (2.38)$$

Введемо безрозмірний час  $\tau \equiv \tau_T / \tau_\sigma$ . Трансформуємо систему до диференціального рівняння виду:

$$\frac{d\sigma}{dT} = \frac{-\sigma + g\sigma(T-1)}{\tau^{-2} [(T_e - T) - \sigma^2]}. \quad (2.39)$$

Рівняння підготовлено для побудови фазових портретів системи та встановлення стійких станів системи із визначенням особливих точок.

### 2.3.2 Фазовий перехід в дослідженні температурної залежності деформації

Розглянемо систему рівнянь (2.33) – (2.35). Для зручності роботи над виразами введемо масштаб  $\tau_\varepsilon$  з метою коректного виміру часу. Припустимо, що  $\tau_\varepsilon \ll \tau_\sigma, \tau_T$ , тоді в друге рівняння системи (2.34) підставимо нульову швидкість зміни деформації  $d\sigma/dt = 0$ , що приведе до виразу

$$\sigma = g(T-1)\varepsilon, \quad (2.40)$$

підстановка якого в інші два диференціальні рівняння системи (2.33) та (2.35) приводить систему до вигляду:

$$\tau_\varepsilon \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon + g\varepsilon(T-1), \quad (2.41)$$

$$\tau_T \frac{dT}{dt} = (T_e - T) - g(T - 1)\varepsilon^2. \quad (2.42)$$

Введемо безрозмірний час  $\tau \equiv \tau_T/\tau_\varepsilon$ . Для встановлення стійкого стану системи в рамках методу фазової площини, підготуємо вираз для знаходження координат особливих точок, що формують відповідне уявлення про поведінку системи. Для знаходження особливих точок системи розділимо (2.41) на (2.42). Виходимо на вираз після відповідних перетворень у вигляді:

$$\frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{-\varepsilon + g\varepsilon(T - 1)}{\tau^{-1}[(T_e - T) - g(T - 1)\varepsilon^2]}. \quad (2.43)$$

Використовуючи (2.43), переходимо до встановлення особливих точок та формування фазового портрету системи. В особливих точках фазової площини напрям дотичної до фазової траєкторії  $\varepsilon = \varepsilon(T)$  невизначений.

### 2.3.3 Фазовий перехід в дослідженні напружено-деформаційних полів

З метою дослідження залежності напружено деформаційних процесів в рамках системи (2.33) – (2.35) покращимо  $\tau_T \ll \tau_\varepsilon, \tau_\sigma$ . Тоді в (2.34) встановлюємо  $dT/dt = 0$ , що приведе вираз (2.35) до виду:

$$T = T_e - \varepsilon\sigma \quad (2.44)$$

Далі, врахування підстановки (2.44) в (2.33), (2.34) веде до системи

$$\tau \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon + \sigma; \quad (2.45)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\sigma + (T_e - \varepsilon\sigma - 1)g\varepsilon; \quad (2.46)$$

де розглядається час в одиницях  $\tau_\sigma$ , а параметр позначимо  $\tau \equiv \tau_\varepsilon / \tau_\sigma$ .

Для знаходження особливих точок системи, що формують уявлення про відповідну залежність, поділимо (2.46) на (2.45) а потім переходимо до пошуку особливих точок фазової площини. Одержуємо співвідношення

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \tau \cdot \frac{-\sigma + g\varepsilon(T_e - \varepsilon\sigma - 1)}{-\varepsilon + \sigma}. \quad (2.47)$$

Числова реалізація розв'язків диференціального рівняння приведе до формування фазових портретів системи.

### 2.3.4 Кінетична характеристика системи в координатах $\dot{\varepsilon} - \varepsilon$

З метою формування уявлення про кінетику деформаційно-напружених процесів дослідимо еволюцію залежності деформацій від показників швидкості їх зміни. З цією метою, з двох диференціальних рівнянь першого порядку (2.45) і (2.46) одержимо рівняння другого порядку для  $\varepsilon$ . Для цього, з (2.45) виражаємо  $\sigma$  через  $\varepsilon$  та виходимо на залежність  $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ . Записуємо похідну за часом від цього виразу, тобто шукаємо швидкість зміни відповідного показника. Потім, підставивши одержаний вираз у (2.46) формуємо співвідношення, що виражає швидкість зміни деформацій  $\dot{\sigma}(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ . Провівши диференціювання виразу (2.45), виходимо на диференціальне рівняння другого порядку

$$A\ddot{\varepsilon} + B\dot{\varepsilon} + C = 0, \quad (2.48)$$

де відповідні коефіцієнти набувають значення:  $A = \tau$ ,  $B = \tau (g\varepsilon^2 + 1) + 1$ ,  $C = \varepsilon[1 - g(T_e - \varepsilon^2 - 1)]$ .

Рівняння (2.48) містить другу і першу похідні від напруження за часом. Рівняння є основою для побудови відповідних фазових портретів системи.

### **Висновки до Розділу 2**

1. Розроблена математична модель поширення теплового поля в різальній пластині із нанесеними на неї одно-, двошаровими покриттями. Модель дозволяє враховувати конфігурацію різальної пластини та фізико-механічні властивості матеріалу покриття.

2. На основі синергетичної системи рівнянь сформована модель в'язко-пружного середовища поверхневої багатошарової структури покриття ріжучої пластини. Представлені аналітичні вирази, що описують напружено-деформований стан системи, температурну залежність напруження та деформації.

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОШИРЕННЯ ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ В ПЛАСТИНІ ІЗ НАНЕСЕНИМ ПОКРИТТЯМ

Встановлено, що поверхневі характеристики багатошарової структури відчутно впливають не тільки на контактні процеси, а й на фрикційні властивості, теплопровідність, зносостійкість та ін. Відомо, що, наприклад, під час операції різання майже вся механічна енергія перетворюється в теплову енергію, яка сильно впливає на температурні умови в області контакту. Ефективне керування температурою в області впливу, завдання її оптимального значення для відповідної структури покриття знижує її негативний вплив на робочі поверхні інструменту та матеріал різця [118, 119].

Нанесення багатошарового покриття впливає на коефіцієнт тертя в системі та знижує потужність фрикційних джерел тепла. В то же час, виступаючи теплозахисним бар'єром, багатошарове покриття знижує інтенсивність теплових потоків в напрямку віддалення від поверхні багатошарової структури. Покриття, в залежності від свого складу, формують властивості багатофункціональної проміжної технологічної середи, яка дозволяє прогнозувати можливість керування температурним режимом під впливом направленою температурного поля. Прогнозування особливостей поширення теплового поля, що формується під час контактної операції, дозволяє ефективно прогнозувати фізико-механічні характеристики структур вже на етапі прогнозування .

Аналіз літературних джерел показав, що існуючи на даний час моделі теплоперенесення, що описували поширення нестационарного температурного поля у структурах пластин із багатошаровими покриттями не формували адекватного уявлення про розподіл температур. Тому виникла необхідність представлення моделі теплоперенесення та проведення дослідження процесу теплоперенесення, надання прогнозу про зміни теплофізичного характеру у відповідних термомеханічних характеристиках структур.

### 3.1 Аналіз температурного поля пластини із одно- та двошаровим покриттям

З метою дослідження температурного поля плоскої пластини були розглянуті три різних типи структур. Виконано розбиття площі пластини на елементарні частини методом скінчених елементів, встановлено значення функції, яка є розв'язком рівняння теплопровідності, знайдена множина значень температури у точках площини із врахуванням граничних умов. Програма розрахунку відповідних параметрів була реалізована в середовище MATLAB 17. Результати досліджень представлені в роботах [120-123].

За результатами роботи програми було розраховано, сформовано, графічно представлено та досліджено температурні поля різальної пластини з матеріалу марки 38ХМ (42CrMo4) без покриття, з одно- та двошаровим покриттям. Термофізичні властивості матеріалів основи та покриття, що були взяті для розрахунку представлені в таблиці 3.1. Результати досліджень представлені на рисунку 3.1.

Таблиця 3.1 – Термофізичні властивості матеріалів при 900°C [124, 125]

	38ХМ (42CrMo4)	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiN
Густина ( $\rho$ ) (кг/м <sup>3</sup> )	7800	3780	5420
Питома теплоємність матеріалу ( $c$ ) (Дж/кг·°К)	476	1252	857,6
Теплопровідність ( $\lambda$ ) (Вт/кг·°К)	46	5,5	25,5

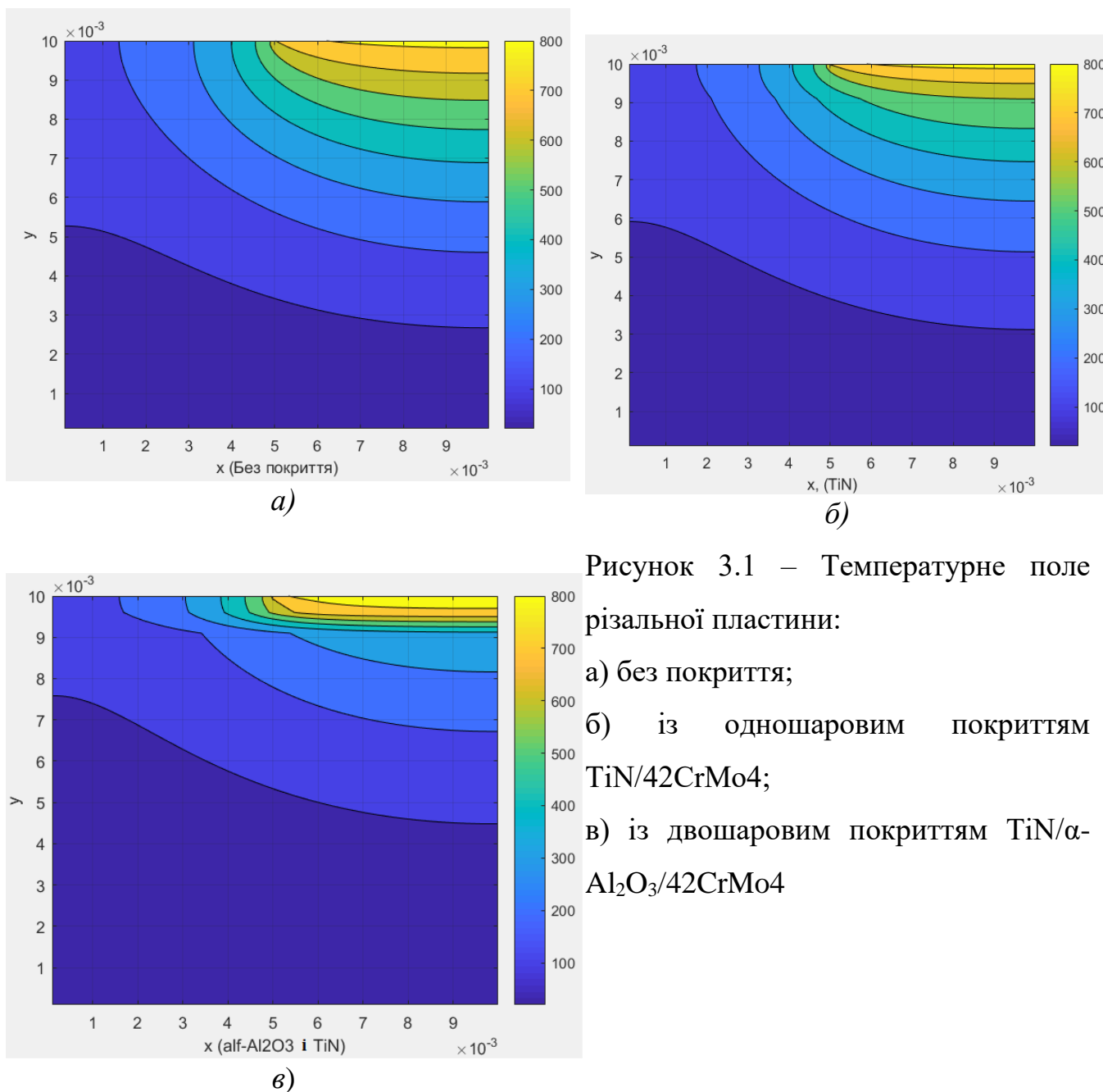


Рисунок 3.1 – Температурне поле різальної пластини:

а) без покриття;

б) із одношаровим покриттям TiN/42CrMo4;

в) із двошаровим покриттям TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/42CrMo4

На рисунку 3.1 *а* представлено температурне поле пластини матеріалу марки 38XM (42CrMo4) без покриття. Лінії рівня формують зони постійної температури, які поширюються вглиб пластини.

На рисунку 3.1 *б* представлені результати моделювання температурного поля різальної пластини із нанесеним зносостійким покриттям з TiN. Цей тип покриття вибраний як один із найпоширеніших, такий який значно впливає на зниження абразивного зносу поверхневої структури інструмента. Встановлено [125], що цей матеріал має високу зносостійкість до корозійного та атмосферного впливу, має

високу хімічну інертність. Хімічна інертність цього покриття впливає на зменшення ймовірності виникнення мікроадгезії.

Аналіз результатів поширення теплового потоку на рисунках 3.1а та 3.1б показує дещо обмежене проникнення теплоти в середину пластини із нанесеним TiN/42CrMo4 покриттям.

На рисунку 3.1в представлений розподіл температури в пластині із нанесеним двошаровим захисним покриттям виду TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/42CrMo4. В покритті нанесений проміжний шар  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, який запобігає дифузії матеріалу основного покриття в пластину та підвищує механічну стійкість системи в цілому [126].

Можна зробити висновок, про те, що двошарове покриття за своїми термофізичними показниками знижує температурний потік в глибину пластини, що веде до зменшення термічного впливу.

Температурні профілі розподілу температури вздовж пластини представлені на рисунку 3.2.

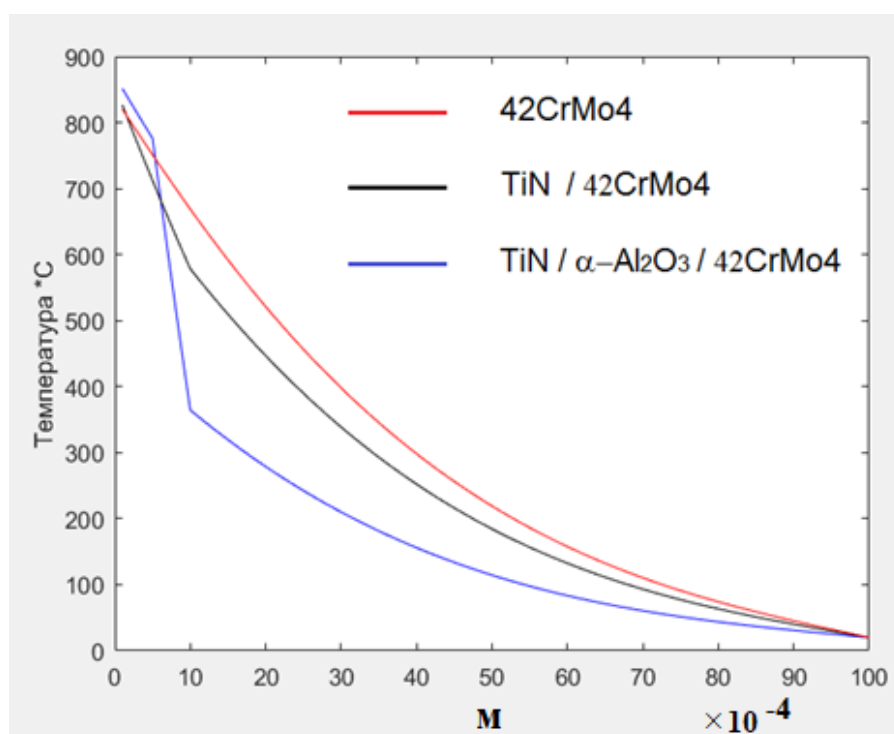


Рисунок 3.2 – Температурні профілі поширення температури вглубину пластини без покриття та з одно- та двошаровим покриттям



Аналіз теплових профілів показує (див. рис. 3.2), що в пластині без покриття (червона лінія) спостерігається поступове зниження температури при віддаленні від поверхні теплового впливу. Одночасно, крива (чорна лінія), яка відповідає пластині із одношаровим покриттям TiN складається із двох ділянок. На першому відрізку, що проходить в рамках нанесеного шару TiN, в інтервалі температур 853 К – 1173 К можна побачити швидке падіння температури поверхневого шару, що пояснюється фізико-термічними показниками матеріалу покриття. Із віддаленням від контактної поверхні, спостерігається вже більш повільне зниження температури різця, що непогано корелюється із результатами робіт [127-129]. Синя ламана лінія (дивись рис. 3.2) представляє температурний профіль розподілу температури в пластині із нанесеним двошаровим покриттям і складається із трьох ділянок. На кожному з цих відрізків спостерігається падіння температури із віддаленням від поверхні. Ця закономірність вказує на зниження теплового навантаження з 1123 К до 1053 К (зовнішній нанесений шар TiN), а потім, спостерігається більш стрімке зниження з 1053К до 633К (при проході шару  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Відзначимо, що отримані результати дослідження непогано узгоджуються із даними роботи [127].

Одержані результати свідчать про те, що при віддаленні від поверхні та товщину одношарового покриття, температура знижується на 36%. При віддаленні на глибину двошарового покриття TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/42CrMo4 аналогічної товщини температурний потік зменшується на 60%. Такий ефект пов'язаний із термозахисною функцією проміжного шару оксиду алюмінію. Він значно знижує температурне навантаження на поверхневі шари пластини, тим самим подовжуючи її зносостійкість та термостабільність.

### **3.2 Поширення теплового потоку в пластині із тришаровим покриттям TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN-II**

Особливу увагу дослідників привертає тришарове покриття TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN -II, як одне з найпоширеніших багатофункціональних покриттів.

Моделювання теплових потоків в пластинах із нанесеним покриттям методом скінчених елементів є поширеною практикою в сучасних наукових дослідженнях термомеханічних процесів[130-133].

Для реалізації мети дослідження був вибраний метод скінчених елементів та створено програму для проведення чисельних розрахунків. Модулі цієї програми можуть бути застосовані для проведення чисельних розрахунків при розв'язанні задач такого типу. На основі математичних співвідношень та відповідних схем реалізації, була створена оригінальна комп'ютерна програма мовою Pascal. Результати дослідження температурного поля пластини із нанесеним багатошаровим покриттям представлені в роботах [134-138].

Розглядалися пластини із тришаровим П-TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN покриттям із загальною товщиною  $d = 7,5$  мкм, при товщині кожного шару 2,5 мкм, та пластина без покриття для порівняння. Термофізичні властивості матеріалів покриття при проведенні розрахунків наведені в таблиці 3.2.

Для ефективного застосування метода сіток область рішення була розбита на 8800 елементів. Це було враховано при формуванні комп'ютерного кода програми для реалізації поставленої задачі.

Результати моделювання поширення температурного поля пластини без покриття та з тришаровим покриттям представлено на рисунку 3.3.

Таблиця 3.2 – Термофізичні властивості матеріалів покриття [124]

	Сталь 40X	T15K6	TiCN	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiN
Теплопровідність $\lambda$ , Вт/(кг·К)	41,9	27,2	30	7,5	11,3

Детальний аналіз температурного поля пластини без покриття та із покриттям показує дещо зменшену глибину проникнення теплового потоку вглиб пластини із покриттям. Так, на рисунку 3.3а представлений результат

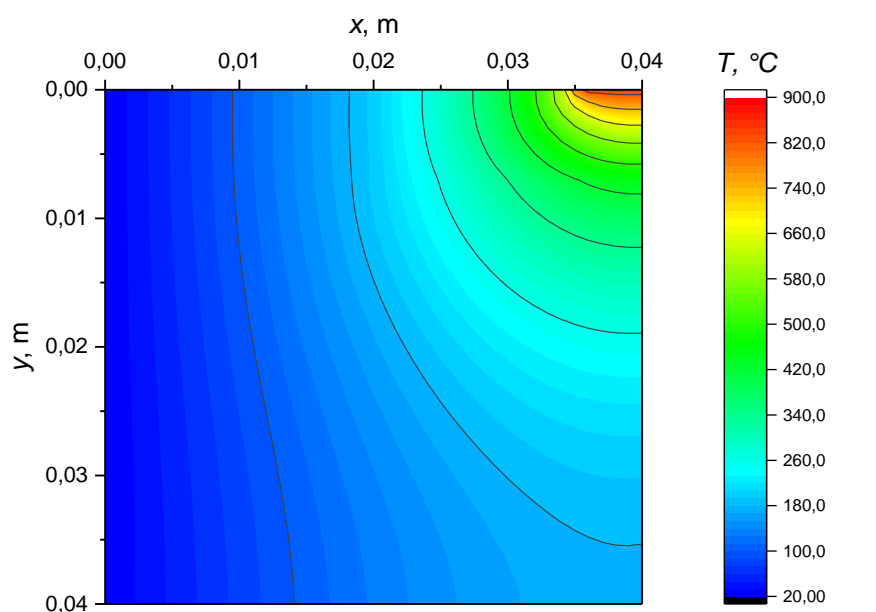
моделювання, що відповідає пластині без покриття. Лінії рівня на рисунку 3.3б формують уявлення про поширення температурного поля пластини із нанесеним тришаровим покриттям структурою П-TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN. Спостерігається теплоекрануючий ефект покриття при заданих умовах

Цей факт пояснюється тим, що шар покриття TiCN, який є зовнішнім у структурі покриття, знижує коефіцієнт тертя в зоні контакту в порівнянні зі зразком без покриття. Це пов'язуємо із дифузією графіту в підкладку, що призведе до зменшення коефіцієнту тертя. Це показує, що покриття TiCN має гарну адгезію в зоні між покриттям та підкладкою, що одночасно зменшує коефіцієнт тертя між поверхнями і знижує величину теплової енергії, яка виділяється в результаті цього процесу. Хімічна інертність цього неметалевого покриття знижує ймовірність виникнення мікроадгезії між металевою деталлю і різцем з точки зору практичного застосування, що знижує, в тому числі, і адгезійний знос інструменту.

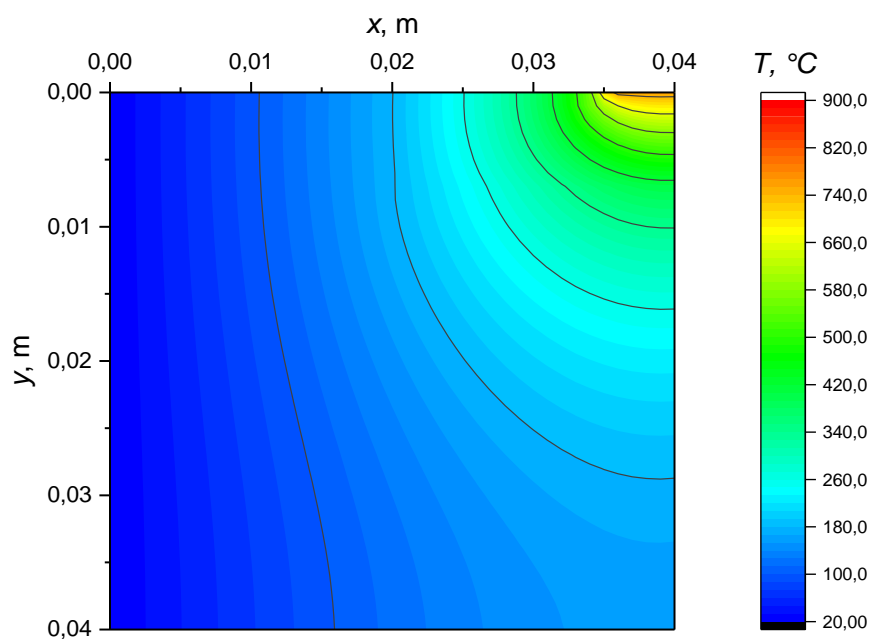
Уявлення про інтенсивність проникнення теплового потоку в середину функціонального матеріалу різця із покриттям та без нього формує рисунок 3.4. Дослідження проведене для перерізу при  $x = 0,037$  м. В пластині без покриття температура на поверхні складала 1116,7 К, відповідна температура на поверхні із покриттям – 1031,2 К. Надалі, із віддаленням від поверхні, спостерігається поступове зменшення температурного показника. Причому, для поверхні без покриття показники температури знижуються лінійно.

