

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**БУДАР МОХАМЕД Р.Ф.**

УДК 621.850.67:620.21

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛМАЗНО–АБРАЗИВНОГО  
ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ОБРОБКИ ВИСОКОМІЦНИХ  
КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти  
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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



Мохамед Р.Ф. Будар

Науковий керівник – Шепеленко Ігор Віталійович,  
кандидат технічних наук, доцент

Кропивницький – 2021

## АНОТАЦІЯ

**Будар Мохамед Р.Ф.** Підвищення ефективності алмазно–абразивного інструменту для обробки високоміцних композиційних матеріалів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2021.

У *вступі* обґрунтована актуальність роботи, сформульовано мету, об'єкт, предмет дослідження і задачі, які автор розв'язує в роботі. Наведено інформацію на підтвердження важливості питання, що розглядається. Окреслено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Подано відомості про апробацію, публікації та структуру дисертаційної роботи. Зазначено про особистий внесок здобувача.

У *першому розділі* проаналізовано умови застосування алмазного інструменту при обробці новітніх композиційних матеріалів, зокрема, карбонової групи. Проаналізовано відомі вітчизняні та зарубіжні наукові школи зі створення алмазного інструменту, здійснено аналіз його роботи. Наведено відомості щодо особливостей формоутворення поверхонь при обробці виробів із композиційних матеріалів з урахуванням їх структури та складу, анізотропії фізико–механічних властивостей; показано, що робота алмазним інструментом відбувається при зміні умов контакту, внаслідок чого можуть виникати дефекти різного характеру, знижуватиметься продуктивність обробки. Зроблено висновок щодо доцільності застосування функціонального підходу до створення робочих крайок алмазного інструменту, детально проаналізовано методологічне підґрунтя, запропоноване відомими вченими у галузі функціонального підходу.

Приймаючи до уваги, що з точки зору раціонального забезпечення

функцій робочі крайки інструменту мають бути адаптованими до особливостей роботи у різних робочих зонах впродовж обробного циклу, та базуючись на принципі поділу поверхонь на різних рівнях, а також зважаючи на попередні дослідження науковців у галузі застосування функціонального підходу, зроблено висновок про можливість декомпозиції поверхонь інструменту і переходу до створення окремих функціональних ділянок у вигляді функціонально сталих поверхневих кластерів.

Виконуючи подальший аналіз можливості формування таких кластерів, висунуте припущення про перспективу застосування гібридних точкових процесів, що дозволяють формувати певні параметри поверхні (у тому числі, різальні властивості поверхневого шару).

На основі закономірностей формування алмазного шару різними методами зроблено висновок, що лазерне термодформаційне спікання (ЛТДС) є найбільш доцільним із точки зору застосування для визначених задач.

Унаслідок викладеного вибрано предмет і об'єкт дослідження, сформульовано мету та визначено задачі дослідження.

*Другий розділ* присвячено викладенню методики формування алмазовмісного шару на основі функціонального підходу. Оскільки було встановлено, що функціонально-орієнтований підхід є дієвим високоефективним методом створення обробних процесів, особливо тих, які пов'язані з кінцевим формоутворенням виробів із композиційних матеріалів, розглянуто основні положення функціонування жорсткого, пружного та гнучкого інструментів при обробці композитів. На основі аналізу конструкцій інструменту визначено принципи декомпозиції робочих поверхонь, встановлено відмінність умов, в яких вони працюють. Доведено, що зменшення пружності та деформованості інструменту знижує відмінність умов роботи по локалізації, однак збільшує таку відмінність за часом.

Причиною є зміна різальних властивостей внаслідок активного виділення шламу, і, у подальшому, зростання температури на робочих поверхнях.

Обґрунтовано схему формування показників якості обробки та показано, що декомпозиція поверхні на окремі зони (кластери) дозволяє описати зміну їх властивостей як функцію, отриману внаслідок перетину січною площиною певної моделі поверхні, яка використовується як основа інструменту. Такий функціональний опис дозволяє узгодити умови сполучення окремих кластерів, забезпечити потрібну відмінність їх функціональних властивостей, перейти до функціональної обумовленості формування кластерів на визначених технологічних режимах створення інструменту.

З цією метою виконано адаптацію методики пошуку раціональних матеріальних носіїв функцій до задач удосконалення виробів із алмазним шаром, причому для пошуку оптимальних носіїв функцій – нових технічних рішень аналізованих виробів запропоновано застосовувати метод розрахунку питомої вартості корисної функції із урахуванням можливостей дискретизації головних функціональних поверхонь виробу (із алмазним шаром), що дозволяють забезпечити кінцеві властивості виробу через систему показників якості із мінімальними матеріальними затратами.

Сформульовано основні вимоги до поверхонь, зокрема: сумісні поверхні мають допускати відмінності у сформованих структурах; сумісні поверхні не повинні мати різні механічні характеристики, зокрема, КЛТР,  $\sigma_a$  та ін., що дозволяє із таких елементів формувати суцільну поверхню різання; послідовність сумісних поверхонь має наближатися до огинаючої заданого геометричного профіля виробу в цілому; сумісні поверхні не повинні мати розривів у структурі; ряд сумісних поверхонь можуть утворювати окремий кластер із схожими фізико–механічними характеристиками.

Зроблено висновок, що найбільш доцільним засобом забезпечення властивостей є лазерно–деформаційний спосіб формування поверхневого

шару, який потребує певних удосконалень для отримання закономірностей керування процесом формування елементів поверхні або їх кластерів. Наведений розрахунок очікуваної зони локалізації показав, що за умови нагріву поверхні для здійснення наступного деформаційного ущільнення понад 750 °С, діаметр локалізованої плями при нерухомому промені становить від 0,32 мм до 0,4 мм.

У *третьому розділі* наведено детальний опис використаного обладнання, а також методики проведення експериментальних і модельних досліджень. На основі аналізу схем реалізації ЛТДС розроблено оригінальні конструкції допоміжних пристроїв, встановлюваних на універсальний лазерно–струминний комплекс ЛСК-400-5, який використовувався для експериментальних досліджень. Розроблено динамічну модель формування кластеру поверхні, виходячи з особливостей нагрівання поверхні розфокусованим лазерним променем, явищ газової подачі частинок присадкового металу та алмазних зерен, а також із динамічних властивостей електромеханічної системи орієнтації корпусу інструменту.

Наводиться методика використання засобів електронно-мікроскопічного дослідження за допомогою мікроскопу РЕМ-106-И, методика підготовки препаратів для визначення деградації поверхні інструменту, а також топографічного дослідження поверхні обробленого зразка. Запропоновані рівняння для оцінки топографічного контрасту та побудови 3–D зображень поверхонь, а також для калібрування засобів електронних вимірів мікрогеометричних параметрів поверхні.

Приведено опис випробувального обладнання для експериментальної перевірки створеного інструменту (зокрема, пильного верстата із регульованим асинхронним приводом та свердлувального верстата мод. ЛЕТ–12).

Подана загальна послідовність доведення сформульованих наукових положень.

У *четвертому розділі* приведено результати комплексу теоретико–експериментальних досліджень застосування традиційного та пропонованого інструменту. Так, із використанням розробленої узагальненої математичної моделі, яка враховує особливості взаємодії жорсткого, пружного та гнучкого інструментів з нещільною структурою композиту виконана симуляція для визначення умов і відмінностей при роботі алмазного свердла, пилки реноватора, алмазної нитки під час різання матеріалу типу КІМФ. Встановлено закономірності зміни навантажень частин робочої поверхні, і відповідно, функціональних особливостей кластерів робочих поверхонь інструменту, за якими сформульовано вимоги до параметрів алмазозносного шару. Це дало змогу також довести твердження про можливість опису функціональних відмінностей математичними закономірностями, поданими у вигляді поліномів другого та третього ступеня виду.

За результатами моделювання та із використанням теорії графів, а також на основі отриманих закономірностей сформульовано вимоги до параметрів алмазного шару, виконана перевірка цих вимог на відповідність можливостям мінімального розміру кластеру та сполученість між собою, та сформовано вимоги до процесу ЛТДС.

Приведено результати досліджень процесу ЛТДС на предмет формування надійних поверхневих кластерів мінімально потрібного розміру (що довело третє наукове положення), властивості яких змінюються за прогнозними залежностями. Виконано порівняння модельного і експериментального результатів щодо властивостей поверхні.

Зосереджено увагу на особливостях обробки матеріалів типу КІМФ створеним інструментом. При цьому здійснена перевірка положення теорії алмазного мікрорізання композиційних армованих матеріалів щодо необхідності врахування динамічних явищ зони різання як наслідку сукупності роботи окремих поверхневих кластерів.

Показано, що похибки симуляції та отриманих регресійних моделей не перевищують 5–7%, а використання інструменту, створеного на основі функціонального підходу, вища на 20–25% для кільцевих сверدل, на 40–50%

для гнучкого інструменту (алмазних струн) та на 15–20% для пружного інструменту (пилки реноватору).

У *п'ятому розділі* приведені економічне обґрунтування запропонованих технічних рішень та інженерна методика їх використання. Сформульовано вимоги до інструментів, що використовуються для різання матеріалів типу КІМФ, розроблено, виготовлено і апробовано ряд нових технічних рішень інструментів із нанесеним алмазним шаром, зокрема, різальних струн, занурюваних пилки реноватору та свердл.

Розроблено методику визначення функціональних особливостей жорстких (свердл), пружних (пилки полотна реноватору) та гнучких (струни) інструментів, призначених для обробки матеріалів, армованих скляними та вуглецевими волокнами.

Наведено приклади та перспективи застосування підходу при використанні виробів із алмазовмісними шарами в машинобудуванні, зроблено висновок щодо економічної доцільності використання запропонованого підходу.

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

1. На основі аналізу процесу алмазно–абразивного різання композиційних матеріалів вперше запропоновано математичну модель, яка враховує особливості взаємодії пружного нежорсткого інструменту із додатковими ступенями вільності з порожнистою структурою композиту, та доведено, що ця взаємодія характеризується відмінностями за локалізацією та часом. Зроблено висновок про доцільність формування робочих поверхонь інструменту у вигляді окремих кластерів.

2. Удосконалено функціонально–орієнтований підхід до створення алмазно–абразивного інструменту шляхом залучення процедур опису умов роботи кластерів та зіставлення із засобами – матеріальними носіями – їх формування. Показано, що відмінність функціональних особливостей кластерів описується поліномами другого порядку; врахування відмінностей дозволяє активізувати інтенсифікуючі та пригнітити стримуючі чинники процесу взаємодії.

3. Удосконалено математичну модель формування кластерів поверхні ЛТДС алмазного шару, яка враховує не тільки теплові процеси і явища в зоні обробки, але й динаміку руху робочих органів; запропоновано залежності для визначення розміру кластеру.

4. Набула подальшого розвитку теорія алмазного мікрорізання композиційних армованих матеріалів шляхом урахування динамічних явищ у зоні різання як наслідку сукупності роботи окремих поверхневих кластерів. Показано, що більш стабільним і ефективним є різання інструментом, крок розміщення кластерів на якому відповідає кроку армування матеріалу джгутами волокон.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Сформульовано вимоги до інструментів, що використовуються для різання високоміцних композитів типу КІМФ, розроблено й апробовано низку нових технічних рішень щодо виготовлення інструментів із нанесеним алмазним шаром, зокрема алмазних струн, полотен реноватора та кільцевих свердел.

2. Розроблено методику визначення функціональних особливостей жорстких (кільцевих свердел), пружних (полотен реноватора) та гнучких (алмазних струн) інструментів, призначених для обробки матеріалів, армованих скляними та вуглецевими волокнами.

3. Запропоновано емпіричні залежності для визначення режимів ЛТДС при формуванні кластерів робочих поверхонь пропонованих інструментів.

4. Наведено економічне обґрунтування застосування функціонально-орієнтованого підходу до створення алмазовмісного інструменту.

5. Розроблені рекомендації щодо виконання операцій різання алмазним інструментом та принципи ведення обробки передано до впровадження на підприємство ТОВ «Кіровоградський інструментальний завод «Лезо»». Отримані результати роботи, методики та моделі використовуються в навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологія фізико-технічної



обробки матеріалів» і «Технологія і обладнання фізико–технічної обробки матеріалів».

**Ключові слова:** алмазно–абразивний інструмент, високоміцний композиційний матеріал, функціонально–орієнтований підхід, лазерне термомодеформаційне спікання, кластер поверхні, ефективність обробки.

## ABSTRACT

**Budar Mohamed R.F.** Improving the efficiency of diamond-abrasive tools for processing high-strength composite materials. – Qualifying scientific work as manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.03.01 "Processes of machining, machines and tools". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2021.

**The introduction** substantiates the relevance of the work, formulates the purpose, object, subject of research and tasks that the author solves in the paper. The information is provided to confirm the importance of the issue under consideration. The scientific novelty and practical significance of the obtained results are outlined. Information on approbation, publications and structure of the dissertation is given. The personal contribution of the applicant is indicated.

**The first section** analyzes the use conditions of diamond tools in the processing of new composite materials, in particular, the carbon group. Well-known domestic and foreign scientific schools on creation of the diamond tool are analyzed, the analysis of its work is carried out. Information on the peculiarities of surfaces formation in the products processing from composite materials, taking into account their structure and composition, anisotropy of physical and mechanical properties; it is shown that work with the diamond tool occurs at change of conditions of contact therefore defects of various character can arise, processing productivity will decrease. The conclusion on expediency of application of the functional approach to creation of working edges of the diamond tool is made, the methodological basis offered by known scientists in the field of the

functional approach is analyzed in detail.

Whereas, from the point of view of rational provision of functions, the working edges of the tool must be adapted to the peculiarities of work in different work areas during the machining cycle, and based on the principle of separation of surfaces at different levels, and taking into account previous research, the conclusion is made about the possibility of decomposition of the tool surfaces and the transition to the creation of separate functional areas in the form of functionally stable surface clusters.

Performing further analysis of the possibility of forming such clusters, the assumption is made about the prospect of using hybrid point processes that allow to form certain surface parameters (including the cutting properties of the surface layer).

Based on the regularities of diamond layer formation by different methods, it is concluded that laser thermodeformation sintering is the most expedient from the point of view of application for certain tasks.

As a result, the subject and object of research are selected, the purpose is formulated and the tasks of research are defined.

*The second section* is devoted to the method of forming a diamond-containing layer based on a functional approach. Since it was found that the functional-oriented approach is an effective highly efficient method of creating machining processes, especially those associated with the final formation of products from composite materials, considered the basic principles of rigid, elastic and flexible tools functioning for processing composites. Based on the analysis of the tool structures, the principles of decomposition of working surfaces are determined, the difference of conditions in which they work is established. It is proved that the decrease in the elasticity and deformation of the tool reduces the difference in working conditions for localization, but increases this difference in time. The reason is the change in cutting properties due to the active allocation of sludge, and, subsequently, the increase in temperature on the working surfaces.

The scheme of processing quality indicators formation is substantiated and it is shown that the decomposition of the surface into separate zones (clusters) allows to describe the change of their properties as a function obtained due to the

intersection of the cutting plane of a certain surface model used as a tool base. This functional description allows to agree on the conditions of individual clusters connection, to ensure the desired difference in their functional properties, to move to the functional conditionality of clusters formation on certain technological modes of tool creation.

For this purpose, the method of finding rational material carriers of functions to the problems of improving products with a diamond layer was adapted, and to find optimal carriers of functions - new technical solutions of analyzed products, it was proposed to use the method of calculating the unit cost of useful function taking into account the possibility of discretization of the main functional surfaces of the product (with a diamond layer), which allow to ensure the final properties of the product through a system of quality indicators with minimal material costs.

The basic requirements to surfaces are formulated, in particular: compatible surfaces should allow differences in the formed structures; compatible surfaces should not have different mechanical characteristics, in particular, CLTE,  $\sigma_a$ , etc., which allows such elements to form a continuous cutting surface; the sequence of compatible surfaces should approach the curve of a given geometric profile of the product as a whole; compatible surfaces must not have gaps in the structure; a number of compatible surfaces can form a separate cluster with similar physical and mechanical characteristics.

It is concluded that the most appropriate means of providing properties is a laser-deformation method of surface layer formation, which requires certain improvements to obtain patterns of the process control of forming surface elements or their clusters. The calculation of the expected localization zone showed that under the condition of surface heating for the implementation of the subsequent deformation compaction over 750°C, the diameter of the localized spot with a fixed beam is from 0.32 mm to 0.4 mm.

***The third section*** provides a detailed description of the equipment used, as well as methods of experimental and model research. On the basis of the analysis of schemes of realization of laser thermodeformation sintering original designs of the auxiliary devices established on the universal laser-jet complex LSK-400-5 which was used for experimental researches are developed. A dynamic model of

surface cluster formation is developed based on the peculiarities of surface heating by defocused laser beam, gas supply phenomena of filler metal particles and diamond grains, as well as on dynamic properties of electromechanical tool body orientation system.

The method of using the means of electron microscopic examination using a microscope REM-106-I, the method of specimens preparation to determine the degradation of the tool surface, as well as topographic examination of the surface of the treated sample is given. Equations for estimating topographic contrast and construction of 3D images of surfaces, and also for calibration of means of electronic measurements of microgeometric surface parameters are offered.

A description of the test equipment for experimental verification of the created tool (in particular, a saw machine with adjustable asynchronous drive and a drilling machine model JET-12) is given.

The general sequence of proof of the formulated scientific positions is given.

*The fourth section* presents the results of a set of theoretical and experimental studies of application. Thus, using the developed generalized mathematical model, which takes into account the interaction of rigid, elastic and flexible tools with a loose composite structure, a simulation was performed to determine the conditions and differences in the operation of a diamond drill, renovator saw, diamond thread when cutting KIMF material. Regularities of parts loadings change of a working surface, and accordingly, functional features of working surfaces clusters of the tool on which requirements to parameters of a diamond-bearing layer are formulated are established. This also made it possible to prove the assertion of the possibility of describing functional differences by mathematical regularities presented in the form of polynomials of the second and third degree of the form.

Based on the results of modeling and using graph theory, as well as on the basis of the obtained laws, the requirements to the diamond layer parameters are formulated, these requirements are checked for compliance with the minimum cluster size and interconnection, and requirements for laser thermodeformation sintering are formed.

The results of researches of the process of laser thermodeformation sintering

for the formation of reliable surface clusters of the minimum required size (which proved the third scientific position), the properties of which change according to the forecast dependences, are given. A comparison of model and experimental results on surface properties is performed.

The focus is on the features of processing materials such as KIMF by the created tool. At the same time, the provision of the theory of diamond microcutting of composite reinforced materials was verified by the need to take into account the dynamic phenomena of the cutting zone as a consequence of the work totality of individual surface clusters.

It is shown that the errors of the simulation and the obtained regression models do not exceed 5-7%, and the use of the tool created on the basis of the functional approach is higher by 20-25% for ring drills, 40-50% for flexible tools (diamond strings) and 15-20% for the elastic tool (pollen of the renovator).

*The fifth section* provides an economic justification of the proposed technical solutions and engineering methods of their use. The requirements to the tools used for KIMF type materials cutting are formulated, a number of new technical solutions of tools with the put diamond layer, in particular, cutting strings, the immersed saws of the renovator and drills are developed, made and tested.

The technique of definition of functional features of rigid (drills), elastic (saw blades of the renovator) and flexible (strings) tools intended for the materials processing reinforced with glass and carbon fibers is developed.

Examples and prospects of application of the approach at use of products with diamond-containing layers in mechanical engineering are resulted, the conclusion concerning economic expediency of use of the offered approach is made.

### **Scientific novelty of the obtained results.**

1. Based on the analysis of diamond-abrasive cutting process of composite materials, a mathematical model was proposed for the first time, which takes into account the interaction of elastic non-rigid tool with additional degrees of freedom with the hollow structure of the composite, and proved that this interaction is characterized by differences in location and time. The conclusion about expediency

of formation of working surfaces of the tool in the form of separate clusters is made.

2. The functionally-oriented approach to the creation of a diamond-abrasive tool has been improved by involving procedures for describing the working conditions of clusters and comparing them with the means - material carriers - of their formation. It is shown that the difference in the functional features of clusters is described by second-order polynomials; taking into account the differences allows to activate the intensifying and to suppress restraining factors of the interaction process.

3. The mathematical model of clusters formation of diamond layer LTDS surface which considers not only thermal processes and the phenomena in a processing zone, but also dynamics of movement of working bodies is improved; dependencies for cluster size are proposed.

4. The theory of diamond microcutting of composite reinforced materials by taking into account the dynamic phenomena in the cutting zone as a consequence of the totality of the work of individual surface clusters has been further developed. It is shown that the cutting tool is more stable and efficient, the step of placing clusters on which corresponds to the step of reinforcing the material with bundles of fibers.

### **The practical significance of the obtained results.**

1. The requirements to the tools used for cutting of high-strength composites of KIMF type are formulated, a number of new technical decisions concerning production of tools with applied diamond layer, in particular diamond strings, cloths of the renovator and ring drills are developed and tested.

2. The technique of functional features definition of rigid (ring drills), elastic (cloths of the renovator) and flexible (diamond strings) tools intended for processing of the materials reinforced by glass and carbon fibers is developed.

3. Empirical dependencies for determination of LTDS modes at formation of working surfaces clusters of the offered tools are offered.

4. The economic substantiation of the functionally-oriented approach application to creation of the diamond-containing tool is resulted.

5. The developed recommendations for diamond cutting operations and the

principles of machining have been transferred to the LLC "Kirovohrad Tool Factory "Lezo" for implementation. The obtained work results, methods and models are used in the educational process of the Central Ukrainian National Technical University for teaching disciplines "Technology of physical and technical processing of materials" and "Technology and equipment of physical and technical processing of materials".

**Keywords:** diamond–abrasive tool, high-strength composite material, functionally–oriented approach, laser thermodeformation sintering, diamond–containing cluster, processing efficiency.

## СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Саленко О.Ф., Щетинін В.Т., Глухова В.І., Лашко Є.Є., Головка Л.Ф., Саленко А.О., Будар Мохамед Р.Ф. Забезпечення надійності роботи алмазовмісного інструменту, отриманого лазерним термодформаційним спіканням, при обробці армованих вуглепластиків. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Кременчук, 2019. Вип. 3 (116). С.147–157. (включено до міжнародних наукометричних баз «Ulrich's Web Global Serials Directory», «eLIBRARY», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services»).

2. Salenko Alexandr, Shchetynin Viktor, Gabuzian Galina, Lashko Evgeny, Budar Mohamed R.F., Klimenko Sergey, Potapov Alexandr. Cutting Superhard Materials by Jet Methods (on Functional Approach). Recent Advancements in the Metallurgical Engineering and Electrodeposition. IntechOpen, 2019. P.1–21. (включено до міжнародних наукометричних баз «Web of Science – Book Citation Index», «Crossref Google Scholar», «WorldCat», «BASE», «EMBSCO A-to-Z», «Open AIRE», «CNKI Scholar», «RePEC», «ExLibris SFX»).

3. Salenko A., Chencheva O., Gluchova V., Schetinyn V., Budar Mohamed R.F., Klimenko S., Lashko E. Effect of slime and dust emission on micro-cutting when processing carbon-carbon composites. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. 3/1 (105). P.38–51. (включено до міжнародних наукометричних баз «CrossRef», «Index Copernicus», «American Chemical Society», «PIHЦ», «WorldCat», «Ulrich's Periodicals Directory», «BASE», «ResearchBib», «CiteFactor», «Scopus»).

4. Salenko Oleksandr, Chencheva Olga, Schetinyn Viktor, Budar Mohamed R.F., Gluchova Valentina. New design of combined electric machines to increase the efficiency of processing composite materials. *Journal of the Technical University of Gabrovo*. 2019. № 59. P.27–31.

5. Salenko Oleksandr, Chencheva Olga, Shchetynin Viktor, Gluchova Valentina, Lashko Evgeny, Budar Mohamed R.F. Cutting carbon–carbon composites by the diamond drills variable cyclic feed. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2019. Vol 87, № 3. P.47–60.

6. Salenko Oleksandr, Chencheva Olga, Schetinyn Viktor, Gluchova Valentina, Lashko Evgeny, Budar Mohamed R.F. Increasing the efficiency of diamond drilling of carbon composites by a device with combined electric machines. *Journal of the Technical University of Gabrovo*. 2020. № 60. P.52–65.

7. Salenko O.F., Golovko L.F., Salenko A.O., R.H. Arhat, Budar Mohamed R.F. Principles of creating a diamond abrasive tool taking into account the features of the microcutting process. *Journal of the Technical University of Gabrovo*. 2020. № 61. P.8–21.

*Опубліковані праці апробаційного характеру:*

8. Саленко О.Ф., Клименко С.А., Щетинін В.Т, Лашко Є.Є, Коваленко С.В, Будар Мохамед Р.Ф. Про використання функціонально–орієнтованого підходу при розробці гібридних процесів обробки композиційних матеріалів. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали ХХ Міжнародної науково–технічної конференції, 10–13 вересня 2019 р. Херсон, 2019. С.290–294.



9. Саленко О.Ф., Мельничук С.П., Гаврушкевич А.Ю., Щетинін В.Т., Ченчева О.О., Будар Мохамед Р.Ф., Мельничук П.П. Гібридні процеси оброблення композиційних матеріалів: тенденції сучасного машинобудування. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: матеріали X Всеукраїнської науково–технічної конференції з міжнародною участю, 06–09 листопада 2019 р. Житомир, 2019. С.29–37.

10. Будар Мохамед Р.Ф., Шепеленко І.В. Формування поверхонь та їх властивостей у деталях із композиційних матеріалів і металів. Молодь і сільськогосподарська техніка у ХХІ сторіччі: матеріали XVI – го міжнародного форуму молоді. Харків, 2020. С.45.

11. Саленко О.Ф., Шепеленко І.В., Будар Мохамед Р.Ф. Формування алмазовмісних шарів на робочих поверхнях інструменту. Инженерия поверхности и реновация изделий: матеріали XX Міжнародної науково–практичної конференції, 01–05 червня 2020 р. Київ: АТМ України, 2020. С.100–103.

12. Будар Мохамед Р.Ф. Новий підхід до розробки інструментів, що використовуються для оброблення композиційних матеріалів, застосовуваних в авіації. Авіація, промисловість, суспільство: матеріали I Міжнародної науково–практичної конференції, присвяченої 60-річчю КЛК ХНУВС. Ч.1. Кременчук, 2020. С.166–169.

*Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

13. Пристрій для фрикційно–механічного нанесення антифрикційних покриттів: Пат. 102038 Україна: МПК В24В 39/00. № 201504042; заявл. 27.04.2015; опубл. 12.10.2015, Бюл. №19, 2 с.

14. Пристрій для визначення міцності зчеплення покриття з основним матеріалом. Пат. 133205 Україна: МПК G01N 19/04. № 201810652; заявл. 29.10.2018; опубл. 25.03.2019, Бюл. №6, 2 с.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	20
ВСТУП.....	21
Розділ 1. Розробка обробних процесів для формування комплексу властивостей поверхневих шарів у машинобудуванні.....	28
1.1. Формування поверхонь та їх властивостей в деталях із композиційних матеріалів і металів.....	28
1.2. Функціональний підхід до створення обробних процесів.....	39
1.3. Підвищення ефективності процесів за рахунок комбінування та гібридизації обробки на основі функціонального підходу.....	55
1.4. Особливості формування алмазовмісних шарів на робочих поверхнях та можливості їх комбінування.....	60
1.5. Висновки та постановка задач досліджень.....	67
Розділ 2. Розробка методики формування алмазного шару на основі функціонального підходу.....	70
2.1. Типові умови роботи виробів із алмазним шаром.....	70
2.2. Обумовлення параметрів алмазовмісного шару як забезпечення функцій виробу.....	86
2.3. Адаптація методики пошуку раціональних матеріальних носіїв функцій до задач удосконалення виробів із алмазним шаром.....	91
2.4. Умови та обмеження при пошуку раціональних рішень в задачах формування алмазовмісного поверхневого шару.....	104
2.5. Лазерне термодформаційне спікання як засіб формування поверхневих кластерів.....	109
2.6. Висновки за розділом.....	124
Розділ 3. Використовуване обладнання, засоби формування алмазного шару на основі функціонального підходу та порядок проведення досліджень.....	126
3.1. Вимоги до обладнання і оснащення, що реалізує процеси лазерного термодформаційного спікання кластерів поверхонь.....	126

3.2. Обладнання для термодформаційного спікання кластерів поверхні та допоміжні пристрої.....	132
3.3. Контрольні засоби та обладнання.....	141
3.4. Обладнання для виконання обробки композитів створеним інструментом.....	146
3.5. Визначення досяжного розміру кластеру та точності його відтворення.....	151
3.6. Порядок виконання досліджень та розрахунок параметрів обробки.....	153
3.7. Висновки до розділу.....	157
Розділ 4. Експериментальна перевірка теоретичних положень та пошук раціональних рішень гібридних інструментів.....	159
4.1. Симуляція процесу взаємодії нежорсткого інструменту із композиційним матеріалом.....	159
4.2. Формування кластерів поверхні лазерним термодформаційним спіканням.....	169
4.3. Випробування інструменту з кластеризованою робочою поверхнею.....	181
4.4. Висновки за розділом.....	190
Розділ 5. Економічне обґрунтування пропонованих рішень та інженерна методика їх використання.....	192
5.1. Визначення рівня рентабельності при виробництві інструментів із кластеризацією поверхні.....	192
5.2. Визначення економічного ефекту та ефективності впровадження функціонально–орієнтованого підходу.....	195
5.3. Реверсний інженірінг робочих крайок інструменту.....	199
5.4. Висновки за розділом.....	206
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	208
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	210
ДОДАТКИ.....	229

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- $\sigma_a$  – міцність адгезії шарів, МПа;
- $\delta$  – відносне подовження;
- $h$  – товщина оброблюваного матеріалу, мм;
- $s$  – швидкість контурної подачі, мм/хв;
- $Ra$  – параметр шорсткості поверхні, мкм;
- $T_g$  – глибина дефектного шару, мм;
- $\sigma_{0max}$  – максимальне значення залишкових напружень, МПа;
- $l$  – відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні, мм;
- $K_\sigma$  – коефіцієнт зміни рівня залишкових напружень;
- $K_{Ra}$  – коефіцієнт зміни рівня шорсткості поверхні після струминного впливу;
- $\eta$  – загальний коефіцієнт корисної дії;
- $\mu_c$  – коефіцієнт витрат у соплі, що залежить від профілю каналу, якості виконання та рівня мікронерівностей у каналі;
- $f_{cmax}$  – активна площа сопла, мм<sup>2</sup>;
- $Par$  – параметр інтенсивності струминного впливу на поверхню;
- $A$  – рівень залишку бруду в поверхневому шарі, %;
- $\varphi$  – кут розходження струменя;
- $\mu$  – коефіцієнт Пуассону;
- $E$  – модуль пружності, МПа;
- $a$  – робота, що витрачається на руйнування одиниці маси матеріалу;
- $m_m$  – маса видаленого матеріалу, кг;
- $\tau$  – час різання, с;
- $b_p$  – ширина перерізу, мм;
- $N$  – потужність струменя, обумовлена його геометричними параметрами та швидкістю витікання, Вт;
- $v_l$  – початкова швидкість струминки, з якою остання натікає на перепону, м/с.

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Сучасний розвиток наукоємного виробництва вимагає значно більшого використання нових композиційних матеріалів – конструкційних, жаротривких, спеціального призначення та ін., обробка яких, зокрема алмазним інструментом, пов'язана з низкою проблем.

Застосування найпоширеніших скло– та вуглепластиків, карбон–карбонівих матеріалів зумовлює труднощі, пов'язані з наявністю в структурі композиту високоміцних армувальних волокон (вуглецевих або високомодульних скляних), які погіршують спроможність інструмента керувати впливати на зону обробки. Особливо важкими є розділові операції, під час яких відокремлюються частини заготовки, значні за розміром (наприклад, розрізання заготовок типу КІМФ на пластини). Оскільки така обробка, як правило, є достатньо тривалою, то алмазний інструмент внаслідок деградації змінює різальні властивості. Така деградація не є однорідною і відбувається переважно в зонах, де умови обробки досить сильно відрізняються від умов усталеного різання. Ця особливість найбільш повно виявляється в нежорстких інструментах (як інструментах із додатковими ступенями вільності) – полотнах реноваторів та алмазних струнах.

Керуючись принципами та засадами функціонально–орієнтованого підходу, забезпечення раціональних умов різання композитів шляхом встановлення відповідності властивостей крайок інструменту особливостям процесу і конкретному типу композиту є дієвим способом, реалізація якого дає змогу покращити якість обробки, досягти більш повного використання масиву алмазних зерен та підвищити ефективність процесу в цілому за рахунок збільшення періоду стійкості інструменту та меншого відходу матеріалу в шлам. При цьому систематизована інформація щодо

використання функціонально–орієнтованого підходу до створення інструментів нині відсутня.

Таким чином, розробка принципів та методик застосування функціонального підходу до створення алмазного інструменту є актуальним напрямком підвищення його ефективності, а дослідження й адаптація процесів формування кластерів робочих поверхонь за допомогою універсального методу лазерного термодеоформаційного спікання (ЛТДС) робить можливим розв'язати важливу народно–господарську задачу сучасного наукоємного виробництва – скорочення витрат при обробці високовартісних композитів.

Оскільки забезпечення сталості різання на основі формування щільності, фракційності та умов викладання алмазовмісного шару різальної поверхні інструменту при обробці сучасних композиційних матеріалів, доля яких невпинно зростає, дозволить значно підвищити ефективність обробки, **актуальність теми досліджень** не викликає сумніву.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до наукової тематики кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету і пов'язана з тематикою науково–дослідної роботи кафедри «Підвищення ефективності алмазно–абразивного різання карбонових композитів на основі функціонального підходу» (номер державної реєстрації №0120U104288).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності алмазно–абразивного інструменту для різання високоміцних композиційних матеріалів на основі раціонального формування щільності, фракційності елементів алмазовмісного шару робочої поверхні інструменту засобами ЛТДС.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити модель взаємодії інструменту із додатковими ступенями вільності з високоміцним армованим матеріалом, застосувавши механізм

контактування алмазних зерен з порожнистим поверхневим шаром; здійснити аналіз відмінностей процесу різання за місцем та з плином часу.

2. Використовуючи морфологічний аналіз, удосконалити функціонально–орієнтований підхід до створення обробного алмазного інструменту (кільцевих свердел, полотен ренованора, алмазних струн), придатного для обробки високоміцних композиційних матеріалів.

3. Здійснити пошук раціональних умов різання на ділянках робочих поверхонь інструменту. Застосувавши поняття кластеру, визначити його параметри для ділянок, що відрізняються умовами різання. Встановити закономірності зміни параметрів шару та характеристик кластерів поверхні інструмента для забезпечення ефективної обробки.

4. Виявити умови та обмеження сполучень окремих кластерів між собою з метою утворення робочих поверхонь різального шару в цілому.

5. Адаптувати метод ЛТДС алмазного шару у вигляді поверхневих кластерів, встановити раціональні параметри кластерів.

6. Провести випробування ефективності пропонованих заходів, а також впровадження технології у діюче виробництво.