У той же час, на лінії, яка описує залежність температури від відстані, для пластини із тришаровим покриттям спостерігається ламана, яка складається із чотирьох елементів. На першому з них, в розмірних рамках нанесеного шару (2,5 мкм), спостерігається незначне зниження температури поверхні до 1030,9К, що обумовлено фізико-термічними показниками TiN шару покриття. На другій ділянці графіка, на глибині віддалення 2,5 мкм - 5 мкм, в інтервалі температур 1030,9 – 1030,2 К, спостерігається більш суттєве зниження температури. На третій частині графіка, в інтервалі температур 1030,2 – 1029,7 К, відбувається значне зниження температури поверхні. Далі, із збільшенням відстані від ріжучої кромки

пластини, температура деталі повільно знижується. На аналогічній глибині пластини без покриття температура складає 1103 К.

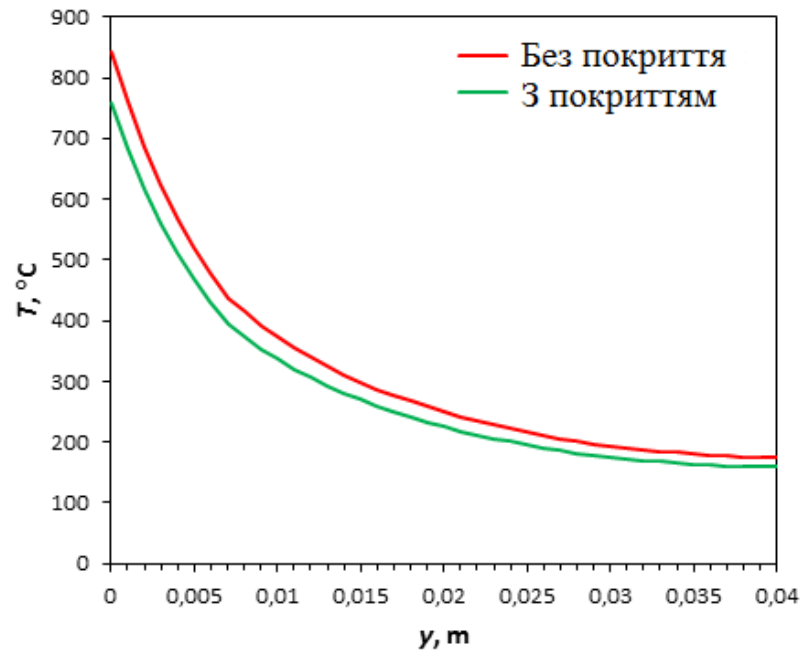


a)

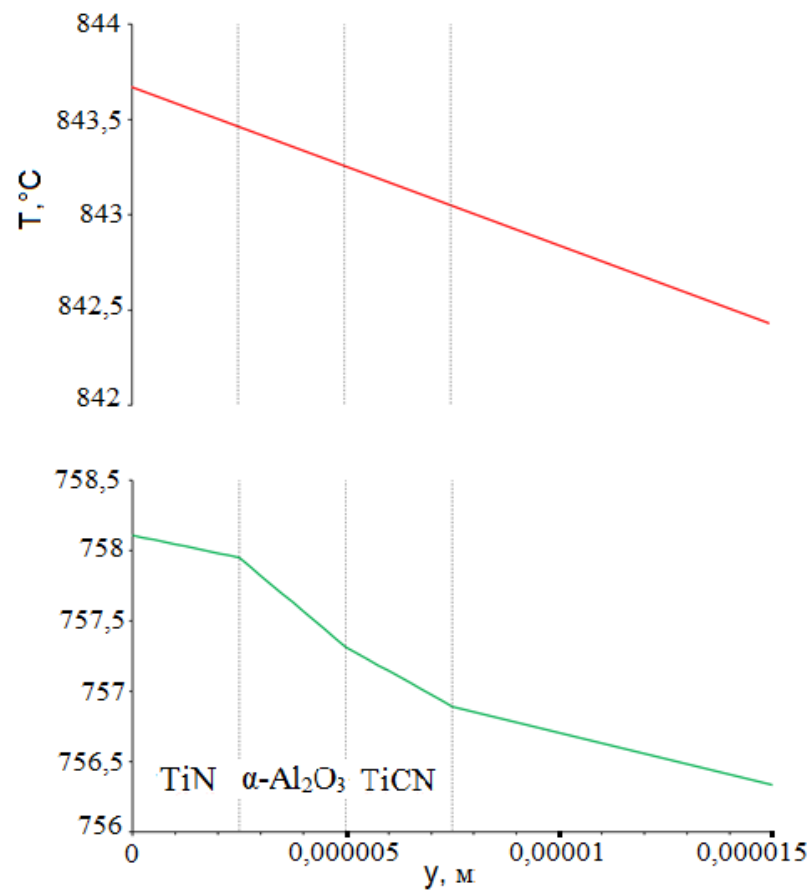


b)

Рисунок 3.3 – Поширення теплового поля: а) – пластина без покриття; б) - пластина з тришаровим покриттям П-TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN



a)



б)

Рисунок 3.4 – Теплові профілі пластини без покриття (—) та з покриттям (—): а – загальні профілі; б – збільшений масштаб

Аналіз отриманих результатів показує, що покриття з низькою теплопровідністю (проміжний шар  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) виконують роль теплового екрана, що призводить до концентрації більш високих температур на поверхні матеріалу інструменту, в той час, як температури в підкладці зменшена.

Порівняння графічних результатів дослідження показує, що на поверхні пластини із покриттям спостерігається значно нижча температура, ніж температура на поверхні пластини без покриття. Одночасно, для пластини із покриттям значно зменшується глибина проникнення теплового потоку. Це пов'язується із термозахисною та екрануючою функцією покриття на основі  $\text{TiCN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ . Різниця температур становить близько 150 К. Відзначимо, що теплопровідність керамічного шару  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [118] в покритті  $\text{TiC}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$  - P20 значно зменшує теплове навантаження на матеріал пластини, тому тепловий потік в підкладку для цього тришарового покриття поширюється дещо обмежено. Отримані результати дослідження непогано узгоджуються із дослідженнями [5, 23], в яких автори відмічають аналогічний ефект і формують схожі висновки щодо термоізоляційного ефекту покриття відповідної структури.

Робота [119] підтверджує розподіл температури в зоні різання для структур з покриттями  $\text{TiC}$ -,  $\text{TiC}/\text{TiN}$ -,  $\text{TiC}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ - і  $(\text{TiC}/\text{Ti}(\text{C}, \text{N}))/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$  з плоскою поверхнею, що виготовлена з цементованої твёрдосплавної підкладки. Автори вказують на те, що використання багат шарових покриттів поліпшують трибологічні властивості поверхонь при ковзанні. Ефект теплового бар'єру та зміна трибологічних характеристик, спричинений покриттям, значно скорочує діапазон контактних температур.

### 3.3. Динаміка поширення теплового поля

Особливо цікавим залишається питання дослідження впливу теплофізичних характеристик матеріалу покриття на особливості поширення теплового потоку. Дослідження проводилися в рамках розробленої математичної моделі, яка представлена в роботах [120, 121]. Динаміка теплового поля в пластині із

покриттям П-TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN досліджувалась методом скінченних елементів у поєднанні з чіткою різницевою схемою [139 - 141]. Такий підхід дозволяє врахувати фізичні властивості матеріалу шарів багатошарової конструкції. Під час моделювання припустили [120, 121], що захисне покриття не впливає на коефіцієнт тертя на поверхні пластини. Вважаємо, що тепловий потік, якій утворений внаслідок тертя, має постійне значення і для пластини без покриття та із покриттям. Припустили, що температура в зоні температурного впливу була 1073 К. Тришарове покриття було товщину  $d = 7,5$  мкм, причому кожний шар мав товщину 2,5 мкм. Теплофізичні властивості матеріалів, що використані для розрахунків, наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Теплофізичні властивості матеріалів [124, 125]

	Сталь DIN 1.70 34	Карбідна підклад- ка	TiCN	$\alpha$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiN
Температурна провідність $\lambda$ , Вт/(кг·К)	41,9	27,2	30	7,5	11,3
Густина, кг/м <sup>3</sup>	7770	11400	5200	3990	5430
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	529	251,4	440	1000	600
Коефіцієнт теплопровідності, $\times 10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с	10,19	9,49	13,11	1,88	3,47

Результати моделювання динаміки теплового поля в багатошаровій системі представлені на рисунках 3.5 та 3.6.

Рисунки 3.5 і 3.6 ілюструють, що температура на поверхні з зростанням часу збільшується. Рисунки 3.7 і 3.8 показують, що наявність комбінованої структури покриття підвищує температуру поверхні в зоні контакту порівняно з пластиною без покриття.

В той же час, ця різниця не надто значна, щоб говорити про теплозахисну функцію покриття при безперервному впливі теплового навантаження. З часом, різниця зменшується і тим більше, чим менший інтервал часу від початку повороту. Водночас, про теплозахисну роль покриття можна говорити в інтервалі дуже малих проміжків часу від початку операції термічного впливу, наприклад при фрезеруванні складним різцем, коли одна ріжуча пластина контактує з обробленою поверхнею протягом кількох мікросекунд.

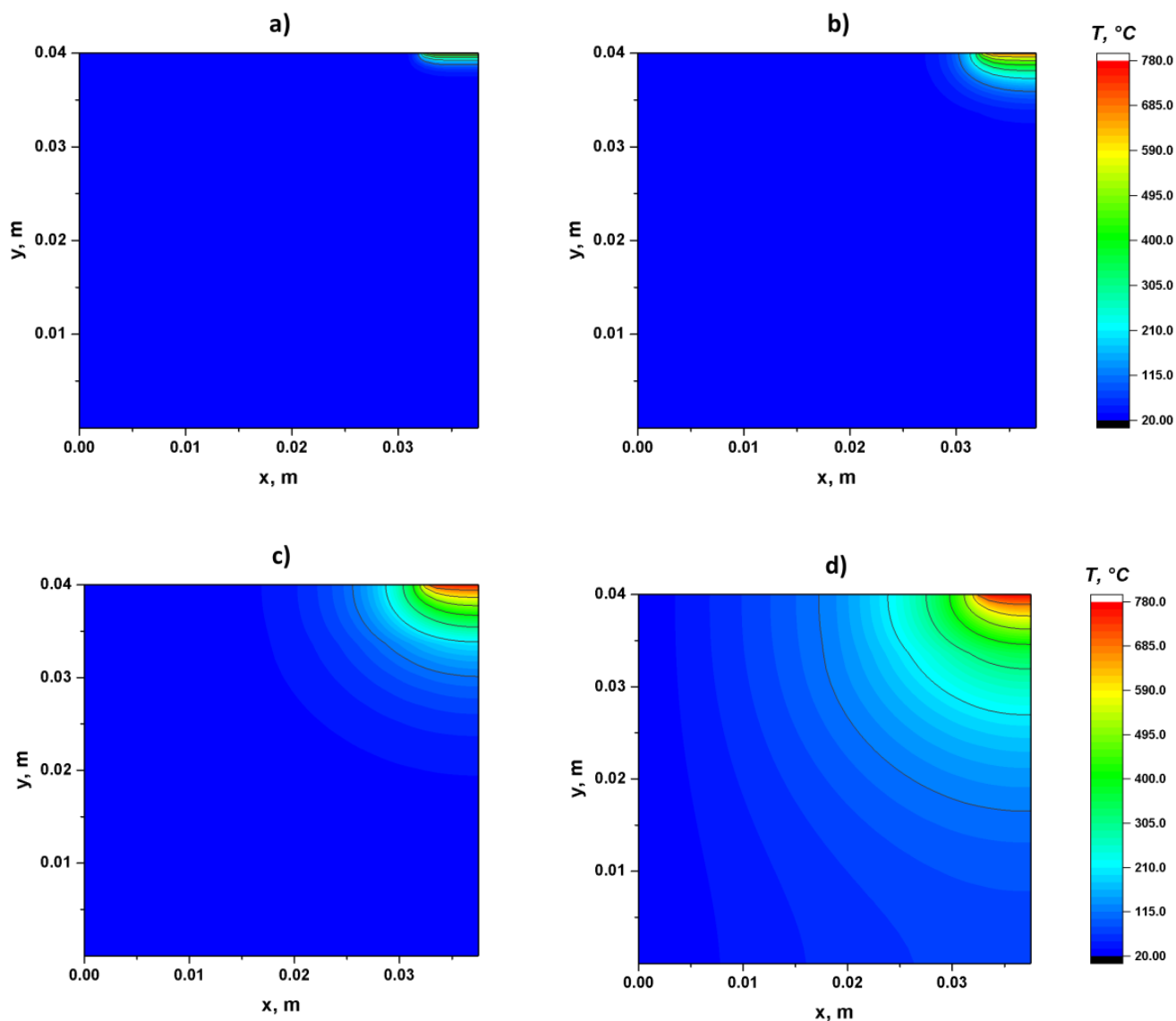


Рисунок 3.5 – Динаміка теплового поля в різальній пластині із часом, відлік якого від початку обробки встановив: a)  $t = 0,1$  с; b)  $t = 1$  с; c)  $t = 10$  с; d)  $t = 100$  с



Такі висновки підтверджуються аналогічними результатами роботи [5]. У рамках цієї роботи представлено сучасну модель кінцевих елементів Лагранжа-Ейлера (FEM) операції фрезерування з використанням ріжучих пластин з твердого металу з покриттям. Дослідження [5] проведені із трьома покриттями, якими були: одношарове TiAlN, двошарові TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та TiAlN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Модель інструменту без покриття використовувалася в якості еталону. Порівняння між собою непокритого і трьох інструментів з різними покриттями показало, що розрахункові температури на контактній поверхні є найнижчими для інструменту без покриття.

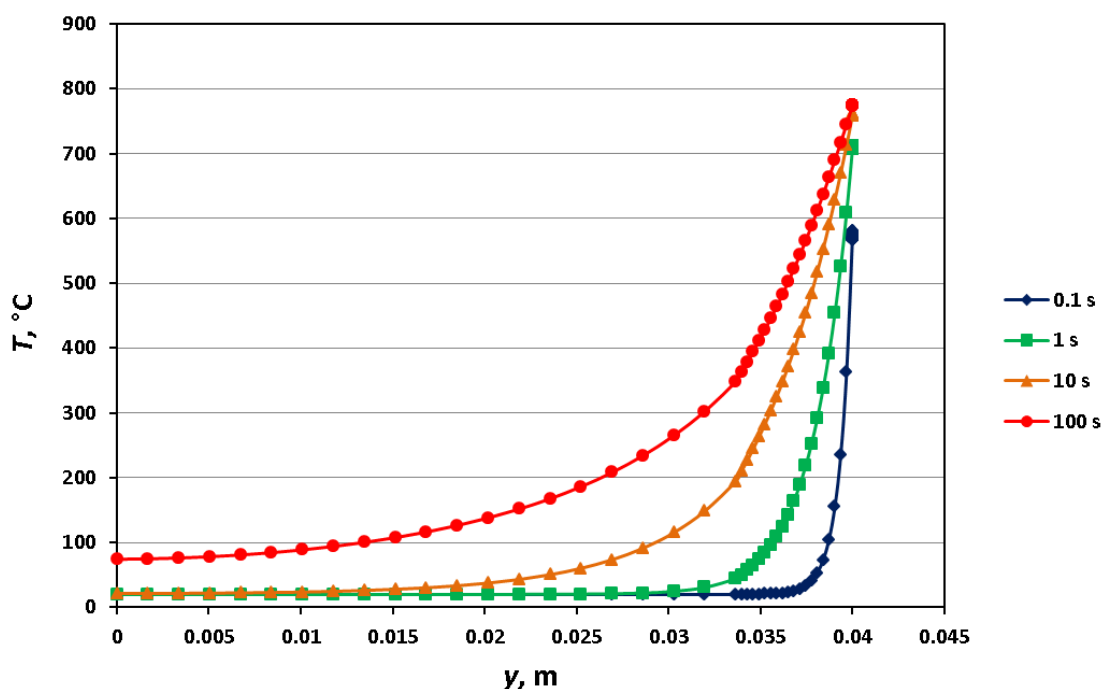
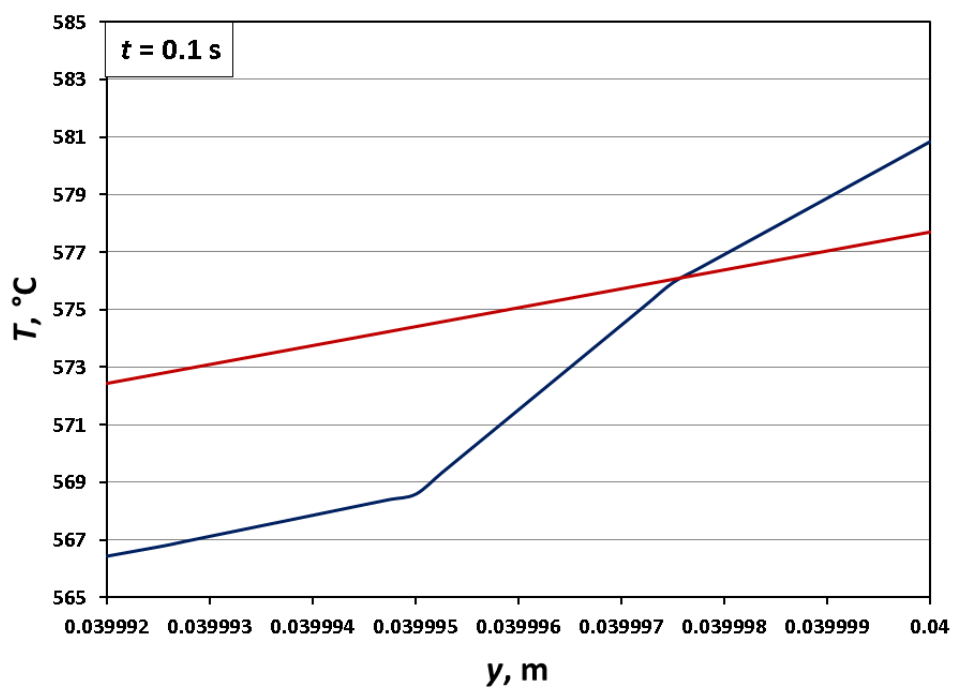
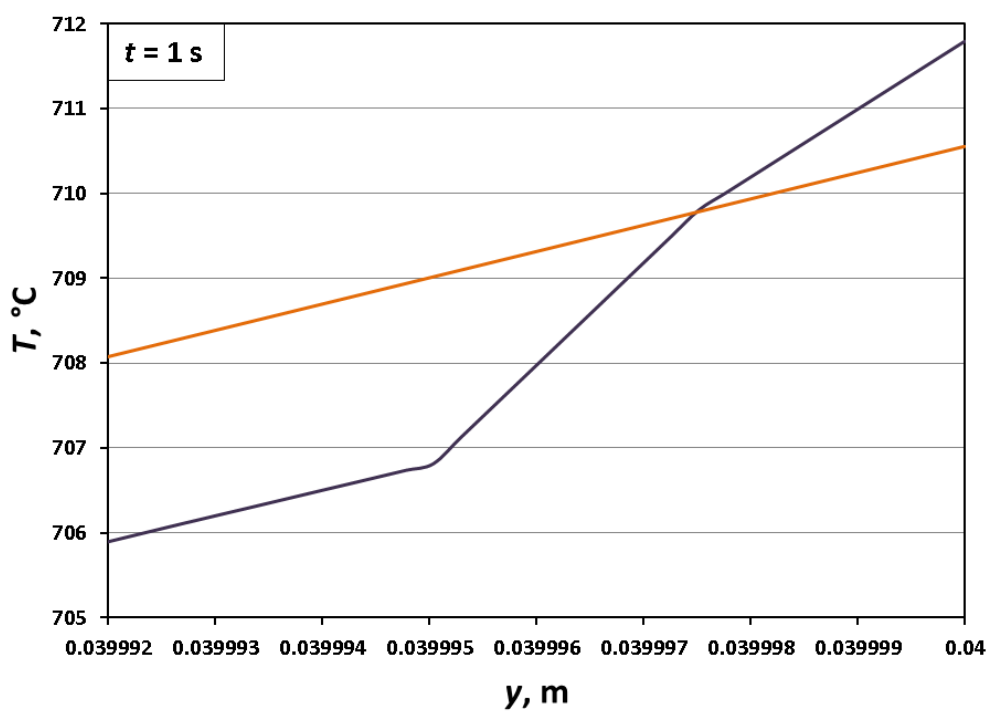


Рисунок 3.6 – Теплові профілі в ріжучому інструменті із комбінованим ріжучим лезом (з покриттям П-TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN), в поперечному перерізі, що відповідає  $x = 0,035$  м і різних часових точках від початку теплового впливу

Причину цього автори бачать в тому, що підкладка має вищу теплопровідність ніж покриття. Як наслідок, вищі температури всередині інструменту є вищими для інструментів без покриття, ніж для інструментів з покриттям.