Розв'язок поставлених задач дослідження сприятиме не тільки досягненню поставленої мети, а й доведе доцільність використання подібних функціональних технологій при виробництві інструменту, орієнтованого на обробку певної марки композиційного матеріалу.

**Об'єкт дослідження** – процес обробки карбон–карбонових композицій алмазно–абразивним інструментом із додатковими ступенями вільності.

**Предмет дослідження** – алмазно–абразивний інструмент, удосконалений за рахунок адаптації сформованих ЛТДС кластерів поверхні до умов їх роботи при різанні високоміцних композитів типу КІМФ.

**Методи дослідження.** Роботу виконано на основі фундаментальних положень теорії різання, механіки деформованого пружного тіла, теорії тепло– та масообміну, теорії пластичного деформування. Формулювання

принципів пошуку раціональних умов роботи окремих ділянок інструментальних поверхонь здійснено з використанням теорії графів та теорії комбінаторики. Залучено сучасні методи експериментальних досліджень поверхонь твердих тіл: електронну растрову мікроскопію та енергодисперсійний рентгенівський мікроаналіз поверхні, засоби відтворення профілю поверхні. Розв'язок системи диференціальних рівнянь виконано методом Рунге–Кутта, для опрацювання статистичних вибірок застосовано регресійний та дисперсійний аналізи, спеціальні статистичні програмні пакети. Достовірність теоретичних посилок, розробок, конструкцій інструментів та технологій підтверджена експериментами, виконаними в лабораторних та виробничих умовах. Перевірку працеспроможності та ефективності використання створеного інструменту здійснено при обробці матеріалів типу КІМФ.

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

1. На основі аналізу процесу алмазно–абразивного різання композиційних матеріалів вперше запропоновано математичну модель, яка враховує особливості взаємодії пружного нежорсткого інструменту із додатковими ступенями вільності з порожнистою структурою композиту, та доведено, що ця взаємодія характеризується відмінностями за локалізацією та часом. Зроблено висновок про доцільність формування робочих поверхонь інструменту у вигляді окремих кластерів.

2. Удосконалено функціонально–орієнтований підхід до створення алмазно–абразивного інструменту шляхом залучення процедур опису умов роботи кластерів та зіставлення із засобами – матеріальними носіями – їх формування. Показано, що відмінність функціональних особливостей кластерів описується поліномами другого порядку; врахування відмінностей дозволяє активізувати інтенсифікуючі та пригнітити стримуючі чинники процесу взаємодії.

3. Удосконалено математичну модель формування кластерів поверхні



ЛТДС алмазного шару, яка враховує не тільки теплові процеси і явища в зоні обробки, але й динаміку руху робочих органів; запропоновано залежності для визначення розміру кластеру.

4. Набула подальшого розвитку теорія алмазного мікрорізання композиційних армованих матеріалів шляхом урахування динамічних явищ у зоні різання як наслідку сукупності роботи окремих поверхневих кластерів. Показано, що більш стабільним і ефективним є різання інструментом, крок розміщення кластерів на якому відповідає кроку армування матеріалу джгутами волокон.

#### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Сформульовано вимоги до інструментів, що використовуються для різання високоміцних композитів типу КІМФ, розроблено, виготовлено і апробовано ряд нових технічних рішень інструментів із нанесеним алмазним шаром, зокрема, алмазних струн, полотен реноватору та кільцевих свердл.

2. Розроблено методикку визначення функціональних особливостей жорстких (кільцевих свердл), пружних (полотен реноватору) та гнучких (алмазних струн) інструментів, призначених для обробки матеріалів, армованих скляними та вуглецевими волокнами.

3. Запропоновані емпіричні залежності для визначення режимів ЛТДС для формування кластерів робочих поверхонь пропонованих інструментів.

4. Наведено економічне обґрунтування застосування функціонально-орієнтованого підходу до створення алмазовмісного інструменту.

5. Розроблені рекомендації щодо виконання операцій різання алмазним інструментом та принципи ведення обробки передано до впровадження на підприємство ТОВ «Кіровоградський інструментальний завод «Лезо». Отримані результати роботи, методики та моделі використовуються у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологія фізико-технічної обробки матеріалів» і «Технологія і обладнання фізико-технічної обробки матеріалів».

**Особистий внесок здобувача** полягає у тому, що автором обґрунтовано доцільність використання функціонально–орієнтованого підходу до створення нежорстких інструментів, які застосовуються для обробки сучасних композиційних матеріалів, зокрема типу КІМФ. Запропоновано математичну модель взаємодії, низку регресійних залежностей, що дають змогу встановити відмінність роботи окремих ділянок поверхні за локацією та часом, визначити параметри різального шару інструменту. Автором доведена необхідність декомпозиції робочих крайок на окремі кластери, розмір яких зумовлюється структурою оброблюваного матеріалу; обґрунтовано доцільність формування таких кластерів методом ЛТДС. Постановка задач дослідження й аналіз отриманих результатів здійснювалися разом з науковим керівником.

Основні наукові результати, наведені в дисертації, були отримані автором самостійно. У наукових статтях, які опубліковані у співавторстві, особистий внесок автора такий: [1] – запропоновані ймовірнісні моделі настання параметричної відмови роботи алмазовмісного інструменту; [2] – запропоновано використання функціонального підходу при обробці композиційних матеріалів; [3] – встановлені закономірності явищ пило– та шламоутворення при абразивній обробці карбонових композитів; [4] – запропонована технологія свердління композиційних матеріалів карбонової групи; [5] – виконано розрахунок напруженого стану зони різання композиційного матеріалу; [6] – проведені експериментальні дослідження кільцевих свердел, створених на основі функціонального підходу; [7] – запропонована схема формування розміру кластеру при динамічній постановці задачі.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на конференціях: International Scientific Conference UNITECH–19 (Gabrovo, Bulgaria, 2019); Міжнародній науково–технічній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні

проблеми життєдіяльності суспільства» (м. Кременчук, 24–24 квітня 2019 р.); XX Міжнародній науково–технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Херсон, 10–13 вересня 2019 р.); X Всеукраїнській науково–технічній конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент» (м. Житомир, 06–09 листопада 2019 р.); Міжнародній науково–практичній конференції «Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability» (м. Кропивницький, 15–17 квітня 2020 р.); XIII Міжнародній науково–технічній конференції молодих учених (м. Мінськ, Білорусія, 15–17 квітня 2020 р.); I Міжнародній науково–практичній конференції «Авіація, промисловість, суспільство» (м. Кременчук, 14 травня 2020 р.); XX Міжнародній науково–технічній конференції «Инженерия поверхности и реновация изделий» (м. Київ, 01–05 червня 2020 р.); науково–технічних конференціях викладачів, аспірантів та співробітників Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький, 2015–2020 р.). У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на розширеному засіданні наукового семінару кафедри технології машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 14 наукових праць, із них 3 статті – у фахових виданнях України, 4 – у закордонних періодичних наукових журналах, 5 тез доповідей на наукових конференціях, отримано 2 патенти України на винахід.

**Структура і зміст роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку літератури зі 158 джерел та додатків на 10 сторінках. Повний обсяг дисертації складає 208 сторінок, із яких 142 сторінки – основного тексту, 82 рисунки та 14 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

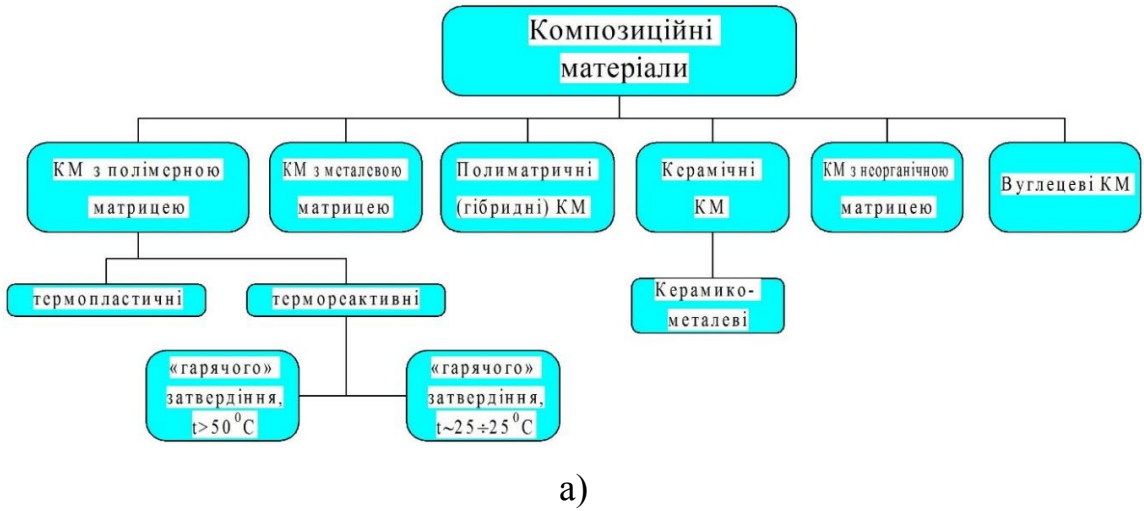
### РОЗРОБКА ОБРОБНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ КОМПЛЕКСУ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ

1.1. Формування поверхонь та їх властивостей в деталях із композиційних матеріалів і металів

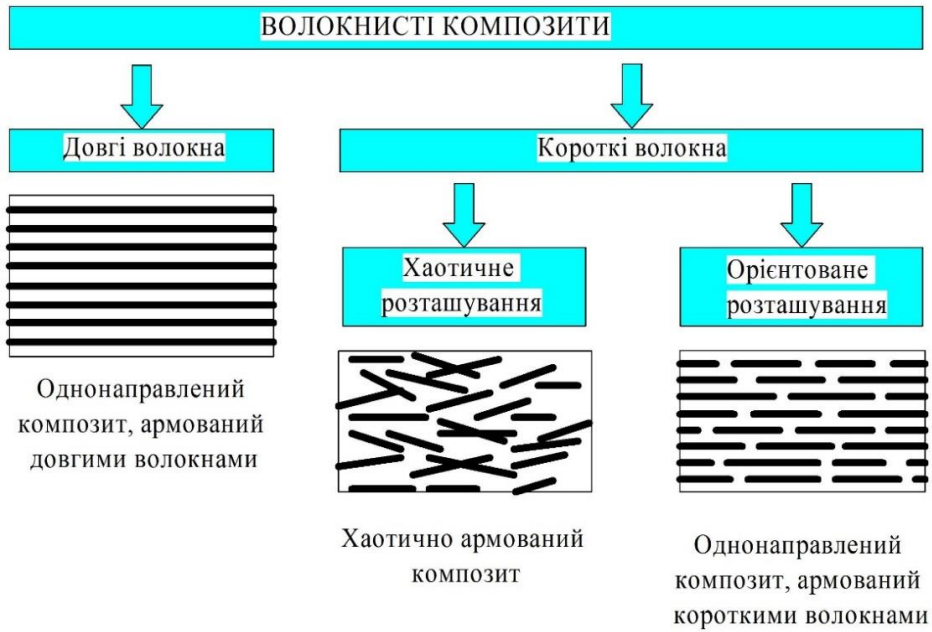
Сучасне машинобудування характеризується активним зростанням обсягів використання нових композиційних матеріалів, що володіють заданими фізико-механічними властивостями та спроможні працювати в умовах високих і низьких температур, при значних навантаженнях, сприймати дію магнітних і радіоактивних полів тощо [1].

Композити знаходять застосування при виробництві літаків, суден, в автомобільній галузі. Більш дешеві матеріали використовуються у пакувальній індустрії, при виробництві товарів для побутових потреб. Активно використовуються композити в інструментальному виробництві, причому не тільки для створення різальних пластин (елементів), а і для виробництва основ в першу чергу абразивовмісних (алмазовмісних) інструментів [2].

Незважаючи на те, що вже нині існує значна кількість промислово використовуваних матеріалів (рис. 1.1,а), пошук нових композиційних сполучень активно продовжується [3–5]. Слід зазначити, що головні зусилля дослідників направлені на покращення експлуатаційних властивостей матеріалів, спрощення технологій їх отримання та доведення до готового вигляду [6], поліпшення екологічних характеристик в першу чергу за рахунок рециклінгових процесів [7], [8]. При цьому основною масою таких матеріалів є армовані довгими або короткими скляними, вуглецевими або органічними волокнами полімерні матриці, рис. 1.1,б [9].



а)



б)

U.S. fiber reinforced polymer (FRP) composites market, by type, 2014 - 2025 (USD Billion)



в)

Рис.1.1. Класифікація композитів (а), типи волокнистих матеріалів (б) та їх промислове використання (в) (за [9], [14])

Неоднорідність структури, відмінність фізико-механічних властивостей компонентів не тільки відкривають широкі можливості у царині формування вихідних показників та властивостей готового виробу [10], а і обумовлюють активний пошук нових методів та способів оброблення матеріалів [11–14], формування властивостей поверхневих шарів, що обумовлюватиме працеспроможність виробу при його експлуатації.

Зазвичай виробництво армованих скло– та вуглеволокнами матеріалів відбувається шляхом викладення препрегів на основу (яка у даному випадку постає своєрідними копіювальним елементом), з наступним нанесенням компонентів полімеризації матриці, або шляхом укладання компонентів композиту в потрібну форму (матрицю), необхідність у кінцевій обробці існує [15]. При цьому намагаються не тільки забезпечити потрібну форму виробу, а й створити такий стан поверхні, при якому його властивості не будуть істотно відрізнятися від основного матеріалу [16–18]. Головну увагу зосереджують на:

- створенні прогресивних конструкцій різального інструменту;
- застосуванні сучасних інструментальних матеріалів, кераміки та надтвердих матеріалів;
- застосуванні активізаторів процесу різання/мікрорізання за рахунок зміни стану зони обробки;
- проведенні заходів із «конструювання» не тільки виробу, а і використовуваного матеріалу із врахування подальшої механічної обробки;
- розробці й впровадженні гібридних процесів, спроможних змінювати умови і види керованого впливу на оброблювані композиційні заготовки.

Якщо перші напрямки удосконалення процесів оброблення композитів є відомими і достатньо поширеними (вони базуються на фундаментальних працях науковців Харківської та Київської шкіл різання, зокрема, М.Ф. Семка, Г.В. Шабалина, П.С. Редька, Е.М. Левенберга, А.И. Грабченка, В.Л.

Доброскока, В.А. Федоровича, Б.А. Перепелиці та ін. [19] – [21]), то останні три напрями останнім часом починають активно розроблятися.

В окремих роботах Charles W. Vytheway, Є.І. Голібардова, А.М. Кузьміна, О.Ф. Саленка, С.А. Клименка, Ю.М. Кузнєцова ([22] – [24]), було показано, що гібридизація та комбінування впливу може істотно підвищити ефективність обробки, особливо коли необхідно обробляти композиційні матеріали.

В ряді робіт В.М.Орла, О.О.Ченчевої, Є.Є.Лашка (зокрема [25], [26]) показано, що зміна умов навантаження зони різання, зміна напруженого стану в місцях контакту із різальним або абразивним інструментом може суттєво зменшити опір руйнуванню матеріалу.

Значні перспективи у контурній обробці оболонкових виробів має і метод обробки потужним рідинним струменем. Гідроабразивне різання із компенсацією динамічних явищ (автор – С.В.Коваленко, [27]) та попередньою ідентифікацією гідрорізної системи (О.В.Фомовська [28]) дозволяє отримувати якісних різ матеріалів як карбон–полімерної так і карбон–карбонової груп. Однак автори не зосереджували уваги на перевірці фізико–механічних властивостей поверхневого шару і оперували лише терміном деструкції поверхні від дії різального клина (клинів при абразивній обробці) або потоку частинок чи теплового точкового впливу, як це показано, наприклад, в [29].

Формоутворення при обробці виробів із композиційних матеріалів подібно до формоутворення при різанні металів. Згідно [29] існує кілька груп рухів, швидкість яких впливає як на процес різання, так і на стан поверхні після обробки:

I група – один поступальний рух (стругання). Він може бути вертикальним, горизонтальним або похилим. Рухається або інструмент, або заготовка. Тому навіть при реалізації такої простої схеми використовується різне устаткування та інструмент.

II група – два поступальні рухи (пилки).

III група – один обертальний рух (протягування сегментів на столі, що обертається). Не має широкого застосування.

IV група – поступальний і обертальний рухи (точіння, свердлення, фрезерування, нарізування різі).

V група – два обертальні рухи (зовнішнє протягування. фрезерування тіл обертання, фрезерування черв'ячними фрезами черв'ячних коліс).

VI група – два поступальні та один обертальний рухи (затилювання).

VII група – два обертальних і один поступальний рухи (фрезерування гвинтових канавок).

VIII група – три обертальні рухи (нарізування конічних зубчастих коліс різцевими головками).

Однак практичного застосування знаходять рухи II (струминні методи обробки, рідко – механічне розпилювання) та IV груп (механічне оброблення). Зі схем формоутворення (за П.Р.Родіним, [30]), використовуються тільки перший (струминні методи) та другий (свердлування, фрезерування) класи.

Для випадку використання у якості інструменту променя лазера або швидкоплинного струменя рідини малого діаметра задача формоутворення значно спрощується, оскільки ці засоби постають ідеалізованим циліндрично–точковим інструментом із правильними геометричними параметрами. У той же час перехід до нанометричного рівня відтворення заданих просторових розташувань поверхонь вимагає врахування усіх геометричних характеристик робочого інструменту, як показано в [31], [32] при дослідженні процесів обробки, не залишаються ні геометрично правильними, ні сталими.

Модель формування поверхонь різальними інструментами при обробці композитів подібна до моделей, описаних в [33]. Оскільки рух твірної по напрямній створює поверхню оброблення, останню визначають двома параметрами – криволінійними координатами  $T$  і  $H$  (рис.1.2). Тоді в параметричному вигляді рівняння поверхні матиме вигляд:

$$\bar{R} = \bar{R}(T, H),$$

де  $\bar{R}$  – радіус–вектор, з початком у точці  $O$  прямокутної системи координат  $xuz$ .



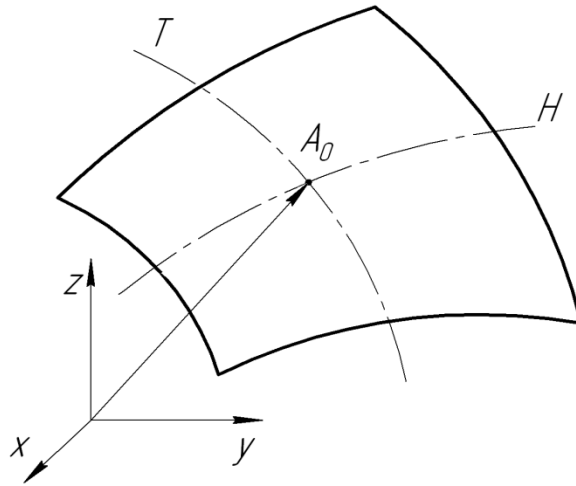


Рис. 1.2. Твірна та напрямна поверхні у створенні поверхні обробки

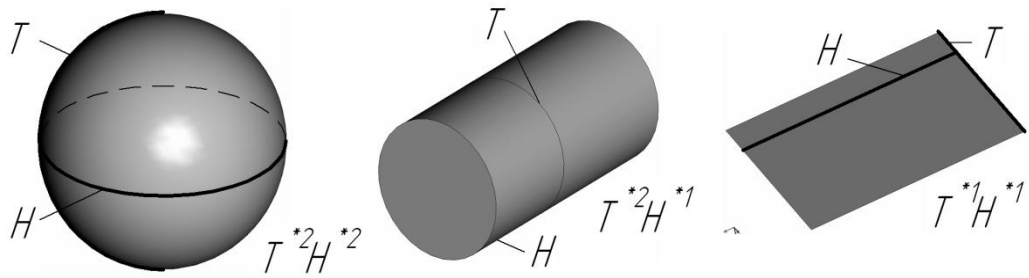


Рис.1.3. Поверхні, що мають рух "самих по собі"

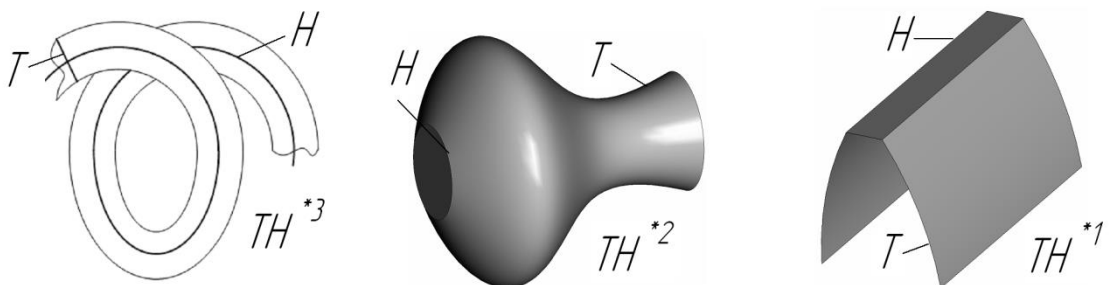


Рис. 1.4. Поверхні, що допускають рух "самих по собі" по напрямній

Визначена поверхня має дві сторони – закриту і відкриту, і обмежує предмет. Закрита сторона примикає до матеріалу предмету, а відкрита може контактувати з іншими предметами, зокрема із тілом обробляючого інструменту. З технологічної точки зору найбільш цікавою для обробки композитів є поверхні, що допускають рух "самих по собі" по напрямній і твірній  $T^*H^*$ , (рис.1.3), або тільки по напрямній  $TH^*$  (рис. 1.4).

З [31] відомо, що при формоутворенні поверхні різальним інструментом неминучі похибки технологічної системи і тому номінальні значення параметрів  $T$  і  $H$  цієї поверхні виконують з допусками, що робить їх неоднозначними. Для забезпечення однозначності при розрахунку інструменту, вводять так звану розрахункову поверхню  $(T_p, H_p)$ , яка лежить у полі допуску на поверхню  $(T, H)$ . Однак в роботі [28] також показано, що різання композиційних матеріалів неодмінно призводить до виникнення деструктивного шару, відсутнього на металевих заготовках, товщина якого обумовлюється умовами навантаження поверхні і розраховується на основі положень механіки квазікрихкого руйнування матеріалу.

Так, в роботах [34], [35] показано, що під час механічного різання відбувається зняття матеріалу внаслідок зародження та поширення мікротріщин, які під дією різального клина біфурцирують та зливаються у тріщини магістральні, направлені під певними кутами до лінії дії сили різання. Процес різання волокнистих полімерних композитів має чітко виражений циклічний ударно–динамічний характер. Механізм одного циклу наступний: під дією прикладених ріжучим клином навантажень в композиті відбуваються зародження, зростання та взаємодія субмікротріщин та мікротріщин. Коли напруження в зоні контакту досягнуть граничного рівня, відбувається старт магістральної тріщини, або старт та розгалудження системи тріщин. Після початку руйнування відбувається швидке зростання системи тріщин в об'ємі шару, який знімається, що супроводжується падінням сили різання та відділенням шару матеріалу. Далі іде новий цикл руйнування матеріалу. При цьому сила різання змінює своє значення від максимального до мінімального.

Тривалість циклу руйнування, його амплітуда, частота циклів залежать від швидкості різання, товщини зрізу, марки оброблюваного матеріалу, напрямлення вектора головного руху різання відносно напрямлення армування композиту. Таким чином, процес різання волокнистих полімерних композитів є динамічним, так як швидкість росту сили різання до критичного значення, що забезпечує старт макротріщини (або системи тріщин) та їх подальший закритичний розвиток є функціями швидкості різання та часу контакту.

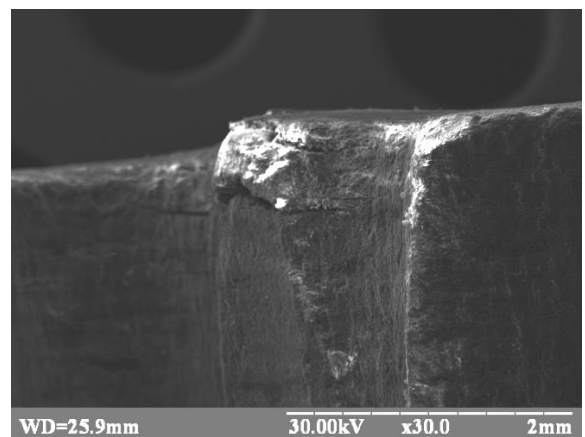
Волокнисті полімерні композити типу склопластиків, органопластиків, склоорганопластиків мають домінуючі пружні властивості. З позицій механіки руйнування їх можна вважати ідеально крихкими з нехтувано малою областю текучості у вершині тріщини. Більш того, експерименти з композитними матеріалами показали, що зі збільшенням швидкості навантаження тріщиностійкість (критичний коефіцієнт інтенсивності напруг старту тріщини) зменшується. Це означає зменшення в'язких властивостей перед пружними, тобто окрихчення, яке відбувається до величини швидкості  $V \approx 0,13C_2$ , де  $C_2$  – швидкість хвиль Релея.

Дослідниками [36] доведено, що руйнування композиту (армованого скляними волокнами полімеру) відбувається по лінії розділення матеріалу ріжучим клином, де встановлюється максимальне напруження та максимальний коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) для цих умов, причому при швидкостях різання біля 20 м/с швидкість розповсюдження тріщини досягає своїх граничних значень (вище 700 м/с).

Формування деструктивного шару відбувається переважно за рахунок тріщин, які не досягли свого критичного значення і не перетворилися на магістральні. Зазвичай дефектність шару виражена слабо, а товщина деструктованої ділянки не перевищує 0,03–0,09 мм. Інколи розшарування матеріалу може бути істотним (рис. 1.5,а).



а)



б)

Рис.1.5. Фото торців виробів із вуглецевих композитів при свердлуванні (а) гідрострумина обробки склотекстоліту (б), в якому виконано також кілька отворів з неповним прорізанням

На відміну від механічного, різання тонким надзвуковим струменем рідини малого (біля 0,1–0,25 мм) діаметра відбувається внаслідок гідродинамічного навантаження поверхні, при якому локальні дефекти розпочинають швидко зливатися, зростати та сягати критичних значень, після чого відбувається початкове руйнування матеріалу [37]. Цей процес йде у два етапи – початкового пружного втиснення поверхні та утворення мікрodefektів та наступного активного зростання мікротріщин внаслідок дії гідродинамічних сил. Дослідження процесів гідрорізання здійснювали І. Петко, Р. Тихоміров, М. Гуєнко, а узагальнення та механіка процесу гідрорізання композитних матеріалів (як ортотропних шаруватих пластин) подано в роботах [38] – [40].

При цьому було встановлено, що формування борозенки різки та утворення деструктивного поверхневого шару є наслідком диспергації елементарних обсягів заготовки при її поступовому переміщенні відносно швидкоплинного струменя, яке призводить до зародження, зростання та розгалуження мікротріщин, орієнтованих під ймовірними кутами відносно осі швидкоплинного струменя, їх наступного злиття з активним руйнуванням у центрі прикладання гідرو впливу і виносом шламу, та кінцевого формування поверхні розділу периферійною частиною струменя і стічним потоком рідини, насиченим продуктами руйнування.

Оброблювані волокнисті неметали при гідрорізанні можна вважати крихкими, зі зменшенням крихкості при зниженні інтенсивності прикладання струминного навантаження в зоні виходу струменя, що обумовлює кінцеве формування поверхні борозенки різки як наслідок пружно–пластичного деформування мікровиступів та багатоциклового навантаження елементів поверхні. Концентрація мікротріщин, їх зародження та напрямок розвитку залежить від ширини зони передруйнування, утвореною на межі стискуючих та розтягуючих напружень, співпадаючих з оболонкою струменя, та від швидкості перенесення гідро впливу уздовж оброблюваної поверхні.

Процес тріщиноутворення, наслідком якого є нестационарне гідроруйнування мікрообсягів оброблюваної заготовки, визначає товщину

деструктивного шару та форму поверхні різання, і в кінцевому рахунку обумовлює ефективність гідрообробки і якість отриманих поверхонь розділу. Деструктивний шар може сягати значних розмірів, особливо у випадку, коли наскрізне прорізання відсутнє, а стічний потік прямує назустріч струменю (рис. 1.5,б).

Пошукова товщина деструктивного шару на бокових поверхнях борозенки різи становитиме:

$$h_d = \frac{D_0 - D_a}{2} + \frac{a_0}{\sqrt[n/2-1]{1 - \frac{2.182C_p C \sqrt{D_0^2/2 - D_a^2/2}}{s_r K \left(\frac{\rho}{P_b}\right)^{0.5}}}} - x_c,$$

де  $x_c$  – товщина шару наповнювача.

Для механічного або абразивного різання, для якого явища тріщиноутворення є превалюючими, деструктивний шар становитиме

$$l(t) = l_{\max} + \frac{K \left[ 2 + \alpha \left( 1 - \frac{\beta}{2} \right) \right]}{\Delta \sigma_d^2 \sqrt{\pi}} dN, \text{ причому } dN \text{ є функцією часу і визначається}$$

частотою коливань навантаження. Іншими словами, якщо припуск на механічне оброблення є недостатнім, може виникнути ситуація, коли поширення деструкції матеріалу зрівняється із довжиною виключення

$$\text{волокна } l_0 = \frac{\sigma_{fb} - \sigma_{f\tau}}{13\sqrt{b'E}k_\tau\tau_\tau} l_c, \text{ де } b' \text{ – глибина тріщини; } l_c \text{ – критична довжина;}$$

$E$  – модуль пружності;  $\tau_\tau$  – дотичні напруження;  $k_\tau = 0.3 \dots 1.5$ , що унеможливить обробку в цілому.

Отже, проведений аналіз показав, що кінцеве формоутворення виробів із композиційних матеріалів потребує ряду заходів, направлених на трансформацію стану і властивостей поверхневого шару, утвореного після оброблення, пошуку нових способів і методів ведення обробки, а також необхідності проводити конструювання готового виробу одночасно з процесом підбору параметрів і створення самого композиційного матеріалу.

## 1.2. Функціональний підхід до створення обробних процесів

Свій початок зазначений підхід бере з функціонально–вартісного аналізу, поширеного серед передових виробництв усередині минулого століття. Перші роботи Голібардова [41] Г. Альтшуллера [42] узагальнили накопичену інформацію стосовно розв'язку багатокomпонентних та багатокритеріальних задач в умовах невизначеності, довівши перспективність застосування даного підходу в умовах масового виробництва і як універсального засобу зниження витрат на виробництво в цілому.

Фахівці у [40] зазначали, що функції, заради яких створюється об'єкт, і які присутні в об'єкті в тому чи іншому вигляді, для споживача є цікавими диференційно: важливими є виключно функції корисні, а не шкідливі, з якими слід боротися.

Відмінність функціонального підходу від матеріального полягає у тому, що при розробці нового об'єкта виходять саме із тих корисних функцій, на виконання яких направлений створюваний об'єкт. При цьому матеріальні носії функцій обираються так, щоб з мінімальним затратами забезпечити потрібне виконання корисних функцій і зменшити, або в ідеальному варіанті унеможливити появу функцій шкідливих та нейтральних.

Згодом функціональний підхід було також застосовано і для створення обробних технологій. Наразі провідними фахівцями у галузі технології машинобудування значно підвищений теоретичний рівень фундаментальних засад. Трансформуючи функціональний підхід на обробні технології, автор [43] звернув увагу на те, що процес виробництва є певною послідовністю дій, направлених на надання оброблюваній заготовці потрібної форми та властивостей, причому зазначені властивості можуть змінюватися навіть у межах однієї поверхні. На відміну від технологій традиційних, коли властивості виробу закладаються у межах сформованої поверхні або певної

кількості поверхонь, функціональний підхід передбачає диференціацію властивостей та об'єднання елементів різних поверхонь в одній технологічній операції (або переході) саме за функціональною ознакою.

Описуючи об'єкт виробництва завданням його вихідного стану  $\tilde{N}_0$  як сукупності параметрів, що характеризують форму й розміри заготовки, матеріал та механічні властивості, а кінцевий стан  $C_k$  через визначення форми, розмірів, точності, фізико–механічних властивостей тощо, функцію перетворення  $\varphi_0$  властивостей потоку деталей з вихідного стану – заготовки – в кінцевий стан – виріб – автор [44] пропонує подавати у такий спосіб:

$$\varphi_0: \begin{Bmatrix} C_{n1} \\ C_{n2} \\ \vdots \\ C_{nR} \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} C_{k1} \\ C_{k2} \\ \vdots \\ C_{kT} \end{Bmatrix}, \quad (1.1)$$

де  $\varphi_0$  – функція технологічного перетворення властивостей предмета обробки;

$C_{nR}$  –  $r$ -е елементарна властивість заготовки;

$C_{kT}$  –  $t$ -е елементарна властивість виробу;

$R$  – загальне число властивостей заготовки;

$T$  – загальне число властивостей виробу.

Будь–який новий принцип створення технологій нового покоління може утворюватися від перетину деякої підмножини  $p_i$  відомих принципів:

$$R_{nj} = \bigcap_{i=1}^{\rho_i} R_{si}, \quad (1.2)$$

де  $R_{nj}$  – поле утворень нових принципів створюваних технологій;

$R_{si}$  –  $i$ -та сукупність відомих принципів проектування технологій;

$\rho_i$  – потужність підмножини відомих принципів.

Будь–яка технічна система, інструмент або машина, створювана проектувальником, призначена для виконання комплексу різних за призначенням та складом експлуатаційних функцій, для виконання яких вона створюється зазвичай із сукупності функціональних підсистем та елементів, які виконуються на базі деталей (виробів).



Традиційно при розробці технологічного процесу виготовлення виробу (деталі) прийнято його розглядати сукупністю виконавчих поверхонь або поверхонь, що включають виконавчі й сполучні поверхні. Тоді в процесі розробки технологічного процесу, послідовно вирішуються питання забезпечення заданих властивостей елементів виробу у вигляді сукупності поверхонь.

Разом з тим, подібний розгляд не дозволяє прецензійно точно виконувати задані технологічні впливи і забезпечувати необхідні властивості на місцевому рівні в залежності від різних особливостей їх експлуатації та дії експлуатаційних функцій. При цьому розробляється технологічний процес і технологічні впливи орієнтуються в процесі реалізації технології для всієї поверхні в цілому без урахування особливостей дії експлуатаційних функцій. Також не дає можливості вирішувати питання повної адаптації властивостей виробу при виготовленні залежно від особливостей його експлуатації.

Авторами роботи [43] пропонується ввести деталізацію виробу за кількома рівнями, а саме:

- 1-й рівень поділу – рівень виробів,
- 2-й рівень поділу – рівень функціональних частин,
- 3-й рівень поділу – рівень функціональних складових,
- 4-й рівень поділу – рівень функціональних зон,
- 5-й рівень поділу – рівень функціональних макрозон,
- 6-й рівень поділу – рівень функціональних мікрозон,
- 7-й рівень поділу – рівень функціональних нанозон.

При цьому процес поділу є ієрархічною структурою, тобто на кожному рівні поділу виконується поділ виробу на функціональні елементи даного рівня поділу.

Для композитів поділ з 4 рівня набуває особливого значення, оскільки розміри армувальників можуть вже порівнюватися із рівнем поділу

При розробці комплексного технологічного процесу, на різних його етапах можуть розроблятися процеси для різних рівнів поділу. Наприклад, на етапі виготовлення заготовки може розроблятися процес тільки для першого



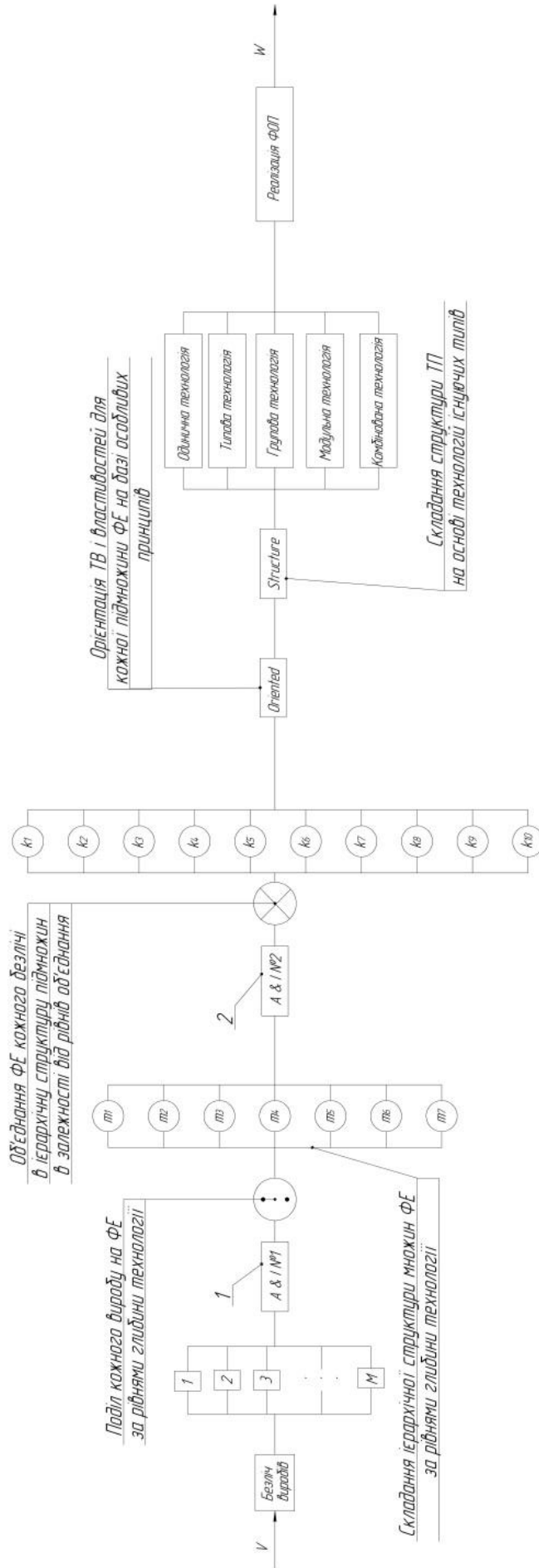


Рис. 1.6. Структурна схема реалізації функціонально-орієнтованої технології для множини виробів (за [42])



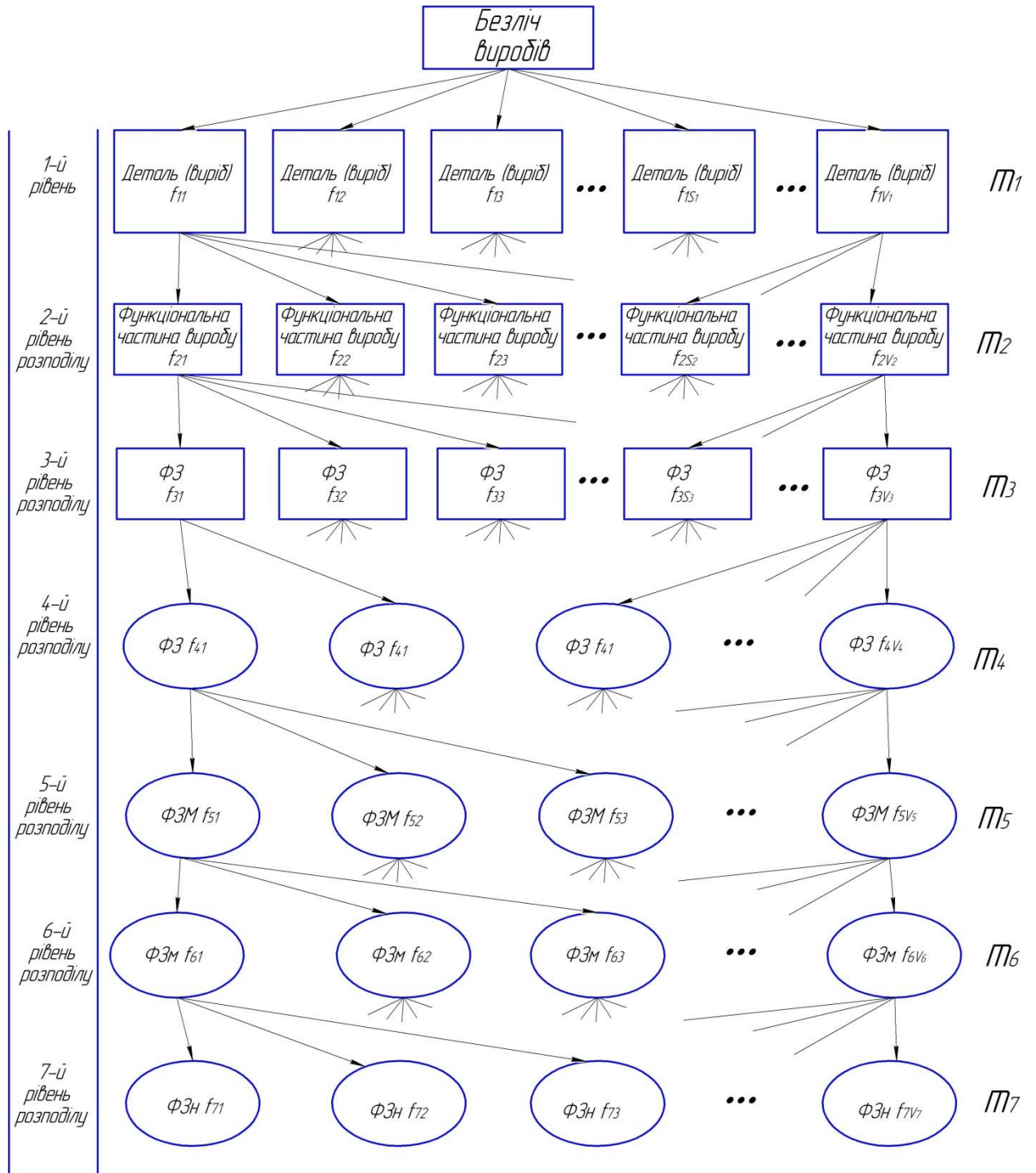


Рис. 1.7. Ієрархічна структура функціональних елементів за рівнями розподілу множини виробів

Ієрархічна структура функціональних елементів за рівнями ділення для множини виробів подана на рис. 1.8. На 1-му ієрархічному рівні, множина виробів може складатися з множини функціональних виробів ( $\Phi И$ )  $m_1 = \{f_{11}, f_{12}, f_{13}, \dots, f_{1v_1}\}$ , в які можуть входити будь-які класи деталей.

Тут:  $f_{1s1}$  – будь-який функціональний елемент (виріб) 1-го рівня ієрархічної структури поділу,  $v_1$  – потужність множини  $m_1$  1-го рівня поділу ( $v_1 = M$ ). Якщо процес поділу на функціональні елементи виконується для одного виробу, то  $v_1 = 1$ .

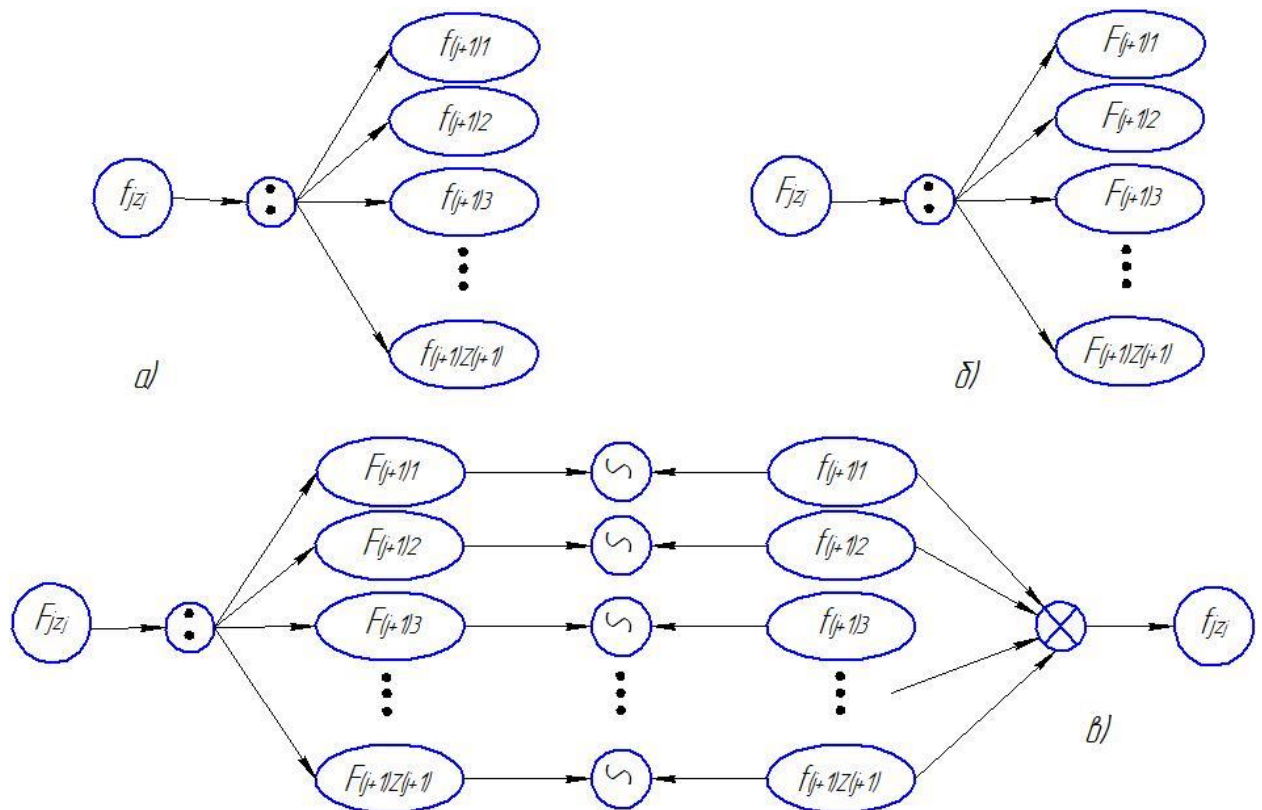


Рис. 1.8. Схеми декомпозиції та синтезу функціональних елементів і функцій:

а – схема декомпозиції функціонального елемента  $j$ -го рівня глибини технології на множину функціональних елементів  $(j + 1)$ -го рівня;

б – схема декомпозиції складної функції  $j$ -го рівня глибини технології на множину функціональних елементів  $(j + 1)$ -го рівня;

в – схема синтезу функціональних елементів виробу на базі складної функції.

На 2–му ієрархічному рівні поділу, кожний виріб ділиться на функціональні частини ( $\Phi\mathcal{C}$ ), при цьому для множини виробів складається множина функціональних частин  $m_2 = \{f_{21}, f_{22}, f_{23}, \dots, f_{2v_2}\}$ , де  $f_{2v_2}$  – будь–який функціональний елемент 2–го рівня ієрархічної структури поділу,  $v_2$  – потужність множини  $m_2$  2–го рівня поділу.

Як приклад на рис. 1.9 показаний процес декомпозиції одного конкретного виробу на множину функціональних частин.

На наступному, 3–му ієрархічному рівні, функціональні частини діляться на функціональні складові ( $\Phi\mathcal{C}$ ), які складають множину  $m_3 = \{f_{31}, f_{32}, f_{33}, \dots, f_{3v_3}\}$ , де  $f_{3v_3}$  – будь–який функціональний елемент 3–го рівня ієрархічної структури поділу,  $v_3$  – потужність множини  $m_3$  3–го рівня поділу. На рис. 1.9 представлена схема декомпозиції функціональної частини  $\Phi\mathcal{C}$  3 на множину функціональних складових

$$\Phi\mathcal{C} 3 = \{\Phi\mathcal{C} 3.1; \Phi\mathcal{C} 3.2; \Phi\mathcal{C} 3.3; \dots; \Phi\mathcal{C} 3.z_3; \dots; \Phi\mathcal{C} 3.Z_3\}.$$

Функціональні (виконавчі) складові 3–го рівня поділу можуть бути семи видів:

- 1) поверхневі точки або елементарні поверхні 3–го рівня поділу, розміри яких визначаються експлуатаційними параметрами виробу;
- 2) об'ємні точки або елементарні обсяги 3–го рівня поділу, розміри яких визначаються експлуатаційними параметрами виробу;
- 3) поверхневі лінії або лінії елементарної ширини 3–го рівня поділу, ширина яких визначається експлуатаційними параметрами виробу;
- 4) об'ємні лінії або лінії з перетином елементарних розмірів 3–го рівня поділу, розміри перетину яких, визначаються експлуатаційними параметрами виробу;
- 5) поверхні 3–го рівня поділу;
- 6) поверхневі шари 3–го рівня поділу, товщина шарів яких визначається експлуатаційними параметрами виробу;
- 7) обсяги 3–го рівня поділу.

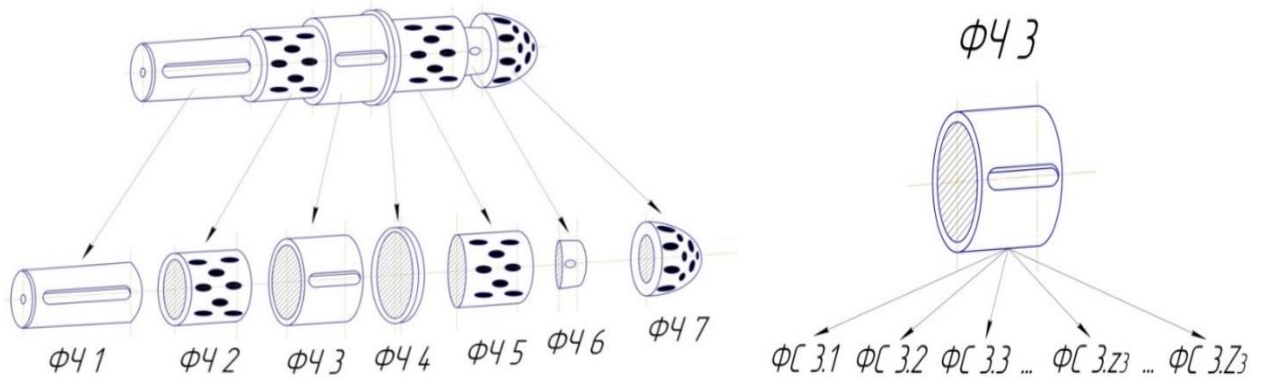


Рис. 1.9. Декомпозиція виробу на множину функціональних частин

Просторова форма функціональних складових виробу може мати множину варіантів, які відомі з аналітичної та прикладної геометрії, або існують на практиці. На рис. 1.10 дана геометрична інтерпретація видів функціональних (виконавчих) складових 3–го рівня поділу.

Відзначимо, що 4–й ієрархічний рівень складається множиною  $m_4 = \{f_{41}, f_{42}, f_{43}, \dots, f_{4v_4}\}$  функціональних зон ( $\Phi Z$ ), де  $f_{4v_4}$  – будь–який функціональний елемент 4–го рівня ієрархічної структури поділу,  $v_4$  – потужність множини  $m_4$  4–го рівня поділу.

Функціональні (виконавчі) зони 4–го рівня поділу також можуть бути семи видів, так як представляють просторові зони функціональних складових 3–го рівня поділу виробу:

1. Зона 4–го рівня поділу поверхневої точки або елементарної поверхні 3–го рівня поділу, розміри якої визначаються експлуатаційними параметрами виробу. Ця зона є частиною поверхневої точки або елементарної поверхні 3–го рівня поділу.

2. Зона 4–го рівня поділу об'ємної точки або елементарного об'єму 3–го рівня поділу, розміри яких визначаються експлуатаційними параметрами виробу. Ця зона є частиною об'ємної точки або елементарного об'єму 3–го рівня поділу.



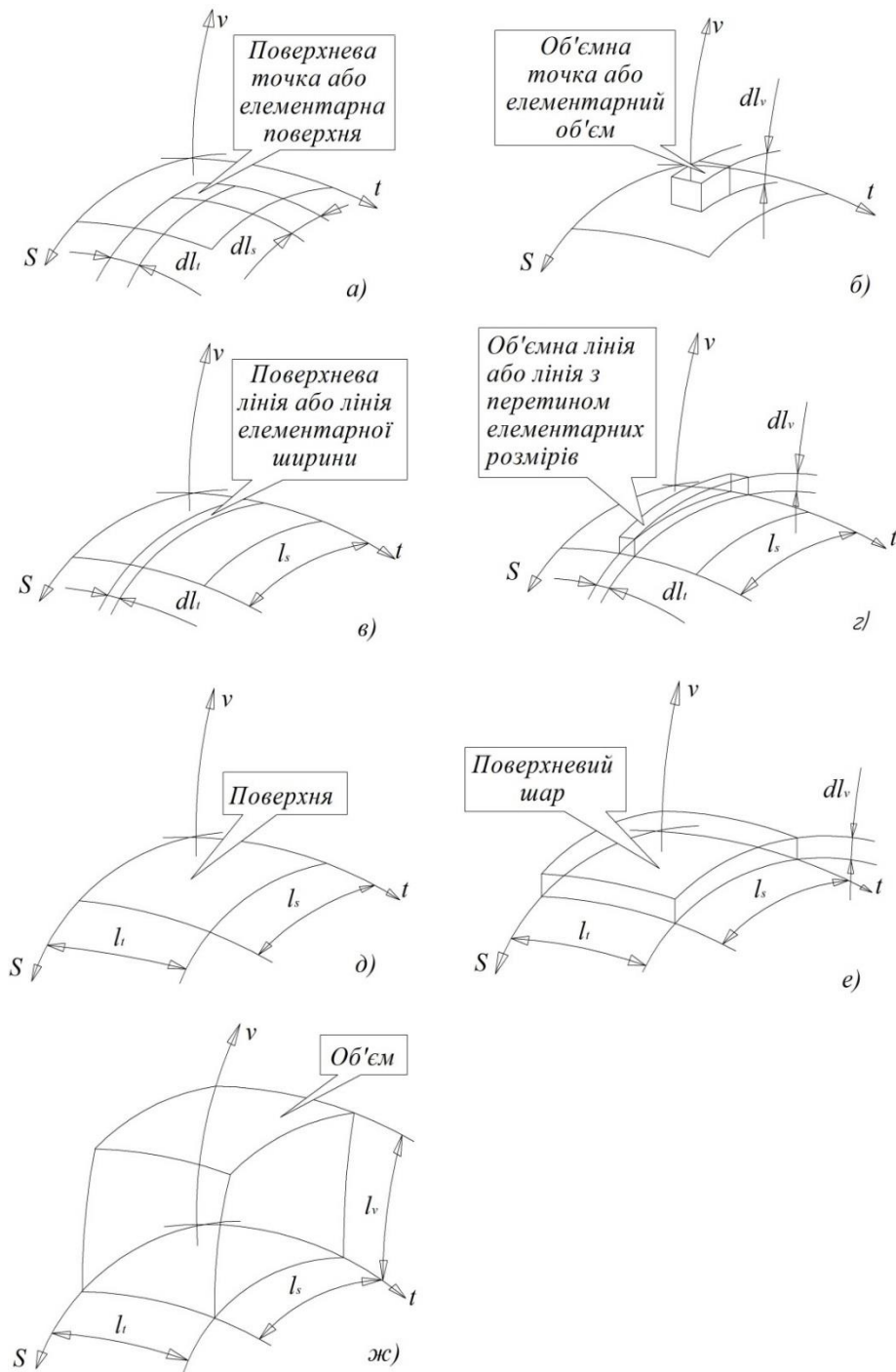


Рис. 1.10. Геометрична інтерпретація видів функціональних (виконувальних) складових 3-го рівня поділу:

а) поверхневі точки або елементарні поверхні; б) об'ємні точки або елементарні обсяги 3-го рівня поділу, розміри яких визначаються експлуатаційними параметрами виробу; в) поверхневі лінії або лінії елементарної ширини; г) об'ємні лінії або лінії з перетином елементарних розмірів; д) поверхні 3-го рівня поділу; е) поверхневі шари 3-го рівня поділу, товщина шарів яких визначається експлуатаційними параметрами виробу; ж) об'єму 3-го рівня поділу

3. Зона 4-го рівня поділу поверхневої лінії або лінії елементарної ширини 3-го рівня поділу, ширина якої визначається експлуатаційними параметрами виробу. Ця зона є частиною лінії або лінії елементарної ширини 3-го рівня поділу в напрямку її довжини.

4. Зона 4-го рівня поділу об'ємної лінії або лінії з перетином елементарних розмірів 3-го рівня поділу, розміри перетину якої, визначаються експлуатаційними параметрами виробу. Ця зона є частиною об'ємної лінії або лінії з перетином елементарних розмірів 3-го рівня поділу в напрямку її довжини.

5. Зона 4-го рівня поділу поверхні 3-го рівня поділу. Ця зона є частиною поверхні 3-го рівня поділу.

6. Зона 4-го рівня поділу поверхневого шару 3-го рівня поділу, товщина якого визначається експлуатаційними параметрами виробу. Ця зона є частиною поверхневого шару 3-го рівня поділу по поверхні.

7. Зона 4-го рівня ділення об'єму 3-го рівня поділу. Ця зона є частиною обсягу 3-го рівня поділу.

На 5-му ієрархічному рівні складається множина  $m_5 = \{f_{51}, f_{52}, f_{53}, \dots, f_{5v_5}\}$  функціональних макрозон ( $\Phi ЗМ$ ), де  $f_{5v_5}$  – будь-який функціональний елемент 5-го рівня ієрархічної структури поділу;  $v_5$  – потужність множини  $m_5$  5-го рівня поділу.

Приведені міркування можна аналогічно поширити на рівні мікро– та нанозон виробу. Обґрунтовується доцільність створення багат шарових плівкових покриттів, у тому числі, алмазних, що володіють властивостями добре відводити тепло із зони різання, демпфувати динамічні випадкові навантаження верхівки різця, створювати умови для мінімізації адгезійного зчеплення зі стружкою, що набуває особливої актуальності при різанні сучасних неметалевих конструкційних матеріалів і композитів. Маємо змогу також переходити до кластеризації поверхневого шару, потрібної при виконанні певних обробних операцій.

Автор роботи [45] розглядав випадок, коли технологічний процес обробки деталі складається з кількох операцій  $Q_i$ , кожна з яких реалізується на окремих переходах  $P_{ij}$ , послідовне їх виконання приводить до формування на заготовці ряду елементів  $E_i$  (рис.1.11, а) та набуття нею вигляду, вираженого якісними та кількісними ознаками функцій. При цьому реалізація окремих переходів ( $P_{ij}$ ) веде до появи як корисних, так і нейтральних та шкідливих функцій, створеними оброблювальними елементами як матеріальними носіями (рис.1.11, б).

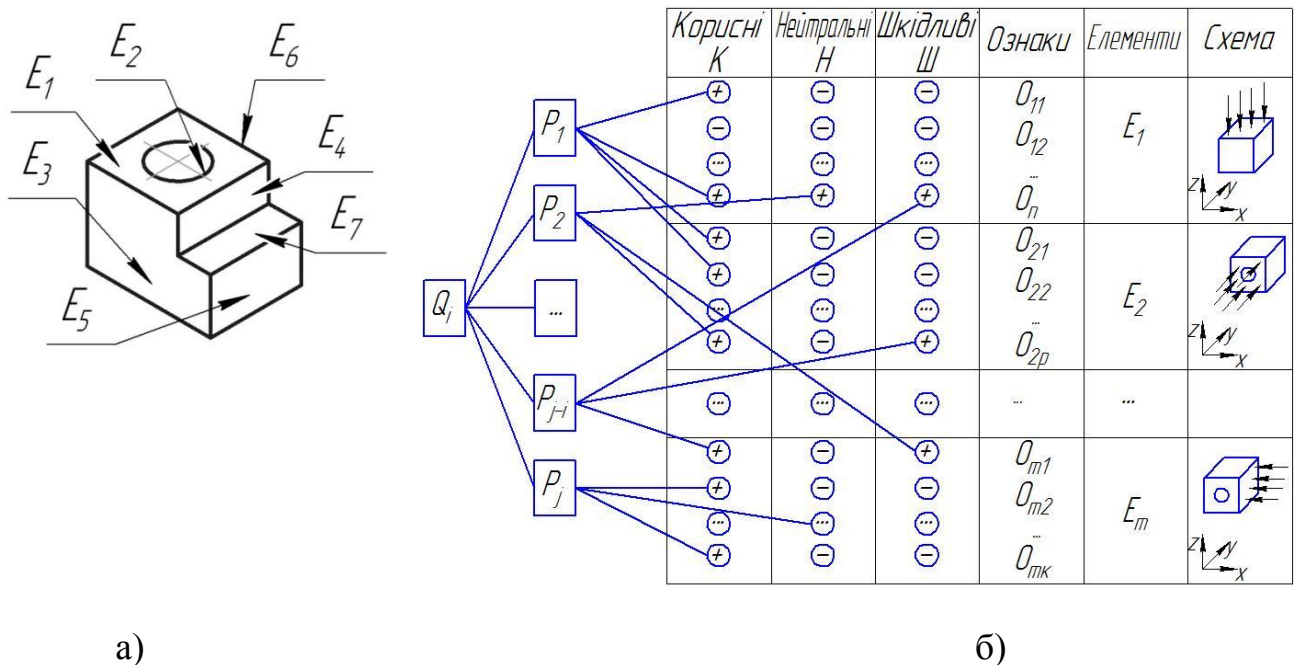


Рис.1.11. Елементи виробу, отримувані при реалізації технологічних операцій (а) та формування функцій операціями (б)

Подана схема дозволяє постулювати граф обумовленості функцій як елементами виробу, так і переходами технологічного процесу, внаслідок яких ці елементи формуються.

У цьому випадку технологічний процес як результат формування певних функцій виробу, виражених, наприклад, через параметри геометричної точності ( $IT$ ), дефектності ( $Td$ ) та шорсткості ( $Ra$ ) оброблюваних поверхонь можна уявити відповідно до схеми, поданої на рис. 1.10.

Припустимо, що вихідні ознаки формують масив значень  $B$ . Поділимо ознаки  $B_{ij}$  на ряд елементів  $L_k$ , утворених під час обробки на заготовці, які у сукупності множини будуть однозначно визначати ознаки  $B$  оброблюваної деталі.

Позначимо корисні властивості як  $K_m$ , нейтральні –  $N_p$ , шкідливі –  $S_u$ . Тоді, відповідно до [43], з сукупності можливих альтернатив обраних технологічних процесів кращим є той, який не передбачає виникнення шкідливих властивостей виробу, або має мінімальну кількість таких властивостей. При цьому формування корисних властивостей має відбуватися з мінімальними матеріальними затратами, а шкідливі властивості мають бути вилучені на наступних переходах, за можливістю, сполучених із переходами формування основних функцій виробу.

Досить часто визначати матеріальні носії технологічного впливу вдається на основі аналізу закономірностей процесів, що відбуваються у робочій зоні. Так, наприклад, в роботі [46] авторкою звернуто увагу на те, що важливою проблемою при обробці композитів, особливо карбон–карбонкової групи, є виділення тепла. Причиною є висока відновлюваність навантаженого та поверхнево–деформованого шару, внаслідок чого в місці контакту інструменту з матеріалом виділяється теплота  $q = fpv$ , де  $f$  – коефіцієнт тертя;  $p$  – контактний тиск;  $v$  – швидкість ковзання. Це також зазначено і в роботі [47].

Утворене одномірне температурне поле отримують на основі рішення диференційного рівняння  $q = q_0 A = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x}(0, t)$ ,  $T(x, t) = \frac{2q\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right)$  і для напівнескінченного простору визначається так:

$$T(z, t) = \frac{2Aq_0\sqrt{\alpha_T}}{\lambda_T} \left[ \sqrt{t} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right) - \sqrt{t-\tau} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T(t-\tau)}}\right) \right]$$

Саме тому в роботі О.О.Ченчевої [46] пропонується обробку композитів виконувати виключно в умовах циклічно–періодичного навантаження, коли не тільки змінюється напруження у зоні контакту, а і забезпечується активне відведення продуктів руйнування. Такі умови можна забезпечувати як шляхом спрямованої дії на інструмент, так і підведенням додаткової енергії у зону механічного впливу.

В.М. Орел [48] пропонує створювати додаткове навантаження в зоні різання, на яку впливає різальний інструмент (тепер – водоабразивний струмінь), яке викликатиме появу розтяжних напружень у площині, перпендикулярній до осі дії різальної сили.

Утворені напруження, що одночасно залежать від струминного навантаження мікроділянок поверхні у зоні різання та від рівня попереднього навантаження зони різання, наприклад, від прикладення відповідних зусиль  $P$  до торця оброблюваної листової заготовки розмірами  $b \times l \times h$ , за умови початкової відсутності тріщин, у функції часу становитимуть

$$\bar{\sigma}(t) = \sqrt{\left(\frac{R_c}{f_k} \cos \alpha\right)^2 + \left(\frac{P \sin \omega t}{(b-l)h}\right)^2}$$
, що викликатиме випереджаюче зростання

мікротріщин від величини  $a_0$  до 
$$h_d = v \frac{a_0}{\sqrt[n/2-1]{1 - \frac{C Q_m d_c}{\xi(N) m s_k k}}}$$
,

де  $N$  – кількість циклів навантаження;  $C = a_0^{n/2-1} \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^n \left(\frac{\rho}{\bar{c}}\right)^n$ ,  $K = \frac{1}{\sqrt{\pi(n/2-1)}}$ ,  $v$  –

коефіцієнт Пуассону;  $a_0$  – початкове пошкодження поверхні;  $\rho$  – густина матеріалу;  $n$ ,  $\bar{c}$  – константи матеріалу;  $s_k$  – швидкість контурної подачі;  $Q_m$  – витрата абразиву;  $m$  – середня маса однієї абразивної частинки,  $d_c$  – діаметр струменя,  $\sigma$  – створювані в зоні різання напруження.

Дослідженнями встановлено, що зменшення опору руйнування гідроабразивному різанню відбуватиметься як внаслідок зниження міцності

матеріалу  $T$ ,  $T=k\sigma_m$ , що відповідає рівнянню  $Q = 0,106 \cdot \left(\frac{p}{100}\right)^{2,4} \cdot d_c^{-0,27} \cdot h^{-0,35} \cdot \left(\frac{T'}{100}\right)^{-0,75}$ ,

де  $p$  – тиск витікання, МПа;  $d_c$  – діаметр струминної насадки, мм;  $h$  – товщина оброблюваного матеріалу, мм;  $T'$  – міцність матеріалу,  $T' = k(\sigma_p - \sigma_a)$ ,

так і за рахунок явищ тріщиноутворення, за якими  $l(t) = l_{\max} + \frac{K \left[2 + \alpha \left(1 - \frac{\beta}{2}\right)\right]}{\Delta \sigma_d^2 \sqrt{\pi}} dN$ ,

причому  $dN$  є функцією часу і визначається частотою коливань навантаження.

Зміна частоти прикладання навантаження  $N$  в діапазоні 5–50 Гц показала наступне. Зі зростанням частоти прикладання навантаження усереднена швидкість зростання тріщин за кожен наступний цикл різко сповільнюється, з одночасним зростанням сітки тріщин. В цьому випадку тріщини біфуркують, поширюючись у різні напрями відносно лінії дії силового навантаження.

В роботі [49] наводяться також відомості стосовно використання функціонально–орієнтованого підходу в адитивних технологіях, зокрема, технологіях FDM–друку. Показано, що такий підхід дозволяє виявляти раціональні способи викладення філаменту, формувати певні кластери поверхні, що володіють магнітними або струмопровідними властивостями.

Таким чином, можна констатувати, що функціонально–орієнтований підхід є дієвим високоефективним методом створення обробних процесів, особливо тих, які пов'язані з кінцевим формоутворенням виробів із композиційних матеріалів.

Те саме стосується і формування заданих властивостей поверхневих алмазовмісних шарів в інструментах для обробки композиційних матеріалів або пластинах адгезійного зчеплення, які використовують для 3–D друку.

### 1.3. Підвищення ефективності процесів за рахунок комбінування та гібридизації обробки на основі функціонального підходу

Використовувані нині алмазні інструменти призначені переважно для обробки широкої гами високоміцних матеріалів, кераміки, граніту тощо. Маючи досить тонкий шар алмазів, інструменти забезпечують надійне оброблення на операціях розрізання, шліфування, вибірки пазів у випадку, коли машинний час не перевищує кількох десятків секунд. Тривалі операції при обробці матеріалів без водяного або рідинного охолодження (наприклад, при розрізанні вуглець–вуглецевих заготовок щільного армування) приводять до того, що алмазовмісний шар активно засалюється, а поверхня різання деструктує, внаслідок чого зона різання різко розігрівається (про це зазначено в роботах Метак Аль Ібрахімі [50], [51]) і процес різання може припинитися. Дослідження стану поверхні різального інструменту доводить, що при цьому кількість алмазів різко скорочується, а сама поверхня вкривається шаром адгезійного шламу (рис. 1.12).

В цілому процес втрати працеспроможності інструменту (алмазного круга) виглядає, як подано на рис. 1.13 – 1.14.