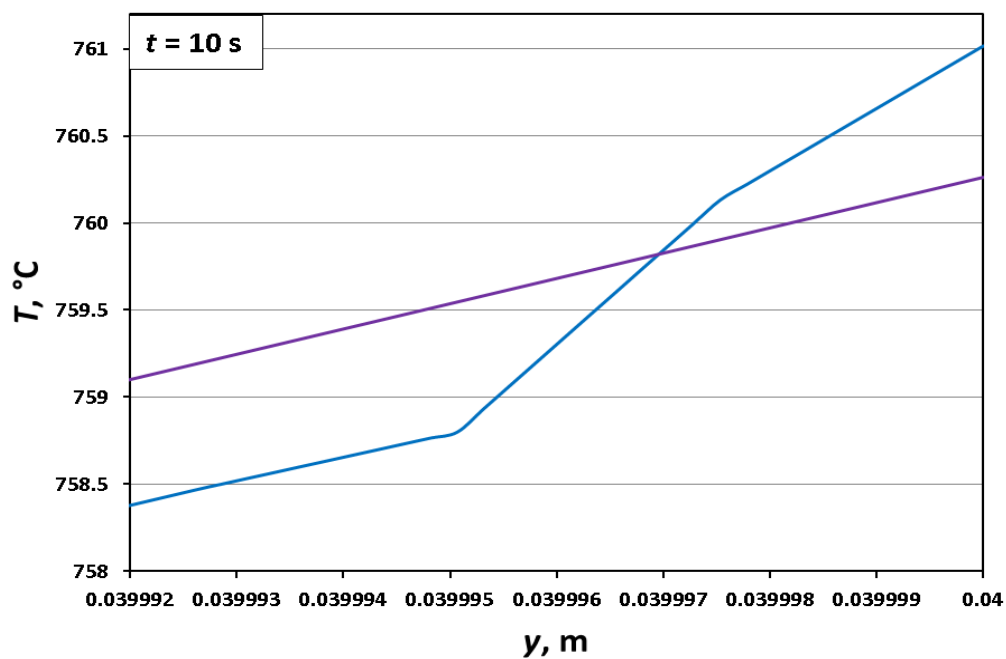


a)

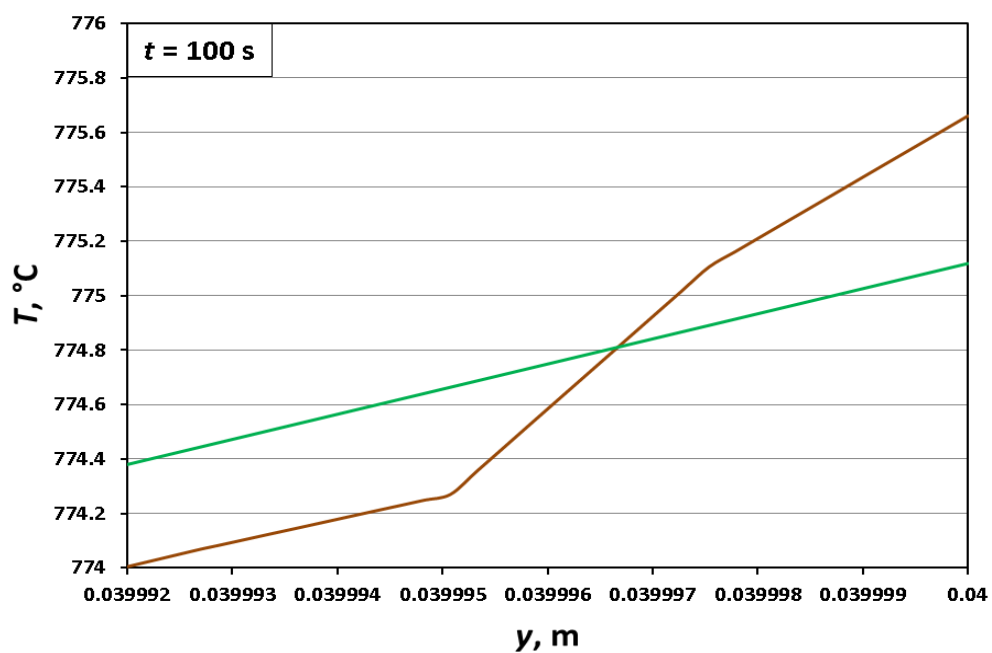


б)

Рисунок 3.7 – Термічні профілі у пластині із покриттям та без нього, при поперечному перерізі  $x = 0,035 \text{ м}$  і в різні моменти часу від початку теплового впливу: а) – час 0,1 с; б) – час 1 с



a)



б)

Рисунок 3.8 – Термічні профілі у пластині із покриттям та без нього, при поперечному перерізі  $x = 0,035 \text{ м}$  і в різні моменти часу від початку теплового впливу: а) – час 10 с; б) – час 100 с

Порівнюючи інструменти з покриттям, найбільша високотемпературна зона поблизу поверхні інструменту отримана для  $\text{TiCN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Цей результат був очікуваним, оскільки  $\text{TiCN}$  показує найвищу теплопровідність серед досліджуваних покриттів.  $\text{TiAlN}$  і двошаровий  $\text{TiAlN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  дають найнижчі розрахункові температури в підкладці для інструментів з покриттям і суттєво не відрізняються в розрахункових температурних полях; обидва матеріали покриття характеризуються однаковими значеннями теплопровідності.

В результаті дослідження встановлено, що температура, знижується при переході до внутрішньої частини пластини. Так, зниження температури при дослідженні процесу у напрямку від поверхні в глибину матеріалу складо (дивись рис. 3.7, і рис. 3.8) для пластини без покриття – 5 К на початку дії теплового навантаження, через 1 с – 2,5 К, через 10 с – 1,4 К та через 100 с – 0,7 К. Одночасно для пластини із покриттям П- $\text{TiCN}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$  відповідні дані склали: – 14,5 К на початку дії теплового навантаження, через 1 с – 5,6 К, через 10 с – 2,6 К та через 100 с – 1,65 К. Результати дослідження показали, що покриття з низькою теплопровідністю можна використовувати як теплозахисний екран. Це може призвести до підвищення температури в на поверхні пластини, тоді як температура в середині пластини буде дещо обмеженою.

У нашому дослідженні ми знехтували впливом захисного покриття на коефіцієнт тертя. Досліджувалась зміна теплового поля в пластині внаслідок впливу теплофізичних характеристик матеріалу покриття. Аналогічні результати підтверджуються роботами [1, 2] в яких досліджувалась пластинка з твёрдосплавної сталі ISO P20 з нанесеними тонкими шарами  $\text{TiC}$ ,  $\text{TiN}$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Встановлено, що теплоізоляційний ефект, який виникає в багатошарових покриттях із шаром кераміки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , пояснюється його надзвичайно низькою теплопровідністю. Наш висновок співпадає із висновком цих робіт про те, що наявність покриття на пластині-підкладці спричиняє зменшення частини тепла, що передається вглиб пластини. Цей ефект особливо чітко автори спостерігали для тришарового покриття підкладки структурою  $\text{TiN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$ . Так, різниця

температур в зоні термічного впливу на пластину з покриттям і без нього становила більше 100 К.

Спостерігається узгодження із даними роботи [133], в якій підтверджено температурний розподіл в зоні різання для структур з одношаровими (TiC), двошаровими (TiC/TiN), тришаровими (TiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN) покриттями. Автори роблять висновок, що використання багатошарових покриттів покращує трибологічні властивості поверхонь при ковзанні в умовах різання. Встановлено, що для багатошарової пластини контактна температура знижується приблизно на 300 К порівняно з температурою твердосплавного непокритого інструмента [133].

### 3.4. Термодеформаційні процеси у багатошарових структурах

Особливий інтерес у дослідників визиває питання одночасного дослідження особливостей формування теплових та деформаційних полів, встановлення характерних залежностей. В рамках власного дослідження [134] було проведено, з використанням середовища MATLAB, моделювання теплових та деформаційних процесів з використанням методів фазового простору в дослідженні термодеформаційних полів [135-138]. Були досліджені теплові та деформаційні поля для пластини із різними комбінаціями покриттів, а саме: без покриття, з одношаровим покриттям TiN, з двошаровими покриттями TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, з тришаровим покриттям TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN. Моделювання процесів поширення теплового та деформаційного поля проводилось на основі математичних співвідношень, які були представлені у другому розділі цієї роботи. Для проведення розрахунків використовувалися відповідні термофізичні властивості матеріалів, які можна знайти в таблиці 3.3.

Аналіз проведений на основі синергетичної моделі [111, 112] (формули 2.21, 2.22, 2.23) поверхневої плівкової структури нанесеної для зміцнення та підвищення термічної стабільності контактної пластини. Для формування фазових портретів системи, використано метод фазового простору. Вказана система диференціальних рівнянь (2.21) – (2.23) вважалася безрозмірною. В якості масштабу вибраний  $\tau_\varepsilon$  – час релаксації деформації для виміру часу.

Проведемо аналіз співвідношення (2.42), яке було запропоновано у вигляді:

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

З використанням виразу (2.42) встановимо особливі точки фазової площини. Це такі точки, в яких напрям дотичної до фазової траєкторії  $\varepsilon = \varepsilon(T)$  не може бути визначеним. Як правило, це точки в яких похідна функції дорівнює нулю та не існує. З цією метою сформуємо умови,  $d\varepsilon/dT = 0$ ,  $d\varepsilon/dT = \infty$ , які дозволяють перейти до виразів:

$$-\varepsilon[1 - g(T-1)] = 0, \quad (3.1)$$

$$\tau^{-1}[(T_e - T) - (T-1)g\varepsilon^2] = 0. \quad (3.2)$$

Розглянемо можливі ситуації.

1) При  $\varepsilon = 0$ , у співвідношенні (3.1) різниця, що стоїть у квадратних дужках набуває будь яких значень. Підставимо значення  $\varepsilon = 0$  у вираз (3.2). Після підстановки, вийдемо на рівність  $T = T_e$ . Таким чином, встановлена особлива точка –  $D(T_e, 0)$ .

2) При умові, що  $\varepsilon \neq 0$ . У такій ситуації, вираз зліва в (3.1) дорівнює нулю тільки при умові того, що буде дорівнювати нулю вираз, що стоїть у в квадратних дужках. Одержимо вираз для критичної температури операції різання у вигляді:  $T_c = 1 + g^{-1}$ . Підставимо вираз для критичної температури в (3.2), в результаті чого, маємо координати точки у вигляді:  $O(T_c, \sqrt{T_e - T_c})$ .

Для коректного представлення термо-деформаційного стану системи, встановимо значення показників Ляпунова для знайдених особливих точок.

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

$$\lambda_D = \frac{1}{2} [g(T_e - 1) - \tau^{-1} - 1] \left\{ 1 \pm \sqrt{1 + 4\tau^{-1} \frac{g(T_e - 1) - 1}{[\tau^{-1} - g(T_e - 1) + 1]^2}} \right\}. \quad (3.3)$$

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

$$\lambda_O = \frac{1}{2\tau} \left[ (1 + g\sqrt{T_e - T_c}) \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - 8\tau \frac{g(T_e - T_c)}{(1 + g\sqrt{T_e - T_c})^2}} \right\} \right]. \quad (3.4)$$

Дійсні або комплексні значення параметрів Ляпунова дозволяють встановити вид особливих точок. Проведемо перевірку цих показників.

Для точки  $D(T_e, 0)$  показник  $\lambda_D$  набуває дійсне значення при невід'ємному значенні підкореневого виразу в (3.3). Виконується нерівність:

$$1 \pm \sqrt{1 + 4\tau^{-1} \frac{g(T_e - 1) - 1}{[\tau^{-1} - g(T_e - 1) + 1]^2}} \geq 0. \quad (3.5)$$

Вираз (3.5) демонструє, що показники Ляпунова мають тільки дійсні значення. Точка  $D(T_e, 0)$  може виконувати роль або вузла, або сідла.

В точці  $O(T_c, \sqrt{T_e - T_c})$  показники Ляпунова набувають вигляду (3.4).

Аналіз співвідношення  $\varepsilon = \sqrt{T_e - T_c}$ , показує, що точка існує тільки при умові  $T_e > 1 + g^{-1}$ . Тому що значення деформації  $\varepsilon$  є фізичною величиною, воно ніколи не може набувати від'ємних або комплексних значень. Точка  $O$  може виконувати функцію тільки або вузла, або фокуса.

Детальний аналіз показників Ляпунова показує той факт, що при виконанні подвійної нерівності  $0 < T_e < T_c$  – точка  $D(T_e, 0)$  формує стійкий вузол, так як при таких значеннях  $T_e$  особлива точка  $O$  не реалізується. Можна зробити висновок про те, що із плином часу система еволюціонує у відповідний точці  $D$  і показує стаціонарний тепловий режим при різанні. При виконанні умови  $T_e > T_c$  система формує стійкий фокус в точці  $O$ .

Реалізація моделі теплових та деформаційних процесів, що відбуваються під час дії теплового впливу на різальну пластину виконано в середовищі MATLAB. Сформовані теплові та деформаційні поля в різальній пластині з матеріалу AISI/SAE 1045 без покриття, з одношаровим покриттям TiN, з двошаровими покриттями TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і з тришаровим покриттям TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN.

Врахування фізичних властивостей матеріалу покриття відбувалось за допомогою параметра  $g$ . Це стала величина, яка встановлюється за співвідношенням  $g = G/G_0 < 1$ .  $G$  – модуль зсуву (модуль пружності при зсуві, модуль Кулона), який характеризує пружні властивості матеріалів, їх здатність чинити опір деформаційним процесам;  $G_0 \equiv \eta_0 / \tau_\epsilon$  – характерне значення модуля зсуву,  $\eta_0 \equiv \eta(T = 2T_c)$  – характерне значення зсувної в'язкості.

Відомо, що твердість є однією з найважливіших механічних властивостей, однак, недостатньою для вибору того чи іншого матеріалу для конкретного застосування при формуванні покриттів. Твердість може поєднуватися з в'язкістю, так як в'язкість плівки або покриття в багатьох випадках застосування вважається більш важливим фактором, ніж твердість. Важливо враховувати твердість при формуванні твердих плівок або покриттів у поєднанні з в'язкістю [142]. В'язкість матеріалу – це здатність поглинати енергію під час операції деформації до повної руйнації матеріалу. Параметром в'язкості можна варіювати, якщо утворення або розповсюдження дефектів, наприклад тріщин, можна загальмувати чи зменшити. Існує кілька способів регулювання в'язкості [142]:

- зробити структуру матеріалу пластичною, шляхом додавання пластичних матеріалів (металів) у керамічні матриці;
- використовувати ударну пластичність багатошарових структур, засновану на чергуванні численних крихких і в'язких тонких шарів;
- ударна в'язкість при стискаючих напругах, яка перешкоджає початку утворення тріщин шляхом їх заліковування.



Для формування результатів розрахунків використовувалися раніше наведені (дивись розділ 2) математичні співвідношення. Результати моделювання процесів поширення теплового поля та відповідні термодформаційні поля багатошарової структури одержані у вигляді графічних результатів, які наведені на рисунках 3.9-3.11. Представлені результати розрахунків для різних значень параметрів температури поверхні  $T_e = 2,5$ ,  $T_e = 3$  та  $T_e = 5$ , при варіюванні показника в'язкості матеріалу структури  $g = 0,5-0,7$  та при  $\tau = 1$ .

На графіках, що наведені на рисунку 3.9 *а*, *б*, спостерігається еволюція системи в стаціонарному стані у точці  $D$ .

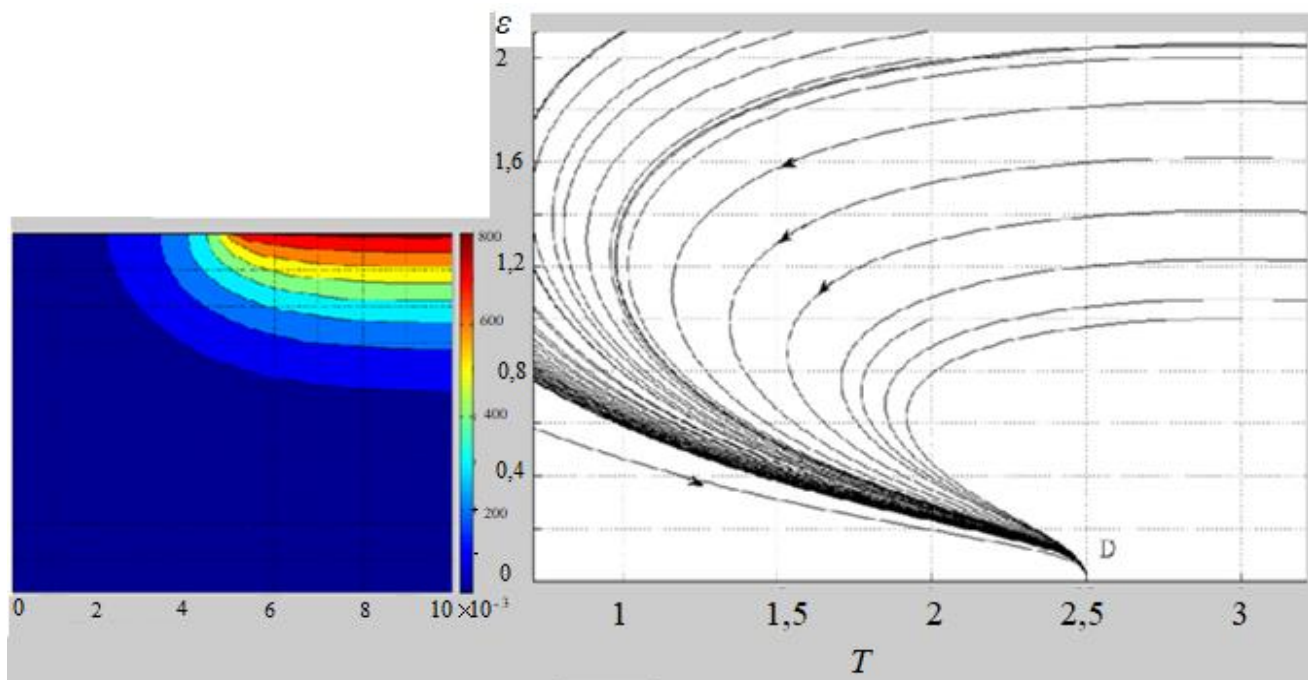
При умові  $T_e \leq T_c$ , в передкритичній області, система показує стійкий вузол. Таке явище спостерігається для пластини без покриття (рис. 3.9 *а*) та з одношаровим покриттям TiN (рис. 3.9 *б*). З рисунка 3.9 (*а*, *б*) видно, що відповідні температурні поля і фазові портрети відповідних структур майже ідентичні. Це можна пояснити незначною зміною процесів теплоперенесення при дослідженні одношарового покриття TiN у порівнянні із поверхнями без покриття.

Якщо розглянути пластини з двошаровим або тришаровим покриттям, то їх можна характеризувати зростанням густини матеріалу і зменшенням величини теплової енергії, яка з'являється в результаті тертя в області контакту. До помітного впливу релаксації напружень призводить зростання густини дислокацій у поверхневих шарах покриття.

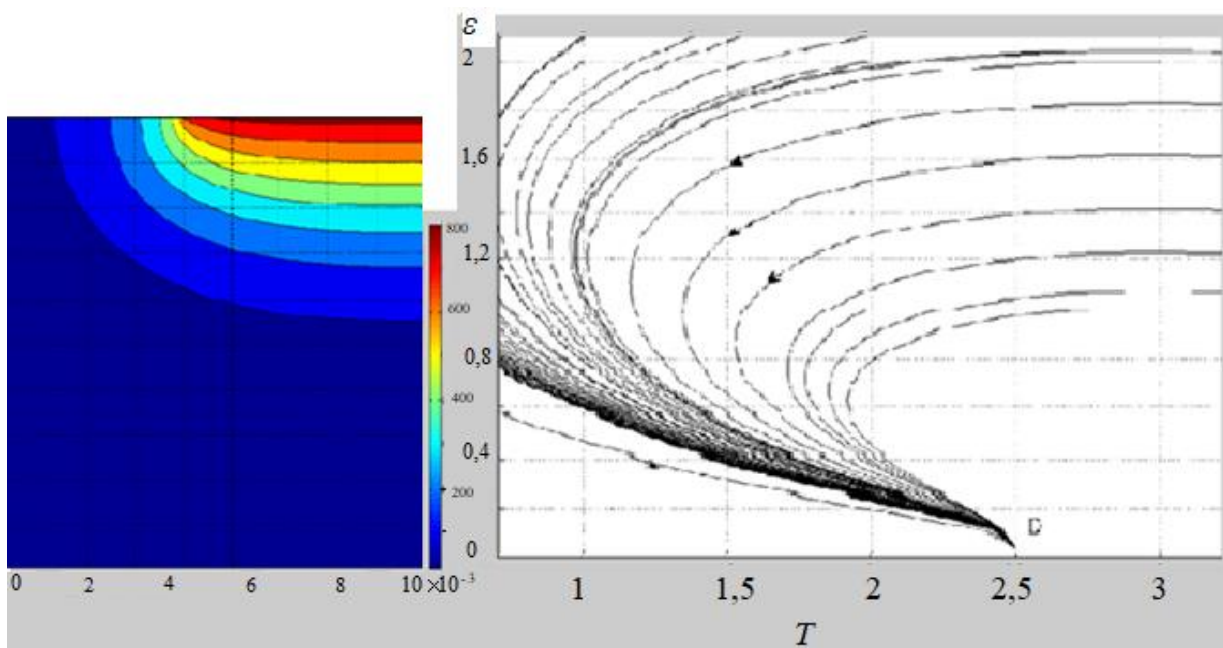
При виконанні умови  $T_e > T_c$  можна бачити стійкий фокус  $O$  (рис. 3.10 *а*, *б*, рис. 3.11). Таке явище спостерігається для пластин із двошаровими покриттями TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 3.10 *а*) та TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 3.10 *б*) та для пластин із тришаровим покриттям TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN (рис. 3.11).

Аналіз фазових портретів термо-деформаційного стану, сформованих для багатошарових покриттів різного складу, показує, що із зростанням параметра  $\tau = \tau_T/\tau_e$  траєкторії поступово обертаються навколо особливої точки. Таке явище пояснюється повільною зміною температури та одночасно достатньо швидкою зміною напружень в покритті. При умові малих або незначних зниженнях

напружень пластична деформація структури розвивається у режимі, подібному до повзучості (рис. 3.8 (а, б)), при цьому не відбувається втрата стійкості.