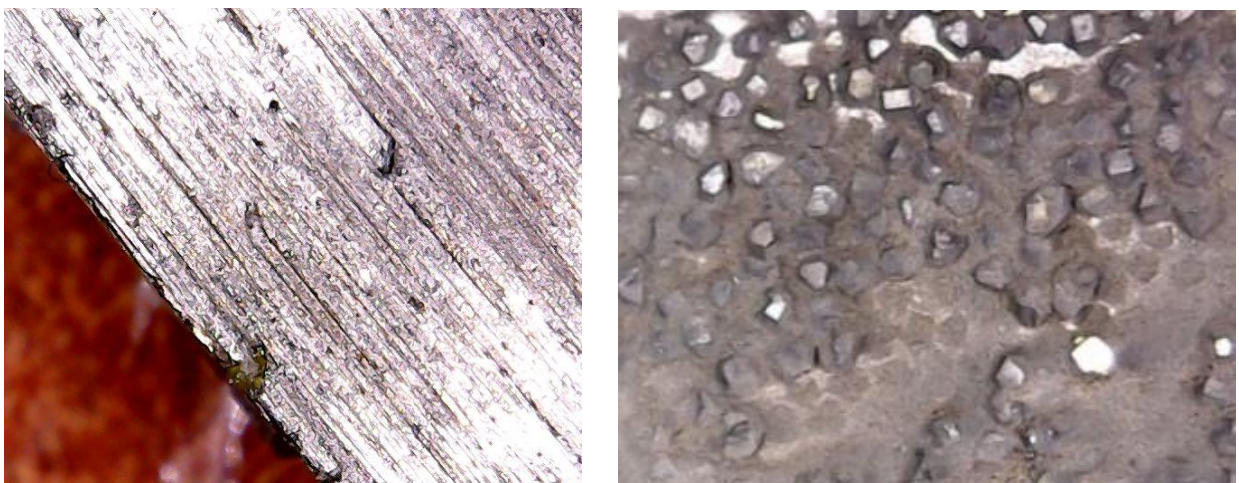


Рис. 1.12. Круг із втраченими алмазними зернами та засалена поверхня круга

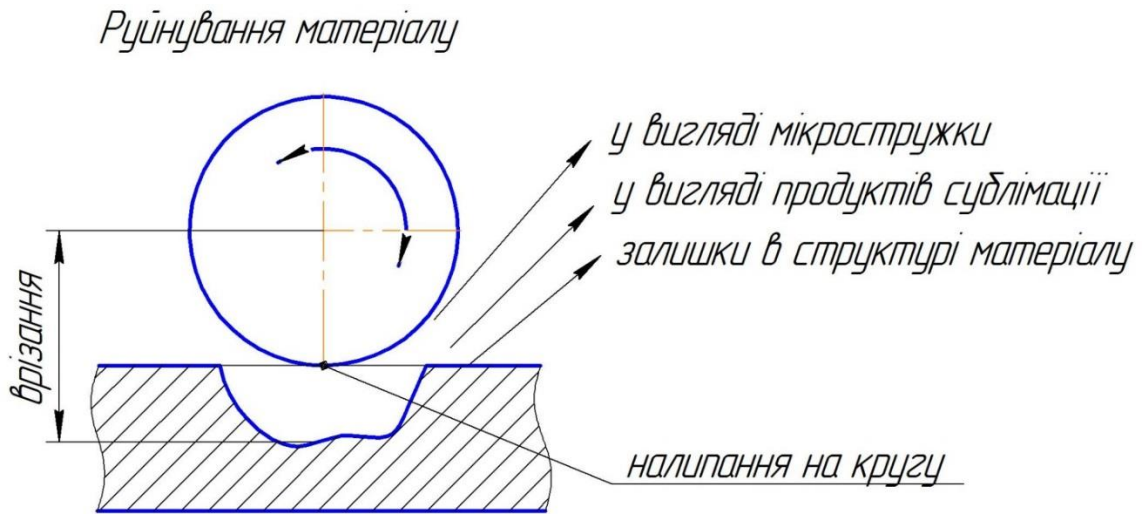


Рис. 1.13. Схема руйнування матеріалу алмазовмісним інструментом

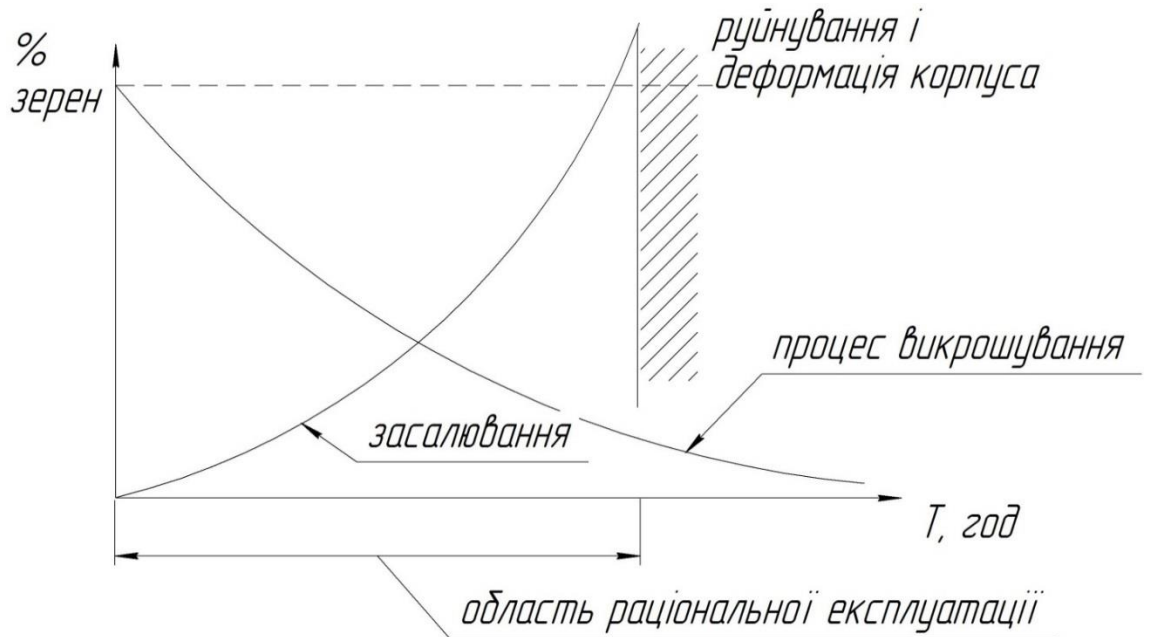


Рис. 1.14. Зміна різальних властивостей інструменту протягом часу експлуатації



Із наведених діаграм стає очевидним, що процеси засалювання та деградації поверхні круга є взаємодоповнюючими, внаслідок чого деякі операції розкрою (зокрема карбонових матеріалів) супроводжуються значним виділенням шкідливих речовин у повітря, зниженням якості та точності обробки, зростанням товщини деструктивного шару. Те саме можна зазначити і про розділові операції початкових заготовок спечених матеріалів, які мають значні перетини різу (до 350–400 мм) і для яких використання алмазовмісного дроту є також ускладненим.

Використовувані нині алмазні інструменти призначені переважно для обробки широкої гами високоміцних матеріалів, кераміки, граніту тощо. Їх дослідженням займалися, зокрема, G. Mittal, K.Y. Rhee, A.S. Yuanyushkin, D.A. Rychkov, D.V. Lobanov, М.Ф. Семко, Г.В. Шабалін, П.С. Редько, Е.М. Левенберг, А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович, Б.А. Перепелиця, В.І. Лавріненко та ін. ([52]-[56]). Тривалі операції при обробці матеріалів без водяного або рідинного охолодження (наприклад, при розрізанні вуглець–вуглецевих заготовок типу КІМФ) приводять до того, що алмазовмісний шар активно засалюється, а поверхня різання деструктує; збільшується шламоутворення.

Аналіз робіт [54, 55, 56] доводить, що підвищити надійність процесу можна за рахунок зміни умов обробки. Однак у цьому випадку таке рішення потребує використання спеціального або гібридного інструменту [57].

Автори зазначають, що формування властивостей виробу здійснюється шляхом виконання ряду технологічних переходів, при яких відбувається повна або часткова зміна початкових властивостей виробу (заготовки). Технологічні перетворення заготовки у виріб здійснюються цілеспрямованою сукупністю технологічних впливів  $W_{ij}(t_k)$  матеріального  $S_o(t_k)$ ,  $S_o(t_k) \in R_{nj} \cap M_{nj}$ , енергетичного  $E_o(t_k)$  та інформаційного  $I_o(t_k)$  типів, що дає змогу записати:

$$W_{ij}(t_k) = S_o(t_k) \cup E_o(t_k) \cup I_o(t_k).$$

Якщо взяти до уваги, що технологічні впливи інструменту на виріб мають здійснюватися на кількох рівнях одночасно, то реалізації технологічних впливів відобразиться матрицею виду:

$$A_3^H = \left\| \begin{array}{cccccccccccc} \Pi_{11}^s & \Pi_{12}^s \dots & \Pi_{21}^s & \Pi_{22}^s \dots & H_{11}^s & H_{12}^s \dots & H_{21}^s & H_{22}^s \dots & E_{11}^s & E_{12}^s \dots & E_{21}^s & E_{22}^s \dots \\ \Pi_{11}^t & \Pi_{12}^t \dots & \Pi_{21}^t & \Pi_{22}^t \dots & H_{11}^t & H_{12}^t \dots & H_{21}^t & H_{22}^t \dots & E_{11}^t & E_{12}^t \dots & E_{21}^t & E_{22}^t \dots \\ \Pi_{11}^v & \Pi_{12}^v \dots & \Pi_{21}^v & \Pi_{22}^v & H_{11}^v & H_{12}^v \dots & H_{21}^v & H_{22}^v \dots & E_{11}^v & E_{12}^v \dots & E_{21}^v & E_{22}^v \dots \end{array} \right\|,$$

де  $\Pi_{11}^s, \Pi_{12}^s, \dots; \Pi_{21}^s, \Pi_{22}^s, \dots; \Pi_{11}^t, \Pi_{12}^t, \dots; \Pi_{21}^t, \Pi_{22}^t, \dots; \dots \Pi_{11}^v, \Pi_{12}^v, \dots; \Pi_{21}^v, \Pi_{22}^v, \dots; \dots$  – варіанти переривчастих технологічних впливів за відповідними осями  $s, t$  та  $v$  системи координат  $s, t, v$ ;  $H_{11}^s, H_{12}^s, \dots; H_{21}^s, H_{22}^s, \dots; \dots; H_{11}^t, H_{12}^t, \dots; H_{21}^t, H_{22}^t, \dots; \dots; H_{11}^v, H_{12}^v, \dots; H_{21}^v, H_{22}^v, \dots$  – різні варіанти безперервних технологічних впливів за відповідними осями  $s, t$  та  $v$  системи координат  $s, t$  и  $v$ ;  $E_{11}^s, E_{12}^s, \dots; E_{21}^s, E_{22}^s, \dots; \dots$  – варіанти разових технологічних впливів.

Тож альтернативами виконання технологічних впливів може бути застосування засобів інтегрованої дії (обробка гібридним інструментом) або, навпаки, використання інструментів диференційованої дії (коли один ФЕ формується кількома діями), рис. 1.15.

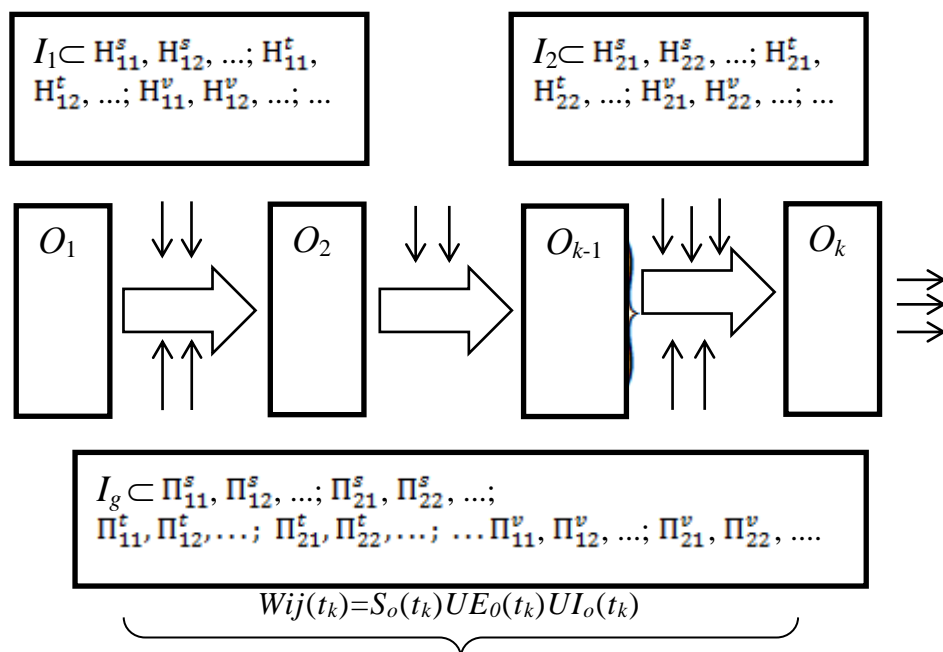


Рис. 1.15. Приклад формування властивостей виробу диференційним або інтегрованим способами

У випадку, якщо ФЕ виробу  $E_m$  отримується при реалізації переривчастих технологічних впливів  $\Pi_{ij}^t$  і  $\Pi_{ij+k}^t$  із одночасним використанням  $k$  інструментів, то застосування одного (гібридного) інструменту відповідатиме  $R_{nj} = \bigcap_{i=1}^{\rho_i} R_{si}$ , де  $R_{nj}$  – поле утворених нових видів інструментів;  $R_{si}$  –  $i$ -я сукупність відомих технічних рішень;  $\rho_i$  – вагомість підмножини відомих рішень. І навпаки, формування ФЕ кількома технологічними впливами відповідає умові  $M_{nj} = \bigcap_{i=1}^{\rho_i} M_{si}$ , де  $M_{nj}$  – поле утворених нових видів технологічних впливів.

На основі вище викладеного розглянуто виготовлення дослідного зразка розмірами  $b \times l \times h$  з кубічної заготовки розмірами  $B \times L \times H$ , причому зразок має криволінійні ділянки з радіусами  $r_i$ .

Позначивши  $R_1$  – фрезерування;  $R_2$  – обробку абразивним кругом;  $R_3$  – обробку засобами зворотно–поступального руху (реноватор);  $R_4$  – свердлування;  $R_5$  – гідроабразивне різання, автори запропонували такі можливі операції:  $(R_2)$ – $(R_1)$ ;  $(R_2)$ – $(R_5)$ ;  $(R_2)$ – $(R_4)$ – $(R_5)$ . При оптимізації процесу за критерієм мінімізації часу обробки для заданого рівня якості отриманий варіант  $(R_2)$ – $(R_4)$ – $(R_5)$ , схема якого представлена на рис.1.16.

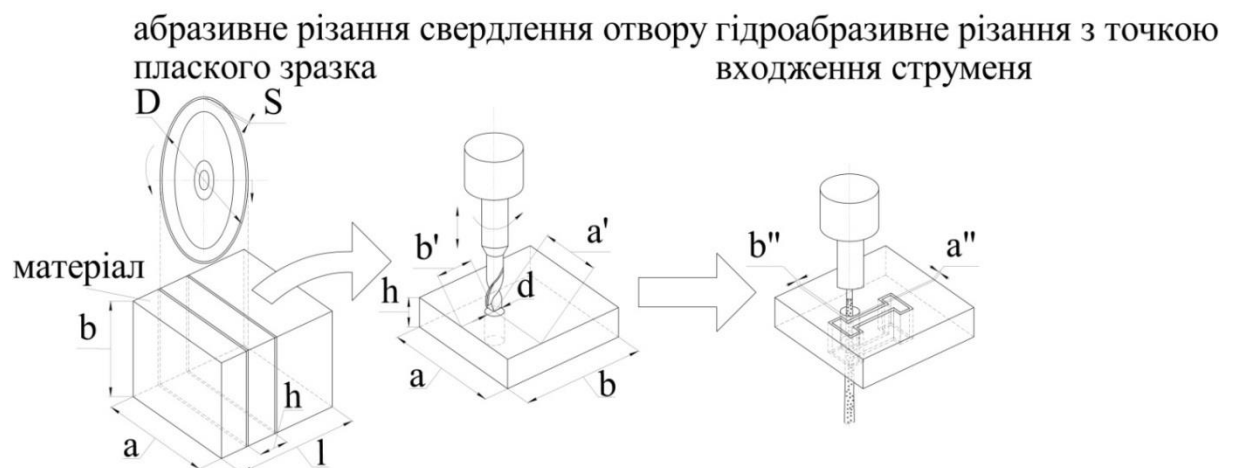


Рисунок 1.16. Послідовність виготовлення виробів із матеріалу КІМФ

Така послідовність операцій дозволяє максимально повно використовувати всі переваги гідроабразивного різання (значне скорочення часу обробки) і уникнути деструкції матеріалу в момент пробою струменем.

Однак на першому етапі брусканий матеріал має поділятися на пластини, з яких у подальшому отримують заготовки заданої форми товщиною  $h$ , що дорівнює товщині пластин.

Виконання внутрішнього контуру для заготовок значної товщини вимагає попереднього свердлування; у протилежному випадку необхідності отримувати отвір немає, а різання розпочинають із вільного торця.

#### 1.4. Особливості формування алмазовмісних шарів на робочих поверхнях та можливості їх комбінування

Раніше нами було показано, що гібридизація та комбінування впливу може істотно підвищити ефективність обробки, особливо коли необхідно обробляти композиційні матеріали.

Очевидно такий підхід може застосовуватися і для абразивного інструменту (кругів, пилок реноватора, кільцевих свердел). При цьому формування окремих кластерів робочої поверхні, поділ її на зони різного силового, температурного та динамічного навантаження дозволить не тільки скоротити втрату абразивних зерен під час обробки (відповідно до рис. 1.13), а й підвищити час його стійкості, особливо при обробці спеціальних композиційних матеріалів.

Розглянемо типові процеси нанесення алмазного шару на поверхні інструментів. Відомі різні способи виготовлення алмазного інструменту (рис. 1.17) [58]. Наведені технології розрізняються способами формоутворення ріжучих поверхонь, способами закріплення абразивних зерен, видами матеріалів зв'язок. Будь-який з перерахованих способів має свої переваги та недоліки, області доцільного застосування. При виготовленні алмазного

інструменту застосовують обмежену кількість зв'язок, що містять в якості основи тільки легкоплавкі компоненти з температурою плавлення не вище 700 °С.

Однак на практиці для виготовлення алмазних інструментів використовують в основному три види технологічних процесів: гальванічне закріплення алмазів; методи порошкової металургії (гаряче пресування і брикетування); методи вакуумної технології (дифузійне зварювання алмазних зерен) [59].

Існують також і альтернативні технологічні процеси, зокрема, пошарове лазерне спікання і надзвукове плазмове наплення алмазного покриття.



Рис. 1.17. Способи виготовлення алмазного інструменту

Значне поширення при виготовленні алмазного інструменту отримав *метод порошкової металургії*, що полягає в пресуванні, спіканні гарячого допресування алмазовмісної суміші.

Інструменти, отримані за даною технологією, виготовляються на металевій зв'язці, як правило, використовується зв'язка міді з оловом (M1), яка ретельно перемішується з порошком алмазу. Далі цю суміш засипають у металеву прес-форму, пресують і одночасно спікають під тиском при температурі близько 680–700 °С. При даній технології виходить композит з рівномірно розподіленими запресованими алмазними зернами по всій металевій зв'язці. Зв'язка M1 утримує зерна до їх затуплення, а потім вони вириваються з поверхні при першому періоді зносу. При виготовленні свердел методом порошкової металургії, зусилля виривання зерна зв'язки є невеликим. При цьому стає можливим прогресивний лавиноподібний знос. Крім того, велика товщина ріжучої кромки значно знижує продуктивність обробки і підвищує витрату алмазів [60].

Свердла, виготовлені методом порошкової металургії, мають хорошу працездатність, але відносно невисоку стійкість (1500 – 2000 отворів в склі товщиною 5 мм) і крайкостійкість, так як коефіцієнт використання алмазу становить не більше 5–6%. Продуктивність обмежена можливістю виникнення лавиноподібного зносу при форсуванні режимів свердління. Спроби підвищити адгезійну здатність зв'язки M1, тобто силу утримання зерна за рахунок металізації алмазних зерен для свердел малих діаметрів не принесли істотних успіхів.

Причинами низької стійкості і крайкостійкості свердел на зв'язці M1 є відносно невисока гранична концентрація алмазних зерен (не більше 150%) при недостатній силі їх утримання в матриці інструменту.

Переваги порошкового інструменту полягають у стабільності властивостей при зносі інструменту; його відносної довговічності, м'якості шліфування, у зв'язку з тим, що відстані між зернами сприяють виходу відпрацьованого матеріалу з робочої зони. Недоліки порошкового інструменту: недостатня концентрація алмазних зерен на поверхні і за обсягом зменшує його продуктивність майже в 2 рази порівняно з гальванічним інструментом; трудомісткість виготовлення.

*Технологія вакуумно-дифузійного зварювання алмазних зерен.*

Ці свердла виготовляються методом просочення в неметалевих прес-формах. Метод полягає в з'єднанні попередньо металізованих алмазних зерен розплавом зв'язки. При температурі понад 1000°C у вакуумному середовищі відбувається з'єднання металізованих зерен з металевою зв'язкою.

Сутність методу полягає в з'єднанні металізованих алмазних зерен розплавом зв'язки. Алмазні зерна попередньо металізуються нікелем, титаном або молібденом. Відомо [61], що титан і молібден володіють високою адгезійною здатністю до алмазу і їх з'єднання призводить до утворення карбідів. Далі ці покриття взаємодіють з елементами зв'язки: міддю, марганцем, нікелем, в результаті чого відбувається утворення нових фаз на контактних межах і сприяє істотному підвищенню експлуатаційних властивостей алмазно-абразивного інструменту.

Форма із засипаними алмазами поміщається в вакуумну піч, де при температурі понад 1000 °C відбувається заповнення залишку вільного простору сплавом і дифузійне зварювання металізованих зерен один з одним. При зварюванні алмазних зерен у вакуумному середовищі при температурі близько 1000 °C між зернами і зв'язкою виникають хороші адгезійні зв'язки, підвищується термостійкість. Дослідження роботи інструменту показали, що фізико-механічні властивості матриці запропонованого інструменту відповідають умовам крихкого руйнування вершин зерен і прилеглих ділянок зв'язки. Саме цим, у першу чергу, пояснюється висока стійкість і

кромкостійкість нового інструменту. Гранична концентрація до 250 % і монолітна упаковка алмазів, особливості технології дозволяють виготовляти інструмент будь-якої форми з розмірами від 1 мм. Технологія виготовлення забезпечує однакову працездатність інструменту по всьому об'єму ріжучої частини. У процесі досліджень були отримані основні фізико-механічні дані про металевих композиціях "металева зв'язка-алмаз".

Створений таким чином алмазний інструмент поєднує в собі не тільки хороші ріжучі властивості гальванічного інструменту і довговічність пресованого, але і має ряд переваг:

- високу зносостійкість (наприклад, свердло діаметром 6 мм забезпечує обробку не менше 6000 отворів в склі товщиною 5 мм);
- стабільність ріжучих властивостей за рахунок багаторазового поновлення алмазного шару.

Технологія *гальванічного закріплення зерен алмазу* – з усіх способів закріплення алмазів технологія гальванічного закріплення зерен є найбільш простою і дешевою. Ця технологія розроблена на основі електролітичних властивостей речовин. Матеріал, на якому створюється алмазний шар занурюють у розчин електроліту з алмазної сумішшю, потім через електроліт пропускається електричний струм і на робочій поверхні можна отримати алмазний шар 0,3 мм від його товщини [62].

Найбільш перспективним і ефективним способом виготовлення згаданих вище універсальних інструментів є *спосіб пошарового лазерного спікання* порошкових композитів.

Як джерело нагріву лазерне випромінювання має ряд значних переваг. Воно дозволяє за рахунок високої швидкості безконтактного введення енергії в матеріал і її прецизійного дозування здійснювати надшвидкісне нагрівання локальних областей матеріалів в широкому діапазоні температур. Це дає можливість, по-перше, використовувати при спіканні значно більш широкий спектр зв'язок, в тому числі і таких, які вимагають температуру нагрівання, що значно перевищують граничні, наприклад, відповідні початку окислення алмазів, по-друге, забезпечити металургійну зв'язку між алмазовмісним



шаром і сталевим корпусом інструменту, що зумовлює підвищення його міцності. Висока локальність процесу дозволяє пошарово формувати одно – або багаторядні алмазовмісні робочі елементи і таким чином отримувати інструменти практично будь-якої конфігурації, досить легко керувати концентрацією складових композитів, здійснювати термічне зміцнення зв'язки, отримувати структури, що мають високу дисперсність.

Методично дана задача вирішувалася двома способами – прямим опроміненням зерен алмазів, розташованих на графітовій підкладці (рис. 1.18, а), і непрямим нагріванням алмазів при лазерному оплавленні різних порошкових матеріалів, які оточують і контактують з ними (рис. 1.18, б, в). Після лазерної обробки алмази випробовували на статичну міцність за стандартною методикою.

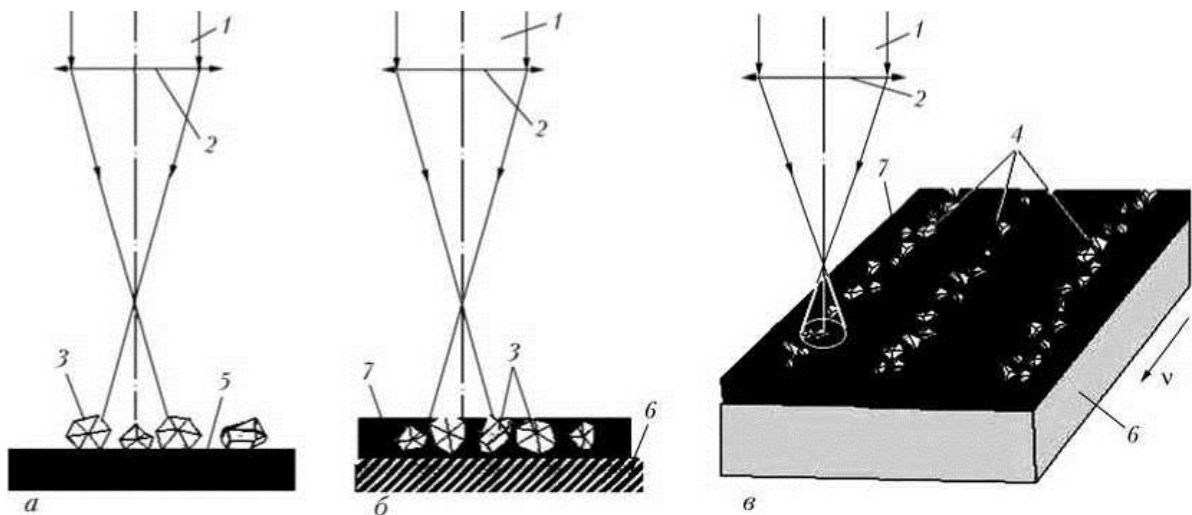


Рис. 1.18. Схеми опромінення алмазів:

а – пряме опромінення; б, в – розплавлення зв'язки з алмазами відповідно при різному часу експозиції і переміщаються щодо лазерного променя: 1 – лазерний промінь; 2 – лінза; 3, 4 – відповідно алмази та діаманти, занурені в зв'язку; 5, 6 – відповідно графітова і сталева підкладка; 7 – зв'язка

Пропонуються дві основні технологічні схеми спікання алмазовмісного композиту на конкретних інструментах, зокрема, на тонких відрізних колах, представлені на рис. 1.19.

Схема осьового пошарового нарощування алмазовмісного композиту

(рис. 1.19, а) передбачає реалізацію процесу спікання шляхом подачі в спеціальну полупрес-форму з розміщеним в ній корпусом відрізного круга і порошкової зв'язки з алмазами. Одночасно лазерний промінь, скануючий в радіальному напрямку, з амплітудою, що дорівнює ширині алмазозного шару, розплавляє крайку корпусу кола і металеву зв'язку.

При цьому частота сканування забезпечує квазінеперервність теплового потоку, інтенсивність якого достатня для розплавлення зв'язки.

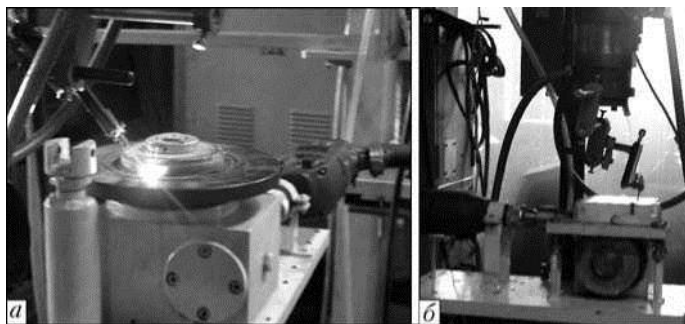


Рис. 1.19. Осьове (а) і радіальне (б) пошарове термодформаційне лазерне спікання алмазовмісного композиту на відрізних кругах

Закристалізована, але ще пластична зв'язка з алмазами по мірі переміщення прес-форми ущільнюється деформуючим роликком, формуючи необхідні розміри і профіль. Дана схема дозволяє реалізувати й інші варіанти організації процесу спікання.

Схема радіального пошарового нарощування (рис. 1.19, б) дозволяє реалізувати процес спікання однорядних і багат шарових алмазовмісних композитів. Вона реалізується шляхом подачі в зону дії лазерного променя, що переміщується між нерухомими матрицями, формує корпус кола порошкової зв'язки і алмазів. Розплавлена і закристалізована зв'язка ущільнюється деформуючим елементом. Формувальна матриця, що складається з двох напівматриць, має складні профілі, забезпечує можливість при своєму повороті регулювати висоту спікання шару.

Виконуючи аналіз можливості формування окремих зон поверхні, на

основі робіт P. M. Harrison, M. Henry, M. Brownell, Shin T., Lee D., Suzuki H., Moriwaki T., Yamamoto Y., Goto Y. Hong S, Akasishi M., Kanda H., Osawa T., Yamaoka S., Sibailly O.D., Wagner F.R., Mayor L., Richerzhagen B. висунуте припущення про перспективу застосування точкових процесів, що дозволяють формувати певні параметри поверхні (у тому числі, різальні властивості поверхневого шару). З цієї точки зору лазерне спікання внаслідок високої керованості процесу, можливості регулювання умов спікання та дозування алмазних зерен, а також локальності впливу (локалізація може сягати мікроскопічних ділянок поверхневого шару) може бути взятий за основу для реалізації функціонально–орієнтованого підходу до створення спеціального інструменту для оброблення певних видів сучасних композиційних матеріалів.

### 1.5. Висновки та постановка задач досліджень

Проведений аналіз довів, що сучасний розвиток виробництва вимагає все більшого використання нових композиційних матеріалів – конструкційний, жаротривких, спеціального призначення та ін., оброблення яких, у тому числі, алмазним інструментом, пов'язана з низкою проблем.

Останні обумовлюються наявністю у структурі композиту високоміцних армувальних волокон (вуглецевих або високо модульних скляних), що погіршують спроможність інструмента керовано впливати на зону обробки.

У той же час нами показано, що функціонально–орієнтований підхід, який застосовується, як правило, при створенні нових виробів, для мінімізації витрат на його виробництво, з успіхом перенесено на розробку нових обробних технологій, які дозволяють уявляти готовий виріб як сукупність функціональних зон, поєднаних у єдину систему.

Проводячи аналогію з процесами обробки матеріалів різанням, окремі дослідники довели перспективність використання зазначених підходів і до інших процесів, зокрема, струминного різання, обробки лазером та ін. При цьому закономірним виходом таких удосконалень є поява гібридного інструменту, здатного комплексно впливати на оброблюване тіло.

У той же час нами не виявлено систематизованої інформації щодо використання функціонально-орієнтованого підходу до створення інструментів комбінованої або інтегральної дії, що вимагає проведення комплексу досліджень у цьому напрямку.

Зважаючи на те, що нині для обробки армованих композиційних матеріалів використовується переважно алмазний інструмент, який внаслідок деградації змінює стан та різальні властивості, актуальною науково-технічною задачею є забезпечення сталості різання на основі керованого формування щільності, фракційності алмазовмісного шару різальної поверхні інструменту, що дозволить значно підвищити ефективність оброблення за рахунок створення раціональних умов взаємодії зерен окремих різальних ділянок інструменту з оброблюваним матеріалом. При цьому виходячи із принципів та основ функціонально-орієнтованого підходу розробка умов забезпечення ефективного оброблення створюваного матеріалу та прив'язка властивостей інструменту під конкретний вид композита є дієвим засобом встановлення умов викладення зерен алмазу, а використання методу лазерно-деформаційного спікання поверхневого шару дозволяє виконувати формування зазначених умов на рівні певних кластерів різальних поверхонь.

Таким чином, *метою роботи* є підвищення ефективності алмазно-абразивного інструменту для різання високоміцних композиційних матеріалів на основі раціонального формування щільності, фракційності елементів алмазовмісного шару робочої поверхні інструменту засобами ЛТДС.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити модель взаємодії інструменту із додатковими ступенями вільності з високоміцним армованим матеріалом, застосувавши механізм контактування алмазних зерен з порожнистим поверхневим шаром; здійснити аналіз відмінностей процесу різання за місцем та з плином часу.

2. Використовуючи морфологічний аналіз, удосконалити функціонально–орієнтований підхід до створення обробного алмазного інструменту (кільцевих свердел, полотен ренованора, алмазних струн), придатного для обробки високоміцних композиційних матеріалів.

3. Здійснити пошук раціональних умов різання на ділянках робочих поверхонь інструменту. Застосувавши поняття кластеру, визначити його параметри для ділянок, що відрізняються умовами різання. Встановити закономірності зміни параметрів шару та характеристик кластерів поверхні інструмента для забезпечення ефективної обробки.

4. Виявити умови та обмеження сполучень окремих кластерів між собою з метою утворення робочих поверхонь різального шару в цілому.

5. Адаптувати метод ЛТДС алмазного шару у вигляді поверхневих кластерів, встановити раціональні параметри кластерів.

6. Провести випробування ефективності пропонованих заходів, а також впровадження технології у діюче виробництво.

Розв’язок поставлених задач досліджень дозволить не тільки досягти поставленої мети, а і довести доцільність використання подібних функціональних технологій при виробництві інструменту, орієнтованого на обробку певної марки композиційного матеріалу.

**Об’єкт дослідження** – процес обробки карбон–карбонових композицій алмазно–абразивним інструментом із додатковими ступенями вільності.

**Предмет дослідження** – алмазно–абразивний інструмент, удосконалений за рахунок адаптації сформованих ЛТДС кластерів поверхні до умов їх роботи при різанні високоміцних композитів типу КІМФ.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ АЛМАЗНОГО ШАРУ НА ОСНОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПІДХОДУ

#### 2.1. Типові умови роботи виробів із алмазним шаром

Вироби з алмазовмісним шаром являють собою перед усім інструменти [67,68]. В окремих випадках це можуть бути спеціальні деталі, використовувані, наприклад, у якості накладок, проставок, вставок [69]. Авторами робіт [70] пропонується використовувати пластинки із алмазним покриттям для столів 3-д принтерів. Класифікація виробів із алмазними шарами та їх застосування подане на рис. 2.1. При цьому позначення інструменту у вигляді  $X^1X^200X^3$ , взятими за зазначеними на рис. 2.1, дає однозначну уяву щодо особливостей інструменту, а наступні числові позначки уточнюють посадковий діаметр, зовнішній діаметр, товщину та інші характеристики інструменту.

Силові навантаження алмазного шару при роботі інструменту істотно відрізняються й визначаються схемою взаємодії робочих поверхонь з оброблюваною заготовкою (рис. 2.2) [71]. Особливо це стосується неметалевих композиційних матеріалів, що володіють вираженою анізотропією властивостей, порожнистістю, наявністю у складі високоміцних волокон. Наприклад, при фрезеруванні (рис.2.2,а) поверхні пластинок, що утворюють різальні клини, створюють силу різання  $R$ , величина і напрямок якої визначається відносним рухом клину поверхнею заготовки, а також перетином стружки, що знімається. Останній безпосередньо визначається глибиною різання  $f$ . Залежно від цього параметру, більша або менша площа передньої поверхні сприйматиме силове (і відповідно, теплове) навантаження – ділянки  $1_p, 2_p, 3_p$ ; залежно від величини подачі та напрямку руху пластинки змінюватиметься і навантаження задньої поверхні (внаслідок пружного відновлення матеріалу після дії різального клину -  $1_z, 2_z, 3_z$ ). Змінюватимуться умови контакту і впродовж періоду стійкості  $T_m$ , зміни обумовлюватимуться явищами зношування.

Серія інструменту $X^1$	Клас інструменту ( $X^2$ )	Абразивність оброблюваного матеріалу	Застосування ( $X^3$ )
Turbo (T) турбокруг	Profi (P) Високоякісний тривалої експлуатації	Низькоабразивні (5–35)	Ручні кутові відрізні машини, реноватори (H)
Rim (R) Круг звичайної			Настільні верстати (T)
Segment (S) Круг сегментний			Шворізні машини (F)
Laser (L) Круг із лазерним спіканням	Standart (S) Стандартний, з лімітованим часом стійкості	Середньоабразивні (40–75)	Різання стін (W)
CUP (C) Фреза цільна			Каменеоброблювання (S)
Grinder (G) Фреза сегментна			Свердлувальні машини та дрилі (D)
Hole (H) Свердло кільцеве	Есо (E) Спрощений, з легкими умовами експлуатації	Високоабразивні (80–100)	Полірувальні-шліфувальні машини (N)
Drill (D) Свердло кільцеве сегментне			
String (S) Струна алмазна			
Renovator (B) Диск пильний			

Рис. 2.1. Класифікація алмазного інструменту

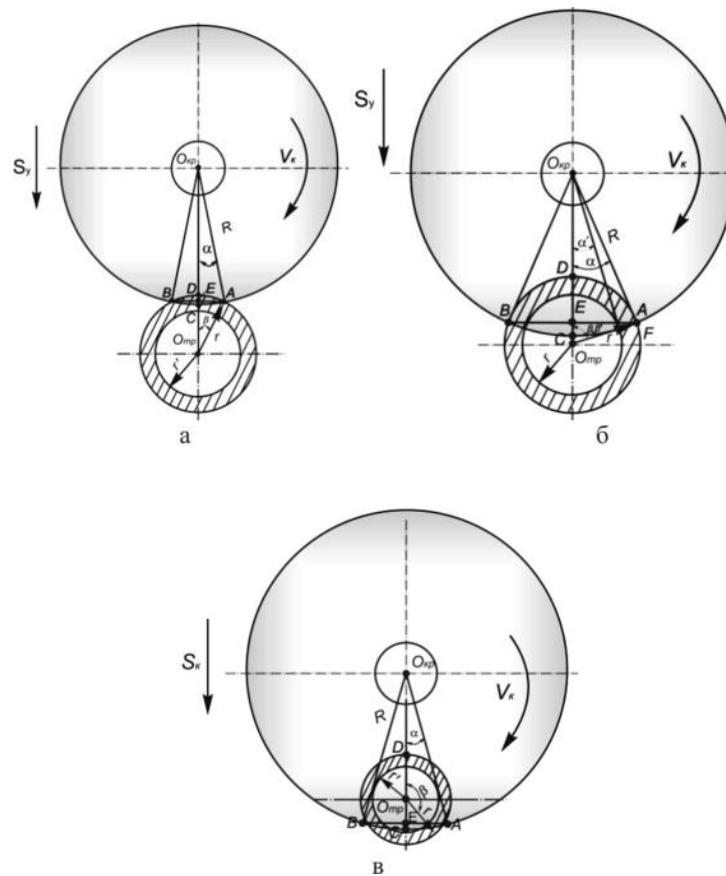
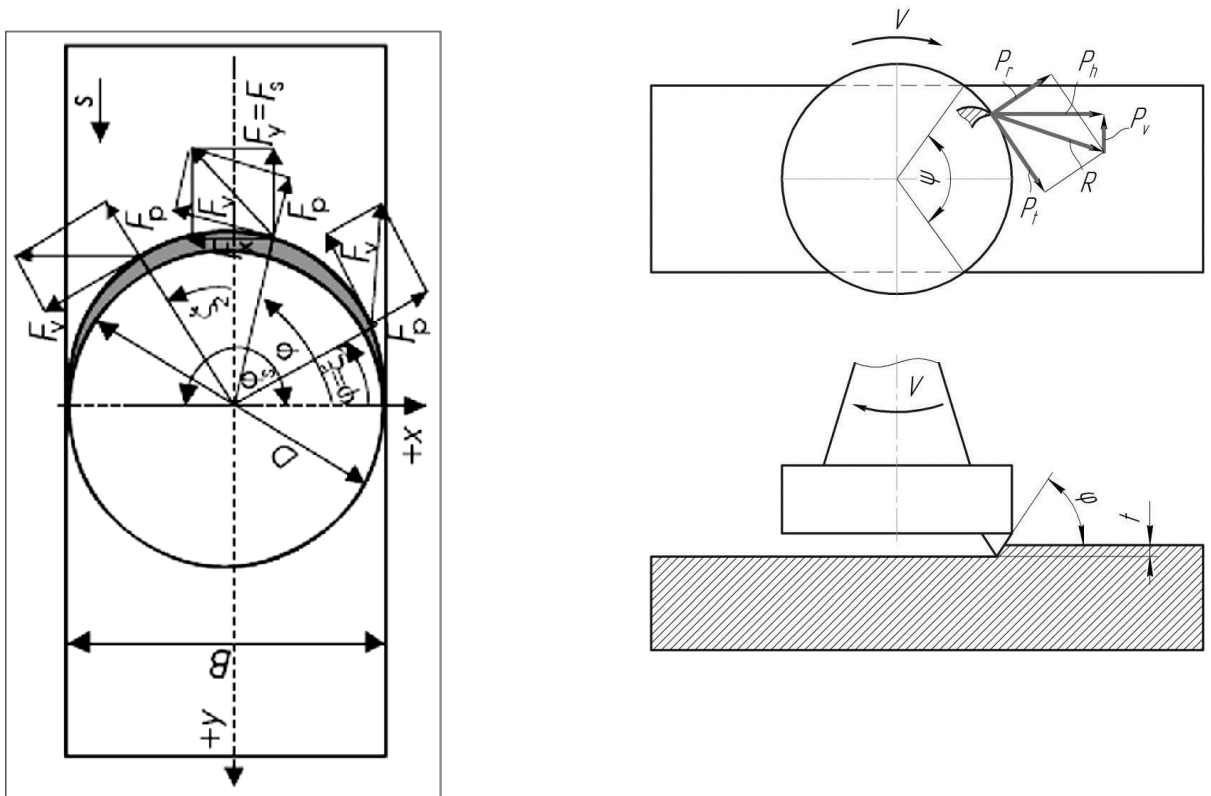


Рис. 2.2. Схеми роботи інструментів за [71], [72]



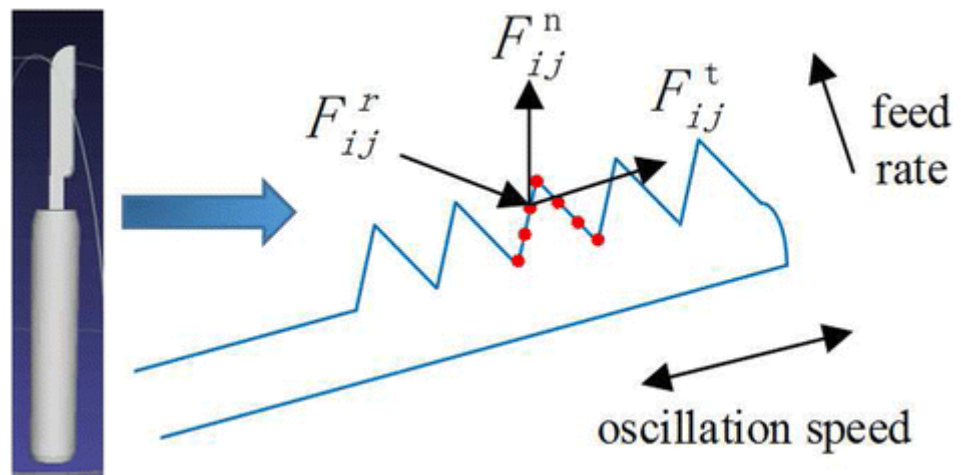
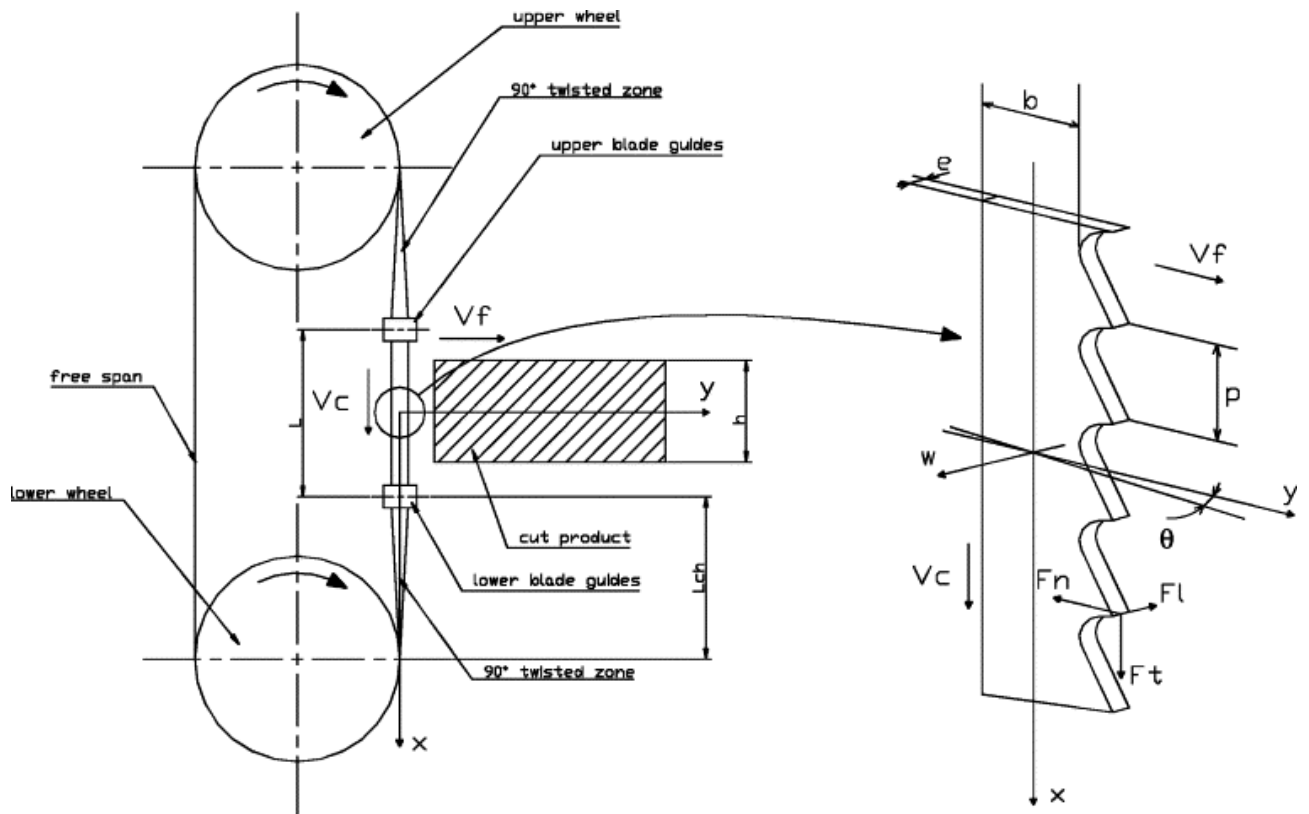


Рис. 2.2. продовження [73]

Таким чином, зміна умов контакту відбуватиметься як наслідок періодичного контакту, так і як наслідок процесів і явищ зношування. Для фрезерування (рис.2.1, а) для передньої  $P$  і задньої  $Z$  поверхонь, що являють собою площини різального клину, умови контакту описуватимуться рівняннями:

$$\begin{aligned}
 R_x, R_y, R_z &= f(R_0), \\
 R_o &= \frac{C_p t^{x_p} s_z^{y_p} Bz}{D^{q_p}}, \\
 R_i &= f(T, \alpha) = (R_o + v_R T) \cos(\omega t), \\
 t &= f(n), \\
 \sigma_p &= \frac{R}{f_k}, \sigma_z = \frac{R_y}{f_k}, \\
 T &< T_m, R_y = 0,55R_o
 \end{aligned}$$

Тобто, окрім періодичного силового навантаження (в момент входу пластинки в оброблювану заготовку і до її виходу), зміна геометрії пластинки веде до поступового зростання максимально діючих в системі сил. Істотних деформацій у системі СПЗ не відбувається.

На відміну від фрезерування різання матеріалів відрізними кругами відбувається з постійною зміною схеми взаємодії (рис. 2.2,б). Це максимально прослідковується при відрізання трубчатих заготовок, при якому положення точок АВЕД постійно змінюється від моменту врізання і до моменту виходу інструменту за межі заготовки. Сили різання, і, відповідно, напруження у поверхневому шарі визначатимуться за [72], і становитимуть

$$\begin{aligned}
 R_s &= C_p v^{x_p} s^{y_p} t^{z_p}, \\
 R_i &= f(T, \alpha) = R_o + v_R T \\
 \sigma_p &= \frac{R}{f_{kp}}, \sigma_b = \frac{R_y}{f_{kt}},
 \end{aligned}$$

причому  $f_{kp}, f_{kt}$  – площі контакту, що визначаються зануренням круга в тіло заготовки впродовж робочого циклу. Однак внаслідок того, що тепло,

виділене у зоні контакту, відповідно до [74] та [75] може призвести до деформації самого круга і до зростання сил різання на бокових поверхнях.

Так, інтенсивність тепловиділення на підставі [75] складе

$$q = fpv ,$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя (для карбону за умови лінеаризації на великих швидкостях  $f=0,18$ );  $p$  – контактний тиск;  $v$  – швидкість ковзання.

Контактний тиск визначається співвідношенням сили нормального навантаження ( $F$ ) до площадки контакту ( $s_k$ ). При дії нормальної сили у місці контакту напруження можуть бути визначені за відповідними формулами Герца, які для випадку контакту абразивного зерна (уявленого у вигляді сфери радіусом  $r_1$ ) та джгута волокон радіусом  $r_2$  становитиме  $\sigma = \frac{mF^{1/3} E^{2/3}}{r^{2/3}}$ ,

де  $m = 1 + \frac{r_1}{r_2}$ ,  $E$  – приведений модуль пружності,  $E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}$ ,  $r$  – приведений

радіус контакту,  $\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$ .

Вплив нерівномірного нагріву периферійної частини дискового інструменту радіусом  $R_1$  можна встановити, записавши відповідні рівняння

$$\begin{cases} \sigma_r - \sigma_\tau - r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0; \\ \varepsilon_r = \varepsilon_\tau + r \frac{d\varepsilon_\tau}{dr}. \end{cases}$$

Для нерівномірного нагрівання закон Гука може бути поданим у

такому вигляді: 
$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu\sigma_\tau) + \alpha T; \\ \varepsilon_\tau = \frac{1}{E} (\sigma_\tau - \mu\sigma_r) + \alpha T. \end{cases}$$

Рішення за [75] набуде вигляду:

$$\begin{cases} \sigma_r(r) = \frac{1}{4} \alpha E (T_2 - T_1) \left[ 1 + \frac{R_1^2}{R_2^2} - \frac{r^2}{R_2^2} - \frac{R_1^2}{r^2} \right]; \\ \sigma_\tau(r) = \frac{1}{4} \alpha E (T_2 - T_1) \left[ 1 + \frac{R_1^2}{R_2^2} - 3 \frac{r^2}{R_2^2} + \frac{R_1^2}{r^2} \right]. \end{cases} \quad (2.1)$$

де  $R_2$  – радіус нагріву інструменту.

Виникаючі на периферії напруження ведуть до появи радіальних та тангенціальних деформацій, причому останні визначаються як  $\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_t) + \alpha T$ , що за умови недостатньо нагрітого центра диску

викличе його викривлення на сторону на величину  $\delta = \pi r \sqrt{(1 + \varepsilon_r)^2 - 1}$ .

Для прогину  $\delta$  зусилля  $F_b$  складе  $\delta = \frac{F_b R_1^3}{3EJ_x}$ , тобто

$$F_b = \frac{3EJ_x}{R_1^3} \delta. \quad (2.2)$$

Таким чином, тиск по бічній поверхні становитиме

$$p = \frac{2F_b}{R_1^2(\alpha - \sin(\alpha))} = \frac{3EJ_x \delta}{R_1^5(\alpha - \sin(\alpha))}. \quad (2.3)$$

Тиск периферією визначатиметься так:

$$p = \frac{F}{bl}. \quad (2.4)$$

Стрічковий або струнний інструмент (рис. 2,в-д) належить до інструментів з нежорсткою основою та з додатковими ступенями вільностями; він працює як безперервний потік чергуючих різальних мікроклінів між якими існують пружні зв'язки. Тут система координат, пов'язана із окремим зерном, є рухомою відносно системи координат, пов'язаною із корпусом інструменту або з вихідним органом приводу

Різновидом подібного інструменту є пластини (леза), що працюють в осцилюючому режимі (рис. 2.2, д). Це так звані полотна ренованорів [76]. Оскільки такі інструменти мають високу пружну деформівність основи, їх також можна вважати інструментами із додатковими ступенями вільності.

Отже, силові навантаження алмазного шару при роботі інструменту істотно відрізняються і визначаються схемою взаємодії робочих поверхонь з оброблюваною заготовкою. Тобто маємо зміни як під час процесу різання, так і внаслідок прояву зношування інструменту, табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Змінність сил та умов різання при обробці композиційних матеріалів

Фрезерування	Відрізання кругами	Пильне полотно та струна	Свердлування
<p>Для передньої <math>P_i</math> і задньої <math>Z</math> поверхонь, що являють собою площини різального клину, умови контакту описуватимуться рівняннями:</p> $R_o, R_y, R_z = f(R_o),$ $R_o = \frac{C_p t^{x_p} s_z^{y_p} B z}{D^{q_p}},$ $R_i = f(T, \alpha) = (R_o + v_R T) \cos(\omega t),$ $t = f(n),$ $\sigma_p = \frac{R}{f_k}, \sigma_z = \frac{R_y}{f_k},$ $T < T_m, R_y = 0,55R_o$	<p>Сили різання, і, відповідно, напруження у поверхневому шарі становитимуть</p> $R_s = C_p v^{x_p} s^{y_p} t^{z_p},$ $R_i = f(T, \alpha) = R_o + v_R T$ $\sigma_p = \frac{R}{f_{kp}}, \sigma_b = \frac{R_y}{f_{kt}},$ <p>Тиск по бічній поверхні становитиме</p> $p = \frac{2F_g}{R_1^2(\alpha - \sin(\alpha))} = \frac{2F_g}{3EJ_x \delta}$ $= \frac{R^5(\alpha - \sin(\alpha))}{3EJ_x \delta}$ <p>Тиск периферією:</p> $p = \frac{F}{bl}$	<p>Оскільки змінна сила натягу полотна становить</p> $N(t) = N_o + \varepsilon N_1 \cos(\mu t)$ <p>де <math>N_1</math> та <math>\mu</math> - параметри, що визначаються умовами роботи пильного полотна і залежать від частоти взаємодії окремого зубця із поверхнею, а також від кількості зубців, що одночасно знаходяться у зоні контакту, переміщення і навантаження визначаються за диференціальними рівняннями</p> $\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\varepsilon}{(\omega + 0,5\mu)} \left[ \frac{\alpha H_2 \omega^2}{2} \sin 2\gamma + H_3 \cos \gamma \right]$ $\frac{d\gamma}{dt} = \omega - 0,5\mu - \frac{\varepsilon}{(\omega + 0,5\mu)} \left[ \frac{H_2 \omega^2}{2} \cos 2\gamma + \frac{H_3}{\alpha} \sin \gamma \right]$	<p>Нормальна і тангенціальна сила, що діє на свердло, за [77], визначається так:</p> $P_y = \left\{ \frac{\sqrt{3,25} a_3 \sin \beta}{\sin \beta_1} + 0,5b(z) \right\} \tau_3$ $P_z = \left\{ \frac{\sqrt{3,25} a_3 \cos \beta}{\sin \beta_1} + 0,5\mu b(z) \right\} \tau_3$

Порожниста структура високоміцного матеріалу має істотний вплив на умови взаємодії та на процеси і явища, що відбуваються в зоні різання нежорстким інструментом. Зазвичай високоміцний композиційний карбон-карбоневий матеріал 3-D структури має порожнистість 3–7%; а за трьома ортогональними напрямками волокна сполучені у джгути, діаметр кожного становить 1,25–1,8 мм; сполучення джгутів та волокон у єдину структуру виконується піровуглецем, отримуваним гарячим осадженням. Тоді для різання матеріалу алмазною струною схема взаємодії відповідатиме рис.2.3.

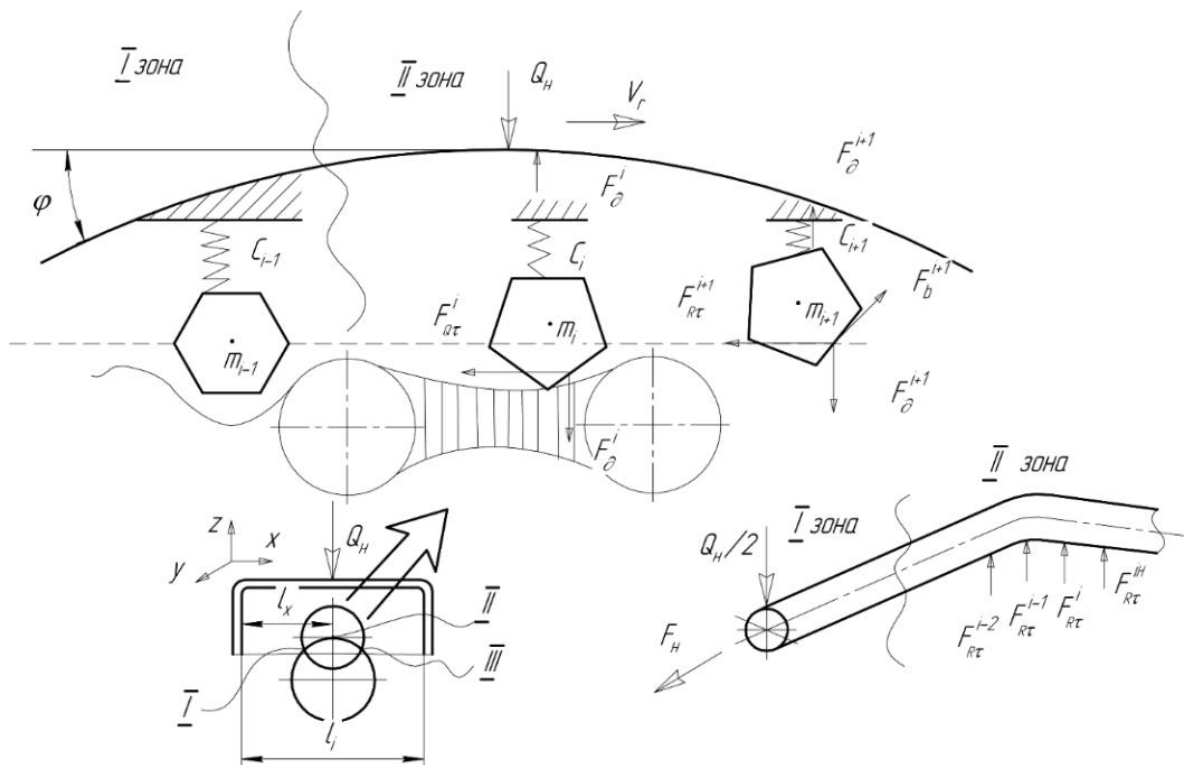


Рис. 2.3. Схема взаємодії алмазних зерен, розташованих на різальному полотні, з поверхнею заготовки

Нежорстка струна довжиною  $l_1$  під дією робочого навантаження  $Q_n$  та сил корисного опору  $F_n^i$  вигинається з кутом  $\varphi$ .

Сприйняття статичного розподіленого навантаження відповідає схемам рис. 2.4,а в початковий моменту часу і при зануренні (рис. 2.4,б).

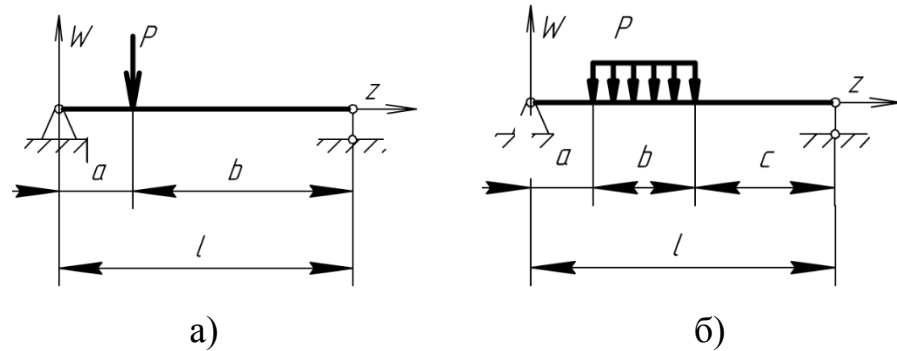


Рис. 2.4. Схема силового навантаження пильної стрічки: на початку контакту (а) та при зануренні (б)

При цьому рівняння пружної лінії на початковій ділянці становить

$$\varpi_z = -\frac{Pa^2b^2}{6EJl} \left( 2\frac{z}{a} + \frac{z}{b} - \frac{z^3}{a^2b} \right),$$

для зосередженого навантаження та для розподіленні (при зануренні)

$$\varpi_z = -\frac{qbl^3}{48EJ} \left[ 8\frac{d}{l} \left( \frac{z}{l} - \frac{z^3}{l^3} \right) - \frac{2ab^2}{l^3} - \frac{b^3}{l^3} + 2\frac{b^2}{l^2} \right], \quad (2.4)$$

де  $P$  та  $q$  – поперечні зосереджене та розподілене навантаження від сил різання з урахуванням попереднього натягу пильного полотна.

Для струни, опір якої на згин практично відсутній, натяг між кріпленнями визначиться за [73], [77]  $H = \frac{ql^2}{8f}$ ,  $f$  – максимальний прогин при прикладанні сили різання.

Оскільки зерна алмазів  $m_i$  закріплені на струні, яка має значну пружну деформівність, можна вважати, що між нерухомою системою координат  $XYZ$  та рухомою, сполученою із центром мас зерен, існує пружний зв'язок з параметром  $C_i$ .

Пильне полотно, як і струна з нанесеним алмазним шаром, схильне до впадання в автоколивальний режим. Вивчаючи особливості поведінки пильного полотна, що сходить із напрямних роликів, було встановлено, що вимушені поперечні коливання пильного полотна, яке неважко уявити у вигляді рухомого нежорсткого бруса із постійним перетином, задовільно описуються у змінних Ейлера диференціальними рівняннями у частинних похідних

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + 2\nu \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \nu^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{N(t)}{m} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = \varepsilon f(x, t), \quad (2.5)$$

де  $u(x, t)$  – поперечні переміщення полотна стрічкової пилки координатою  $x$  у плинний момент часу;  $\varepsilon$  – параметр малої збурюючої сили у порівнянні із силою дії  $\beta^2 = \frac{EI}{m}$ ;  $m$  – маса одиниці довжини пильного полотна;  $E$  – модуль пружності матеріалу;  $I = \frac{Bs^2}{12}$  – момент інерції перетину полотна відносно центральної осі;  $B, s$  – ширина та висота перетину пильного полотна;  $N(t)$  – змінна сила натягу пилки, що залежить від умов різання.

Для пилки, як і для струни, рішення поданого диференційного рівняння здійснюється для граничних умов, що мають вигляд:  $u = 0, x = 0, x = l; \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, x = 0, \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, x = l$ ,  $l$  – довжина секції, що аналізується.

Збурення умовами руху алмазних зерен нещільною поверхнею оброблюваної заготовки в цілому відповідає гармонійному закону

$$f(x, t) = H \sin(\omega t),$$

де  $H, \omega$  – амплітуда та частота збурень.

Зважаючи на те, що змінна сила натягу полотна за рахунок сил корисного опору при зворотно–поступальному русі може бути визначеною як

$$N(t) = N_0 + \varepsilon N_1 \cos(\mu t), \quad (2.6)$$

де  $N_1$  та  $\mu$  – параметри, що визначаються умовами роботи пильного полотна і залежать від частоти взаємодії окремого зубця із поверхнею (або від кількості зубців, що одночасно знаходяться у зоні контакту), а також від швидкості руху пилки. Система диференціальних рівнянь, що описують базові параметри вібрацій, має такий вигляд:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\frac{\varepsilon}{(\omega + 0,5\mu)} \left[ \frac{\alpha H_2 \omega^2}{2} \sin 2\gamma + H_3 \cos \gamma \right] \quad (2.7)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega - 0,5\mu - \frac{\varepsilon}{(\omega + 0,5\mu)} \left[ \frac{H_2 \omega^2}{2} \cos 2\gamma + \frac{H_3}{\alpha} \sin \gamma \right]$$



Розв'язок приведеної системи дозволяє визначити закони руху елементів пильного полотна у кутових координатах та встановити умови настання резонансних явищ. Окрім того, із врахуванням геометричних параметрів зони контакту, дозволяє визначити зміни робочих навантажень верхівок різальних клинів (для пильного полотна) та зерен алмазу.

При розробці моделі взаємодії вважатимемо, що використовуваний алмазний інструмент для обробки заготовок із матеріалів типу КІМФ володіє кінцевою жорсткістю, а пружне зміщення зерен алмазу при обробці відбувається виключно в площині дії сили подачі (вертикальна площина на рис. 2.5). Тоді порожниста структура матеріалу матиме істотний вплив на умови взаємодії та на процеси і явища, що відбуваються в зоні різання. При різанні композиційних карбон–карбонових матеріалів 3–D структури (рис. 2.6) беруть до уваги наступне [78]:

- структура матеріалу порожниста, із порожнистістю 3–7%;
- за трьома ортогональними напрямками волокна сполучені у джгути, діаметр кожного становить 1,25–1,8 мм;
- сполучення джгутів та волокон у єдину структуру виконується піровуглецем, отримуваним гарячим осадженням.

Основні властивості матеріалу подані в табл.2.2.

Тоді схема взаємодії інструменту з додактовими ступенями вільності відповідає рис.2.5; контакт – лінійний.

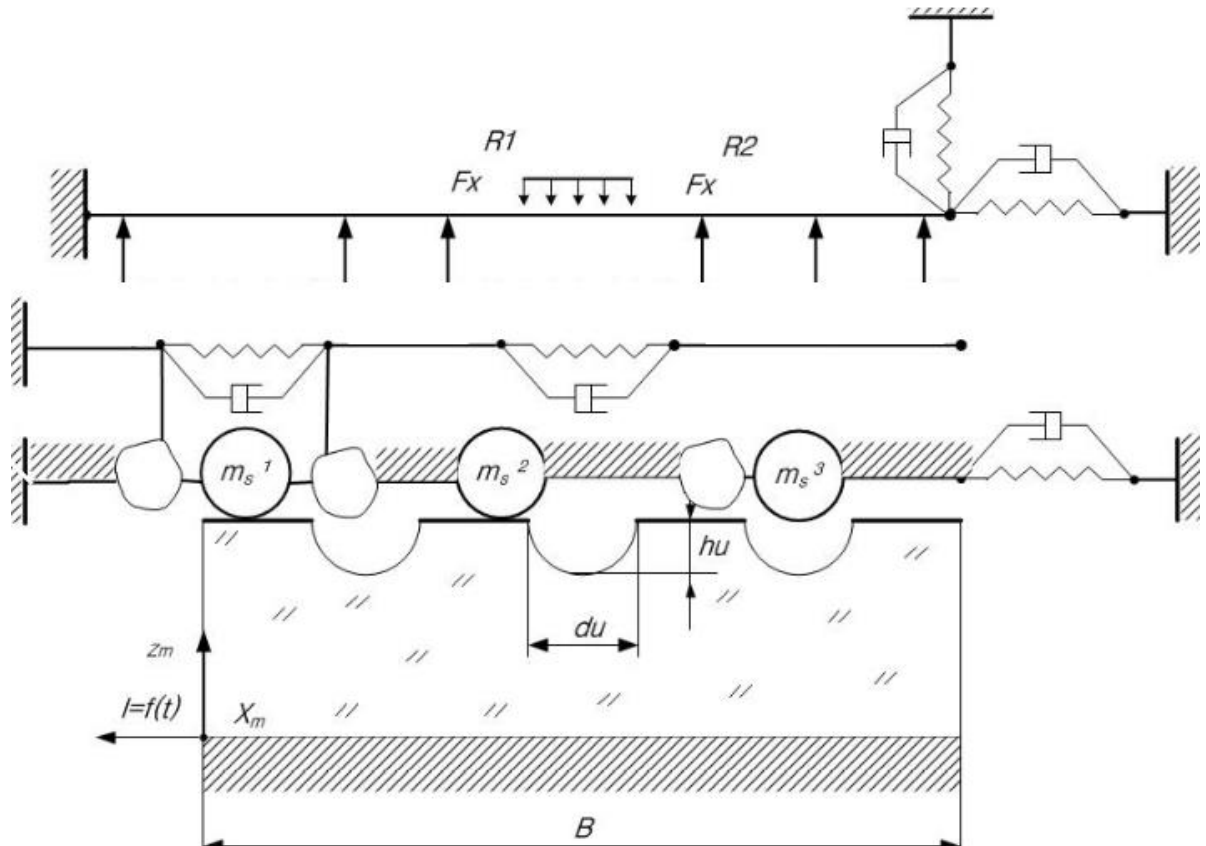


Рис. 2.5. Схема взаємодії алмазних зерен та частинок шламу із поверхнею заготовки

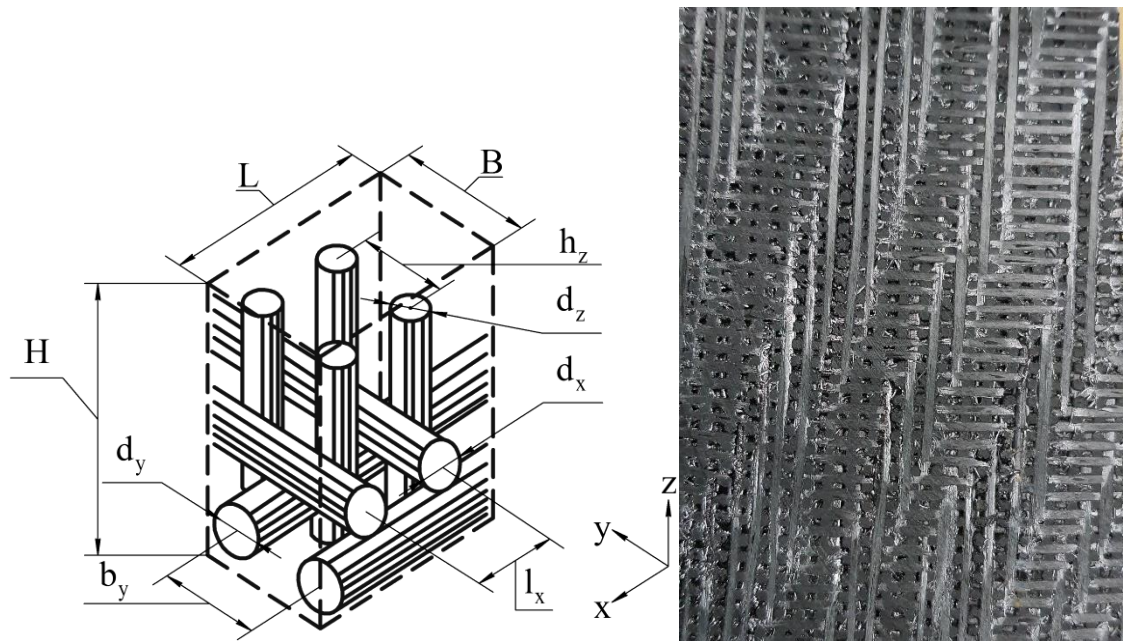


Рис. 2.6. Модель матеріалу та фото його структури

Таблиця 2.2 – Основні механічні властивості вуглецевих волокон і основні технічні характеристики джгута волокон [78]

Characteristic	Carbon Fibers based on polyacrylonitrile			Carbon Fibers based liquid crystal pitch
	high strength	high elongation	highly modular	
Fiber diameter, nm	$(7-9) 10^3$	$(6-7) 10^3$	$(6-9) 10^3$	$1 \cdot 10^5$
Tensile modulus, GPa	239-241	230-256	357-458	384-693
Tensile stress, GPa	3,0-3,5	4,0-4,5	2,0-2,5	2,1-2,4
Elongation at Tension,%	1,3-1,4	1,7-1,8	0,5-0,6	
Density, g / cm <sup>3</sup>	1,74-1,78	1,74-1,78	1,78-1,84	2,00
Specific strength, m	173-196	230-252	112-146	105-120
Linear Density (for CC CM)				350±50 (400±40) teks
Breaking load, H, not less				45
Bending strength in plastic, MPa, not less than				1078
Modulus of elasticity in bending in plastic, MPa, not less				127,4
Dynamic modulus of elasticity, GPa, not less				225
Effective processing temperature of the tow °C, not less				1900
Bulk density, g/cm <sup>3</sup> , not less				1,68
Type of dressing				epoxy compatible
Twist, no more				15 m <sup>-1</sup>
Linear density				текс

Пильне осцилююче лезо працює за рахунок коливальних поздовжніх рухів робочої поверхні відносно оброблюваної поверхні. Однак розв'язок останніх диференційних рівнянь може бути застосований із відповідним коригуванням  $H_2$  та  $H_3$ .