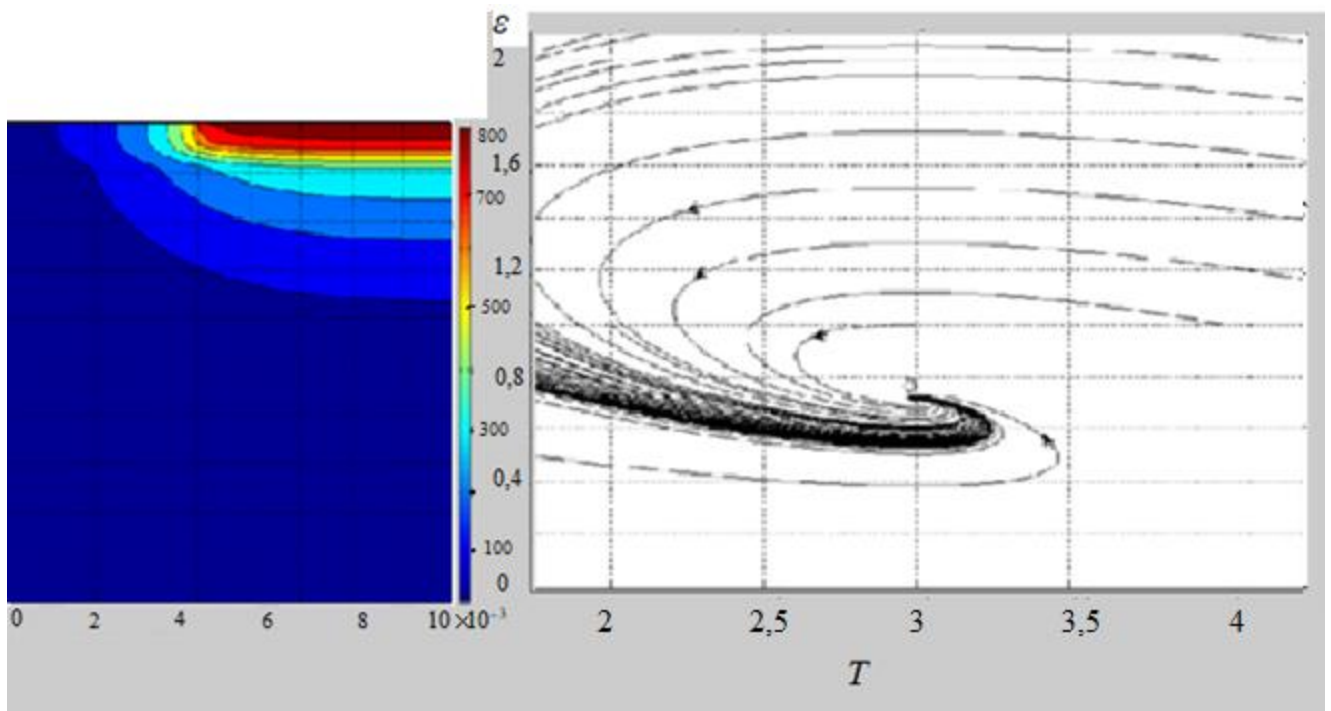


a)

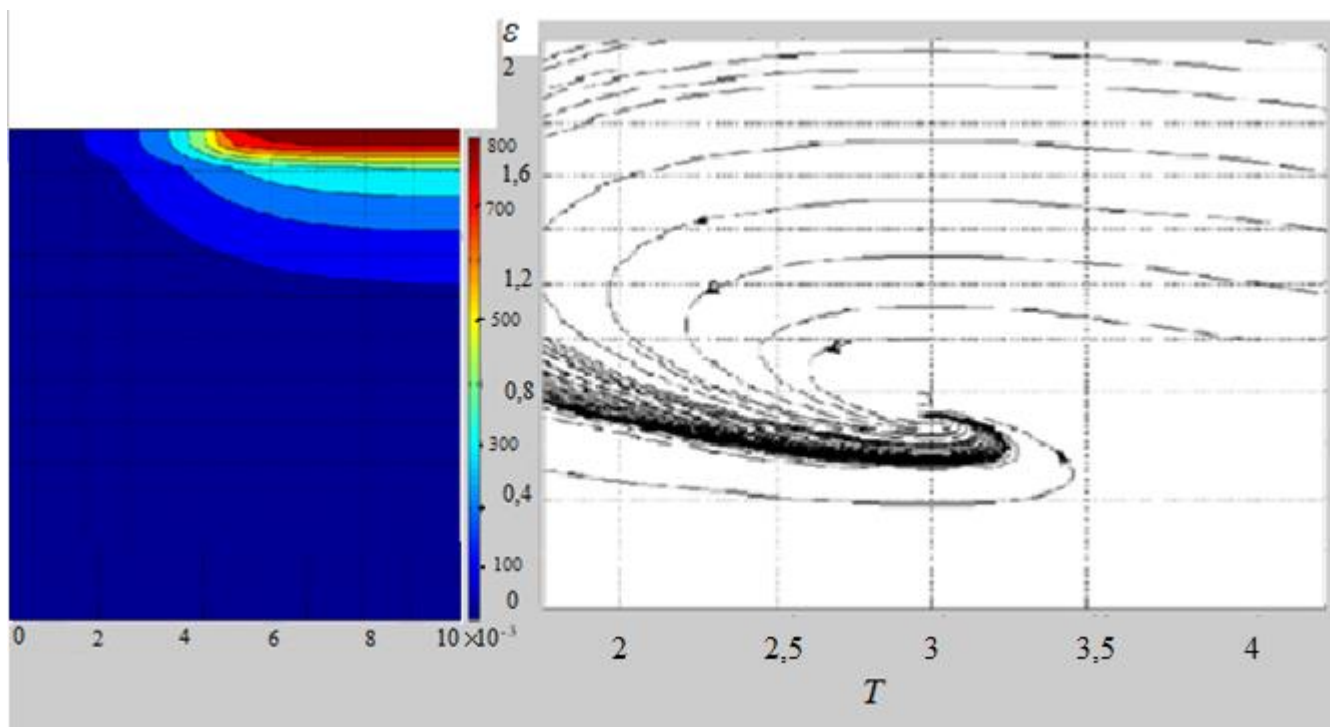


б)

Рисунок 3.9 – Температурне поле пластини та фазовий портрет деформації:  
 а) – без покриття (матеріал AISI/SAE 1045), вхідні параметри:  $T_e = 2,5$ ,  $g = 0,5$ ,  $\tau = 1$ ;  
 б) – з одношаровим покриттям (TiN/AISI/SAE 1045), вхідні параметри:  $T_e = 2,5$ ,  
 $g = 0,55$ ,  $\tau = 1$



a)



б)

Рисунок 3.10 – Температурне поле пластини і відповідний фазовий портрет деформації з покриттями: а) – із двошаровим покриттям (TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AISI/SAE 1045), вхідні параметри:  $T_e = 3$ ,  $g = 0,6$ ,  $\tau = 1$ ; б) – із двошаровим покриттям (TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ AISI/SAE 1045), вхідні параметри:  $T_e = 3$ ,  $g = 0,65$ ,  $\tau = 1$

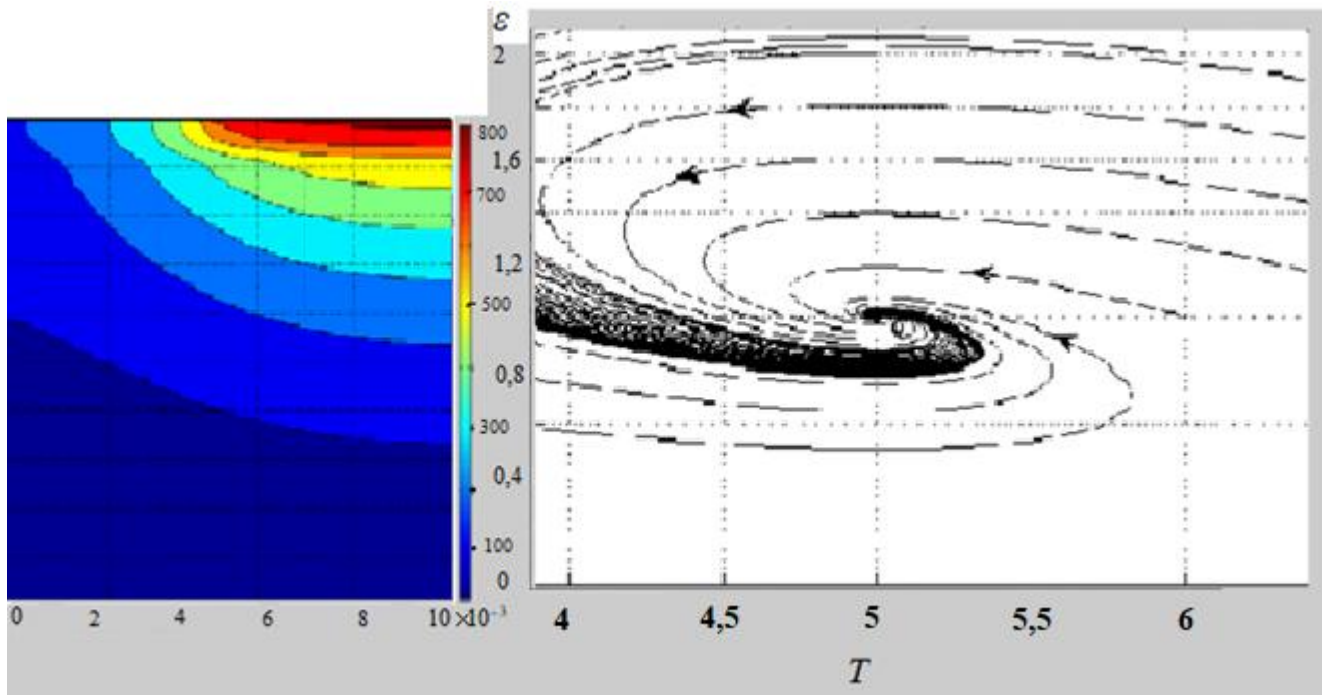


Рисунок 3.11 – Температурне поле пластини і фазовий портрет деформації для пластини із тришаровим покриттям (TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN/AISI/SAE 1045), вхідні параметри:  $T_e = 5$ ,  $g = 0,7$ ,  $\tau = 1$

При зростанні густини дислокацій, що є характерним процесом для багатошарових покриттів, дислокації колективно впливають на поведінку ансамблю дефектів, і процеси релаксації напружень стають суттєвими [65]. Максимальний вплив на теплове і деформаційне поле твёрдосплавної пластини забезпечує тришарове покриття TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN.

Пластини із двошаровими або тришаровими покриттями характеризуються збільшенням густини матеріалу і зменшенням теплового потоку від тертя.

### Висновки до Розділу 3

За результатами проведеного дослідження можна зробити такі висновки:

1. В пластині без покриття спостерігається поступове зниження температури при віддаленні від лінії теплового впливу. Для одношарового покриття TiN, в інтервалі температур 853 К – 1173 К спостерігається швидке падіння температури, що пояснюється фізико-термічними показниками матеріалу покриття. Із

віддаленням від контактної поверхні, спостерігається вже більш повільне зниження температури.

2. Температурний профіль розподілу температури в пластині із нанесеним двошаровим покриттям складається із трьох ділянок. На кожному з цих відрізків спостерігається падіння температури із віддаленням від поверхні. Ця закономірність вказує на зниження теплового навантаження з 1123 К до 1053 К (зовнішній нанесений шар TiN), а потім, спостерігається більш стрімке зниження з 1053 К до 633К (при проході шару  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

3. Результати показують, що при віддаленні від поверхні та товщину одношарового покриття температура знижується на 36%. При віддаленні на глибину двошарового покриття TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/42CrMo4 аналогічної товщини температурний потік зменшується на 60%. Такий ефект пов'язаний із термозахисною функцією проміжного шару оксиду алюмінію. Він значно знижує температурне навантаження на поверхневі шари пластини, тим самим подовжуючи її зносостійкість та термостабільність.

4. Данні про інтенсивність проникнення теплового потоку в середину різця із покриттям та без нього показали (в перерізі при  $x = 0,037$  м) , що в пластині без покриття температура поверхні склала 1116,7 К, відповідна температура на поверхні із покриттям – 1031,2 К. Надалі, із віддаленням від поверхні, спостерігається поступове зменшення температурного показника. Причому, для поверхні без покриття показники температури знижуються лінійно.

5. Залежність температури при віддаленні від поверхні для пластини із тришаровим покриттям складається із чотирьох елементів. На першому з них, в розмірних рамках нанесеного шару (2,5 мкм), спостерігається незначне зниження температури поверхні до 1030,9 К, що обумовлено фізико-термічними показниками TiN шару покриття. На другій ділянці, на глибині віддалення 2,5 мкм - 5 мкм, в інтервалі температур 1030,9 – 1030,2 К, спостерігається більш суттєве зниження температури. На третій частині графіка, в інтервалі температур 1030,2 – 1029,7 К, відбувається значне зниження температури поверхні. Далі, із збільшенням відстані від ріжучої кромки пластини, температура деталі повільно

знижується. На аналогічній глибині пластини без покриття температура складає 1103 К.

6. При умові  $T_e \leq T_c$ , в передкритичній області, фазовий портрет системи показує стійкий вузол. Таке явище спостерігається для пластини без покриття та з одношаровим покриттям TiN. Відповідні температурні поля і фазові портрети таких структур майже ідентичні. Це пояснюється незначною інтенсивністю процесів теплоперенесення при дослідженні одношарового покриття TiN у порівнянні із поверхнями без покриття.

7. Аналіз фазових портретів термо-деформованого стану багатшарових покриттів різного складу, показує, що із зростанням параметра  $\tau = \tau_T/\tau_\varepsilon$  траєкторії поступово обертаються навколо особливої точки. Таке явище пояснюється повільною зміною температури та одночасно достатньо швидкою зміною деформацій в покритті. При умові малих або незначних зниженнях напружень пластична деформація структури розвивається у режимі, подібному до повзучості (рис. 3.8 (а, б)), при цьому не відбувається втрата стійкості

## РОЗДІЛ 4

### ДЕФОРМАЦІЙНО-НАПРУЖЕНИЙ СТАН БАГАТОШАРОВИХ СИСТЕМ

Властивості сучасних багатошарових систем, до яких відносяться наноструктурні покриття, що нанесені на поверхні контактів елементів технологічного обладнання, вважаються сучасним напрямком досліджень інженерії поверхні [144-148]. На експлуатаційні характеристики об'єктів із покриттями впливають розподіл температури в зоні дослідження, вплив температури на внутрішній напружено - деформований стан структури, термофізичні та фізико-механічні характеристики матеріалів.

Результат впливу нанесеного покриття на фізико-механічні властивості твердого тіла орієнтує науковців-практиків на формування методів та способів модифікування поверхневих шарів, які дозволили б спрямовано формувати відповідні характеристики поверхні та впливати на процеси макроскопічного деформування матеріалів.

Встановлено [149, 150], що дія теплового навантаження на різальну пластину із нанесеним покриттям призведе до виникнення стискаючих напружень, деформаційних перетворень. Цей ефект пояснюється тим, що при короткочасному тепловому впливі багатошарова структура покриття встигає погрітися і прагне розширитися, в той час як непрогріта підкладка за такий короткий час не відчуває істотного теплового впливу.

Під дією виникаючих надмірних стискаючих напружень та під впливом деформаційних процесів, що виникають у покритті, воно змінює, або зовсім втрачає свої початкові фізико-технічні характеристики. Деформаційні процеси багатошарового покриття, в свою чергу, приводять до зміни деформаційно-напруженого стану структури.

#### 4.1 Вплив температурного поля пластини на деформаційні процеси

Модифікація властивостей металевих поверхонь, які знаходяться під впливом високоенергетичних потоків, ефективно вирішується нанесенням багат шарових наноструктурних покриттів [147, 150-152]. Особлива роль поверхневого шару у процесі тертя зумовлює інтерес вчених до його дослідження. В останні роки активно розвивається підхід до дослідження деформаційних процесів у поверхневих шарах, заснований на концепції структурних рівнів деформації та руйнування твердих тіл, а також на розумінні в рамках цієї концепції особливої ролі поверхні та поверхневих шарів покриттів у зародженні та розвитку деформаційних процесів [150-152]. З появою нових матеріалів і технологій зміцнення питомих навантажень у вузлах контакту матеріалів постійно зростає. Відповідно зростають і температури, що досягаються на фрикційній поверхні. На думку багатьох сучасних авторів [153, 155] найбільш важливими елементами процесу тертя є температурний вплив, внаслідок цього, в приповерхових шарах спостерігаються деформаційні процеси, що зумовлені температурною динамікою.

Для чисельного вирішення цього питання, як правило, використовувався сітково-характеристичний метод, пристосований до розрахунку процесів, що мають яскраво виражений хвильовий характер, гібридні варіації цього методу, та метод гладких частинок. Вказані методи поряд із перевагами мають суттєві недоліки, які містяться в тому, що вони не формують уявлення про поведінку всієї динамічної системи з кількома компонентами одночасно. Метод фазового простору формує сукупність траєкторій, які визначають множину груп початкових умов та представляє графічний розв'язок диференціальних рівнянь системи, що описує її стан. Фазові траєкторії метода дають повне уявлення про характер процесів в системі. Однак метод фазових траєкторій не застосовувався донедавна щодо дослідження динаміки деформаційних ефектів у системах із багат шаровим покриттям.

В рамках синергетичної концепції процесів пластичної деформації [156-160], такі обставини, як зміна структури матеріалу, що обумовлена деформацією,



величина напруження, зміна густини дефектів не демонструють автономної поведінки, а показують самоузгоджені дії. Таку поведінку можна описати в рамках системи, що об'єднує декілька диференціальних рівнянь із нелінійними доданками. Оскільки аналітичний розв'язок такої системи вкрай складний то рішення ефективно представляється графічно у вигляді фазових портретів.

В рамках представленої моделі (формули 2.21, 2.22, 2.23) до розгляду була взята поверхнева багатошарова структура, яка нанесена з метою зміцнення та підвищення термічної стабільності ріжучого інструмента. Дослідження подані в роботах [161-163]. Представлена система співвідношень впливає із синергетичної системи Лоренца. В ній, в якості параметра порядку, вибрана деформація, а спряжене поле зводиться до напруження, в той же час, температура виступає керуючим параметром. Незважаючи на те, що система рівнянь (2.21) – (2.23) є безрозмірною, для зручності вимірювання часу вводимо масштаб  $\tau_\varepsilon$ . Оскільки  $\tau_\sigma \ll \tau_\varepsilon, \tau_T$ , то в (2.22) врахуємо умову  $d\sigma/dt = 0$ , що приведе до співвідношення:

$$\sigma = g(T - 1)\varepsilon. \quad (4.1)$$

Підстановка такого виразу у (2.21), (2.22) формує нові рівняння системи:

$$\tau_\varepsilon \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon + g\varepsilon(T - 1); \quad (4.2)$$

$$\tau_T \frac{dT}{dt} = (T_e - T) - (T - 1)g\varepsilon^2. \quad (4.3)$$

З метою спрощення був введений параметр  $\tau \equiv \tau_T / \tau_\varepsilon$ . Координати особливих точок дозволяють визначити стійкий стани системи в рамках методу фазового простору (фазової площини). Для пошуку особливих точок системи розділимо (4.2) на (4.3). Відповідний результат ділення представлений у вигляді

$$\frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{-\varepsilon + g\varepsilon(T - 1)}{\tau^{-1}[(T_e - T) - (T - 1)g\varepsilon^2]}. \quad (4.4)$$

На основі (4.4), встановимо особливі точки фазової площини. Це точки, в яких похідна функції деформації по температурі дорівнює нулю і не існує, або, з іншої точки зору, напрям дотичної прямої до фазової траєкторії що формується функцією  $\varepsilon = \varepsilon(T)$  не визначений. Для вирішення цього питання напишемо систему рівнянь з врахуванням умов  $d\varepsilon/dT = 0$ ,  $d\varepsilon/dT = \infty$ :

$$-\varepsilon[1 - g(T - 1)] = 0, \quad (4.5)$$

$$\tau^{-1}[(T_e - T) - (T - 1)g\varepsilon^2] = 0. \quad (4.6)$$

Представимо різні випадки, що призводять до встановлення особливих точок системи:

1) при  $\varepsilon = 0$ , в (4.5) вираз, що міститься у квадратних дужках, набуває будь-яких значень. Підставимо значення  $\varepsilon = 0$  в (4.6) і одержимо рівність  $T = T_e$ . Так, перша особлива точка  $D(T_e, 0)$ ;

2) при умові  $\varepsilon \neq 0$  вираз зліва в (4.5) дорівнює нулю. Переходимо до критичної температури різання  $T_c = 1 + g^{-1}$ .

Підставимо це співвідношення у вираз (4.6). Результат надає координати другої точки  $O(T_c; \sqrt{T_e - T_c})$ . Більше критичних точок в системі непередбачено.

Для оцінки поведінки системи встановлюємо показники Ляпунова.

1) Для точки  $D$  із координатами  $(T_e, 0)$  показник Ляпунова набуває вигляду:

$$\lambda_D = \frac{1}{2} [g(T_e - 1) - \tau^{-1} - 1] \left\{ 1 \pm \sqrt{1 + 4\tau^{-1} \frac{g(T_e - 1) - 1}{[\tau^{-1} - g(T_e - 1) + 1]^2}} \right\}. \quad (4.7)$$

2) Для  $O(T_c; \sqrt{T_e - T_c})$ :

$$\lambda_O = \frac{1}{2} \left[ (\tau^{-1} + g\tau^{-1}\sqrt{T_e - T_c}) \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - 8\tau^{-1} \frac{g(T_e - T_c)}{(\tau^{-1} + g\tau^{-1}\sqrt{T_e - T_c})^2}} \right\} \right]. \quad (4.8)$$

Показники Ляпунова при деяких значеннях параметра  $T_e$  набувають комплексні і дійсні значення. Такій підхід дозволяє встановити характер особливих точок. Представимо дослідження цих умов у вигляді:

1) для  $D$  показники  $\lambda_D$  набувають дійсних значень, при умові, що вираз в (4.7) який стоїть під знаком кореня буде більше або дорівнювати нулю:

$$1 + 4\tau^{-1} \frac{g(T_e - 1) - 1}{[\tau^{-1} - g(T_e - 1) + 1]^2} \geq 0. \quad (4.9)$$

Аналіз (4.9) показує, що показники Ляпунова набувають лише дійсних значень. Точка  $D(T_e, 0)$  може розглядатися тільки як вузол, або як сідло. Аналіз відповідних умов для характеристики цієї точки показує наступне:

а) при умові  $g(T_e - 1) > 1$  (або виконанні аналогічної умові  $T_e > 1 + g^{-1}$ ) дробовий вираз у (4.9) додатний. Аналіз виразів дозволяє зробити висновок про те, що показники Ляпунова мають різні знаки, точка  $D$  при  $T_e > 1 + g^{-1}$  є сідлом;

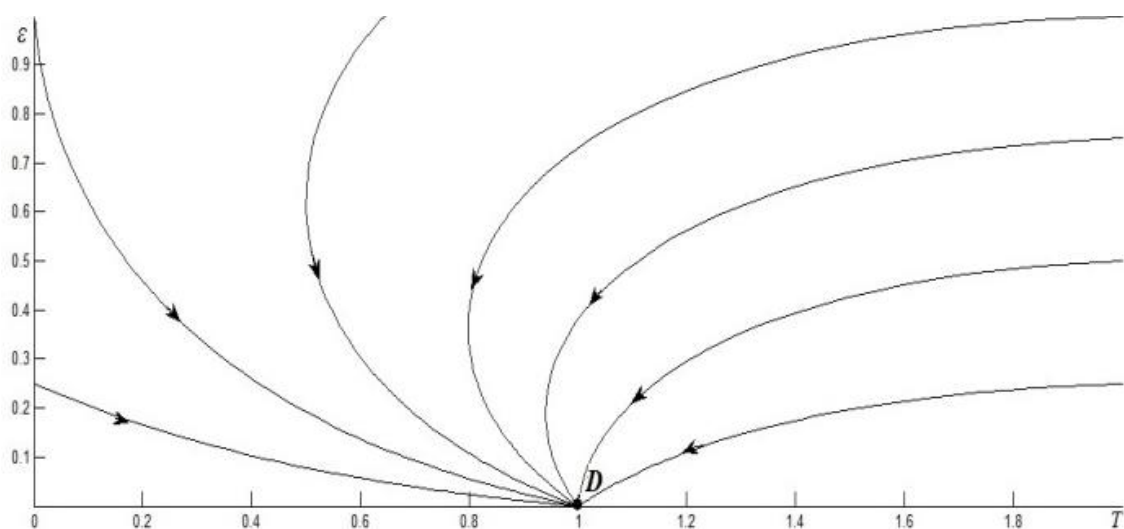
б) якщо  $g(T_e - 1) < 1$  (що аналогічно умові  $T_e < 1 + g^{-1}$ ), то корінь в (4.8) менше ніж одиниця. Тому показники Ляпунова мають однаковий знак. При встановленій умові вираз у прямокутних дужках набуває додатного значення, а вираз у квадратних дужках – від'ємного. Можна зробити висновок, що показники Ляпунова набувають від'ємних значень, а точка  $D(T_e, 0)$  при  $T_e < 1 + g^{-1}$  задає стійкий вузол.