Процес свердлування алмазними трубчастими свердлами у першому наближенні подібний до відрізання дисковим алмазним інструментом (рис. 2.7). Однак додаткові ступені вільності в ньому відсутні, оскільки оправка, на яку нанесено алмазний шар, є практично недеформівною.

Якщо вважати [79], що шар в зоні обробки формується інтегрованою дією сукупності абразивних зерен  $z_i$ , котрі здійснюють просторовий рух разом із основою (трубкою), на якій вони жорстко закріплені (рис. 2.4), то

одночасний обертовий рух ( $P_1$ ) і рух подачі ( $P_2$ ) примушує зерна здійснювати відрізки гвинтової лінії, довжина яких залежить від структури оброблюваних матеріалів.

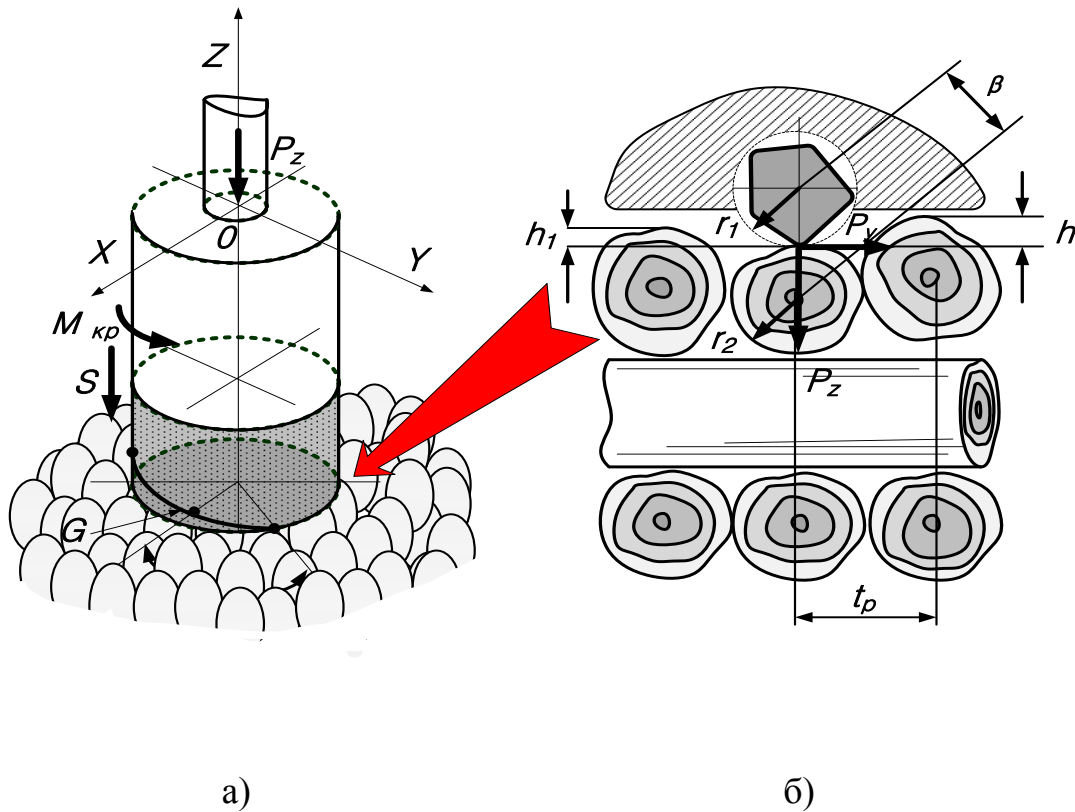


Рис. 2.7. Рух зерна (а) та схема його взаємодії (б) із оброблюваною поверхнею

$$x = r \sin \varphi$$

Тобто траєкторія руху зерна описується рівняннями  $y = r \cos \varphi$ ,

$$z = \frac{S}{n} \varphi$$

де  $r$  – відстань від центру свердла до розглянутого зерна (мм);  $\varphi$  – кут повороту свердла;  $S$  – подача (мм/хв);  $n$  – кількість обертів свердла в хв;  $x, y, z$  – координати зерна.

Впливаючи на оброблювану заготовку, частинки викликають її деформування, складові якого у горизонтальній  $U(t)$  та вертикальній площинах  $H(t)$  отримуються з рівнянь, що зв'язують напруження і деформації:

$$\begin{aligned}
\sigma_r &= 2G \left( \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right); \\
\sigma_t &= 2G \left( \frac{U}{r} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right); \\
\sigma_z &= 2G \left( \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right); \\
\tau &= G \left( \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right).
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Тут  $\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_t + \varepsilon_z = \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r_m} \frac{\partial H}{\partial z}$ , умова сумісності

$$\begin{cases} (1-2\mu) \left[ \Delta U - \frac{U}{r_m^2} \right] + \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = 0; \\ (1-2\mu) \Delta U + \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = 0 \end{cases} \quad \Delta = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{d}{r dr} + \frac{d^2}{dz^2} - \text{оператор Лапласа,}$$

а  $\varepsilon = \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)G} (\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z) = \frac{1-2\mu}{E} (\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z)$ . Для випадку навантаження

поверхні кільцем для  $U(t)$  і  $H(t)$  матимемо:

$$\begin{aligned}
U(t) &= -\frac{(1-2\mu)}{G} \frac{P_z(t)}{(D_{\max} - D_{\min})^2} r, r > \frac{D_{\max}}{2} \\
H(t) &= -\frac{(1-2\mu)}{G} P_z(t) \frac{2}{\pi(D_{\max} - D_{\min})}
\end{aligned}$$

де  $G$  – модуль зсуву оброблюваного матеріалу;  $\mu$  – його коефіцієнт Пуассона;  $\varepsilon$  – об'ємна деформація;

При цьому нормальна і тангенціальна сила, що діє на свердло, за [80], визначається так:

$$\begin{aligned}
P_y &= \left\{ \frac{\sqrt{3,25} a_3 \sin \beta}{\sin \beta_1} + 0,5b(z) \right\} \tau_3 \\
P_z &= \left\{ \frac{\sqrt{3,25} a_3 \cos \beta}{\sin \beta_1} + 0,5\mu b(z) \right\} \tau_3,
\end{aligned} \tag{2.9}$$

де  $a_3$  – глибина різання зерном;  $\beta$  – кут між результуючою силою різання і вектором швидкості різання;  $\beta_1$  – кут нахилу;  $\tau_3$  – середнє

напруження зсуву в площині зсуву;  $\mu$  – коефіцієнт тертя;  $b(z)$  – ширина площини контакту.

В роботі [69] автор зазначає, що зерна з часом змінюють форму, і це впливає на різальну здатність інструменту в цілому. З урахуванням цього фактору ширина різа становитиме  $b(h_3) = C_b \left( \frac{t_f - u}{t_f - u - h_3} \right)^m h_\tau^m$ , де  $C_b = 2\sqrt{2\rho_3}$  і  $m$  – коефіцієнти форма зерна;  $\rho_3$  – радіус округлення вершини зерна;  $h_\tau$  – координата точки профілю зерна з урахуванням зносу;  $t_f$  – максимальна глибина мікрорізання;  $h_3$  – величина зносу в перпендикулярному до вектору швидкості різання напрямку, визначеного як  $h_3 = h_{3max} \left[ 1 - \frac{u}{t_f - \Delta h} \right]^z$ , де  $z$  – коефіцієнт, що визначається аналітично;  $\Delta h$  – величина видалення матеріалу.

Таким чином, врахування динамічних явищ для нежорстких інструментів як інструментів із додатковими ступенями вільності дозволяє врахувати особливості взаємодії пружного нежорсткого інструменту з порожнистою структурою композиту. При цьому показано, що ця взаємодія характеризується відмінністю по локалізації та за часом. Зроблено висновок про доцільність формування робочих поверхонь інструменту у вигляді окремих кластерів.

## 2.2. Обумовлення параметрів алмазовмісного шару як забезпечення функцій інструменту

Нехай поверхня  $P$  деталі складається із ряду функціональних зон  $Z_{ij}$ , що відрізняються своїми властивостями  $V_{ij}^f$  та забезпечують виконання функцій  $FR_k$ . Властивості кожної із зон обумовлюються умовами роботи: силовим  $R_{ij}^{xy}$  та тепловим  $T_{ij}^{xy}$  навантаженнями, протіканням явищ хімічної взаємодії  $H_{ij}^a$ , механізмами пошкоджень  $D_{ij}$ . Оскільки усі функціональні зони належать до однієї поверхні (а у загальному випадку – до обсягу об'єкта, що

розглядається), тобто  $Z_{ij} \in P$ , а поверхня задається функцією  $z = g(x, y)$ , що має область визначення  $R$ , причому  $P = \iint_R dR$ , маємо:

$$P = \iint_R \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} dx dy,$$

або для випадку осесиметричного тіла

$$P = \iint_R dP = \int_{\alpha}^{\beta} \int_{h(\Theta)}^{g(\Theta)} r dr d\Theta$$

Тоді зміну властивостей поверхні можна визначити на основі функціональної обумовленості

$$V_{ij}^f = f(R_{ij}^{xy}, T_{ij}^{xy}, H_{ij}^a, D_{ij}) \quad (2.10)$$

і для будь-якої поверхні другого порядку, що має вигляд  $F(x, y, z) = 0$  та при перетині площиною дає рівняння кривої другого порядку виду

$$\frac{x^2}{\left(a\sqrt{1-\frac{h^2}{c^2}}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(b\sqrt{1-\frac{h^2}{c^2}}\right)^2} = 1$$

а в проекції на вибрану вісь в межах  $(x_1, y_1); (x_2, y_2)$  може бути перетворена до вигляду

$$\begin{aligned} V_R^f &= b_0^R + b_1^R x^2 + b_2^R xy + b_3^R y^2 + b_4^R x + b_5^R y; \\ V_T^f &= b_0^T + b_1^T x^2 + b_2^T xy + b_3^T y^2 + b_4^T x + b_5^T y; \\ V_H^f &= b_0^H + b_1^H x^2 + b_2^H xy + b_3^H y^2 + b_4^H x + b_5^H y; \\ V_D^f &= b_0^D + b_1^D x^2 + b_2^D xy + b_3^D y^2 + b_4^D x + b_5^D y. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Таким чином, отримуємо сімейство безперервних кривих, які належать до площин, що перетинають тіло під певними кутами та які відображають зміну властивостей у певному напрямку від вибраної початкової точки (рис. 2.8).

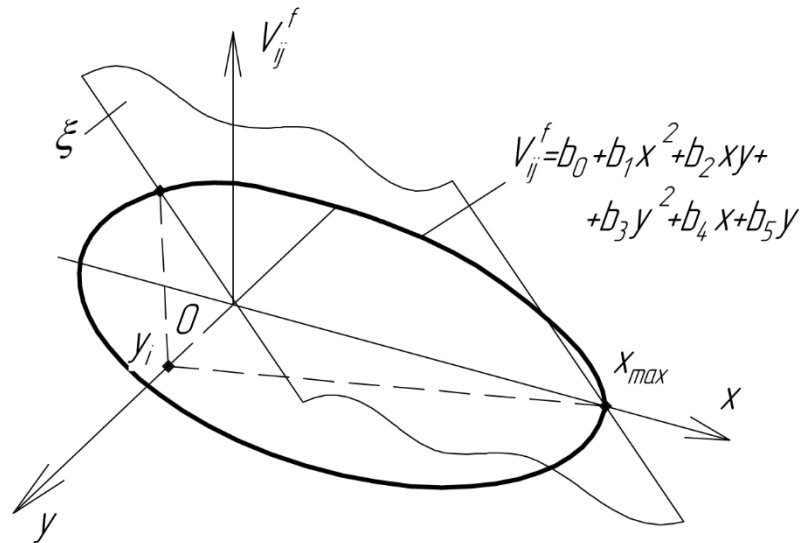


Рис. 2.8. Зміна властивостей виробу при зміні властивостей функціональних зон у певному напрямку від вибраної початкової точки

При цьому загальна схема формування вихідних показників якості інструменту, що безпосередньо визначають хід подальшого процесу оброблення, подано на рис. 2.9.

Відмінність умов взаємодії інструменту із нещільним міцним композитом дозволяє зробити висновок, що інструмент в цілому слід розглядати як сукупність окремих мікрофрагментів, які працюють у конкретних умовах обробки.

Кожен такий фрагмент повинен володіти множиною корисних ознак (функцій)  $F_p$ , сукупність яких дозволяє досягти екстремуму цільової функції; у випадку із нежорстким алмазовмісним інструментом – максимальної продуктивності  $q$  та надійності  $F(t)$  роботи.



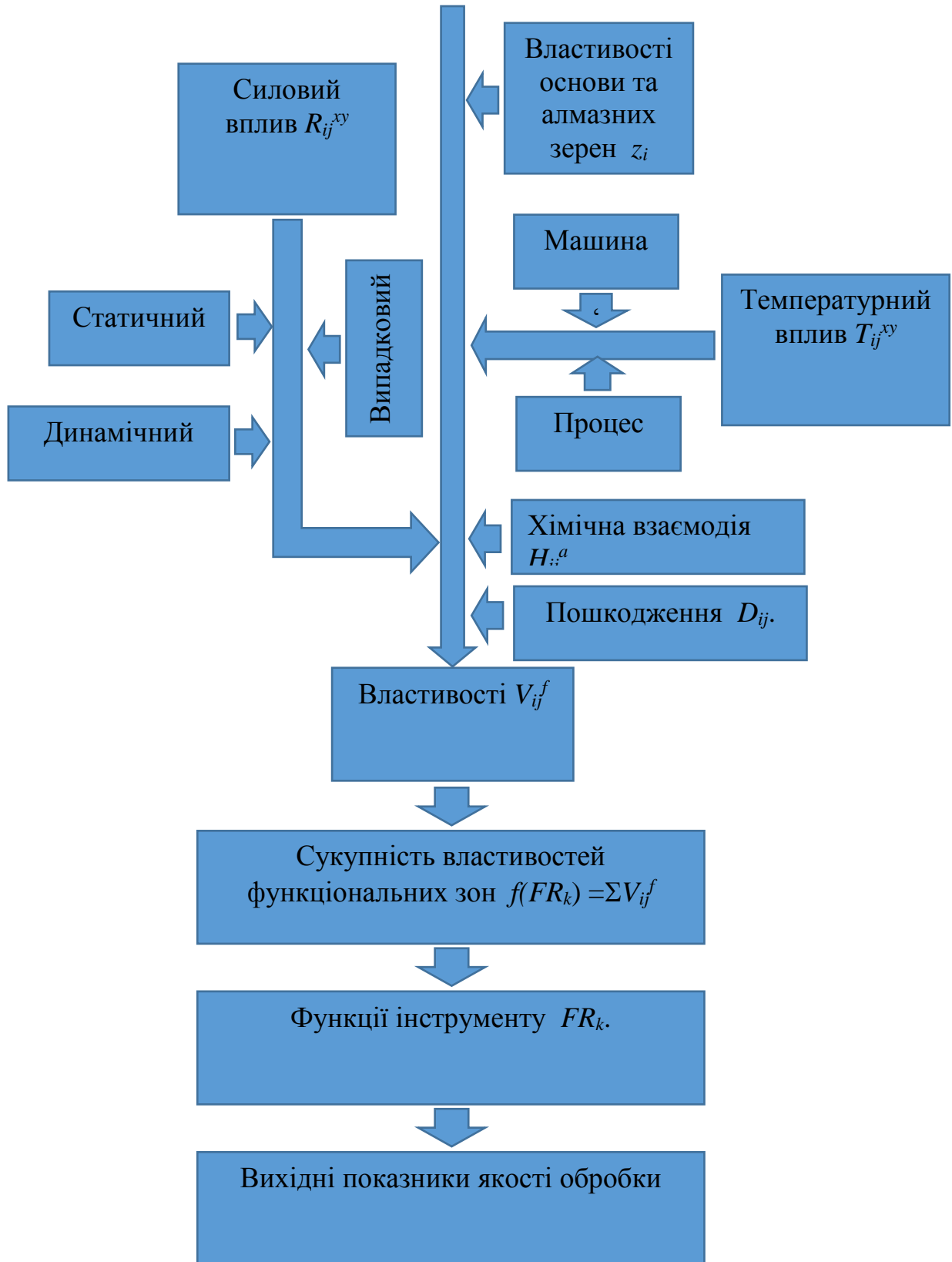


Рис. 2.9. Схема формування вихідних показників якості виробів

Оскільки фрагменти поверхні можуть мати подібні властивості, їх можна вважати кластерами  $K_i$ , сукупність яких утворює алмазний шар. Тоді з точки зору функціонування інструменту його уява у вигляді сукупності поверхневих кластерів відповідає рис. 2.10.

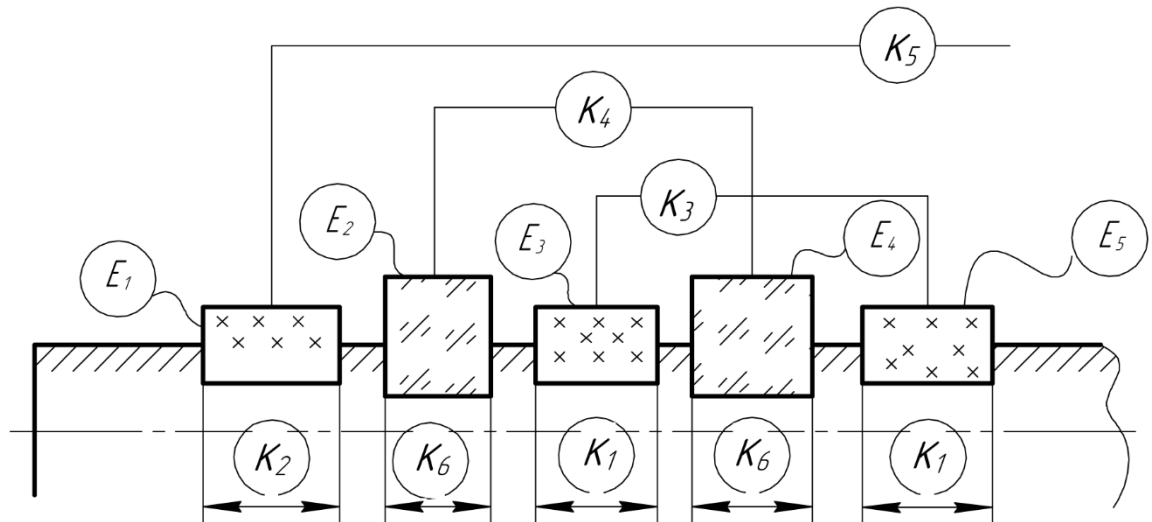


Рис. 2.10. Кластери поверхні інструменту із алмазним шаром

Кластери  $K_i$  поверхні інструменту поділені так:  $K_1$  – фрагмент поверхні певного типорозміру із зернами розмірами  $z_2$  (елементи  $E_3, E_5$ );  $K_2$  – фрагмент поверхні певного типорозміру із зернами розмірами  $z_1$  (елемент  $E_1$ );  $K_3$  – фрагмент поверхні що охоплює кластери  $K_1$  та утворюється сукупністю елементів  $E_3, E_5, \dots$ ;  $K_4$  – фрагмент поверхні що охоплює кластери  $K_1$  та утворюється сукупністю елементів  $E_2, E_4, \dots$ ;  $K_5$  – фрагмент поверхні, що охоплює кластери  $K_1$  та утворюється сукупністю елементів  $E_1-E_5-\dots$ ;  $K_6$  – фрагмент поверхні певного типорозміру із зернами розмірами  $z_3$ .

Тоді  $\Sigma V_{if}^f \rightarrow f(FR_k)$ , і (2.11) постає безперервною функцією зміни різальних властивостей поверхневого шару.

### 2.3. Адаптація методики пошуку раціональних матеріальних носіїв функцій до задач удосконалення виробів із алмазним шаром

Розглянемо основні методологічні засади удосконалення виробів із алмазним шаром (перш за все різальних інструментів). З цією метою скористаємося апаратом функціонально–вартісного аналізу (Activity Based Costing). Останній відповідно до [81] – це методологія вимірювання вартості виробів, затрат на функціонування структур тощо (тобто кінцевих елементів поглинання витрат).

В основі концепції ФВА покладена передумова про те, що споживаються і мають споживчу вартість функції предмету, а не сам предмет, причому ці функції можуть забезпечуватися певною сукупністю матеріальних носіїв. Отже, споживча вартість функції повинна визначати вартість її матеріального носія як сукупності факторів витрат.

Фактор, що викликає появу витрат, є носієм витрат. За допомогою носія витрат встановлюється причинно–наслідковий і кількісний взаємозв'язок між функцією, понесеними витратами та об'єктами обліку витрат (видами продукції). При цьому підбір матеріальних носіїв функції має відбуватися таким чином, щоб сукупна вартість була якомога меншою.

За [82] при створенні будь–якого виробу формування конкретної корисної функції  $F_p$  пов'язано з появою нейтральних  $F_n$  і шкідливих  $F_v$  функцій. Ідеальний з цієї точки зору виріб має задовільняти умовам:

$$F_p = F_{pz}, F_v = 0, F_n \rightarrow \min, \quad (2.12)$$

де  $F_{pz}$  – корисні властивості виробу.

Для створюваного виробу із алмазним шаром сукупність фізико–механічних характеристик, геометричних параметрів тощо відобразатиметься так:

$$P = \sum_{i=1}^l F_{pi} + \sum_{j=1}^m F_{nj} + \sum_{k=1}^p F_{vk}. \quad (2.13)$$

Останній вираз є рівнянням оптимізації, яке дозволяє виконати пошук найбільш раціональних матеріальних носіїв функцій і методів їхнього отримання.

Оскільки забезпечення однієї функції не завжди супроводжується виключно пропорційним зростанням матеріального носія саме цієї функції, маємо:

$$F_v = pF_p, F_n = qF_p.$$

Прийmemo до уваги, що кожен конкретну функцію формує певний технологічний процес або сукупність процесів, наявність функціонального зв'язку відповідно (2.12) дає можливість записати вираз (2.13) в наступному вигляді:

$$P = \sum_{i=1}^l W_p F_{pi} + \sum_{j=1}^m W_n q F_{pj} + \sum_{k=1}^p W_v p F_{pk}. \quad (2.14)$$

Оскільки технологічний процес виготовлення виробу по визначенню не може бути направлений на надання йому шкідливих функцій і властивостей, мінімізація зайвих функцій (властивостей), перш за все, виключення шкідливих, дає можливість записати вираз, який відображає наближеність реального виробу до ідеального через сукупність його властивостей:

$$P = \sum_{i=1}^l W_p F_{pi} + \sum_{j=1}^m \overline{W}_p q F_{pj} + \sum_{k=1}^p \overline{W}_p p F_{pk}.$$

Після виконання певних перетворень ми отримаємо вираз:

$$P = \sum_{i=1}^l F_{pi} (W_p + \overline{W}_p q + \overline{W}_p p).$$

Удосконалення виробу з сукупністю властивостей (2.12) до ідеального передбачає обернення додатків  $\overline{W}_n q$  і  $\overline{W}_v p$  у нуль, що можливо за умови відсутності функціонального зв'язку між корисними і шкідливими властивостями виробу або за умови, коли процес отримання корисних прийнятним матеріальним носієм одночасно є інверсним до виникаючих шкідливих функцій.

Наявність і взаємозв'язок між окремими елементами технологічного процесу дозволяє представити вираз (2.14) у наступному вигляді:

$$P = \sum_{i=1}^l F_{pi} (W_p + \overline{W}_p q + \overline{W}_p p + \overline{W}_p (p + q)). \quad (2.15)$$

Отримання конкретного виробу завжди є задачею інваріантною, із певною кількістю альтернативних технічних рішень. Тож залежність (2.12) повинна бути доповнена кількісними ознаками кожної з функцій (як корисних, так і шкідливих) – всіх функцій, які формують інтегральний показник якості виробу  $I$ . Тоді (2.15) дозволяє записати наступний вираз

$$I = \sum_{i=1}^l F_{pi} (b_{ki} W_{pi} - b_{vi} \overline{W}_{pi} p - b_{ri} \overline{W}_{pi} (p + q)), \quad (2.16)$$

за умови, що  $\overline{b}_{ni} \overline{W}_{pi} q = 0$ . Тут  $b_{ki}$  – відповідні вагові коефіцієнти кожної з корисних функцій;  $b_{vi}$  – вагові коефіцієнти кожної шкідливої функції (що віднімається складова);  $b_{ri}$  – вагові коефіцієнти взаємодії незалежних компонентів, що виявляють резерви в підвищенні вихідних властивостей готового виробу.

Для пошуку раціонального рішення при удосконаленні конкретного виробу застосовують функціонально–вартісну модель (ФВМ) системи, яка придатна для виявлення непотрібних функцій і елементів (непотрібних і шкідливих); визначення функціональної достатності та корисності елементів об'єкта; розподілу витрат за функціями; оцінки якості виконання функцій; виявлення дефектних функціональних зон в об'єкті; визначення рівня функціонально–структурної організації виробу. Побудова ФВМ здійснюється шляхом поєднання ФМ і РМ об'єкта, яка відповідає рис.2.9 та яку представляють у вигляді табл. 2.3.

Оцінка значущості функції ведеться послідовно по рівнях ФМ (зверху вниз), починаючи з першого рівня. Для головної і другорядної, тобто для зовнішніх функцій об'єкту, при оцінці їх значущості початковим є розподіл вимог споживачів (показників якості, параметрів, властивостей) за значимістю (важливості).

Таблиця 2.3 – Приклад складових для побудови функціонально-вартісної моделі

Індекс функції	Матеріальний носій функції	Найменування функції	Значимість функції [r]	Відносна важливість функції [R]	Ступінь задоволення функції [P]	Якість виконання функції [Q]	Абсолютна вартість реалізації функції [S <sub>абс</sub> ]	Відносна вартість реалізації функції [S <sub>відн</sub> ]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$m_1$	$F_1$	$r_{11}$	$R_{11}$	$P_{11}$	$Q_1$		
...	...	...	...	...	...	...		
$n$	$m_j$	$F_k$	$R_{ij}$	$R_{ij}$	$P_{jv}$	$Q_v$		
			$\sum r = 1$	$\sum_{очн} = 1$			$\sum S_{абс} = 1 \cdot$	$\sum S_{відн} = 1 \cdot$

Нормуючою умовою для визначення значущості функції є наступна умова:

$$\sum_{j=1}^n r_{ij} = 1 ,$$

де  $r_{ij}$  – значущість  $j$ -ої функції, що належить цьому 1-у рівню ФМ (визначається експертним шляхом);

$$j=1, 2, \dots, n,$$

$n$  – кількість функцій, розташованих на одному рівні ФМ і належать до загального об'єкту вищого рівня.

Для внутрішніх функцій визначення значущості ведеться виходячи з їх ролі в забезпеченні функцій вищого рівня.

З урахуванням багатоступінчастої структури ФМ, разом з оцінкою значущості функцій по відношенню до найближчої вищої функції, визначається показник відносної важливості функції будь-якого  $i$ -го рівня  $R_{ij}$  по відношенню до виробу в цілому:

$$R_{ij} = \prod_i^{G-1} = r_{ij} \times r_{(i-1)(j-1)}, \quad (2.17)$$

де  $G$  – кількість рівнів ФМ.

У разі, якщо одна функція бере участь одночасно в забезпеченні декількох функцій вищого рівня ФМ, її значущість визначається для кожної з них окремо, а відносна важливість функції для об'єкту в цілому розраховується як сума значень  $R_{ij}$  по кожній гілці ФМ (від 1-го рівня до першого), що проходить через цю функцію.

Узагальнений (комплексний) показник якості варіанту виконання функцій оцінюється за наступним рівнянням:

$$Q_v = \sum_{j=1}^n R_j \times P_{jv}, \quad (2.18)$$

де  $R_i$  – відносна значущість  $j$ -ої функції;  $P_{jv}$  – міра задоволення (виконання)  $j$ -ої функції у  $v$ -ому варіанті;  $n$  – кількість функцій.

Міра виконання функцій ( $P$ ) визначається експертним шляхом в процентному відношенні, перерахованому в долі (від 0 до 1, де 1 – максимальна міра задоволення).

Функціонально необхідні витрати – мінімально можливі витрати на реалізацію комплексу функцій об'єкту при дотриманні заданих вимог споживачів (параметрів якості) в умовах виробництва і застосування (експлуатації), організаційно–технічний рівень яких відповідає рівню складності спроектованого об'єкту.

Абсолютна вартість реалізації функцій ( $S_{abc}$ ) визначається так:

$$S_{abc} = S_{виг} + S_{експ} + S_{тр} + S_{ен} + S_i, \quad (2.19)$$

де  $S_{виг}$  – витрати, пов'язані із створенням або модернізацією досліджуваного об'єкту;  $S_{експ}$  – експлуатаційні витрати;  $S_{тр}$  – витрати, пов'язані з трудомісткістю реалізації функції;  $S_{ен}$  – енерговитрати на реалізацію функції;  $S_i$  – інші витрати на реалізацію функції. Відносна вартість реалізації функцій  $S_{відн}$ :

$$S_{\text{відн}} = \frac{S_{abcF_{ij}}}{\sum_1^n S_{abc}}, \quad (2.20)$$

де  $S_{abc}$  – сумарна абсолютна вартість функціонування об'єкту, визначається шляхом підсумовування значень абсолютних вартостей реалізації функцій (стовпець 8 в табл. 2.3). На підставі порівняння цих діаграм в базовому і пропонованому варіантах можна зробити висновок про міру корисності і економічної доцільності застосування пропонованих технічних рішень.

**Методика пошуку раціонального рішення.** Для пошуку оптимальних носів функцій – нових технічних рішень аналізованих виробів – застосовується метод розрахунку питомої вартості корисної функції із урахуванням можливостей дискретизації головних функціональних поверхонь виробу (із алмазним шаром), що дозволяють забезпечити кінцеві властивості виробу через систему показників якості із мінімальними матеріальними затратами.

Для визначення вартості функцій використовуються загальні прямі витрати, пов'язані зі створенням тих елементів готового виробу, які безпосередньо дану функцію визначають. Вартість функції – це приведена вартість прийомів роботи ( $P_i$ ), технологічного оснащення ( $T_j$ ), часових ( $M_k$ ) та людських витрат ( $P_l$ ), які витрачаються на створення властивостей виробу на макро–, мезо–, міні– або нанорівнях.

Якісну оцінку варіантів конструктивних рішень доцільно здійснювати за допомогою методу розставлення пріоритетів [83]. Це дозволить виокремити раціональне з економічної точки зору рішення, яке дозволить отримати корисну функцію із мінімальними матеріальними витратами.

Даний метод передбачає попарне порівняння усієї вибірки варіантів. Зазвичай їх позначають  $C_1, C_2, C_3 \dots$

Отже, загальна кількість парних порівнянь при  $m$  варіантах становить

$$M = \frac{m(m-1)}{2}.$$



Повний граф “турніру” варіантів подано на рис. 2.11.

Результат попарного порівняння двох варіантів  $C_i$  та  $C_j$  відображено умовами відповідно до положень, сформульованих Ю.М. Кузнецовим:  $i \neq j; i > j$   
 $C_i \rightarrow C_j; i \neq j; i = j$   $C_i \leftrightarrow C_j; i \neq j; i < j$   $C_i \leftarrow C_j$ .

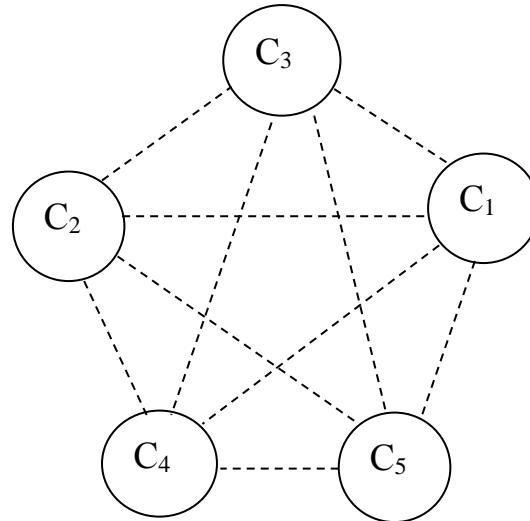


Рис. 2.11. “Турнір” варіантів конструктивних рішень [70]

Прийmemo таку систему кількісних відношень:  $a = \begin{array}{l|l} 2 & a_i > a_j \\ 1 & a_i = a_j \\ 0 & a_i < a_j \end{array}$

Складена квадратна матриця якісних відношень (приклад якої – табл. 2.4) дозволяє виявити пріоритети одного варіанту над іншим.

Таблиця 2.4 – Матриця якісних відношень (матриця суміжності)

$\begin{matrix} i \\ j \end{matrix}$	C3	C1	C2	C4	C5
C3	=	>	<	=	<
C1	<	=	<	<	<
C2	>	>	=	>	<
C4	=	>	<	=	}
C5	>	>	>	}	=

Відповідні кількісні оцінки  $P_i(1)$ ,  $P_i(2)$ ,  $P_i^b(2)$  розраховують за залежностями:

$$P_i(1) = \frac{\sum a_i}{m^2};$$

$$P_1(2) = a_{11} \sum a_{1j} + a_{12} \sum a_{2j} + a_{13} \sum a_{3j} + a_{14} \sum a_{4j} + a_{15} \sum a_{5j}$$

$$P_2(2) = a_{21} \sum a_{1j} + a_{22} \sum a_{2j} + a_{23} \sum a_{3j} + a_{24} \sum a_{4j} + a_{25} \sum a_{5j}$$

$$P_3(2) = a_{31} \sum a_{1j} + a_{32} \sum a_{2j} + a_{33} \sum a_{3j} + a_{34} \sum a_{4j} + a_{35} \sum a_{5j}$$

$$P_4(2) = a_{41} \sum a_{1j} + a_{42} \sum a_{2j} + a_{43} \sum a_{3j} + a_{44} \sum a_{4j} + a_{45} \sum a_{5j}$$

$$P_5(2) = a_{51} \sum a_{1j} + a_{52} \sum a_{2j} + a_{53} \sum a_{3j} + a_{54} \sum a_{4j} + a_{55} \sum a_{5j}$$

$$P_i^b = \frac{P_i(2)}{\sum P_i(2)} \quad (2.21)$$

Оцінку варіантів виконання інструменту здійснюють за допомогою рангування, при якому фактору, що має найбільший вплив, присвоюють ранг  $a_{ij}=1$ , наступним – відповідно ранги 2, 3 і т.д. Однаково впливові фактори мають однакові ранги.

Обробка результатів здійснюється так. Визначається сума  $S_{ij}$  кожного фактору:

$$S_{ij} = \sum_{i=1}^m a_{ij},$$

після чого будується рангований ряд  $Q_{ij}$ , – кожній сумі  $S_{ij}$  присвоюють порядковий номер, що відповідає її місцю у рангованому ряді цих сум. Якщо у ряді сум мається декілька однакових елементів, то їм присвоюють ранги, величина яких дорівнює середньому значенню суми місць, зайнятих цими елементами.

Для оцінки якості рангування виконують порівняння суми рангів із сумою  $k$  членів ряду натуральних чисел  $S_k$ :

$$S_k = k(k+1)/2$$

Порушення умови свідчить про однаковість рангів окремих факторів, та необхідність нормування ряду. Його виконують за рекомендаціями [84].

Далі обчислюють суми рангів по кожному фактору:

$$S_{ij} = \sum_{i=1}^m a_{ij}$$

та перевіряють адекватність нормованих та початкових даних шляхом оцінки ступеня зв'язку між упорядкованими  $Q_{2j}$  та початковими  $Q_{1j}$  рядами за допомогою розрахунку коефіцієнта рангової кореляції Спірмена.

При відсутності об'єднаних рангів коефіцієнт визначається так:

$$r_b = 1 - \frac{6 \sum_{j=1}^k (Q_{1j} - Q_{2j})^2}{(k^3 - k)},$$

а при наявності – наступним чином

$$r_b = \frac{[(k^3 - k) - T_1] + [(k^3 - k) - T_2] - 12 \sum_{j=1}^k (Q_{1j} - Q_{2j})^2}{2\sqrt{[(k^3 - k) - T_1] \cdot [(k^3 - k) - T_2]}},$$

де  $Q_{1j}$ ,  $Q_{2j}$  – ранги рядів, що розглядаються;  $k$  – кількість елементів ряду;  $T_1$  та  $T_2$  – поправки, що враховують поєднані ранги у рядах, які порівнюються:  $T_1 = \sum_{i=1}^{n_1} (t_{1i}^3 - t_{1i})$ ,  $T_2 = \sum_{i=1}^{n_2} (t_{2i}^3 - t_{2i})$ ,  $n_1$ ,  $n_2$  – кількість груп однакових рангів;  $t_{1i}$ ,  $t_{2i}$  – кількість елементів, що входять до  $i$ -тої групи однакових рангів відповідно  $Q_{1j}$  і  $Q_{2j}$ .

Якщо  $r_b=1$ , між рядами існує повна відповідність, якщо  $r_b = -1$  відповідність повністю зворотна, при  $r_b=0$  кореляція між рядами відсутня.

Значимість коефіцієнта кореляції можна оцінити з допомогою  $t$ -критерія (за умови, що  $k \geq 10$ ):

$$t = |r_b| \sqrt{(k-2)/(1-r_b^2)} \geq t_{kr}$$

вибраного при рівні значимості  $\alpha$  (наприклад,  $\alpha=0.05$ ) та числі ступенів вільності  $f=k-2$ . Достовірності отриманої інформації щодо вагомості функцій

підтверджують або спростовують шляхом перевірки дійсності гіпотези щодо рівномірності розподілу думок експертів за допомогою  $\chi^2$ -критерія Пірсона:

$$\chi_j^2 = \sum_n (p_i - \bar{p})^2 / \bar{p},$$

де  $p_i$  – фактична частота попадання досліджуваного фактору у  $i$ -тий інтервал;  $\bar{p}$  – теоретична частота, що визначається за формулою:  $p_i = \frac{m}{n}$ ,  $m$  – кількість експертів;  $n$  – кількість інтервалів, яку отримано при заокругленні до найближчого цілого кількості результату обчислень за формулою:

$$\begin{cases} l = 1 + 1.443 \ln(N), N \leq 100 \\ l = 2.171, N > 100 \end{cases}$$

При цьому ширину інтервалу  $h$  визначають за формулою:

$$h = \frac{k}{n},$$

де  $k$  – кількість досліджуваних факторів.

Умова достовірності апріорної інформації –  $\chi^2 \geq \chi^2_{табл}$ , вибраного при рівні значимості  $\alpha$  та кількості ступенів вільності  $f=n-l$ , для  $j$ -того фактора.

Перевіряється також і ступінь зв'язку між кількома рангованими рядами, котра оцінюється з допомогою коефіцієнта конкордації  $W$  Кендалла:

– при відсутності поєднаних рангів:

$$W = 12 \sum_{j=1}^k \frac{(S_{2j} - S_2)^2}{m^2 (k^3 - k)}$$

– при наявності поєднаних рангів:

$$W = 12 \sum_{j=1}^k \frac{(S_{2j} - S_2)^2}{\left[ m^2 (k^3 - k) - m \sum_{i=1}^m T_i \right]},$$

де  $S_{2j}$  – сума рангів по кожному  $j$ -му фактору;  $S_2$  – загальне середнє суми рангів:  $S_2 = \sum_{j=1}^k S_{2j} / k$ ;  $T_i$  – величина, що враховує наявність поєднаних

рангів у  $i$ -том ряду –  $T_i = \sum_{q=1}^{m_i} (t_q^3 - t_q)$ , де  $t_q$  – число елементів, що входять до  $q$ -ю групи однакових рангів  $i$ -го рангованого ряду;  $k$  – число досліджуваних факторів;  $m$  – число опитаних експертів.

Співпадіння думок відповідає  $W=1$ , при  $W=0$  зв'язок між ранговками відсутній. У всіх інших випадках значимість коефіцієнта оцінюється за допомогою  $\chi^2$  – критерію  $\chi^2 = m(k-1)W$ . Значимість  $W$  підтверджується при виконанні умови  $\chi^2 \geq \chi^2_{табл}$ , вибраного при рівні значимості  $\alpha$  та кількості ступенів вільності  $f = n-1$ .

Ступінь впливу кожного фактора на досліджуваний об'єкт або процес оцінюється як:

- суму рангів, присвоєну  $j$ -му фактору без урахування або з урахуванням кваліфікації експертів  $S_{2j} = \sum_{i=1}^m b_{ij}$ ;

- середній ранг  $j$ -го фактора  $\bar{S}_{2j} = S_{2j} / m$ ;

- коефіцієнт вагомості  $j$ -го фактора  $M_{2j} = \frac{S_{2j}}{\sum_{j=1}^k S_{2j}}$ .

Чим менше значення поданих параметрів, тим сильніший вплив даного фактора. Тому для більш детального аналізу апріорної інформації доцільно побудувати апріорні діаграми рангів.

Власне це порівняння сили впливу факторів, відкладених по осі ординат, із їх відносною вартістю, коли фактори відкладені по осі абсцис (рис. 2.12).

Виходячи із того, що фактори ранговані (тобто наведені за принципом зменшення сили впливу), тенденція зменшення даного чиннику має відповідати тенденції зменшення вартості самого фактору.

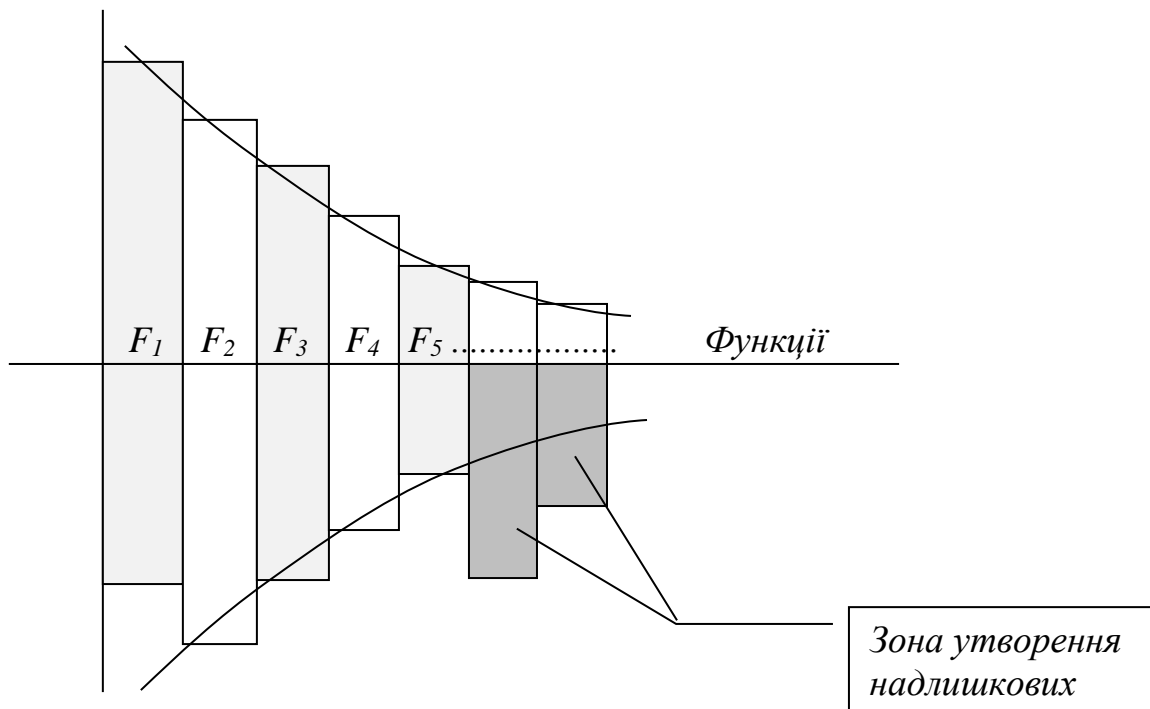


Рис. 2.12. Приклад функціонально–вартісної діаграма

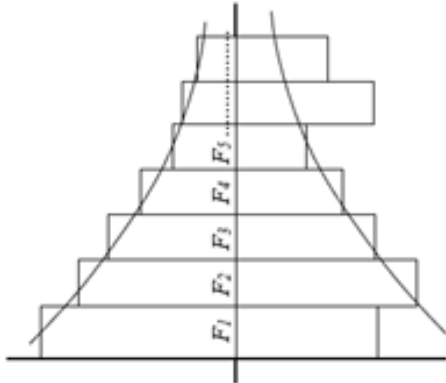
Таким чином, проведення аналізу та побудова функціонально–вартісних діаграм для певних варіантів виконання виробу дозволяє отримати порівняну питому вартість  $W_k$  функцій  $F_1 \dots F_i$  у вигляді

$$W_k = \sum \frac{c_i}{F_i} \quad (2.23)$$

та обрати для виконання той варіант, для якого  $W_k$  буде мінімальним. Сама функція у даному випадку постає як міра задоволення вимог до створюваного об'єкту з урахуванням особливостей перебігу процесу, який даний об'єкт реалізує.

З цієї позиції результати варіантів технічного виконання виробу подаються у табл. 2.5 з розрахунком відповідних параметрів функціонально–вартісних діаграм. При цьому головну увагу зосереджують на функціях корисних.

Таблиця 2.5 – Порівняння варіантів виконання технічних рішень для обґрунтування раціонального

Варіант виконання	Впливові фактори	Рівень забезпечення			Діаграма та параметр $W_k$
		Макро-	Мікро-	Нано-	
1	1	$V_R^f = b_0^R + b_1^R x^2 + b_2^R xy + b_3^R y^2 + b_4^R x + b_5^R y;$	$V_R^f = b_0^R + b_1^R x^2 + b_3^R y^2;$	$V_R^f = b_0^R + b_4^R x + b_5^R y;$	
	2	$V_T^f = b_0^T + b_1^T x^2 + b_3^T y^2;$	$V_T^f = b_0^T + b_1^T x^2 + b_3^T y^2;$	$V_T^f = b_0^T + b_4^T x + b_5^T y;$	
	3	$V_H^f = b_0^H + b_1^H x^2 + b_2^T xy + b_3^T y^2 + b_4^T x + b_5^T y;$	$V_H^f = b_0^H + b_1^H x^2 + b_3^H y^2;$	$V_H^f = b_0^H + b_4^H x + b_5^H y;$	
	4	$V_D^f = b_0^D + b_1^D x^2 + b_2^H xy + b_3^H y^2 + b_4^H x + b_5^H y;$	$V_D^f = b_0^D + b_1^D x^2 + b_3^D y^2.$	$V_D^f = b_0^D + b_4^D x + b_5^D y.$	
2	1	.....	.....	.....	
	2	.....	.....	.....	
	...	.....	.....	.....	
i	...	.....	.....	.....	

#### 2.4. Умови та обмеження при пошуку раціональних рішень в задачах формування алмазовмісного поверхневого шару

Аналізовані вироби із алмазним шаром, використовувані для обробки композиційних вуглецевих матеріалів (переважно із піровуглецевою матрицею) являють собою інструменти, що часто використовуються для розрізання, відрізання, свердління, вибірки пазів, ненаскрізного та наскрізного прорізання.

Як було показано в п. 2.2, умови роботи зазначеного інструмента істотно змінюються як протягом робочого циклу, так і при зміні схеми виконання обробки. Така зміна вимагає вибору такого методу формування поверхневого алмазного шару, який би дозволяв локалізувати дієвий вплив на малих поверхнях  $P_{ij}$ . Тоді основними вимогами для поверхонь будуть наступні:

- 1) сумісні поверхні мають допускати відмінності у сформованих структурах;
- 2) сумісні поверхні не повинні мати різні механічні характеристики, зокрема, КЛТР,  $\sigma_a$  та ін., що дозволяє із таких елементів формувати суцільну поверхню різання;
- 3) послідовність сумісних поверхонь має наближатися до огинаючої заданого геометричного профіля виробу в цілому;
- 4) сумісні поверхні не повинні мати розривів у структурі;
- 5) ряд сумісних поверхонь можуть утворювати сектор зі схожими фізико–механічними характеристиками.

Нехай нами розглядається циліндричний виріб – струна із нанесеним алмазним шаром, призначена для виконання операцій початкового поділу заготовки на пластини.

Для циліндричного довгого нежорсткого виробу (рис.2.13) до окремих поверхонь висуватимуться вимоги, подані у табл.2.5 рис. 2.14. Кожну із поверхонь додатково можна поділити на зони, що відрізняються умовами роботи, табл. 2.6, причому умови формування показників якості відповідатимуть графу рис. 2.14.



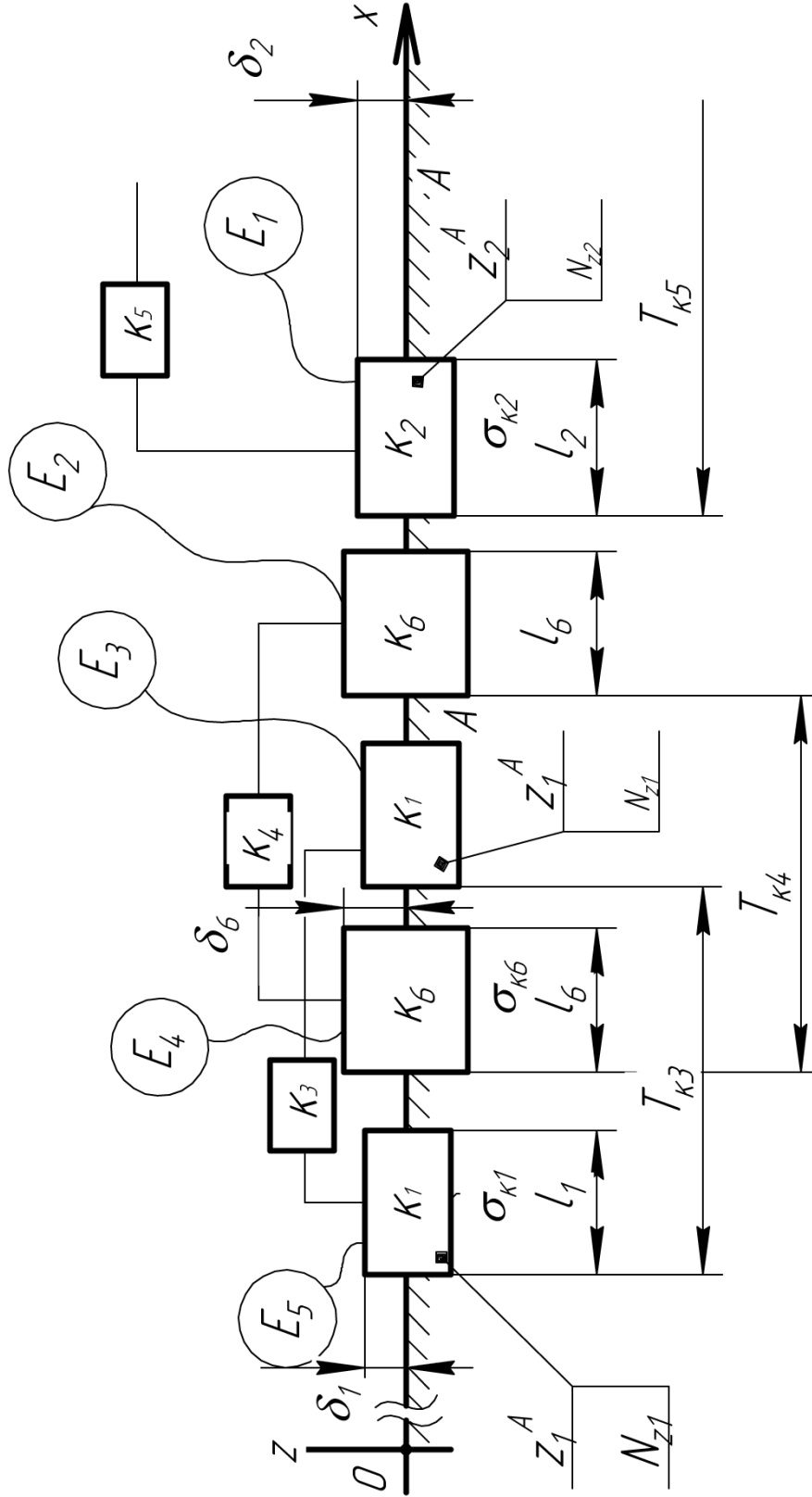


Рис. 2.13. Поділ виробу на окремі елементи поверхні

Таблиця 2.6 – Поділ окремих елементів поверхонь на зони мікрорівня

Кластер	Властивості			Складові кластеру
	Геометричні параметри	Поверхневий шар	Приповерхнева ділянка	
$K_1$	$l_1, \delta_1, b_1$	$z_1^A; N_{z1}$	$\sigma_{k1}$	$E_5$
$K_2$	$l_2, \delta_2, b_1$	$z_{2A}; N_{z2}$	$\sigma_{k2}$	$E_1$
$K_3$	$T_{k3}$		Базова $\sigma_{k1}$	$E_3 \cap E_5$
$K_4$	$T_{k4}$		Базова $\sigma_{k6}$	$E_2 \cap E_4$
$K_5$	$T_{k5}$		Базова $\sigma_{k2}$	$E_3 \cap E_5 \cap E_2 \cap E_4 \dots$
$K_6$	$l_6, \delta_6, b_6$	$z_6^A; N_{z6}$	$\sigma_{k6}$	$E_2$

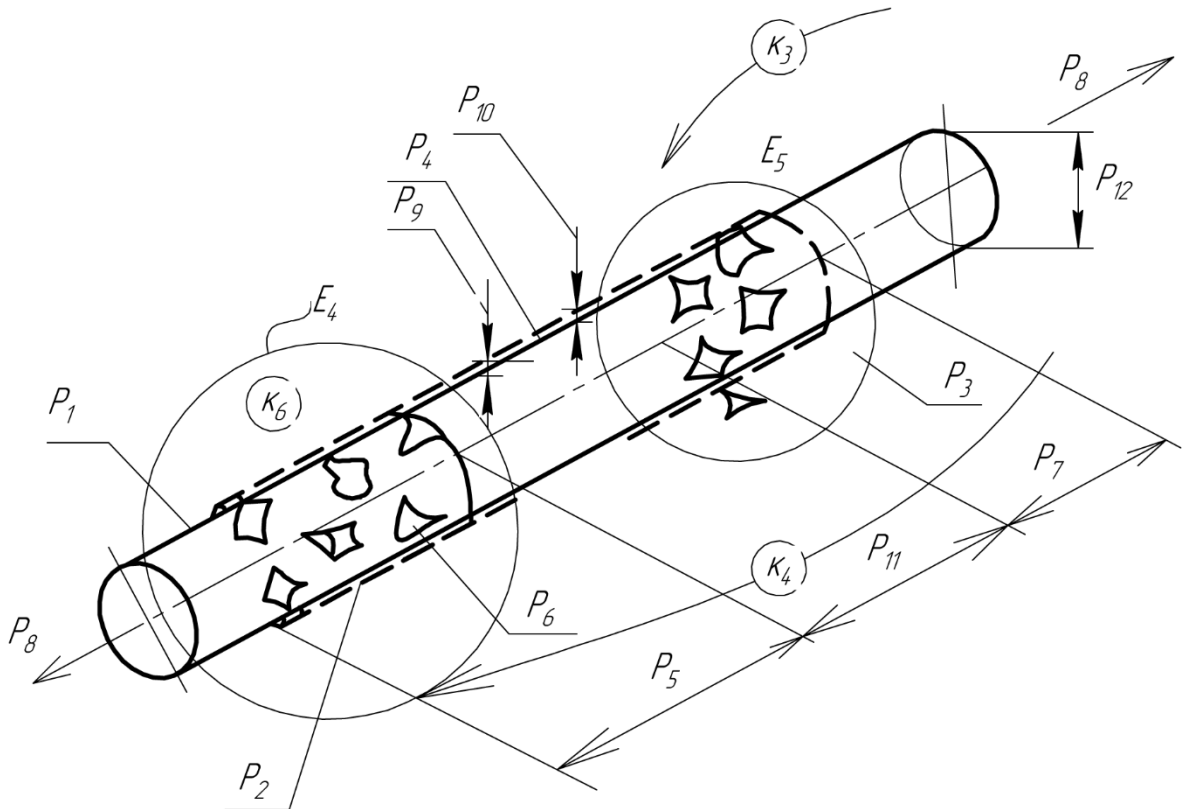


Рис. 2.14. Забезпечення функцій окремими зонами мікрорівня

Локалізація та можливість поділу поверхонь на мікрозони доводить, що нижнім рівнем формування корисних функцій є мікрорівень. Макрорівень передбачає нанесення групи зерен в межах макроплощини (відповідно до рис. 2.10) Однак на основі аналізу п. 2.1 стає зрозумілим, що з урахуванням розташувань окремих зон останні можуть бути поєднані у кластери, однак вимоги табл. 2.6 зберігатимуться і для них.

Формування корисних властивостей виробу як процес адаптації функцій інструменту до локальних умов обробки ілюструє рис. 2.15. Тут властивості та параметри заготовки позначено через її діаметр  $\varnothing$ , довжину  $l$ , міцність шару волокон  $\sigma_v$ , їх геометричні розміри  $D_d, d_v$ , а умови роботи інструменту – як зміна довжини різця протягом часу обробки  $\tau$ ,  $L_o=f(\tau)$ , зміни температури  $T$ ,  $T=f(\tau)$ , швидкості різання  $v_p$  та умом робочого навантаження  $R$ . Параметри сформованих кластерів -  $l_1, \delta_1, b_1$ .

З [85] відомо, що технологічні перетворення заготовки у готовий виріб є наслідком цілеспрямованих технологічних впливів  $W_{ij}(t_k)$  матеріального  $S_o(t_k)$ , енергетичного  $E_o(t_k)$  та інформаційного  $I_o(t_k)$  типів (відповідно до п.1.4). Для кластеризованої поверхні формування вихідних властивостей набуде вигляду:

$$W^m_{ij}(t_k)=\Sigma S^i_o(t_k)\cup E^j_o(t_k)\cup I^k_o(t_k). \quad (2.24)$$

Тоді, з урахуванням можливості переривання процесу формування кластерів, послідовна сукупність впливів у межах локального розташування кластеру  $E_m$  потребує технологічного впливу  $\Pi^t_{ij} \dots \Pi^t_{ij+k}$ ,

Ці дії визначатимуться можливостями обладнання, яке використовується, зокрема, потужністю лазеру  $P$  та тривалістю імпульсу  $\zeta$ , спроможного нагрівати основу до температури  $T_{kr}$ , швидкістю руху  $v_{max}$  та ін.

У цьому випадку раціональні термобаричні умови процесу  $T=f(\tau)$ ,  $P=f(\tau)$  обумовлюватимуться необхідними лінійними ОХ, ОУ, ОZ або обертовими  $\xi, \zeta$  рухами робочих органів верстата. Пошук законів руху, що визначає умови формування робочих кластерів, є основною задачею адаптації процесу до використовуваного обладнання. Тоді на інструменті, що передбачає кластеризовану робочу поверхню, і отриманий на основі принципу морфологічного перебору з об'єднанням властивостей, будуть формуватися  $m$  елементів, для яких умова  $m < k+j$  повністю витримується, оскільки кластери одночасно впливають на поверхню різання, реалізуючи лише дії, адаптовані до умов різання на конкретних ділянках поверхні.

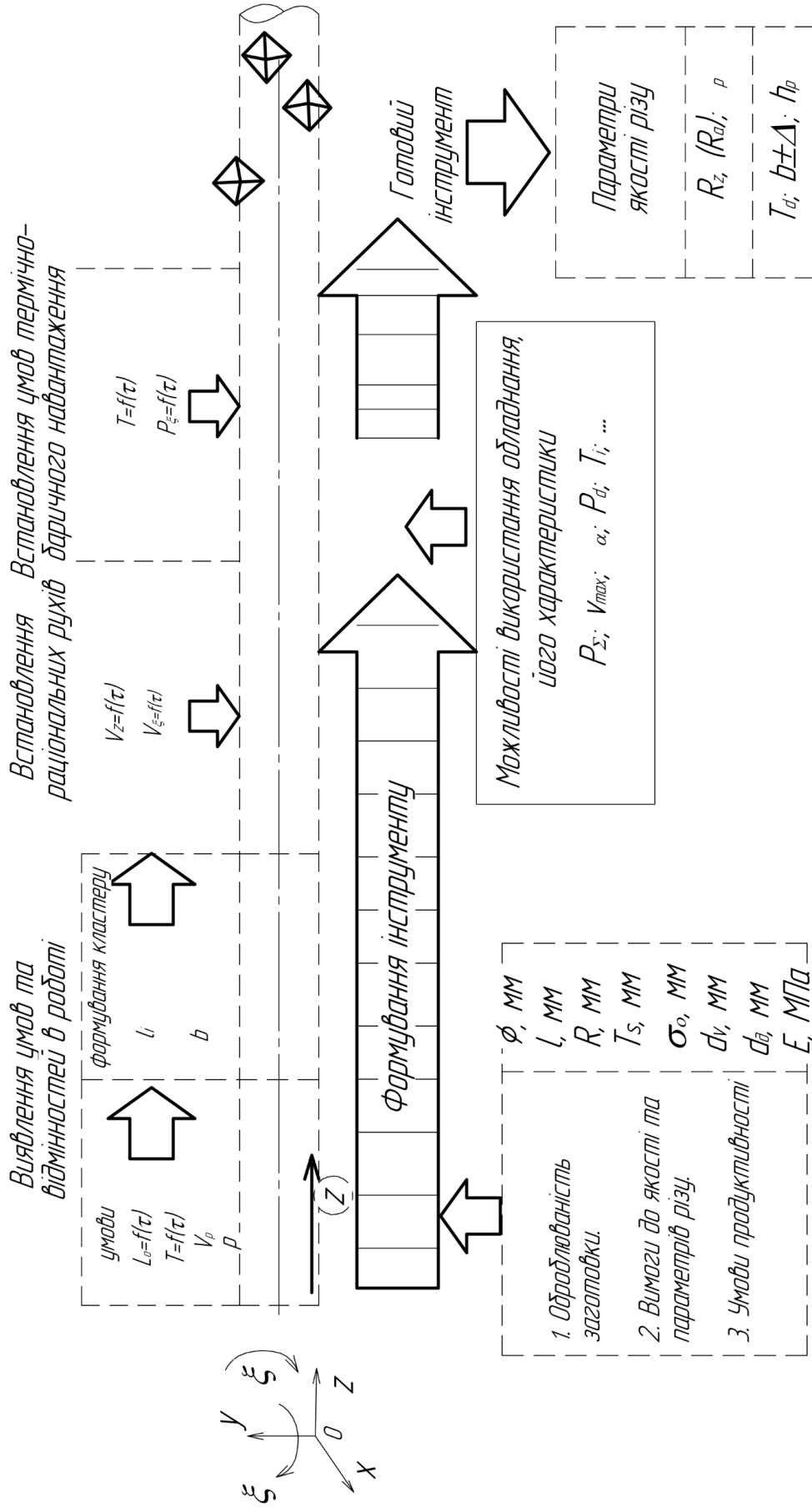


Рис. 2.15. Формування корисних властивостей виробу як процес адаптації функцій

## 2.5. Лазерне термодформаційне спікання як засіб формування поверхневих кластерів

Сутність процесу проілюстровано на рис. 2.16. Порошок зв'язки разом із алмазними зернами дозовано потрапляють у ванну розплаву, сформовану концентрованим лазерним випромінюванням, після чого додатково прикатуються роликом із певним зусиллям  $R$ .

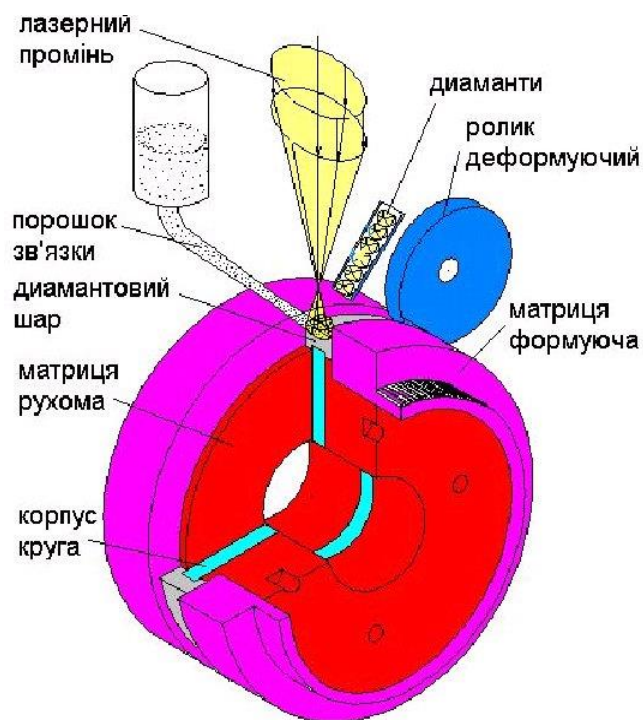


Рис. 2.16. Принципова схема пошарового лазерного термодформаційного спікання азмазовмісного композиту в радіальному напрямку (за [63])

Цей спосіб дозволяє керовано закріплювати алмазні зерна поодинці, забезпечуючи не тільки потрібну міцність кріплення, а і надаючи можливість формувати потрібну поверхню. Для визначення ступеня локалізації  $\delta$  при формуванні шару проаналізуємо теплові явища, що супроводжують процес термодформаційного спікання. Нехай точкове джерело тепла діє на поверхню напівбескінечного тіла (рис.2.17).

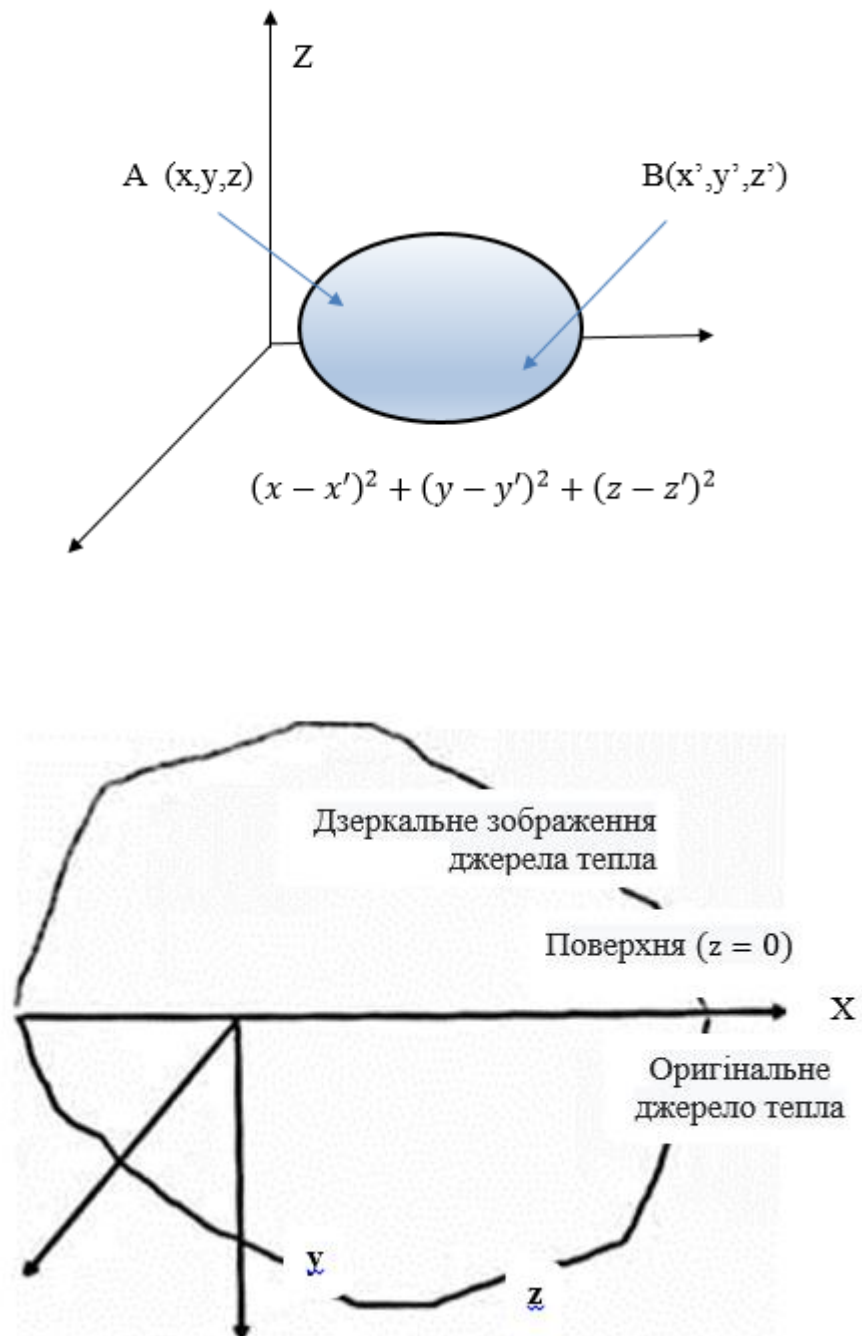


Рис. 2.17. Схема підведення тепла у точку певного тіла та на поверхню напівскінченного тіла

Диференціальне рівняння теплопровідності в стаціонарному середовищі, яке не передбачає конвекції або випромінювання, має вигляд

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.26)$$

Тобто для певного тіла маємо наступну зміну температури

$$dT(x, y, z, t) = \frac{\delta q}{\rho C (4\pi a(t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a(t-t')} \right].$$

Для точки з координатами  $(x, y, z)$  за час  $t$  у разі, якщо тепло  $\delta q$  миттєво надійде до точки поверхні, що має координати  $(x', y', z')$  і час  $t'$ ;  $C$  – теплоємність,  $\alpha$  – дифузійність,  $\rho$  – щільність,  $K$  – теплопровідність.