2) для точки  $O$  показники Ляпунова представлені у вигляді (4.8). Вираз  $\varepsilon = \sqrt{T_e - T_c}$  показує, що точка існує тільки при виконанні умови  $T_e > 1 + g^{-1}$ , тому що деформація  $\varepsilon$  – фізична величина і не набуває комплексних значень.

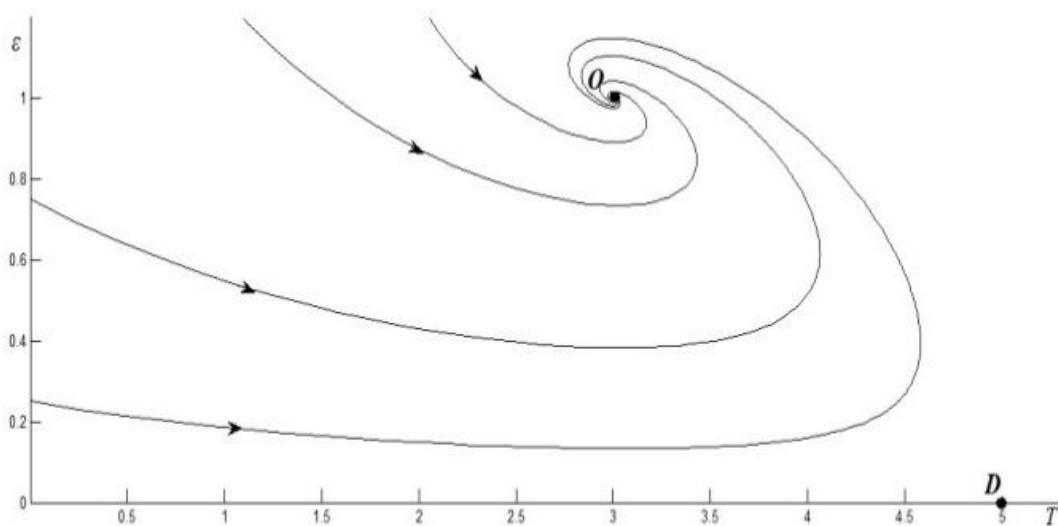
Проведене дослідження характеру особливих точок системи та відповідних показників дозволяє зробити висновок про те, що при виконанні умови  $0 < T_e < T_c$  точка  $D$  подає стійкий вузол. Враховуючи той факт, що за вказаних умов для

параметра  $T_e$  особлива точка  $O$  не може бути реалізована, робимо висновок про те, що із зміною часу система еволюціонує до відповідної точки  $D$ .

Відповідні фазові портрети системи в рамках дослідження впливу температурного поля на деформаційний процес представлені на рисунку 4.1. Спостерігається стаціонарний тепловий режим згідно з фазовим портретом, наведеним на рисунку 4.1 *a*. При виконанні умови  $T_e > T_c$  формується стійкий вузол в точці  $O$  (рис. 4.1 *б*).



*a)*



*б)*

Рисунок 4.1 – Фазові портрети при значеннях  $g = 0,5$ ,  $\tau = 1$ :

*a)*  $0 < T_e < T_c$ ,  $T_e = 1$ ; *б)*  $T_e > T_c$ ,  $T_e = 5$

Аналіз результатів дослідження та наведених математичних співвідношень показує, що фазовий портрет пластичної деформації характеризується наявністю двох особливих точок (див. рис. 4.1), які розглянуті відповідно для поверхні без покриття та із покриттям. Вхідними параметрами системи були обрані наступні значення:  $T_e = 1$ ,  $T_c = 5$ ,  $g = 0,5$ ,  $\tau = 1$ .

Аналіз графічних результатів показує, що спостерігається еволюція системи навколо точки  $D(T_e, 0)$  у стаціонарному стані (дивись рисунок 4.1 *a*). В передкритичній області, при умові  $T_e \leq T_c$  система показує стійкий вузол. Причому, зростання параметра  $\tau = \tau_T / \tau_\varepsilon$  веде до закручування траєкторій навколо особливої точки. Цей стан характерний для відносно повільної зміни температури та швидкій зміні напружень, що відповідає переривчастому режиму впливу на відповідну структуру. При малих значеннях напруження або при умові значного зниження цих показників пластична деформація в системі набуває характеристики повзучості (рис. 4.1 *a*). Під час цього процесу втрати стійкості не спостерігаються.

Багатошарове покриття характеризується ростом густини дислокацій, взаємодія яких, приводе до підвищення величини напруження, яке створюється зовнішнім полем. Поведінка ансамблю таких дефектів стає колективною, і тому принципову роль починають відігравати процеси релаксації напруження [164]. Фазовий портрет набуває вигляд (рис. 4.1 *б*), що відтворює еволюцію деформаційних процесів поверхні із покриттям. При значеннях напружень, які за величиною набагато вищі ніж у полі взаємодії дислокації, на колективні ефекти відбувається зовнішній вплив, тому спостерігається еволюція ансамблю дефектів до кінцевої густини дефектів.

#### **4.2. Деформаційно-напружені поля різальної пластини**

Одним з ефективних методів теоретичного та експериментального дослідження еволюції напружено-деформаційних процесів в структурі є аналіз фазових портретів відповідних фізичних явищ [165, 166]. Метод фазових

траєкторій (фазового простору, фазової площини) вважається ефективним графоаналітичним методом наближеного дослідження нелінійних систем.

Дослідження динаміки деформаційних полів в тензочутливих напівпровідникових покриттях методом фазової площини представлено в роботі [167]. Результати у вигляді фазових портретів нелінійної системи показали структурні зміни покриття у вигляді розриву фазової траєкторії у площині «опір – деформація». При періодичному повторенні механічного впливу фазова траєкторія перетворилася на незамкнуту гвинтову лінію.

Методом фазової площини, із припущенням, що один із ступенів свободи має найвищу швидкість релаксації, в дослідженні [72] змодельовані фазові портрети системи борвмісних покриттів Al-C-B та проведено дослідження процесу дифузії. Показано, що поблизу стаціонарних точок на фазових портретах спостерігається або уповільнення еволюції, або спіральне закручування частини дифузійного процесу.

В роботі [168] показано системне аналітичне дослідження нелінійної моделі зсувної течії в'язкопружнопластичних середовищ методом побудови фазових портретів системи. Для довільних шести параметрів матеріалу та функції матеріалу, які керують моделлю, показані основні властивості сімейств кривих напруження-деформації при постійних швидкостях деформації та кривих релаксації, створених моделлю. Встановлені залежності цих кривих від часу, швидкості зсуву, початкової деформації та початкової структурованості матеріалу, а також від параметрів матеріалу та функції моделі. Аналіз довів здатність моделі описувати поведінку не тільки рідкоподібних в'язкопружнопластичних середовищ, а й твердоподібних (потовщення, зміцнення) середовищ: повзучість, релаксацію, відновлення, ряд типових властивостей експериментальних релаксаційних кривих, криві повзучості та деформації, швидкість деформації та деформаційне зміцнення, течії під постійною напругою тощо.

Метод фазової площини показав себе як високо інформаційний метод, який і був застосований при дослідженні напружено-деформаційних полів багат шарової структури покриття різальної пластини.

#### 4.2.1 Встановлення координат особливих точок системи

В рамках моделі, яку ми беремо за основу (формули 2.21, 2.22, 2.23), розглядається поверхнева багат шарова структура, що сформована для зміцнення та підвищення характеристик термічної стабільності ріжучого інструменту.

Власні дослідження представлені в роботах [169, 170]. Методом фазової площини, визначаємо фазові портрети системи спираючись на рівняння (2.21 – 2.23). Вважаємо, що  $\tau_T \ll \tau_\varepsilon, \tau_\sigma$ , то в (2.23) можна покласти,  $dT/dt = 0$ , що дає зв'язок

$$T = T_e - \varepsilon\sigma, \quad (4.10)$$

підстановка якого в (2.21), (2.22) приводить до системи

$$\tau \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon + \sigma; \quad (4.11)$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\sigma + (T_e - \varepsilon\sigma - 1)g\varepsilon; \quad (4.12)$$

де час виміряно в одиницях  $\tau_\sigma$  і параметр  $\tau \equiv \tau_\varepsilon / \tau_\sigma$ .

Для встановлення характеристики стійких станів системи, в рамках методу фазової площини, знайдемо координати особливих точок. Вирішення цього питання розділимо (4.11) на (4.12). Одержимо вираз:

$$\frac{d\varepsilon}{d\sigma} = \frac{-\varepsilon + \sigma}{\tau[-\sigma + (T_e - \varepsilon\sigma - 1)g\varepsilon]}. \quad (4.13)$$

Знайдемо особливі точки фазової площини. Це точки, в яких напрям дотичної до графіка кривої фазової траєкторії не встановлено, похідна дорівнює нулю та не існує. Для цього напишемо систему рівнянь:

$$-\varepsilon + \sigma = 0, \quad (4.14)$$

$$\tau^{-1}[-\sigma + (T_e - \varepsilon\sigma - 1)g\varepsilon] = 0. \quad (4.15)$$

Встановлено особливі точки системи:  $D(0,0)$  і  $O(\sqrt{T_e - (g^{-1} + 1)}, \sqrt{T_e - (g^{-1} + 1)})$  (див. рис. 4.2). Точка  $O$  реалізується лише при виконанні умови  $T_e > T_c$ . Знайдемо відповідні показники Ляпунова. Вони мають вигляд:

1) Для точки  $D(T_e, 0)$  показник Ляпунова має вид:

$$\lambda_D = -\frac{1}{2}[1 + \tau^{-1}] \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - 4\tau^{-1}(1 + g(T_e - 1))} \right\}. \quad (4.16)$$

2) Для точки  $O(\sqrt{T_e - (g^{-1} + 1)}, \sqrt{T_e - (g^{-1} + 1)})$ :

$$\lambda_o = -0.5(1 + \tau^{-1}) \left[ 1 \pm \sqrt{1 - 8\tau(g^{-1} - 1)[T_e - g^{-1} - 1]} \right]. \quad (4.17)$$

Звідси бачимо, що при значеннях параметра  $\tau$ , обмежених зверху величиною

$$\tau_c = \frac{(g^{-1} - 1)[T_e - g^{-1} - 1]}{8}$$

точка  $O$  подає стійкий вузол, а з його зростанням до значень  $\tau > \tau_c$  – фокус.

#### 4.2.2. Аналіз фазових траєкторій

Згідно з експериментальними даними для ріжучих матеріалів [171, 172], час релаксації напружень становить  $\tau_\sigma \sim 10^{-10}$  с. Час релаксації температури до значення  $T_e$  задовольняє умові:



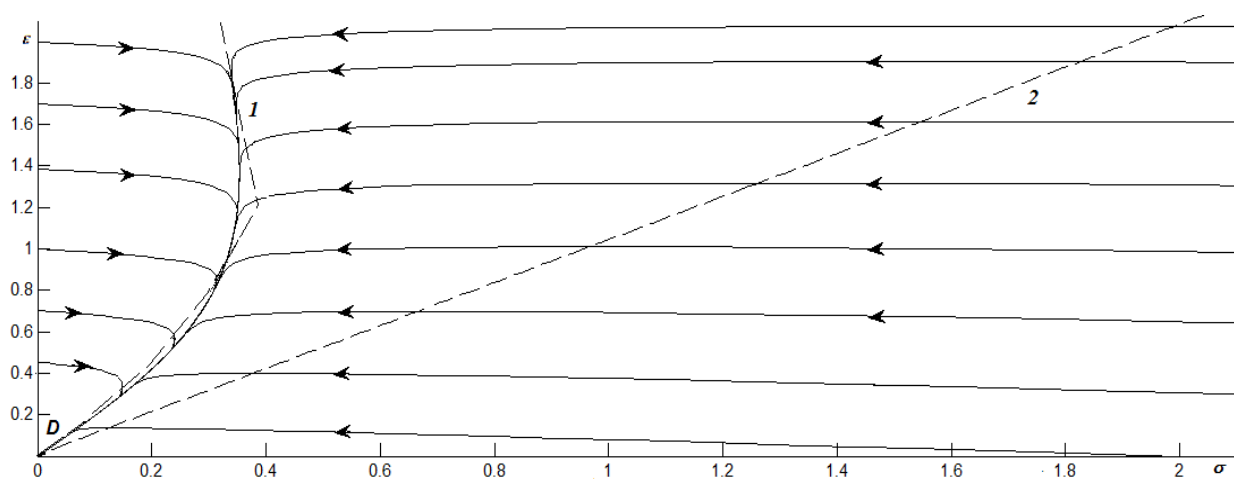
$$\tau_T \ll \tau_\sigma, \tau_\varepsilon. \quad (4.18)$$

На основі двопараметричної системи (4.11), (4.12) сформовані фазові портрети, що представлені на рисунках 4.2 і 4.3.

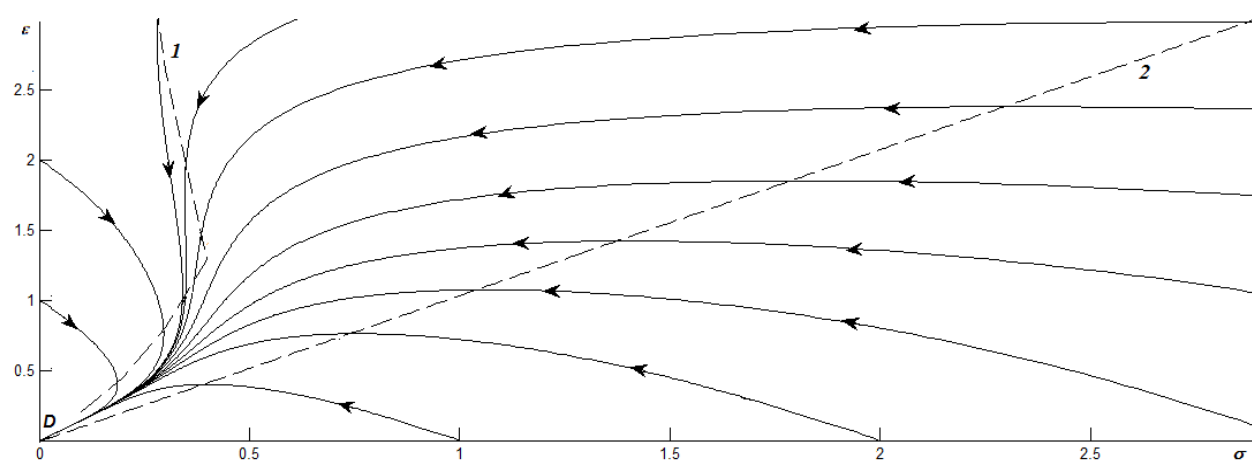
Рисунок 4.2 ілюструє поведінку системи в режимі тертя (за значення температури поверхонь тертя нижче, ніж  $T_c$ ), для значень параметру релаксації  $\tau \equiv \tau_\varepsilon / \tau_\sigma$ . Так, рисунок 4.2 *a* представлений при умові  $\tau = 0,01$ . Штрихова лінія 1 і лінія 2 показують ізокліни, що одержуються під час прирівнювання до нуля похідних в рівняннях (4.11) та (4.12) відповідно. Тому, крива 1 відповідає параметрам системи, при яких напруження не змінюється, а лінія 2 відповідає ситуації із сталою деформацією. Лінії ізоклін перетинаються на початку координат системи, формуючи єдину стаціонарну точку  $D$ , яка є вузлом в цьому фазовому портреті системи.

Аналіз портрету рисунку 4.2 *a* показує, що фазові траєкторії перетинаються у точці-вузлі  $D$ . З цього можна зробити висновок, що з часом напруження релаксують до нульового значення. Аналіз руху по довільній фазовій траєкторії показує спочатку миттєве наближення системи до лінії, яка близька ізокліні 1, а вже після цієї дії, спостерігається повільний рух по відповідній кривій. Якщо розглянути таке переміщення у два етапи, то на першому з них деформація зберігається. Це відповідає представленому раніше переходу між режимами тертя. Відзначимо, що повільна лінія траєкторії другого етапу, відповідає кривій що описує пружну ділянку залежності величини напруження від деформації  $\sigma(\varepsilon)$ .

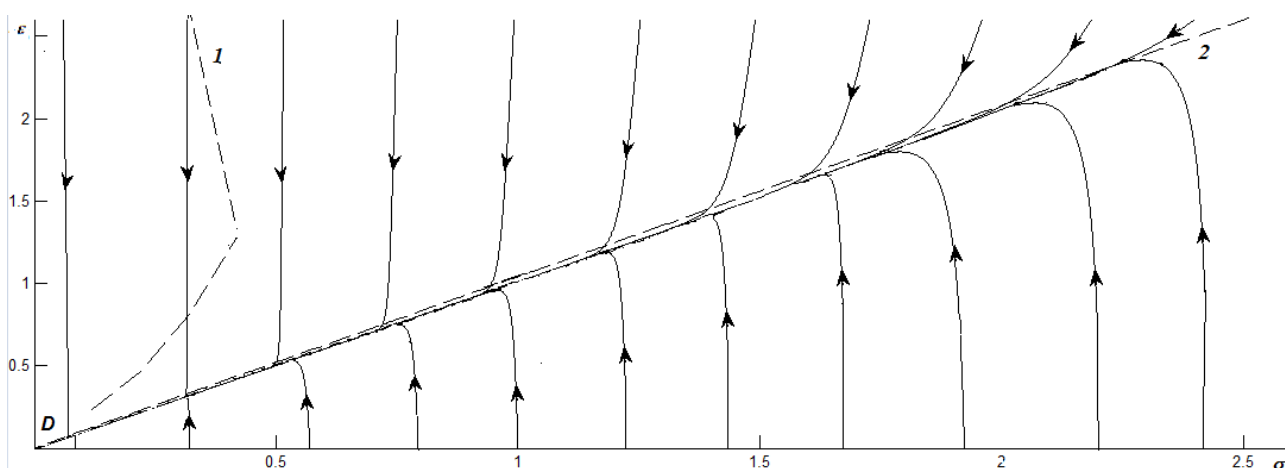
Фазовий портрет (дивись рис. 4.2 *б*) сформований при умові, що час релаксації напружень і деформації одного класу рівності (тобто  $\tau = 1$ ). На портреті наявний характерний особливий вузол  $D$ . Він ілюструє ситуації, при яких напруження  $\varepsilon$  показує різну поведінку спочатку: збільшується, а після зростання повільно зменшуються, і навпаки – зменшення, а потім зростання. Такий ефект пояснюється тим, що до того моменту, коли система прийде до рівноваги (криві досягнуть початку координат), відбувається переривчастий вплив на багатозарову систему ріжучого інструменту.



a)



б)



в)

Рисунок 4.2 – Фазові портрети системи при  $T_e = 2$  за умови:

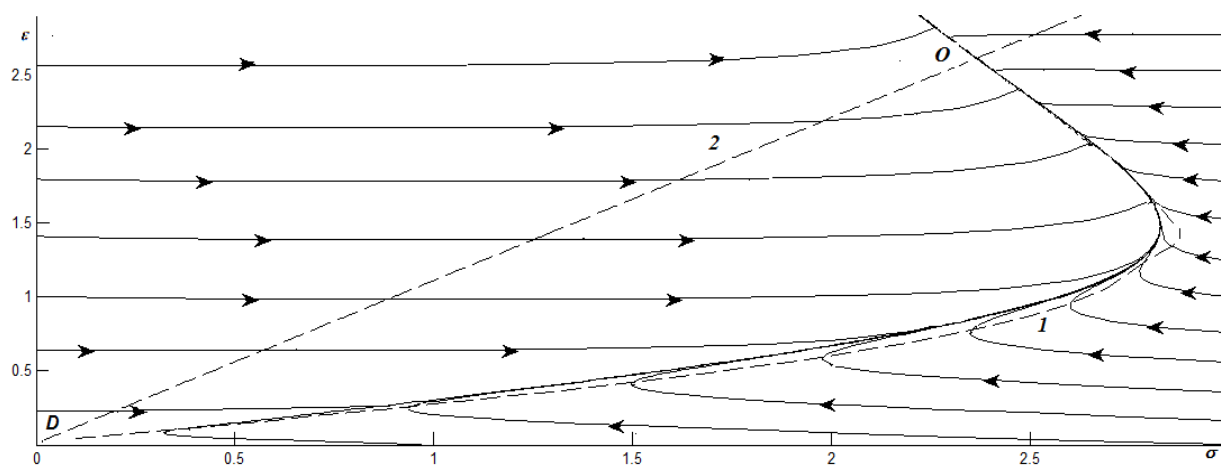
а) –  $\tau_T \ll \tau_\varepsilon = 0,01\tau_\sigma$ ; б) –  $\tau_T \ll \tau_\sigma = \tau_\varepsilon$ ; в) –  $\tau_T \ll \tau_\varepsilon = 100\tau_\sigma$

Наприклад, якщо розглянути фазові траєкторії початок яких пов'язаний із умовою при  $\varepsilon = 0$ , спочатку сухий режим тертя (напруження при цьому дорівнює 0), потім режим тертя переходить у ковзання (напруження зростають), а після цього етапу знову спостерігається сухий тип переривчастого руху.

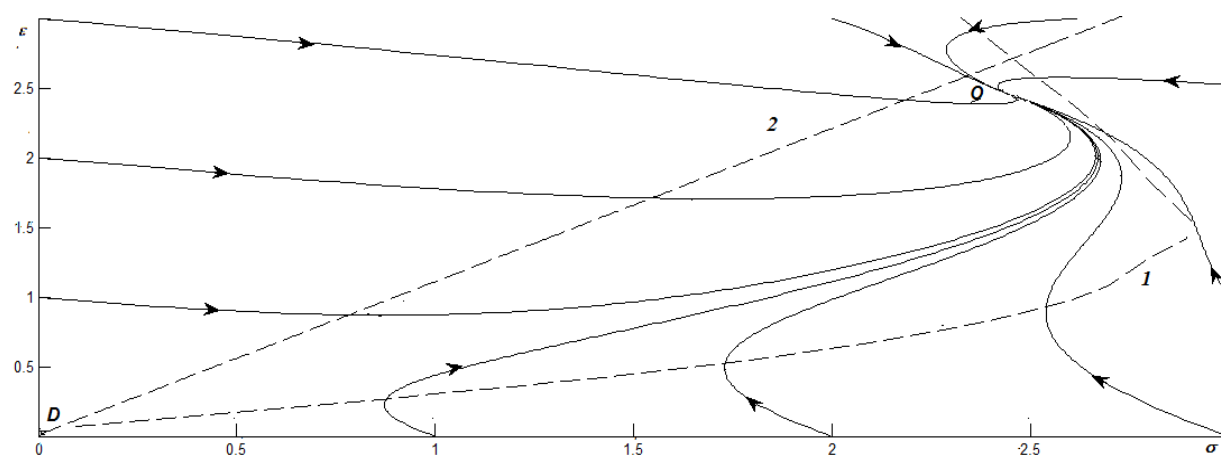
Останній етап ілюструється фазовими траєкторіями дотичними до ізокліни 1. Тут система поводить себе таким чином: спочатку напруження зростають, набувають максимального значення, а потім напруження зменшуються (після першого перетину ізокліни 1), потім знову зростають (після другого перетину ізокліни 1). Потім крива траєкторії прямує до нуля.

На рисунку 4.2 *в* представлений фазовий портрет при  $\tau = 100$ . Тут, як і на рисунку 4.2 *а*, можна спостерігати два етапи: на першому з них спостерігається швидка релаксація, наближення до лінії, яка є близької до ізокліни 2, і далі спостерігається повільний рух по цій траєкторії. Слід відзначити, що на першому етапі напруження в різальній пластині змінюється слабо, в той же час, деформація структури зменшуються дуже швидко для початкових значень деформації  $\varepsilon$  які вище ізокліни 2. На другому етапі, верхня область фазового портрета демонструє конфігураційну точку, яка спочатку рухається по пластичній ділянці, а далі, із ростом значень напруження, спостерігається її рух по гуківській (пружній деформації) траєкторії залежності. В рамках останньої ділянки система проходить більш тривалий час, тому що вона більш наближена до ізокліни, ніж перша.

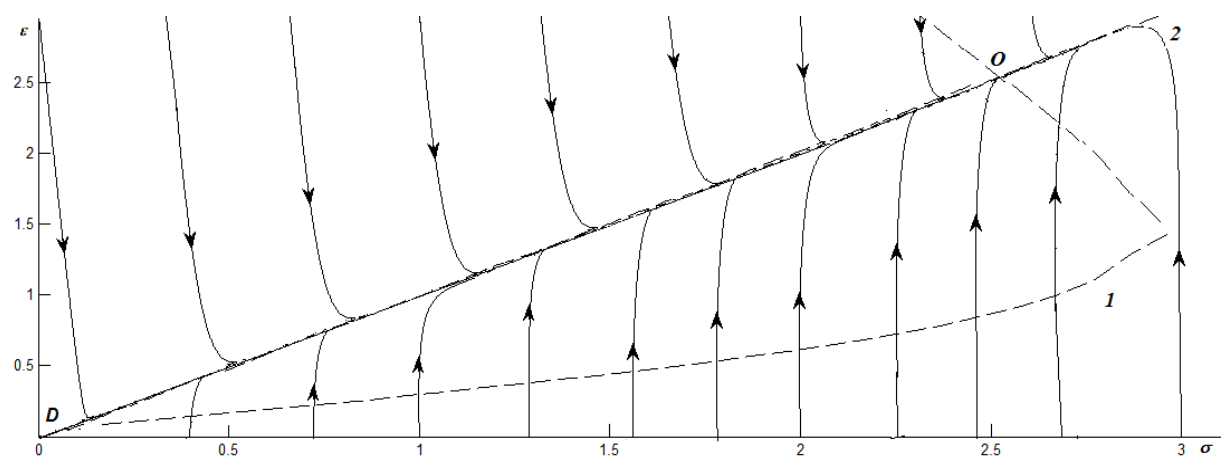
На рисунку 4.3 представлені фазові портрети системи для тих самих параметрів та співвідношень часів релаксації, які були використані для формування фазових портретів системи, що наведені на рисунку 4.2. Відмінністю була температура, яка відповідала ділянці пластичної деформації. В рамках цього дослідження спостерігається тертя ковзання під час механічного впливу на пластину, і з часом виникає ненульове стаціонарне значення зсувних деформацій  $\varepsilon_0 \neq 0$ , що відповідає мінімальному значенню потенціала. Лінії 1 і 2 на рисунку 4.3 є ізоклінами фазових траєкторій.



a)



б)



в)

Рисунок 4.3 – Фазові портрети системи при заданих параметрах  $T_e = 9$ :

а) –  $\tau_T \ll \tau_\epsilon = 0,01\tau_\sigma$ ; б) –  $\tau_T \ll \tau_\epsilon = \tau_\sigma$ ; в) –  $\tau_T \ll \tau_\epsilon = 100\tau_\sigma$

Представлені фазові портрети системи мають в наявності встановлені дві особливі точки – сідло в точці  $D$  на початку координат і вузол в точці  $O$ . Він виникає при ненульових значеннях напружень і деформації, і формується перетином ізоклін. При значенні параметра  $\tau = 0,01$  відповідний фазовий портрет подано на рисунку 4.3 *a*. Бачимо, що на першому етапі, фазові траєкторії швидко збігаються до виду лінії, яка є близькою до ізокліни 1. Така тенденція спостерігається при початку розгляду портрета для будь якої точки фазової площини при виконанні умови збереження деформації. Далі система набуває ненульового значення  $\varepsilon_0 \neq 0$ , після чого встановлюється стаціонарне тертя ковзання. В той же час, пряма, по якій здійснюється рух на під час другого етапу, відповідає пластичній ділянці залежності  $\sigma(\varepsilon)$ .

Аналіз фазового портрета показує, що система завжди в стані ковзання, за винятком тих ситуацій, коли початкові напруження наближаються до нуля. Можна сказати, що з часом ковзання набуває більш в'язкий характер при виконанні умови  $\varepsilon_i < \varepsilon_0$ , і навпаки, більш сухим при умові  $\varepsilon_i > \varepsilon_0$ . Відзначимо, що  $\varepsilon_i$  – початкова деформація, а  $\varepsilon_0$  – стаціонарне значення деформації. Рисунок 4.3 *б* показує, що при умові  $\tau = 1$  та при встановленні стаціонарного значення напружень і деформації виникають такі ситуації в напружено-деформаційній системі при яких змінюються пластичні характеристики покриття. Крім того, із часом реалізується переривчастий режим тертя.

Рисунок 4.3 *в* демонструє фазові портрети системи для  $\tau = 100$ , причому можна спостерігати умовно зміну залежності в два етапи. Основна відмінність між цими етапами полягає в тому, що на першому етапі ділянка, яка може бути описана законом Гуку є наближеною до лінії ізокліни. Тому, при такій ситуації система знаходиться в такому стані більше часу, в порівнянні з етапом пластичної деформації. Відзначимо, що стаціонарна точка  $O$  знаходиться на пластичній ділянці.

### 4.3. Кінетика деформаційних процесів

Розглянемо кінетику системи, шляхом відслідковування еволюції деформацій і дослідження швидкості їх зміни. Застосуємо до системи диференціальних рівнянь (4.11), (4.12) метод виключення змінної. Для цього з двох диференціальних рівнянь першого порядку, залежних від напружень  $\sigma$  та деформацій  $\varepsilon$ , одержимо рівняння другого порядку для  $\varepsilon$ . З рівняння (4.11) виразимо змінну  $\sigma$  через  $\varepsilon$  і запишемо похідну за часом від цього виразу. Підставимо одержані відповідні залежності  $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ ,  $\dot{\sigma}(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$  у (4.13) і знайдемо

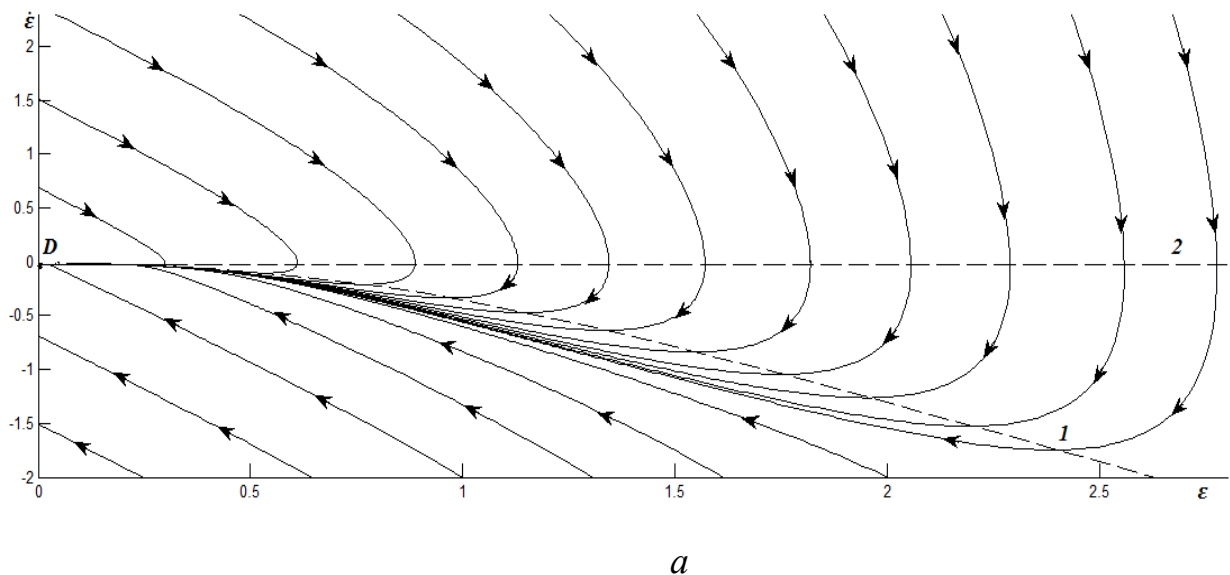
$$A\ddot{\varepsilon} + B\dot{\varepsilon} + C = 0, \quad (4.19)$$

$$A = \tau, B = \tau(g\varepsilon^2 + 1) + 1, C = \varepsilon[1 - g(T_e - \varepsilon^2 - 1)].$$

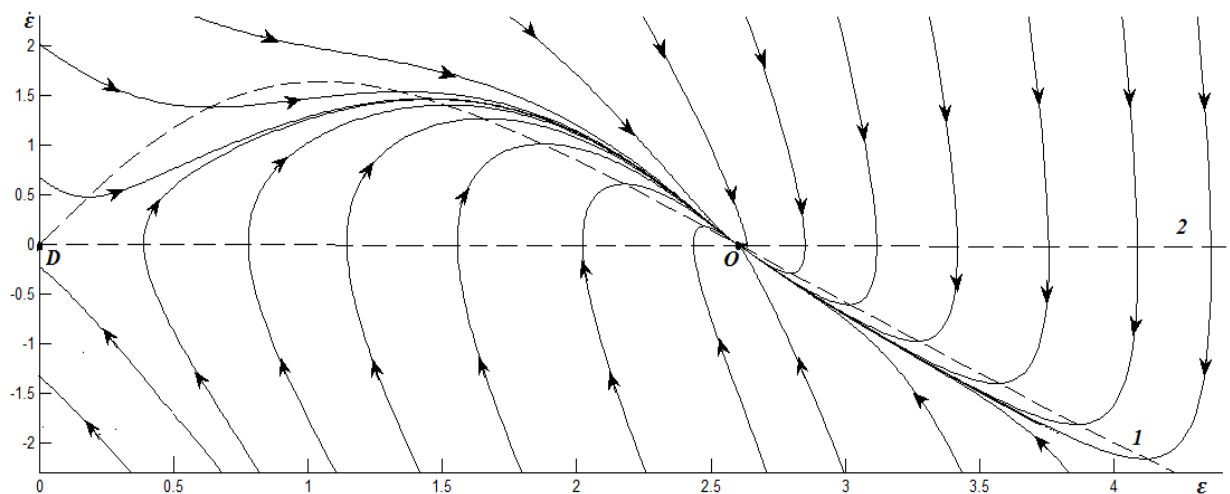
Відповідні фазові портрети представлено на рисунку 4.4. Спостерігаються штриховані криві 1 та 2. Штрихована крива 1 – ізокліна, на якій виконується умова постійної зміни швидкості деформації ( $\ddot{\varepsilon} = 0$ ).

Штрихована крива 2, що представлена на рисунку 4.4 б відповідає ізокліні при умові, що деформації вважаються незмінними ( $\dot{\varepsilon} = 0$ ). В рівнянні (4.19) напруження в явному вигляді відсутнє і його початкове значення задається за допомогою деформації та швидкості її зміни  $\varepsilon, \dot{\varepsilon}$ .

Рисунок 4.4 а ілюструє фазовий портрет, сформований при умові, що температура поверхонь тертя ріжучої пластини (контактних поверхонь) нижче критичної  $T_c$ . Тут спостерігається релаксація деформації  $\varepsilon$  до вузла  $D$ , який розташований на початку координат. Фазові траєкторії системи показують, що водночас також можливий переривчастий характер ковзання .



*a*



*б*

Рисунок 4.4 – Фазові портрети системи для  $\tau_\varepsilon = \tau_\sigma$ : а) –  $T_e = 2$ ; б) –  $T_e = 9$

При умові, коли  $T_e$  вище  $T_c$  і відбувається процес ковзання, сформований фазовий портрет, наведений на рисунку 4.4 б. На графіку наявні дві особливі точки – сідло  $D$  і стійкий вузол  $O$ . Установлено, що із часом, за довільних початкових умов, система приходить до стаціонарного стану, тобто фазові траєкторії збігаються до точки  $O$ , і далі зміна деформації не відбувається ( $\dot{\varepsilon} = 0$ ). Таким чином, релаксація деформацій може проходити за наявності переривчастого режиму впливу на систему. Отримані результати добре узгоджуються із результатами моделювання інших авторів [173, 174].

## Висновки до Розділу 4

1. Сформовано фазовий портрет напружено-деформованого стану системи, що описує стан характерний для відносно повільної зміни температури та швидкій зміні напружень, що відповідає переривчастому режиму впливу на багат шарову структуру різальної пластини. При малих значеннях напруження або при умові значного зниження цих показників пластична деформація в системі набуває характеристики повзучості. Під час цього процесу втрати стійкості не спостерігаються.
2. У фазовому портреті напружено-деформованого стану системи показано варіювання впливом напруження в різучій пластині на деформаційні показники. Встановлено, що при повільній зміні напруження деформація структури зменшуються дуже швидко для початкових значень деформації  $\varepsilon$ . В іншому стані системи, верхня область фазового портрета демонструє конфігураційну точку яка спочатку рухається по пластичній ділянці, а далі, із ростом значень напруження, спостерігається її рух по пружній траєкторії залежності. Вона показує умови переходу від пружних до пластичних деформацій в багат шаровій системі різальної пластини.
3. Кінетику зміни деформаційних характеристик системи вивчено шляхом відслідковування еволюції деформацій і дослідження швидкості їх зміни. Подано фазовий портрет, сформований при умові, що температура поверхонь тертя різучої пластини (контактних поверхонь) нижче критичної  $T_c$ . Фазові траєкторії системи показують, що відбувається переривчастий характер термічного впливу на відповідну структуру покриття під час проведення операції різання.



## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведені систематичні дослідження інтенсивності та кінетики поширення теплового поля, напружено-деформаційний стан у різальній пластині із нанесеними покриттями на основі TiN і TiCN, та одержані такі результати:

1. На основі теорії теплопровідності побудована модель процесу поширення теплового потоку вглиб пластини із нанесеним багат шаровим покриттям. Порівняння результатів дослідження інтенсивності поширення теплового потоку в пластині без покриття, із одношаровим покриттям TiN/42CrMo4 та із двошаровим покриттям TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/42CrMo4 показало, що при віддаленні від поверхні структури на глибину, яка відповідає товщині першого нанесеного шару покриття, температура знижується на 36%. В той же час, при віддаленні від поверхні на аналогічну глибину, але яка відповідає вже товщині двошарового покриття температурний вплив зменшується на 60%, що дозволяє значно знижувати температурне навантаження на матеріал пластини.

2. У рамках моделі еволюції поширення теплового поля проведене дослідження для перерізу при  $x = 0,037$  м пластини без покриття та із тришаровим покриттям П-TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN, результати якого показують, що початкова температура поверхні в пластині без покриття складала 1116,7 К, відповідна температура на поверхні із покриттям – 1031,2 К. Різниця температур поверхні структур пов'язується із їх різними значеннями коефіцієнтів тертя..

3. Встановлено, що для поверхні без покриття показники температури знижуються лінійно. Температурні залежності для пластини із тришаровим покриттям мають вигляд ламаних, які складаються із чотирьох елементів. На першому з них, в розмірних рамках нанесеного шару (2,5 мкм), спостерігається незначне зниження температури поверхні до 1030,9 К, що обумовлено фізико-термічними показниками шару покриття. На другій ділянці на глибині (2,5 – 5,0) мкм, в інтервалі температур 1030,9–1030,2 К, спостерігається більш суттєве зниження температури. На третій ділянці в інтервалі температур 1030,2 К – 1029,7 К, спостерігається значне зниження температури поверхні. Далі, із

збільшенням відстані від поверхні пластини, відбувається повільне зменшення температури матеріалу. На аналогічній глибині пластини без покриття температура склала 1103 К. Тобто температурна різниця встановила 346,3 К на однаковій відстані від поверхні.

4. Вивчена динаміка зміни температури, що знижується при переході у напрямку від поверхні в глибину матеріалу: для пластини без покриття – 5 К на початку дії теплового навантаження (час від початку впливу 0,1 с), через 1 с – 2,5 К, через 10 с – 1,4 К та через 100 с – 0,7 К. Одночасно для пластини із покриттям П-TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN відповідні дані склали: – 14,5 К на початку дії теплового навантаження, через 1 с – 5,6 К, через 10 с – 2,6 К та через 100 с – 1,65 К.

5. Досліджені методом фазового простору теплові та деформаційні поля для пластини без покриття, з одношаровим (TiN), двошаровим (TiCN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> та TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та тришаровим (TiN/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN) покриттями. На основі аналізу фазових портретів показано, що із зростанням відповідних показників траєкторії поступово обертаються навколо особливої точки системи, що зумовлено повільною зміною температури та одночасно достатньо швидкою зміною напружень, яке характерно для переривчастого режиму впливу зовнішнього навантаження. При умові малих або незначних знижень напружень пластична деформація розвивається у режимі, подібному до повзучості, при цьому не відбувається втрата стійкості. Максимальний вплив на теплове і деформаційне поле ріжучої твердосплавної пластини забезпечує тришарове покриття TiN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN.

6. Встановлено, що при повільній зміні напруження деформація структури зменшуються дуже швидко для початкових значень. В іншому стані системи, верхня область фазового портрета демонструє конфігураційну точку, яка спочатку рухається по пластичній ділянці, а далі, із ростом значень напруження, спостерігається її рух по пружній траєкторії залежності. Вона показує умови переходу від пружних до пластичних деформацій в багатошаровій системі різальної пластини.

## ПРИМІТКИ

Автор висловлює глибоку подяку науковим керівникам: доктору фізико-математичних наук, професору Олександрю Андрійовичу Гончарову та доктору фізико-математичних наук, професору Олексію Віталійовичу Хоменку за постійну увагу і керівництво під час написання дисертації. Також автор вважає за необхідне висловити подяку кандидату фізико-математичних наук Ганні Юрїївні Бадалян та кандидату фізико-математичних наук, доценту Андрію Миколайовичу Юнді за допомогу при виконанні досліджень, отриманні та обговоренні результатів і підготовці статей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. W. Grzesik, C.A. van Luttervelt, “An Investigation of the Thermal Effects in Orthogonal Cutting Associated with Multilayer Coating”, *CIRP Annals*, Vol. 50, no. 1, 2001, P. 53-56. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62069-1](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62069-1).
2. W. Grzesik, M. Bartoszek, P. Nieslony, “Finite element modelling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools”, *Journal of Materials Processing Technology*, no. 164–165, 2005, P. 1204-1211. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.136>
3. M. Kathrein, C. Michotte, M. Penoy, P. Polcik, C. Mitterer, “Multifunctional multi-component PVD coatings for cutting tools”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 200, 2005, P. 1867-1871. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.105>.
4. R. Brito, S. Rodrigues de Carvalho, S. Marcondes de Lima, J. Ferreira, “Thermal analysis in coated cutting tools”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, № 4, 2009, P. 314-321.
5. I. Krajinović, W. Daves, M. Tkadletz, T. Tepperneegg, Th. Klünsner, N. Schalk, Ch. Mitterer, Ch. Tritremmel, W. Ecker, Ch. Czettel, “Finite element study of the influence of hard coatings on hard metal toolloading during milling”, *Surface and Coatings Technology*, no. 304, 2016, P. 134-141.
6. Y. Li, G. Zheng, X. Cheng, X. Yang, R. Xu, H. Zhang, “Cutting Performance Evaluation of the Coated Tools in High-Speed Milling of AISI 4340 Steel”, *Materials*, Vol. 12, no. 19, 2019, P. 3266. <https://doi.org/10.3390/ma12193266>.
7. M. Fahad, P. Mativenga, M. Sheikh, “An investigation of multilayer coated (TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -TiN) tungsten carbide tools in high speed cutting using a hybrid finite element and experimental technique”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 225, no. 10, 2011, P. 1835-1850.
8. Р. І. Ахметшин, М. Ш. Мігранов, А. А. Верещака, “Моделювання теплових процесів при різанні інструментом із функціональними покриттями”, *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, №. 2, 2007, С. 116-120.

9. A. A. Goncharov, V. A. Konovalov, G. K. Volkova and V. A. Stupak, “Size effect on the structure of nanocrystalline and cluster films of hafnium diboride”, *The Physics of Metals and Metallography*, Vol. 108, 2009, P. 368-373. <https://doi.org/10.1134/s0031918x0910007x>

10. A. A. Goncharov, G. K. Volkova, V. A. Konovalov, V.V. Petukhov, “Effect of the Substrate on the Orientation and Structure of Thin Films Obtained by High-Frequency Magnetron Sputtering of Nickel Diboride,” *Metallofizika Noveishie Tekhnoljgij*, Vol. 28, no. 12, 2006, P. 1621-1628.

11. G. Samsonov, “Handbook of Refractory Compounds”, *Springer New York, NY*, 1980.

12. A. D. Pogrebnjak, V. I. Ivashchenko, P. L. Skrynskyy, O. V. Bondar, P. Konarski, K. Załęski, S. Jurga, E. Coy, “Experimental and theoretical studies of the physicochemical and mechanical properties of multi-layered TiN/SiC films: Temperature effects on the nanocomposite structure”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 142, 2018, P. 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.004>

13. F. Zemezmi, J. Recha, W. Ben Salemb, A. Dogui, P. Kapsac, “Identification of a friction model at tool/chip/workpiece interfaces in dry machining of AISI4142 treated steels”, *Journal of materials processing technology*, Vol. 209, 2009, P. 3978–3990.

14. W. Grzesik, “Modelling of heat generation and transfer in metal cutting: a short review”, *Journal of Machine Engineering*, Vol. 20, no. 1, 2020, P. 24-33.

15. A. A. Goncharov, S. N. Dub, A. V. Agulov, V. V. Petukhov, “Structure, composition, and mechanical properties of thin films of transition metals diborides”, *Journal of Superhard Materials*, Vol. 37, 2015, P. 422-428. <https://doi.org/10.3103/S1063457615060076>

16. A. A. Goncharov, A. N. Yunda, H. Komsta, P. Rogalski, “Effect of Structure on Physicomechanical Properties of Transition Metals Diboride Films”, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 132, no. 2, 2017, P. 270-273. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.132.270>

17. A. D. Pogrebnjak, M. Il’jashenko, O. P. Kul’ment’eva, V. S. Kshnjakin, A. P. Kobzev, Y. N. Tyurin, O. Kolisnichenko, “Structure and properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings deposited to steel 3 (0.3 wt%C) substrate using pulsed detonation technology”, *Vacuum*, Vol. 62, 2001, P. 21-26 [https://doi.org/10.1016/S0042-207X\(01\)00109-9](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(01)00109-9)

18. M. Fahad, P. Mativenga, M. Sheikh, “A comparative study of multilayer and functionally graded coated tools in high-speed”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 62, No. 1-4, 2012, P. 43-57.

19. P. H. Mayrhofer, F. Kunc, J. Musil, C. Mitterer, “A comparative study on reactive and non-reactive unbalanced magnetron sputter deposition of TiN coatings”, *Thin Solid Films*, Vol. 415, 2002, P. 151-159.

20. W. Grzesik, P. Niesłony, M. Bartoszek, ”Modelling of the cutting process analytical and simulation methods”, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, Vol. 33, 2009, P. 5-29.

21. J. Zhang, Z. Liu, ”The chatter identification in end milling based on combining EMD and WPD”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 91, no. 59, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0024-8>

22. L. Shih-Chang, Ch. Zue-Chin Tsai, L. Du-Cheng, S. Yi-Chen, D. Huan-Shin, Sh. Min-Jen, F. Sheng, ”Effects of substrate temperature on the structure and mechanical properties of (TiVCrZrHf)N coatings”, *Applied Surface Science*, Vol. 257, no. 17, 2011, P. 7709-7713.

23. I. Ucun, K. Aslantas, ”Numerical simulation of orthogonal machining process using multilayer and single-layer coated tools”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 54, 2011, P. 899-910. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-3012-9>

24. S. Chinchankar, S. K. Choudhury, ”Evaluation of Chip-tool Interface Temperature: Effect of Tool Coating and Cutting Parameters during Turning Hardened AISI 4340 Steel”, *Procedia Materials Science*, Vol. 6, 2014, P. 996-1005. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.170>

25. P. S. Sreejith, B. K. A. Ngoi, P. S Sreejith, B. K. A. Ngoi, “Dry machining: Machining of the future”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 101, no. 1–3, 2000, P. 287-291. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00445-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00445-3)

26. Gl. Lakic, G. Kramar, D. Kopac, Janez, “Metal cutting - theory and application”, University of Banjaluka, 2014.

27. B. Haddag, S. Atlati, M. Nouari, M. Zenasni, “Analysis of the heat transfer at the tool–workpiece interface in machining: determination of heat generation and heat transfer coefficients”, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, 2015, P. 1355-1370. <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1499-1>

28. Y. Jaluria, “Thermal Processing of Materials: From Basic Research to Engineering”, *Journal of Heat and Mass Transfer*”, Vol. 125, 2003, P. 957-979. <https://doi.org/10.1115/1.1621889>.

29. S. Fetni, T. Maurizi Enrici, T. Niccolini, H. Son Tran, O. Dedry, L. Duchêne, A. Mertens, A. Marie Habraken, “Thermal model for the directed energy deposition of composite coatings of 316L stainless steel enriched with tungsten carbides”, *Materials & Design*, Vol. 204, 2021, P. 109661, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109661>.

30. A. V. Yakimov, P. T. Slobodjanik, A. Usov, “Thermophysical treatment”, Kiev: Lyibid: 1991.

31. T. Ozel, “The influence of friction models on finite element simulations of machining”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, no. 5, 2006, P. 518-530. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.07.001>

32. G. R. Johnson, W. H. Cook, “Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 21, no. 1, 1985, P. 31-48. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9)

33. N. N. Zorev, “Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting”, *International Research in Production Engineering*, New York: ASME: 1963, p. 165.

34. N. Banerjee, A. Sharma, “Identification of a friction model for minimum quantity lubrication machining”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 83, 2014, P. 437-443. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.034>

35. M. H. Dirikolu, T. H. C. Childs, K. Maekawa, “Finite element simulation of chip flow in metal machining”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, no. 11, 2001, P. 2699-2713. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(01\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00047-9)

36. V. P. Franchuk, K. A. Ziborov, V. V. Krivda, S. O. Fedoriachenko, “Influence of thermophysical processes on the friction properties of wheel-rail pair in the contact area”, *Науковий вісник Національного гірничого університету*, no. 2, 2018, P. 46-52.

37. J. Martan, P. Beneš, “Thermal properties of cutting tool coatings at high temperatures”, *Thermochimica Acta*, Vol. 539, 2012, P. 51-55. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.03.029>

38. D. Corrêa Ferreira, F. Viana Avelar Dutra, R. Gustavo Dourado da Silva, “Studying the effects of coatings on the thermal protection of cutting tools during turning via a nonlinear inverse heat conduction problem”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 129, 2023, P. 3009-3026. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12473-z>

39. W. Grzesik, “Friction behaviour of heat isolating coatings in machining: mechanical, thermal and energy-based considerations”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, no. 2, 2003, P. 145-150, [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00169-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00169-4)

40. W. Grzesik, P. Nieslony, “Thermophysical-Property-Based Selection of Tool Protective Coatings for Dry Machining of Steels”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 125, no. 4, 2003, P. 689-693. <https://doi.org/10.1115/1.1617982>

41. W. Grzesik, P. Nieslony, “Physics based modelling of interface temperatures in machining with multilayer coated tools at moderate cutting speeds”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, no. 9, 2004, P. 889-901, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.02.014>

42. W. Grzesik, K. Zak, “Friction modelling in metal cutting with integrated tool wear effects”, *Advances in manufacturing science and technology*, Vol. 38, no. 3, 2014, P. 5-19. <https://doi.org/10.2478/amst-2014-0014>



43. W. Grzesik, J. Rech, T. Wanat, "Surface finish on hardened bearing steel parts produced by superhard and abrasive tools", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, no. 2, 2007, P. 255-262.
44. D. Umbrello, L. Filice, S. Rizzuti, F. Micari, "On the evaluation of the global heat transfer coefficient in cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, 2007, P. 1738-1743.
45. W. A. Knight, G. Boothroyd, "Fundamentals of machining and machine tools", New York and Base: Marcel Dekker: 1989, p. 560.
46. V. Bezyazychny, M. Szczerek, V. V. Nepomiluev, Z.W. Kiselev, "Use of the theory of similarity in the study of cutting tool wear", *Tribologia*, Vol. 277, 2018, P. 7-12. <https://doi.org/10.105604/01.3001.0011.9812>.
47. M. C. Shaw, "Metal cutting principles", Oxford: Clarendon Press: 1989, p. 672.
48. F. Kone, C. Czarnota, B. Haddag, M. Nouari, "Finite element modelling of the thermo-mechanical behavior of coatings under extreme contact loading in dry machining", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, no. 12, 2011, 3559-3568. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.12.024>
49. Y.-C. Yen Eugene, A. Jain, P. Chigurupati, W.-T. Wu, T. Altan, "Computer simulation of orthogonal cutting using a tool with multiple coatings", *Machining Science and Technology*, Vol. 8, no. 2, 2004, P. 305-326, <https://doi.org/10.1081/MST-200029230>
50. M. B. Guemmour, A. Sahli, S. Kebdani, S. Sahli "Simulation of the Chip Formation and Temperature Distribution by the FEM", *Journal of Applied Sciences*, Vol. 15, 2015, P. 1138-1148.
51. G. Hao, Z. Liu, X. Liang, J. Zhao, "Influences of TiAlN Coating on Cutting Temperature during Orthogonal Machining H13 Hardened Steel", *Coatings*, Vol. 9, 2019, P. 355-357.
52. W. Grzesik, P. Niesłony, M. Bartoszek, "Modelling of the cutting process analytical and simulation methods", *Advances in Manufacturing Science and Technology*, Vol. 33, 2009, P. 5-29.

53. R. Brito, S. Rodrigues de Carvalho, S. Marcondes de Lima, J. Ferreira, “Thermal analysis in coated cutting tools”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, no. 4, 2009, P. 314-321.

54. J. Rech, C. Claudin, W. Grzesik, Z. Zalisz, “Characterization of the friction properties of various coatings at the tool—chip—workpiece interfaces in dry machining of AISI 4140 steel”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 222, no. 4, 2008, P. 617-623. <https://doi.org/10.1243/13506501JET416>

55. F. Zemzemi, J. Rech, W. Ben Salem, A. Dogui, P. Kapsa, “Identification of a friction model at tool/chip/workpiece interfaces in dry machining of AISI4142 treated steels”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, no. 8, 2009, P. 3978-3990. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.019>

56. T. Obikawa, T. Matsumura, T. Shirakashi, E. Usui, “Wear characteristic of alumina coated and alumina ceramic tools, *Journal of Materials Processing Technology*”, Vol. 63, no. 1–3, 1997, P. 211-216, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02626-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02626-X)

57. F. Klocke, T. Beck, S. Hoppe, T. Krieg, N. Müller, T. Nöthe, H.-W. Raedt, K. Sweeney, “Examples of FEM application in manufacturing technology, *Journal of Materials Processing Technology*”, Vol. 120, no. 1–3, 2002, P. 450-457, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)01210-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)01210-9)

58. J. Rech, A. Kusiak, J. L. Battaglia, Tribological and thermal functions of cutting tool coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vo. 186, no. 3, 2004, Pages 364-371. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.11.027>

59. F. Zemzemi, J. Rech, W. Salem, A. Dogui, Ph. Kapsa, “Identification of friction and heat partition model at the tool-chip-workpiece interfaces in dry cutting of an Inconel 718 alloy with cBN and coated carbide tools”, *5th International Conference on High Speed Machining*, Metz, France, pp. 1-7, 2006.

60. A. V. Khomenko, I. A. Lyashenko, V. N. Borisyuk, “Self-similar phase dynamics of boundary friction”, *Ukrainian Journal of Physics*, Vol. 54, no. 11, 2009, P. 1139-1148. <https://doi.org/10.15407/ufm.23.02.239>

61 A. V. Khomenko, I. A. Lyashenko, “Hysteresis phenomena at ultrathin lubricant film melting in the case of first-order phase transition”, *Physics Letters A*, Vol. 366, no. 1–2, 2007, P. 165-173. <https://doi.org/10.1016/j.phy-sleta.2007.02.010>.

62. A. V. Khomenko, I. A. Lyashenko, “A stochastic model of stick-slip boundary friction with account for the deformation effect of the shear modulus of the lubricant”, *Journal of Friction and Wear*, Vol. 31, 2010, P. 308-316. <https://doi.org/10.3103/S1068366610040100>

63. G. Fox-Rabinovich, I. S. Gershman, E. Locks, J. M. Paiva, J. L. Endrino, G. Dosbaeva, S. Veldhuis, “The Relationship between Cyclic Multi-Scale Self-Organized Processes and Wear-Induced Surface Phenomena under Severe Tribological Conditions Associated with Buildup Edge Formation”, *Coatings*, Vol. 11, no. 8, 2021, P. 1002-1008. <https://doi.org/10.3390/coatings11081002>

64. T. S. Skoblo, S. P. Romaniuk, A. I. Sidashenko, R. M. Muratov, “Hardening of the cutting tool by the coatings”, *Metal Science and Heat Treatment of Metals*, no. 3, 2015, P. 45-50.

63. A. V. Khomenko, N. V. Prodanov, “Study of Friction of Ag and Ni Nanoparticles: An Atomistic Approach”, *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 114, no. 47, 2010, 19958-19964. <https://doi.org/10.1021/jp108981e>

64. L. S. Metlov, M. M. Myshlyaev, A. V. Khomenko, I. A. Lyashenko, “A model of grain boundary sliding during deformation”, *Technical Physics Letters*, Vol. 38, no. 11, 2012, 972-974. <https://doi.org/10.1134/S1063785012110107>

65. A. V. Khomenko, D. S. Troshchenko, L.S. Metlov, P. E. Trofimenko, “Features of the Phase Kinetics of Metals’ Fragmentation at the Severe Plastic Deformation”, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, Vol. 15, no. 2, 2017 203-220. <https://doi.org/10.15407/nnn.15.02.0203>

66. T. Fatih, O. Çolak, M. Kayacan, “Investigation of TiN coated CBN and CBN Cutting tool performance in hard milling application”, *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 57, no. 5, 2011, P. 417-424.

67. R. T. Coelho, E. G. Ng, M. A. Elbestawi, “Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, 2007, P. 263-272.

68. N. A. Badaluddin, W. F. Hakim, W. Zamri, M. F. MdDin, I. Fadhlina Mohamed, J. A. Ghani, “Coatings of Cutting Tools and Their Contribution to Improve Mechanical Properties: A Brief Review”, *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 13, no. 14, 2018, P. 11653-11664.

69. A. Nordgren, B. Z. Samanib, R. M'Saoubic, “Experimental Study and Modelling of Plastic Deformation of Cemented Carbide Tools in Turning”, *Procedia CIRP*, Vol. 14, 2014, P. 599- 604.

70. J. Du, T. Hao, X. Zhang, G. Su, P. Zhang, Y. Sun, J. Zhang, Ch.Xu, “Finite element investigation of cutting performance of Cr/W-DLC/DLC composite coated cutting tool”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 118, no. 7-8, 2022, P. 2177-2192. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08093-0>

71. S. K. Mishra, S. Ghosh, S. Aravindan, “Investigations into friction and wear behavior of AlTiN and AlCrN coatings deposited on laser textured WC/Co using novel open tribometer tests”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 387, 2020, 125513-125524. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125513>

72. B. Antoszewski, O. Gaponova, V. Tarelnyk, O. Myslyvchenko, P. Kurp, T. Zhylenko, I. Konoplianchenko, “Assessment of Technological Capabilities for Forming Al-C-B System Coatings on Steel Surfaces by Electrospark Alloying Method”, *Materials*, Vol. 14. 2021, P. 739. <https://doi.org/10.3390/ma14040739>

73. J. Y. Ji, Huang, K. Lee, “Cutting tool temperature field reconstruction using hybrid macro/micro scale modeling for machining of titanium alloy”, *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*; Banff, AB, Canada. 12–15 July 2016, pp. 1265-1270.

74. V. Dubey, A. K. Sharma, R. K. Singh, “A Technological Review on Temperature Measurement Techniques in Various Machining Processes”, *Lecture Notes in Mechanical Engineering Advances in Metrology and Measurement of Engineering Surfaces*, 2020, P. 13-23. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-5151-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-15-5151-2_6)

75. G. Hao, Z. Liu, X. Liang, J. Zhao, “Influences of TiAlN Coating on Cutting Temperature during Orthogonal Machining H13 Hardened Steel”, *Coatings*. 2019; Vol. 9, no. 6, P. 355-361. <https://doi.org/10.3390/coatings9060355>

76. D. Umbrello, L. Filice, S. Rizzuti, F. Micari, “On the evaluation of the global heat transfer coefficient in cutting”, *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, 2007, P. 1738-1743.

77. I. Uzun, K. Aslantas, “Numerical simulation of orthogonal machining process using multilayer and single-layer coated tools”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 54, 2010, P. 899-910. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-3012-9>.

78. A. Thakare, A. Nordgren, “Experimental Study and Modeling of Steady State Temperature Distributions in Coated Cemented Carbide Tools in Turning”, *Procedia CIRP*. Vol. 31, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.024>

79. R. J. Talib, A. M. Zaharah, M. A. Selamat, A. A. Mahaidin, M. F. Fazira, “Friction and Wear characteristics of WC and TiCN-coated Insert in Turning Carbon Steel Workpiece”, *Procedia Engineering*, Vol. 68, 2013, P. 716-722.

80. D. Edström, D. Sangiovanni, L. Hultman, I. Petrov, J. E. Greene, V. Chirita, “Elastic properties and plastic deformation of TiC- and VC-based alloys”, *Acta Materialia*, Vol. 144, 2018, P. 376-385. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.10.047>

81. M. Arenas, “Thermal cutting of steel plates: modelling, simulation and optimal control of preheating strategies”, 2021, <https://doi.org/10.14279/depositonce-11680>.

82. A. Wieprzkowicz, D. Heim, “Modelling of thermal processes in a glazing structure with temperature dependent optical properties - An example of PCM-window”, *Renewable Energy*, Vol. 160, 2020, P. 653-662. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.146>.

83. I. Savelyeva, A. Zhuravskii, “Modeling of thermal processes during vapor deposition of material on curvilinear surface”, *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 891, 2017, P. 012134. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012134>

84. I. K. Krasnov, A. A. Salnikova, N. Pareshina, “Modeling of thermal process in elements of structures with poles with the record of recovery”, *Journal of Physics:*

*Conference Series*, Vol. 1141, 2018, P. 012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1141/1/012046>

85. Л. М. Дяконюк, Я. Г. Савула, “Комп’ютерне моделювання теплоперенесення у шарі з тонким покриттям”, *Вісник Львівського університету. Серія механіко-математична*. Вип. 50, 1998, С. 93-95.

86. Й. Й. Лучко, В. М. Гембара, Н. О. Гембара, “Моделювання теплопровідності тонких плит з багатошаровим покриттям”, *Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій*. Вип. 6. 2004, С. 65-70.

87. Н. С. Бондаренко, А. С. Гольцев, “Вирішення задачі теплопровідності для анізотропних пластин при зосереджених температурних впливах з використанням поліномів Лежандра”, *Математичні методи та фізико-механічні поля*, Т. 52, № 4, 2009, С. 216-226.

88. Д. В. Евдокимов, Д. Я. Ивасишина, А. А. Кочубей, Я. В. Поляков, “Аналіз теплопровідності в неасимптотично тонкому шарі”, *Диференціальні рівняння та їх застосування*. Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т., 2006, С. 141-156.

89. В. А. Шевчук, “Нестационарна одновимірна задача теплопровідності для циліндра з тонким багатошаровим покриттям”, Т. 54, № 2, 2011, С. 179-185.

90. Р. М. Кушнір, Б. В. Процюк, В. М. Синюта, “Температурні напруження та переміщення в багатошаровій пластині з нелінійними умовами теплообміну”, *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, Т. 38, № 6, 2002, С. 31-38.

91. Н. П. Флейшман, “Математичні моделі теплового спряження середовищ із тонкими чужорідними прошарками або покриттями *Вісник Львівського університету. Серія механіко-математична*, Вип. 39, 1993, С. 30-34.

92. Й. Й. Лучко, І. М. Добрянський, Є. І. Іваник, “Моделі розрахунку напружено-деформованого стану інженерних конструкцій за умов локального термомеханічного навантаження”, Львів: Каменяр, 2012, 311 с.

93. Я. П. Коваленко, І. А. Бойко, П. П. Мельничук, “Застосування методу скінчених елементів для пошуку шляхів оптимізації температурного поля при

різанні інструментами із ПКНБ групи BL”, *Технічна інженерія*, Т. 2, № 90, 2022, С. 22-29. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-22-29](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-22-29)

94. М. П. Мазур, А. С. Гаюр, Ю. Бень, “Моделювання теплових явищ процесу різання інструментом з покриттям методом скінченних елементів”, *Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. Праць*, Харків : НТУ «ХП», Вип. 9, 2014, 183 с.

95. I. Yevzerov, Y. Heraimovych, D. Marchenko, V. Remnev, “Difference schemes for dynamics problems”, *Strength of Materials and Theory of Structures*, Vol. 107, 2021, P. 133-139. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2021.107>.

96. Л. М. Дяконюк, Я. Г. Савула, “Комп’ютерне моделювання теплоперенесення у шарі з тонким покриттям”, *Вісник Львівського університету. Серія механіко-математична*, Вип. 50, 1998, С. 93-95.

97. Д. В. Евдокімов, Д. Н. Івасішина, А. А. Кочубей, Н. В. Поляков, “Аналіз теплопровідності у неасимптотично тонкому шарі”, *Диференціальні рівняння та їх застосування*, Дніпропетровськ: Дніпропетр. нац. ун-т, 2006, С. 141-156.

98. Y. A. Kirsanov, “Thermal state of coated solids in asymmetric cyclic heat exchange with ambient media”, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 69, 1996, P. 104-108. <https://doi.org/10.1007/BF02606231>

99. J. Lin, S. Reutskiy, Y. Zhang, Y. Sun, J. Lu, “The Novel Analytical–Numerical Method for Multi-Dimensional Multi-Term Time-Fractional Equations with General Boundary Conditions”, *Mathematics*, Vol. 11, 2023, P. 929-934. <https://doi.org/10.3390/math11040929>

100. Я. П. Коваленко, І. А. Бойко, П. П. Мельничук, “Застосування методу скінчених елементів для пошуку шляхів оптимізації температурного поля при різанні інструментами із ПКНБ групи BL”, *Технічна інженерія*, Т. 2, №90, 2022, С. 22-29. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-22-29](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-22-29)

101. A. Heininen, R. Prod’hona, H. Mokhtariana, E. Coatanea’a, K. Koskinena, “Finite element modelling of temperature in cylindrical grinding for future integration in a digital twin”, *Procedia CIRP*, Vol. 104, 2021, P. 875–880. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.147>

102. X. Cenbo, M. Biao, H. Li, Zh. Fenglian, W. Yusen, “Modeling and analysis of transient temperature field in finite thickness plate under symmetrically located moving heat sources”, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 7, 2015. <https://doi.org/10.1177/1687814015619554>

103. A. Hussein, Ch. Yan, R. Everson, “Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting”, *Materials and Design*, Vol. 52, 2013.

104. М. П. Моклячук, “Варіаційне числення. Екстремальні задачі”, К. : Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2009. – 380 с.

105. М. М. Астаф’єва, “Задача мінімізації функціонала в теорії керування”, *Фізико-математична освіта (ФМО)*”, Вип. 4(14), 2017, С. 144-147.

106. В. Б. Довгалюк, Ю. В. Човнюк, М. О. Шишина, “Аналіз процесів тепломасообміну та деформації колоїдних капілярнопористих тіл методами фрактального аналізу та дискретної нелінійної динаміки”, *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, Вип. 28, 2019, С. 6-16.

107. О. О. Сердюк, “Сучасні методи дослідження нелінійних динамічних систем”, *Краматорськ: ДДМА*, 2018, 120 с.

108. Д. Я. Хусаїнов, А. В. Шатирко, “Основи нелінійної динаміки”, К.: Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2017, 159 с.

109. О. М. Самборська, Б. Г. Шелестовський, “Чисельні методи”, *Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя*, 2010, 164 с.

110. N. Raza, A. Jhangeer, S. Arshed, A. R. Butt, Y.-M. Chu, “Dynamical analysis and phase portraits of two-mode waves in different media”, *Results in Physics*, Vol. 19, 2020, P. 103650. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103650>

111. A. Khomenko, M. Khomenko, B. Persson, K. Khomenko, “Noise effect on ice surface softening during friction”, *Tribology Letters*, Vol. 65, no. 2, 2017, P.71. <https://doi.org/10.1007/s11249-017-0853-5>.

112. A. V. Khomenko, O. V. Yushchenko, “Solid – liquid transition of ultrathin lubricant film ”, *Physical Review E*, Vol. 68, 2003, P. 036110.



113. A. Olemskoi, A. Khomenko, “Three-parameter kinetics of a phase transition”, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, Vol. 83. 1996, P. 1180-1192.
114. A. V. Khomenko, “Noise influence on solid – liquid transition of ultrathin lubricant film”, *Physics Letters A*, Vol. 329, 2004, P. 140-147.
115. О. В. Хоменко, “Вплив флуктуацій температури поверхонь тертя на динамічну фазову діаграму”, *Вісник Сумського державного університету*, №10(69), 2004, С. 15-28.
116. О. В. Хоменко, Я. А. Ляшенко, “Фазова кінетика внутрішнього тертя ультратонкої плівки мастила”, *Вісник Сумського державного університету*, № 8(80), 2005, С. 68 - 77.
117. A. Khomenko, I. Lyashenko, “Statistical theory of the boundary friction of atomically flat solid surfaces in the presence of a lubricant layer”, *Physics-Uspekhi*. №55, 2012, P. 1008-1034. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201210f.1081>.
118. “Фізико-математична теорія процесів обробки матеріалів та технології машинобудування”, *Одеса: ОНПУ*, 2003, 625 с.
119. R. Komanduri, Zh. B. Hou, “Thermal modeling of the metal cutting process — Part III: temperature rise distribution due to the combined effects of shear plane heat source and the tool–chip interface frictional heat source”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, Is. 1, 2001, P. 89-107. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(99\)00105-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(99)00105-8).
120. A. A. Goncharov, A. N. Yunda, S. A. Goncharova, D. A. Belous, S. V. Koval, L. V. Vasilyeva, “Dependence of the thermal field in the coated cutting insert on the cutting conditions”, *2017 IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2017)*, Odessa, Ukraine, 2017, pp. 01FNC19-1 – 01FNC19-5. <https://doi.org/10.1109/nap.2017.8190209>.
121. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, D. Belous, L. Vasilyeva, “Effect of a Protective Coating on the Temperature Distribution in a Revolving Cutting Tool and the Cutting Tool Lifetime”, *High Temperature Material Processes: An International*

*Quarterly Journal of High-Technology Plasma Processes*, Vol. 22, № 4, 2018, P. 279-291. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2018029411>

122. D. A. Belous, A. A. Goncharov, “Modeling of a thermal field in the cutting insert protected by multilayered coating”, *Міжнародна наукова конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика-2018»*. Львів, Україна, 15-17 травня 2018, С. 36.

123. Д. О. Білоус, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, “Моделювання поширення теплового потоку у різальній пластині з багат шаровим покриттям”, *Міжнародна науково-технічна конференція “Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2019)”*, Суми, Україна, 23 - 26 квітня 2019 р., С. 202.

124. G. Grimvall, “Thermophysical Properties of Materials”, *Hardcover – Elsevier, United States*, 1999, 424 с.

125. G. V. Samsonov, “Handbook of the physicochemical properties of the elements”, *Springer*, 1968. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-6066-7>

126. Д. А. Колесніков, І. В. Суджанская, В. Ю. Новіков, С. В. Литовченко, Е.А. Кудрявцев, І. Ю. Гончаров, Б. О. Мазілін, Е. В. Крицина. В. М. Береснєв, О. В. Глухов, “Отримання, структура і властивості покриттів на основі  $Al_2O_3$ , отримані магнетронним методом”, *Журнал нано- та електронної фізики*, Т. 12, № 1, 2020, P. 01022.

127. M. Volosova, A. Vereschaka, N. Andreev, C. Sotova, J. Bublikov, “Improvement of the performance properties of cutting tools using the multilayer composite wear-resistant coatings based on nitrides of Cr, Mo, Zr, Nb, and Al”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 38(4), 2021, P. 1421-1427. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.118>.

128. A. P. Slesarenko, I. R. Vengerov, “Mathematical modeling of high-temperature nonlinear processes of heat transfer”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4(61), 2013, P. 4-10. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.9136>.

129. U. Karaguzel, M. Bakkal, E. Budak, “Modeling and Measurement of Cutting Temperatures in Milling”, Vol. 46, 2016, P. 173-176, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.182>.

130. J. Li, Zh. Wei, L. Yang, B. Zhou, Y. Wu, Sh.-G. Chen, Zh. Sun, “Finite element analysis of thermal behavior and experimental investigation of Ti6Al4V in selective laser melting”, *Optik*, Vol. 207, 2020, P. 163760. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163760>

131. J. Caldeirani, A. Diniz, “Influence of Cutting Conditions on Tool Life, Tool Wear and Surface Finish in the Face Milling Process”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol. 24, 2002, P. 2-15. <https://doi.org/10.1590/S0100-73862002000100002>.

132. W. Grzesik, “Determination of temperature distribution in the cutting zone using hybrid analytical-FEM technique”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, no. 6, 2006, P. 651-658.

133. W. Grzesik “The influence of thin hard coatings on frictional behaviour in the orthogonal cutting process”, *Tribology International*, no. 33, 2000, P. 131-140.

134. D. Belous, A. Goncharov, A. Badalian, O. Khomenko, “Study of Thermomechanical Properties of Multilayer Nanocomposite Film Systems“, *2023 IEEE 13th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2023)*, Bratislava, Slovakia, 10-15 September, 2023, pp. MTFC15-1-MTFC15-4, doi: 10.1109/NAP59739.2023.10310893.

135. Д. О. Білоус, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, “Вплив нанорозмірних багатошарових структур на динаміку температурного поля в зоні металообробки”, *Міжнародна науково-технічна конференція “Фізика, електроніка, електротехніка” (ФЕЕ -2021)*. Суми, Україна, 19 - 23 квітня 2021, С. 127.

136. Д. О. Білоус, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, С. А. Гончарова, Л. В. Васильєва, Т. Р. Кравченко, С. М. Пінчук, “Моделювання поширення теплового навантаження на ріжучу поверхню інструменту із нанесеним багатошаровим покриттям”, *V Всеукраїнська науково-практична конференція*

“Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод”, Краматорськ, Україна, 23-24 квітня 2021 р., С. 74-75.

137. Є. В. Мироненко, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, Л. В. Васильєва, С. В. Коваль, Д. О. Білоус, “Дослідження теплового поля твёрдосплавних пластин з багатошаровим покриттям”, *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, № 2 (44), 2018, С. 214 – 218.

138. Д. О. Білоус, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, “Багатошарові нанорозмірні покриття ріжучого інструменту в моделюванні теплових процесів”, *Всеукраїнська науково-практична конференція “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку”*. Черкаси, Україна, 15-21 березня 2019, С. 138-139.

139. Д. О. Білоус, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, Л. В. Васильєва, С. А. Гончарова, Т. Р. Кравченко, С. М. Пинчук, “Моделювання поширення теплового навантаження на ріжучу поверхню інструменту із нанесеним багатошаровим покриттям”, *Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції “Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод*, Краматорськ : ДДМА, 2021, С. 74-75.

140. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, L. Vasilyeva, D. Belous, “Effect of multilayer protective coating on the thermal field dynamics in the cutting tool during machining,” *High Temperature Material Processes: An International Quarterly Journal of High-Technology Plasma Processes*, Vol. 24, 2020, P. 81–90. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2020033202>

141. D. Belous, A. Goncharov, A. Yunda, A. Khomenko, L. Vasilyeva, S. Goncharova, “Influence of Protective Nanocomposite Coatings on the State of Heat Flow in the Cutting Insert”, *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP)*. Odesa, Ukraine, 9 -13 November 2020, pp. 01TFC22-1-01TFC22-3, <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309548>

142. V. M. Beresnev, A. D. Pogrebnyak, N. A. Azarenkov, G. V. Kirik, N. K. Erdybayeva, V. V. Ponaryadov, “Structure, Properties and Fabrication of the Solid

Nanocrystalline Coatings Deposited in Several Ways”, *Uspehi Fiziki Metallov*, Vol. 8, no. 3, 2007, P. 171-246. <https://doi.org/10.15407/ufm.08.03.171>

143. M. Fahad, P. T. Mativenga, M. A. Sheikh, “An investigation of multilayer coated (TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN) tungsten carbide tools in high speed cutting using a hybrid finite element and experimental technique“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 225, no. 10, 2011, P. 1835-1850. <https://doi.org/10.1177/0954405411404504>

144. K.-D. Bouzakis, N. Michailidis, G. Skordaris, E. Bouzakis, D. Biermann, R. M'Saoubi, “Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization”, *CIRP Annals*, Vol. 61, no. 2, 2012, P. 703-723. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2012.05.006>

145. X. Zhang, R. Namakian, A. Meng, D. Moldovan, W. Meng, “Size-dependent tensile failure of epitaxial TiN/Cu/TiN sandwich pillar structures: A combined experimentation – Atomistic simulation study”, *Materials Science and Engineering A*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.143889>

146. S. Rizali, C. L. Ling, A. F. A. Latif, U. Nur, M. M. A. Yajid, N. S. Abdullah, W. F. F. Wan Ali, “AlCrN Coated WC by PVD at Various Deposition Temperatures”, *In Key Engineering Materials*, Vol. 908, 2022, P. 592-597. <https://doi.org/10.4028/p-zivv73>

147. K. Bobzin, T. Brögelmann, C. Kalscheuer, T. Liang, “High-rate deposition of thick (Cr,Al)ON coatings by high speed physical vapor deposition”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 322, 2017, P. 152-162. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.05.034>

148. Ch. Kumar, S. Patel, A. Das, “Experimental and numerical investigations of the temperature distribution in PVD AlTiN coated and uncoated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiCN mixed ceramic cutting tools in hard turning of AISI 52100 steel”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, no. 338, 2018, P. 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/338/1/012021>.

149. S. Grigoriev, A. Metel, A. A. Voevodin, “Nanostructured Thin Films and Nanodispersion”, *Strengthened Coatings*. 2004, vol. 155, pp. 147-154.

150. S. N. Grigoriev, A. A. Vereschaka, S. V. Fyodorov, N. N. Sitnikov, A. D. Batako, “Comparative Analysis of Cutting Properties and Nature of Wear of Carbide Cutting Tools with Multi-Layered Nano-Structured and Gradient Coatings Produced by Using of Various Deposition Methods”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no. 90, 2016, P. 3421-3435. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9676-z>

151. A. D. Pogrebnjak, V. M. Beresnev, O. M. Ivasishin, V. M. Rogoz, A. A. Goncharov, “Application of micro- and nanoprobes to the analysis of small-sized 2D and 3D materials, nanocomposites, and nanoobjects”, *Handbook of Modern Coating Technologies Advanced. Characterization Methods. - Amsterdam, Netherlands: Elsevier*, Vol. 2, 2021, P. 177-261.

152. B. Dang, T. Tian, K. Yang, F. Ding, F. Li, D. Wei, P. Zhang, “Wear and Deformation Performance of W/Ta Multilayer Coatings on Pure Cu Prepared by Double Glow Plasma Alloying Technique”, *Coatings*, Vol. 10, 2020, P. 926. <https://doi.org/10.3390/coatings10100926>

153. P. Louda, A. Sharko, D. Stepanchikov, A. Sharko, “Experimental and Theoretical Study of Plastic Deformation of Epoxy Coatings on Metal Substrates Using the Acoustic Emission Method”, *Materials*, no. 15, 2022, P. 3791. <https://doi.org/10.3390/ma15113791>

154. E. S. Puchi-Cabrera, M. Staia, I. Alain, “A description of the composite elastic modulus of multilayer coated systems”, *Thin Solid Films*, no. 583, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.02.078>

155. K. V. Sreenivasa Rao, K. G. Girisha, R. P. Shree, M. Kumar, “Effect of Surface Coatings on Thermal performance of steel Substrates”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, no. 9, 2017, P. 10249-10253. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.358>

156. A. V. Khomenko, D. S. Troshchenko, L. S. Metlov, “Effect of stochastic processes on structure formation in nanocrystalline materials under severe plastic deformation”, *Physical Review E*, Vol. 100, 2019, P. 022110.

157. A. V. Khomenko, I. A. Lyashenko, L. S. Metlov, “Phase dynamics and kinetics of severe plastic deformation”, *Metallofizika i Novejshie Tekhnologii*, Vol. 30, no. 6, 2008, P. 859-872.

158. A. Khomenko, D. Boyko, K. Khomenko, “Atomistic tribological investigation of ultrathin layer of carbon disulfide between diamond surfaces”, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, Vol. 719, Iss. 1, 2021, P. 1-10.  
<https://doi.org/10.1080/15421406.2020.1860531>

159. O. Mazur, K.-I. Tozaki, Y. Yoshimura, L. Stefanovich, “Influence of pressure on the kinetics of ferroelectric phase transition in BaTiO<sub>3</sub>”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 599, 2022, P. 127436.  
<https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127436>

160. P. E. Trofimenko, M. V. Naida, A. V. Khomenko, “Formation of Liquid Film on a Static Film Former”, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, Vol. 18, no. 3, 2020, P. 565-576.

161. Д. О. Білоус, О. А. Гончаров, “Деформаційні процеси у поверхневих структурах різальних інструментів“, *X Всеукраїнська науково-технічна конференція “Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2023)”*. Суми, Україна, 18-21 квітня 2023, С. 90.

162. A. Goncharov, D. Belous, A. Yunda, O. Khomenko, E. Mironenko, L. Vasilyeva, S. Goncharova, “Heat transfer processes in multilayer nanocomposites systems during cutting”, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, Vol. 20, № 2, 2022, P. 385-422.

163. D. A. Belous, A. Yu. Badalian, A. A. Goncharov, O. V. Khomenko, and S. A. Goncharova, “Influence of Protective Nanocomposite Coatings on the State of Thermal and Strain Fields in Cutting Plate,” *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, Vol. 44, № 11, 2022, P. 1495-1508. doi: 10.15407/mfint.44.11.1495.

164. Б. М. Мордюк, О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, “Metallic surfaces and films”, *Metallophysics and Advanced Technologies*, Vol. 42, no. 2, 2020, P. 175-195. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.02.0175>

165. G. Abadias, E. Chason, E. Keckes, M. Sebastiani, G. Thompson, . “Stress in thin films and coatings: Current status, challenges, and prospects”, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, Vol. 36, no. 2, 2018, P. 020801. <https://doi.org/10.1116/1.5011790>

166. M. Ahmetoglu, S. H. Shamirzaev, G. Gulyamov, M. Dadamirzayev, A. G. Gulyamov, “Change in the resistance of the semiconductor in the variable deformation field”, *Romanian Journal of Physics*, Vol. 52, no 3-4, 2007, P. 319-327.

167. G. Gulyamov, A. G. Gulyamov, A. Q. Ergashev, B. T. Abdulazizov, “The Use of Phase Portraits for the Study of the Generation-Recombination Processes in Semiconductor”, *Journal of Modern Physics*, Vol. 6 no. 13, 2015. <https://doi.org/10.4236/jmp.2015.613197>

168. A. V. Khokhlov, V. V. Gulin, “Families of Stress-Strain, Relaxation, and Creep Curves Generated by a Nonlinear Model for Thixotropic Viscoelastic-Plastic Media Accounting for Structure Evolution. Part 1. The model, Its Basic Properties, Integral Curves, and Phase Portraits,” *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 60, 2024, P. 49–66. <https://doi.org/10.1007/s11029-024-10174-6>

169. Д. О. Білоус, О. А. Гончаров, О. В. Хоменко, А. Ю. Бадалян, “Модельовання процесів пластичної деформації у ріжучих поверхневих шарах металообробного інструменту,” *Міжнародна науково-технічна конференція “Інформатика, математика, автоматика” (ІМА-2023)*. Суми, Україна - Астана, Казахстан, 24 - 28 квітня 2023, С. 292.

170. D. A. Belous, A. Yu. Badalian, A. A. Goncharov, O. V. Khomenko, “Investigation of the Strain-Stress Field in Nanoscale Multilayer Systems by the Phase Space Method”, *Materials*, Vol. 17, № 10, 2024, P. 2466.

171. G. S. Schajer, "Relaxation Methods for Measuring Residual Stresses: Techniques and Opportunities," *Experimental Mechanics*, vol. 50, 2010, P. 1117-1127.

172. D. Coupard, T. Palinluc, P. Bristiel, V. Ji, C. Dumas, "Residual stresses in surface induction hardening of steels: Comparision between experiment and simulation," *Materials Science & Engineering A*, 2008, P. 328-339.



173. V. Segal, “Review: Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD)”, *Materials*, Vol. 11(7), 2018, P.1175. <https://doi.org/10.3390/ma11071175>

174. N. Ao, D. Liu, X. Xu, X. Zhang, D. Liu, “Gradient nanostructure evolution and phase transformation of  $\alpha$  phase in Ti-6Al-4V alloy induced by ultrasonic surface rolling process”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 742, 2019, P. 820-834. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.098>

## Додаток А

**Список публікацій за темою дисертації. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації***Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях, які індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science*

1. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, **D. Belous**, L. Vasilyeva, “Effect of a Protective Coating on the Temperature Distribution in a Revolving Cutting Tool and the Cutting Tool Lifetime”, *High Temperature Material Processes: An International Quarterly Journal of High-Technology Plasma Processes*, Vol. 22, № 4, 2018, P. 279–291. doi: 10.1615/HighTempMatProc.2018029411. (Scopus)

2. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, L. Vasilyeva, **D. Belous**, “Effect of multilayer protective coating on the thermal field dynamics in the cutting tool during machining,” *High Temperature Material Processes: An International Quarterly Journal of High-Technology Plasma Processes*, Vol. 24, 2020, P. 81–90. doi: 10.1615/HighTempMatProc.2020033202. (Scopus)

3. **D. A. Belous**, A. Yu. Badalian, A. A. Goncharov, O. V. Khomenko, and S. A. Goncharova, “Influence of Protective Nanocomposite Coatings on the State of Thermal and Strain Fields in Cutting Plate,” *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, Vol. 44, № 11, 2022, P. 1495-1508. doi: 10.15407/mfint.44.11.1495. (Scopus)

4. A. Goncharov, **D. Belous**, A. Yunda, O. Khomenko, E. Mironenko, L. Vasilyeva, S. Goncharova, “Heat transfer processes in multilayer nanocomposites systems during cutting”, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotekhnologii*, Vol. 20, № 2, 2022, P. 385–422.

5. **D. A. Belous**, A. Yu. Badalian, A. A. Goncharov, O. V. Khomenko, “Investigation of the Strain-Stress Field in Nanoscale Multilayer Systems by the Phase Space Method”, *Materials*, Vol. 17, № 10, 2024, P. 2466.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

6. A. A. Goncharov, A. N. Yunda, S. A. Goncharova, **D. A. Belous**, S. V. Koval, L. V. Vasilyeva, “Dependence of the thermal field in the coated cutting insert on the cutting conditions”, *2017 IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2017)*, Odessa, Ukraine, 2017, pp. 01FNC19-1 – 01FNC19-5. doi: 10.1109/nap.2017.8190209.

7. **D. A. Belous**, A. A. Goncharov, “Modeling of a thermal field in the cutting insert protected by multilayered coating”, *Міжнародна наукова конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика-2018»*. Львів, Україна, 15-17 травня 2018, С. 36.

8. О. А. Гончаров, Є. В. Мироненко, А. М. Юнда, Л. В. Васильєва, С. В. Коваль, **Д. О. Білоус**, “Моделювання теплового поля в ріжучій пластині в залежності від режимів різання”, II Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод» : ДДМА, Україна, 19–21 квітня 2018 р. С. 134-136.

9. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, “Моделювання поширення теплового потоку у різальній пластині з багатошаровим покриттям”, *Міжнародна науково-технічна конференція “Інформатика, математика, автоматика” (ІМА-2019)*. Суми, Україна, 23 - 26 квітня 2019 р., С. 202.

10. **D. Belous**, A. Goncharov, A. Yunda, A. Khomenko, L. Vasilyeva, S. Goncharova “Influence of Protective Nanocomposite Coatings on the State of Heat Flow in the Cutting Insert”, *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP)*. Odesa, Ukraine, 9 -13 November 2020, pp. 01TFC22-1-01TFC22-3,

11. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, “Вплив нанорозмірних багатошарових структур на динаміку температурного поля в зоні металообробки”, *Міжнародна науково-технічна конференція “Фізика, електроніка, електротехніка” (ФЕЕ -2021)*. Суми, Україна, 19 - 23 квітня 2021, С. 127.

12. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, С. А. Гончарова, Л. В. Васильєва, Т. Р. Кравченко, С. М. Пінчук, “Моделювання поширення

теплового навантаження на ріжучу поверхню інструменту із нанесеним багатошаровим покриттям”, *V Всеукраїнська науково-практична конференція “Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод”*, Україна, 23-24 квітня 2021 р., С. 74-75.

13. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, О. В. Хоменко, С. М. Пінчук, “Вплив покриття на коефіцієнт тертя між інструментом та стружкою і заготовкою”, *Міжнародна наукова конференція молодих учених “Інформатика, математика, автоматика” (ІМА-2022)*. Суми, Україна, 18 - 29 квітня 2022, С. 157.

14. О. В. Хоменко, О. А. Гончаров, А. Ю. Бадалян, Т. П. Кравченко, Р. Р. Чернущенко, **Д. О. Білоус**, М. В. Захаров, “Врахування деформаційного дефекту модуля зсуву матеріалу при інтенсивній пластичній деформації поверхні”, *Міжнародна наукова конференція молодих учених “Інформатика, математика, автоматика” (ІМА-2022)*. Суми, Україна, 18 - 29 квітня 2022, С. 156.

15. **D. Belous**, A. Goncharov, A. Badalian, O. Khomenko, “Study of Thermomechanical Properties of Multilayer Nanocomposite Film Systems“, *2023 IEEE 13th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2023)*, Bratislava, Slovakia, 10-15 September, 2023, pp. MTFC15-1-MTFC15-4, doi: 10.1109/NAP59739.2023.10310893. Available:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/10310893/metrics#metrics> (accessed on: October 22, 2023).

16. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, О. В. Хоменко, А. Ю. Бадалян, “Моделювання процесів пластичної деформації у ріжучих поверхневих шарах металообробного інструменту,” *Міжнародна науково-технічна конференція “Інформатика, математика, автоматика” (ІМА-2023)*. Суми, Україна - Астана, Казахстан, 24 - 28 квітня 2023, С. 292.

17. A. Badalian, A. Khomenko, O. Goncharov, **D. Belous**, O. Lytvynenko, A. Biesiedina, “Modeling of the Stress-Strain State in Multilayer Film Systems Depending on the Thermal Load”, *2024 IEEE 14th International Conference*

*Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2024)*, Riga, Latvia, 8-13 September, 2024, pp. 1-4, doi:10.1109/NAP62956.2024.10739692

***Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації***

18. Є. В. Мироненко, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, Л. В. Васильєва, С. В. Коваль, **Д. О. Білоус**, “Дослідження теплового поля твёрдосплавних пластин з багат шаровим покриттям”, *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, № 2 (44), 2018, С. 214 – 218.

19. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, “Багат шарові покриття ріжучого інструменту в моделюванні теплових процесів”, *Всеукраїнська науково-практична конференція “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку”*. Черкаси, Україна, 15-21 березня 2019, С. 138-139

20. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, “Моделювання теплового поля у різальній пластині з багат шаровим покриттям”, *Всеукраїнська науково-практична конференція “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку”*. Черкаси, Україна, 11-17 березня 2019, С. 128.

21. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, А. М. Юнда, Л. В. Васильєва, С. А. Гончарова, Т. Р. Кравченко, С. М. Пинчук, “Моделювання поширення теплового навантаження на ріжучу поверхню інструменту із нанесеним багат шаровим покриттям”, *Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції “Сучасні інформаційні технології, засоби автоматизації та електропривод, : ДДМА, 2021, С. 74-75.*

22. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, “Аналіз моделей тертя в зоні обробці матеріалів ріжучим інструментом із багат шаровим покриттям”, *IX Всеукраїнська науково-технічної конференція “Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2022)”*. Суми, Україна, 19-22 квітня 2022, С. 79.

23. **Д. О. Білоус**, О. А. Гончаров, “Деформаційні процеси у поверхневих структурах різальних інструментів“, *X Всеукраїнська науково-технічна конференція “Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2023)”*. Суми, Україна, 18-21 квітня 2023, С. 90.