В напівскінченному тілі зміна температури відбуватиметься дещо іншим чином:

$$\begin{aligned} dT(x, y, z, t) &= \frac{\delta q}{\rho C (4\pi a(t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4a(t-t')} \right] \left[ \exp \left[ -\frac{(z-z')^2}{4a(t-t')} \right] \right. \\ &\quad \left. + \exp \left[ -\frac{(z+z')^2}{4a(t-t')} \right] \right] \end{aligned}$$

Для рухомого джерела рівняння набуде змін і при  $z'=0$ , матиме вигляд:

$$dT(x, y, z, t) = \frac{2\delta q}{\rho C (4\pi a(t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}{4a(t-t')} \right] \quad (2.27)$$

Тож маємо, якщо тепло вивільняється зі швидкістю  $dQ = P dt'$  від  $t = t'$  до  $t = t' + dt'$  у точці  $(x', y', z')$ , температуру при  $(x, y, z)$  в момент часу  $t$  знаходимо, інтегруючи вище рівняння:

$$dT(x, y, z, t) = \frac{P dt'}{\rho C (4\pi a(t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a(t-t')} \right] \quad (2.28)$$

Тепер, якщо джерело тепла від часу  $t'=0$  до  $t'=t$  безперервне, воно може бути записане як

$$dT(x, y, z, t) = \int_{t'=0}^{t'=t} \frac{P dt'}{\rho C (4\pi a(t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a(t-t')} \right]$$

де  $Q$  у Вт.

Коли  $t \rightarrow \infty$ , відбуватиметься стаціонарний розподіл температури, заданий формулою

$$T(x, y, z) = \frac{P}{4\pi k \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} \quad (2.29)$$

Такий розподіл температур характерний для імпульсної дії джерела тепла.

Оскільки використовуваний лазер є імпульсним, а в зону лазерного впливу потрапляють і додаткові частинки матеріалу (алмазні зерна, присадковий метал), розглянемо задачу поширення тепла при переміщенні лазера. Насправді така схема властива умові, коли формування кластерів і окремих мікрозон відбувається безперервно, а властивості кластеру обумовлюються режимами процесу.

Якщо точкове джерело переміщується уздовж певної координати, опис розподілу температур виконуватиметься виходячи із наступного (рис. 2.18): 1) рухоме джерело тепла насправді є безперервним нерухомим джерелом в рухомій системі відліку; 2) наступний крок використовується для пошуку суперпозиції точкових рішень у просторових координатах у рухомій системі відліку.

Переміщення джерела лазера вздовж осі  $X$  у напівнескінченному тілі може бути описане наступним чином:

- у рухомій системі координат:

$$dT(X, Y, Z, t) = \frac{2\delta q}{\rho C (4\pi a(t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(X-x')^2 + (Y-y')^2 + Z^2}{4a(t-t')} \right]$$

- у нерухомій системі координат:

$$dT(x, y, z, t) = \frac{2\delta q}{\rho C (4\pi a(t-t'))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x-vt'-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}{4a(t-t')} \right]$$



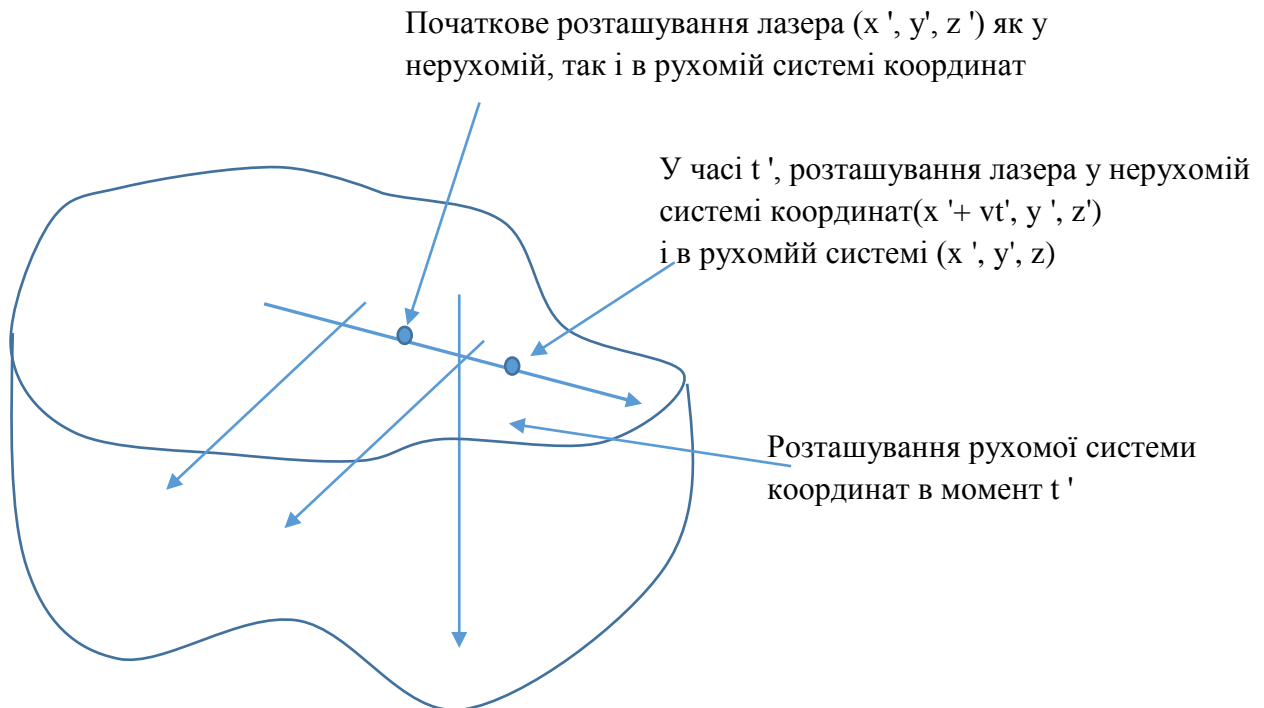


Рис. 2.18. До визначення точок нагріву в рухомій системі координат

Тепер, якщо точкові джерела тепла  $P$  із інтенсивністю теплопідведення  $dQ = P dt'$ , рухаються зі швидкістю  $v$  уздовж поверхні напівскінченого тіла від часу  $t' = 0$  до  $t' = t$ , матимемо наступне рівняння підвищення температури в точці  $(x, y, z)$ :

$$dT(x, y, z, t) = \int_{t'=0}^{t'=t} \frac{P dt'}{\rho C (4\pi a(t))^{3/2}} \exp \left[ -\frac{(x - vt' - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}{4a(t)} \right]$$

Зважаючи на те, що теоретично розподіл інтенсивності випромінювання підкоряється розподілу Гаусса, тобто

$$I(x', y') = \frac{2P}{\pi \sigma^2} \exp \left[ -\frac{2(x'^2 + y'^2)}{\sigma^2} \right] \quad (2.30)$$

у рухомій системі координат зростання температури може бути описане рівнянням

$$dT(t') = \frac{4Pdt'}{\pi\sigma^2\rho C(4\pi a(t-t'))^{3/2}} \frac{\pi\sigma^2 4\alpha(t-t')}{\sigma^2 + 8\alpha(t-t')} \exp \left[ - \left[ \frac{2(X^2 + Y^2)}{\sigma^2 + 8\alpha(t-t')} + \frac{Z^2}{4a(t-t')} \right] \right]$$

Тоді у фіксованій системі координат відповідна різниця температур може бути визначено з інтегрального рівняння

$$T - T_0 = \frac{4P}{\rho C \sqrt{4\pi a}} \int_{t'=0}^{t'=t} \frac{dt'(t-t')^{-0.5}}{\sigma^2 + 8\alpha(t-t')} \exp \left[ - \frac{2((x-vt')^2 + y^2)}{\sigma^2 + 8\alpha(t-t')} - \frac{z^2}{4a(t-t')} \right] \quad (2.31)$$

Отже, розподіл температур при опроміненні тіла круговим джерелом (що відповідає перетяжці каустики у фокальній площині), може бути описаний таким рівнянням:

$$dT(X, Y, Z, t) = \frac{2Pdt'}{8\rho C\pi\sigma^2(\pi a(t-t'))^2} \exp \left[ - \frac{z^2}{4a(t-t')} \right] \times \int_{-\sigma}^{\sigma} \exp \left[ - \frac{(x^2 - x')^2}{4a(t-t')} \right] dx' \int_{-\sqrt{\sigma^2 - x'^2}}^{\sqrt{\sigma^2 - x'^2}} \exp \left[ - \frac{(y^2 - y')^2}{4a(t-t')} \right] dy' \quad (2.32)$$

Кінцеву температуру отримують шляхом інтегрування за часом від 0 до  $t$ .

Розглянемо процес нагріву поверхні тіла твердотільним лазером, що падає на поверхню протягом деякого часу і створює локальний нагрів зони опромінення. При цьому щільність енергії, яка буде поглинена, може бути визначено за допомогою виразу [71]:

$$q(x) = q_0 \exp \left( - \frac{x^2}{r^2} \right), \quad (2.33)$$

де  $q_0$  – щільність потужності випромінювання в центрі плями фокусування;  $r$  – радіус променя з урахуванням розподілу щільності випромінювання відповідно до закону Гауса.

Розподіл тепла на поверхні поглинання радіусом  $r$ , наприклад, при прошиванні отвору, визначається за допомогою наступного рівняння:

$$T(x, z, t) = \frac{q_{\max} r^2}{K} \left( \frac{a}{\pi} \right)^{1/2} \int_0^t \frac{P(t-t') dt' \exp \left[ \frac{z^2}{4at} - \frac{x^2}{4at'} \right]}{\sqrt{t'} (4at' + r^2)},$$

де  $q_{\max}$  – максимальна щільність потужності випромінювання в центрі плями;  $x$  – радіальна відстань від центру теплового джерела;

$$P(t) = q(t) / q_{\max},$$

температура на поверхні напівбезмежного тіла в точці з координатами  $(x, y, z)$ , за умови переміщення лазерного променя вздовж поверхні зі швидкістю  $v$ , та за умови нехтування втратами тепла з поверхні, визначається як

$$\bar{T} = \frac{16}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{(c'^2 + t'^2)(b'^2 + \bar{t}'^2)}} \exp \left[ - \frac{\left( 2\bar{x}'^2 + \bar{v}' t' \right)^2}{4(\bar{c}'^2 + \bar{t}'^2)} - \frac{\bar{y}'^2}{\bar{b}'^2 + \bar{t}'^2} - \frac{\bar{z}'^2}{\bar{t}'^2} \right] dt', \quad (2.34)$$

де  $\bar{T} = 16\sqrt{\pi K r T} / P A_0$ ;  $\bar{v} = v_r / 2a$ ;  $\bar{x}' = \frac{x}{r}$ ;  $\bar{y}' = \frac{y}{r}$ ;  $\bar{z}' = \frac{z}{r}$ ;  $\bar{c}' = \frac{c}{r}$ ;

$\bar{b}' = \frac{b}{r}$ ;  $r^2 = cb$ ;  $A_0$  – відбивна здатність матеріалу заготовки;  $P$  – потужність лазерного випромінювання;  $b, c$  – параметри розподілу щільності потужності лазерного випромінювання (за законом Гауса).

Процес теплопровідності в об'ємі матеріалу заготовки, яку обмежено областю  $\Omega$ , з поверхнею  $\partial\Omega$ , може бути описаний за допомогою:

- скалярного поля температури:

$$T = T(P, t),$$

- векторного поля потоку тепла:

$$q = q(P, t), \quad P = \{(x, y, z)\} \in \Omega,$$

- скалярного поля з питомою тепловою енергією:

$$e = e(T).$$

Граничні умови на зовнішніх поверхнях при  $\tau > 0$

$$\left\{ \Gamma_1 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = q_r; \Gamma_2 : \frac{\partial t}{\partial n} = 0; \Gamma_3 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha(t - t_{\text{medium}}) \right\}.$$

Умови на границі контакту  $\Gamma_4$  при  $\tau > 0$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} t|_{\partial_4^-} = t|_{\partial_4^+}, \\ -\lambda_- \frac{\partial t}{\partial n}|_{\partial_4^-} = \lambda_+ \frac{\partial T}{\partial n}|_{\partial_4^+} \end{array} \right. \quad (2.35)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t < t_m - \frac{\Delta t}{2}, \lambda_1(t) = \lambda_s; [c_p(t)\rho(t)]_1 = c_{ps}\rho_s; \\ t_m - \frac{\Delta t}{2} \leq t \leq t_m + \frac{\Delta t}{2}, \lambda_1(t) = \lambda_s + \frac{\lambda_m - \lambda_s}{\Delta t} \left( t - t_m + \frac{\Delta t}{2} \right); \\ [c_p(t)\rho(t)]_1 = c_{ps}\rho_s + \frac{c_{pm}\rho_m - c_{ps}\rho_s}{\Delta t} \left( t - t_m + \frac{\Delta t}{2} \right) + \frac{L_f}{\Delta t}; \\ t > t_m + \frac{\Delta t}{2}, \lambda_1(t) = \lambda_m; [c_p(t)\rho(t)]_1 = c_{pm}\rho_m; \end{array} \right. \quad (2.35)$$

де  $n$  – нормаль до поверхні;  $q_r$  – щільність потужності;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $\Gamma_1$  – поверхня, що опромінюється,  $\Gamma_2$  – поверхня осьової симетрії,  $\Gamma_3$  – поверхні, що контактують із зовнішнім середовищем,  $\Gamma_4$  – границя контакту зв'язника і матриці.

Розрахункові схеми для розв'язку теплових задач формування алмазного шару різних типів інструменту представлені на рис. 2.19.

При граничному режимі розплаву з наступним випаровуванням розмір порожнини [78], що утворилася, залежить від повної енергії, що надходить до поверхневого шару заготовки.

При цьому взято до уваги, що одночасно з нагріванням відбуватиметься деяке перенесення енергії вглиб заготовки, яке обумовлено теплопровідністю її матеріалу. Це явище призводить до зміни фізико-механічних властивостей матеріалу в деякому об'ємі.

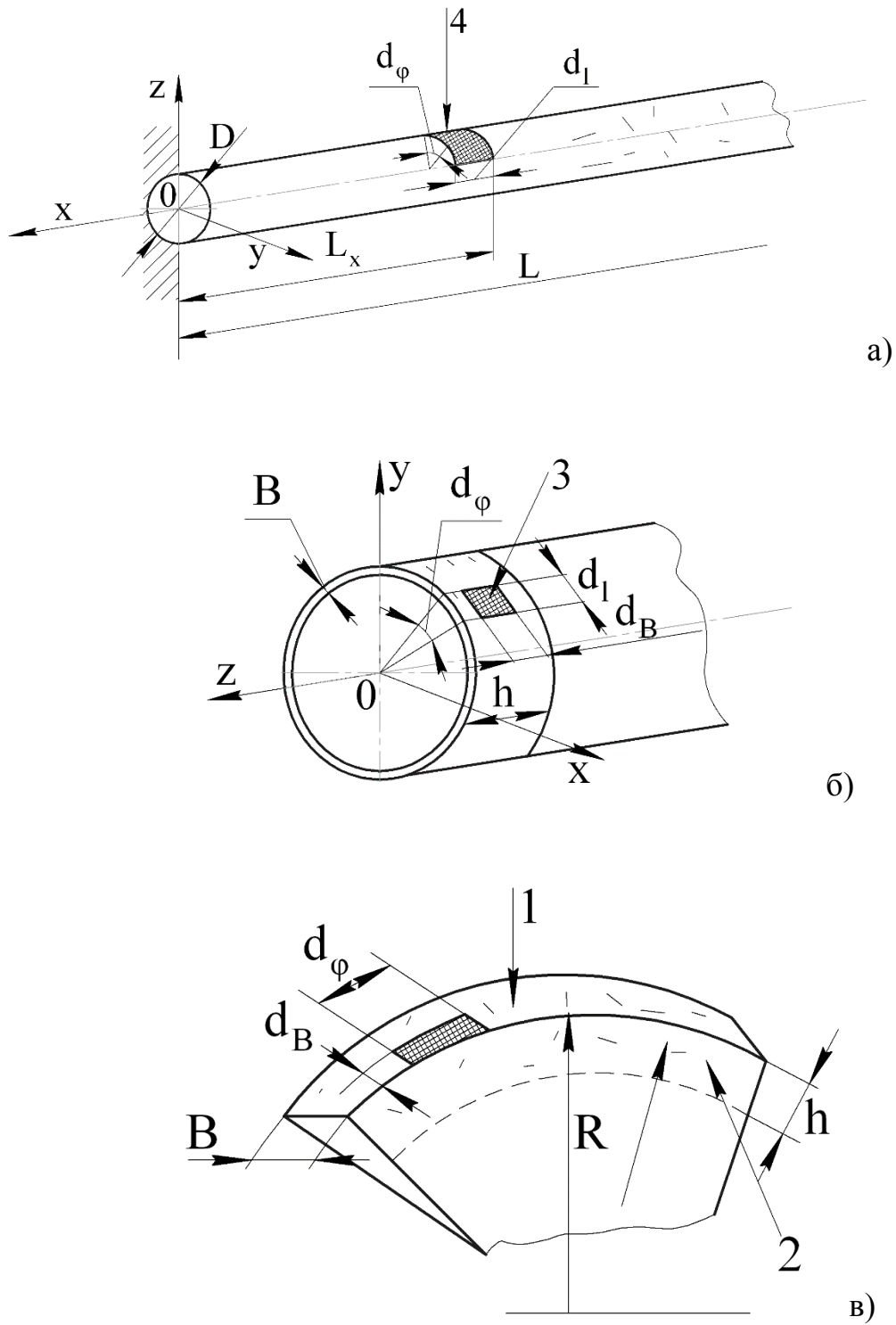


Рис. 2.19. Розрахункові схеми нагрівання елементів поверхонь типових виробів: а) алмазної струни; б) кільцевого свердла; в) торця круга

Завдання руху границь розділу фаз з урахуванням теплопровідності в припущенні, що тепло поширюється по нормалі до поверхні, на основі одновимірного нестационарного рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{D} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.36)$$

де  $D=K/(\rho c)$  – коефіцієнт температуропровідності;  $K$  – коефіцієнти теплопровідності матеріалу заготовки;  $P$  – щільність матеріалу заготовки;  $c$  – питома теплоємність матеріалу заготовки.

Безрозмірна швидкість руху межі зміни фаз залежно від безрозмірного часу для температури  $T(z,t)$  з граничними умовами на рухомій границі  $z=l(t)$  і на зворотній стороні заготовки набуде вигляду:

$$\frac{d\xi}{dt} = \left[ 1 + \varepsilon \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{\tau^{1/2}}{2} \right) - \frac{1}{(\pi\tau)^{1/2}} e^{-\frac{\tau}{4}} \right\} \right] \frac{2}{\pi} \left\{ 1 + \frac{\varepsilon}{\pi\tau^{1/2}} \right\} \arcsin \left\{ \left( 1 - \frac{\pi\varepsilon^2}{4\tau} \right)^{1/2} \right\}.$$

Для чисельних розрахунків було прийнято геометричні параметри інструментів відповідно до рис. 2.18.

Таким чином, статична постановка задачі дозволяє оцінити теоретичні розміри плями як  $d_{n \min} = 0,67 dR^{1/3} \left( \frac{\lambda}{d} \right)^{2/3}$ , з урахуванням теплофізичних властивостей основи для нанесення алмазів

$$d = \left\{ \frac{12E}{\pi\rho h [cT_u + L_u + L_{нт} + c'(T_u - T_{нт})]} \right\}^{1/2}. \quad (2.37)$$

Динамічна постановка задачі, яка, окрім явищ теплового характеру, враховує динамічні явища руху алмазного зерна каналами підведення, переміщення робочого органу відносно поверхні нанесення та ін., потребує врахування того, що розміри сформованого кластеру, який володіє сукупністю заданих властивостей та може бути сформований окремо від других, визначається: 1) процесами нагрівання, плавлення та наступної кристалізації зони із введеним у ванну розплаву композитом та алмазними зернами; 2) динамічними явищами підведення частинок композиту та алмазних зерен системою транспортування (газоповітряною); 3) динамічними явищами переміщення основи виробу під наступне нагрівання, рис. 2.20.

Система подачі композиту працює за рахунок перепаду тиску в каналі подачі суміші. Алмазні зерна вносяться дозатором у потік, і прямують до точки розплаву. Суміш подається як примусово, так і за рахунок ежекції при змішуванні робочого газу в передсопловій камері.

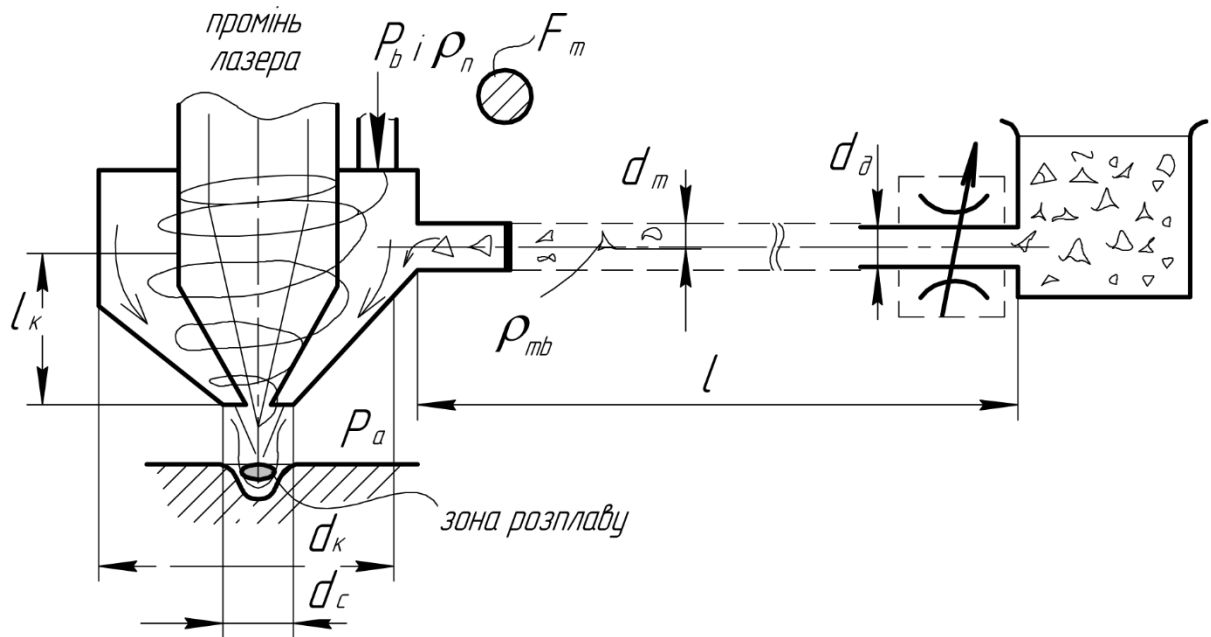


Рис. 2.20. Схема формування кластера поверхні як наслідку явищ нагріву, подачі суміші композиту та алмазних зерен, орієнтації основи відносно джерела нагріву

Рух частинок відбувається внаслідок передачі імпульсу зовнішніх сил на ділянці  $\Delta l$  від газового середовища і описується рівнянням:

$$[F \cdot (p - \Delta p) - F_p] \cdot \Delta t = \Delta p \cdot F \cdot \Delta t, \quad (2.38)$$

де  $F$  – площа поперечного перерізу труби підведення частинок присадкового металу та алмазів.

При цьому зміна кількості руху маси двофазного потоку на ділянці  $\Delta l$  складе

$$[\varepsilon \cdot \rho_T + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_B] \cdot [F \cdot v_{cm} \cdot u_{y\partial} \cdot \Delta t + F \cdot v_{cm}^2 \cdot \Delta t], \quad (2.39)$$

де  $\rho_T, \rho_B$  – щільність твердих часток і стисненого повітря відповідно;  $\varepsilon$  – об'ємна частка твердих часток в аеросуміші;  $1-\varepsilon$  – об'ємна частка повітря в аеросуміші;  $\varepsilon \cdot \rho_T + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_B = \rho$  – щільність двофазного потоку;  $u_{уд}$  – швидкість поширення звуку в двофазному потоці.

На основі рівняння Менделєєва–Клапейрона витрата абразивних частинок залежить від співвідношення обсягів жиклеру подачі стисненого повітря та власне змішувальної камери за умови ізотермічності процесу  $p_k = \frac{p_j W_j}{W_k}$ , де  $p_j$  – тиск у жиклері. У зв'язку з цим витрату повітряно-твердофазної суміші у функції геометричних параметрів системи подачі частинок у зону лазерного впливу можна визначити так:

$$Q_m = \frac{5}{2} \mu \pi d_c^2 \sqrt{\frac{2p_j d_j^2 l_j \rho_a \rho_r}{[x_a \rho_r + \rho_a (100 - x_a)] d_k^2 l_k}}, \quad (2.40)$$

де  $d_c, d_j, d_k$  – діаметри вихідного отвору, отвору жиклеру та змішувальної камери відповідно;  $\mu$  – коефіцієнт витрати вихідного отвору;  $\rho_a, \rho_r$  – густина абразивних частинок та рідини відповідно;  $l_j, l_k$  – довжина жиклеру та змішувальної камери відповідно;  $x$  – масова концентрація твердої фази, %.

Для визначення похибки робочих переміщень основи інструменту кроковими двигунами враховуємо наступне.

Динамічна система робочого столу подібна до схеми, розглянутої в [86] та відповідає рис. 2.21.

Складова геометрична помилка відтворення контуру буде визначатися за формулою:

$$\chi = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_\varphi^2 + v^2} - \frac{k d_c}{2}, \quad (2.41)$$

причому  $\delta_\varphi = \frac{D_p}{2} \sin(\varphi)$  – визначається кутом повороту другої маси.



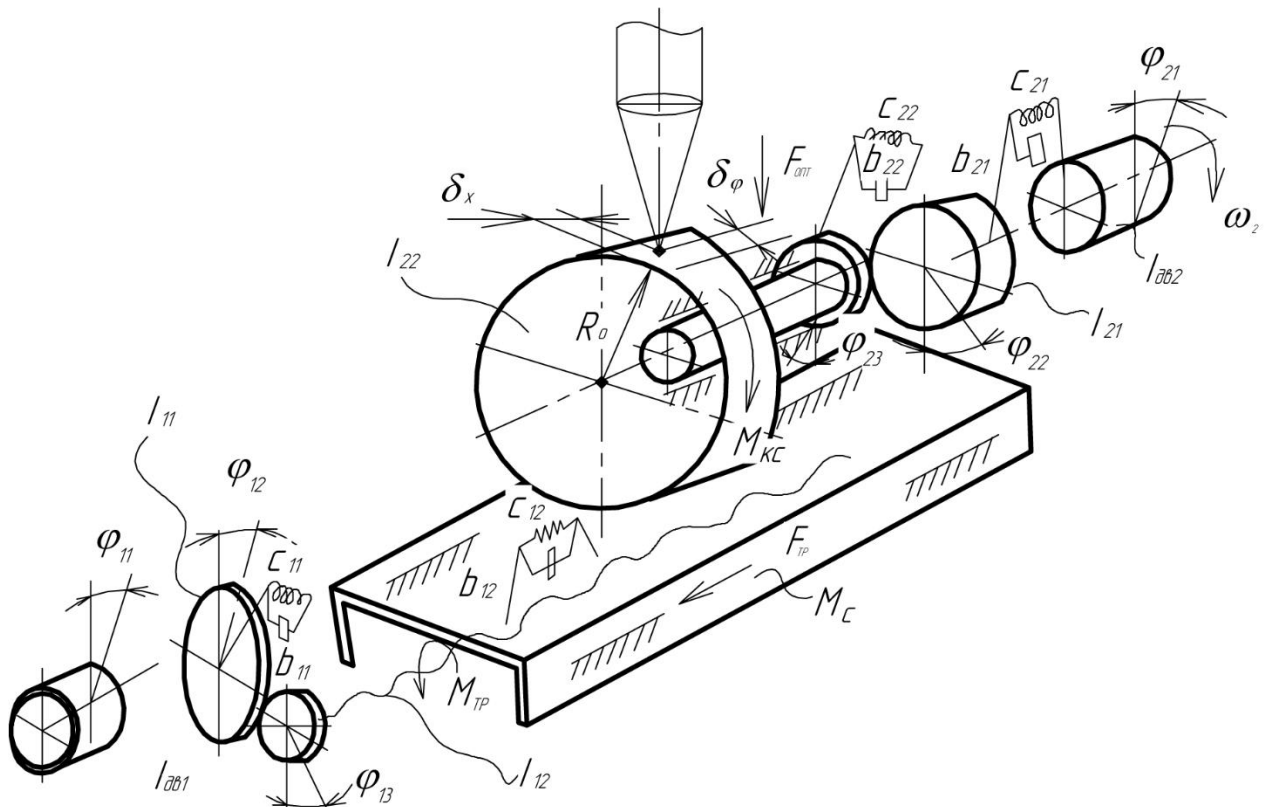


Рис. 2.21. Формування похибок приводами

Тут  $\delta_x$  – похибка приводу по координаті  $X$ ;  $\delta_\varphi$  – похибка приводу по кутовій координаті  $\varphi_{22}$ ;  $\nu$  – похибка від дії допоміжного пристрою;  $d_c$  – діаметр плями розплаву;  $k$  – коефіцієнт, що враховує збільшення ділянки розігріву до пластичного стану після дії лазера.

Похибки  $\delta_x$  та  $\delta_\varphi$ , як і динамічні коливання  $\Delta_{ix}$ ,  $\Delta_{iy}$  будуть змінними в часі та залежатимуть від багатьох факторів, зокрема, від типу використаного приводу подачі, швидкості відпрацювання переміщень, сил тертя у направляючих, маси оброблюваної заготовки (якщо переміщується саме вона), системи керування та алгоритмів відпрацювання довільно розташованих прямих або криволінійних відрізків. Однак, найбільшою похибка буде у разі формування кластерів із одночасною роботою обох приводів. Значення  $\delta_x, \delta_\varphi, \Delta_{ix}$  та  $\Delta_{iy}$  отримуємо на основі математичного моделювання поведінки приводів подач. З цією метою застосовуємо наступну систему диференціальних рівнянь:

– рівновага першої зосередженої маси  $\frac{d\varphi_{11}}{dt} = \omega_{11}$ ;

– рівновага другої зосередженої маси

$$\frac{d\omega_{11}}{dt} = \frac{(c_{11}(\varphi_{11}-\varphi_{12})+b_{11}(\omega_{11}-\omega_{12}))-M_t-c_{12}(x_z-x_p)-b_{12}(v_z-v_p)}{J_{12}} \quad (2.44)$$

– кут повороту на другій масі  $\frac{d\varphi_{12}}{dt} = \omega_{12}$ ,

де  $M_t$  – момент тертя у опорах повздовжньої кінематичної ланки, що у загальному вигляді буде являти собою нелінійність  $M_t = \text{sign}\omega_2 |M_t|$ .

Поступова швидкість руху столу  $v$  пов'язана з відповідною обертовою швидкістю ходового гвинта  $\omega$  так:  $v_z = \omega_2 \frac{t}{2\pi}$ . Рівновага поздовжньо рухомого стола визначиться рівнянням:

$$m_c \frac{dv_p}{dt} = c_{12}(x_z - x_p) + b_{12}(v_z - v_p) - F_c, \quad (2.45)$$

де  $m_p$  – маса столу;  $F_{tz}$  – нелінійна сила тертя в направляючих робочого столу;  $x_p, v_p$  – координата і швидкість переміщення столу;  $x_z, v_z$  – координата і швидкість, яка визначається переміщенням ходового гвинта.

Друга зосереджена маса здійснює обертовий рух. Отже  $\frac{d\varphi_{21}}{dt} = \omega_{21}$ ; рівновага другої зосередженої маси

$$\frac{d\omega_{21}}{dt} = \frac{(c_{21}(\varphi_{21}-\varphi_{22})+b_{21}(\omega_{21}-\omega_{22}))-M_t-c_{22}(\varphi_{23}-\varphi_{22})-b_{22}(\omega_{23}-\omega_{22})}{J_{21}} \quad (2.46)$$

$$\frac{d\varphi_{22}}{dt} = \omega_{23}, \quad \frac{d\omega_{22}}{dt} = \frac{c_{22}(\varphi_{23}-\varphi_{22})-b_{22}(\omega_{23}-\omega_{22})-M_c}{J_{21}}$$

Рівняння руху електропривода з урахуванням моментів діючих на ротор:

$$\frac{d\omega_{11}}{dt} = \frac{p}{J_\Sigma} (M_\Sigma - M_c), \quad (2.47)$$

де  $J_\Sigma = J_\Sigma + J_\Sigma$  – сумарний момент інерції електропривода приведений до валу ротора;  $p$  – число пар полюсів;  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  – частота обертання;  $M_c = M_n + M_m + M_n$  – сумарний момент опору двигуна;  $M_n$  – момент опору навантаження,  $M_m = D \cdot \frac{d\theta}{dt}$  – момент опору в'язкого тертя (де  $D$  – коефіцієнт в'язкого тертя),  $M_n$  – момент тертя ковзання в підшипниках.

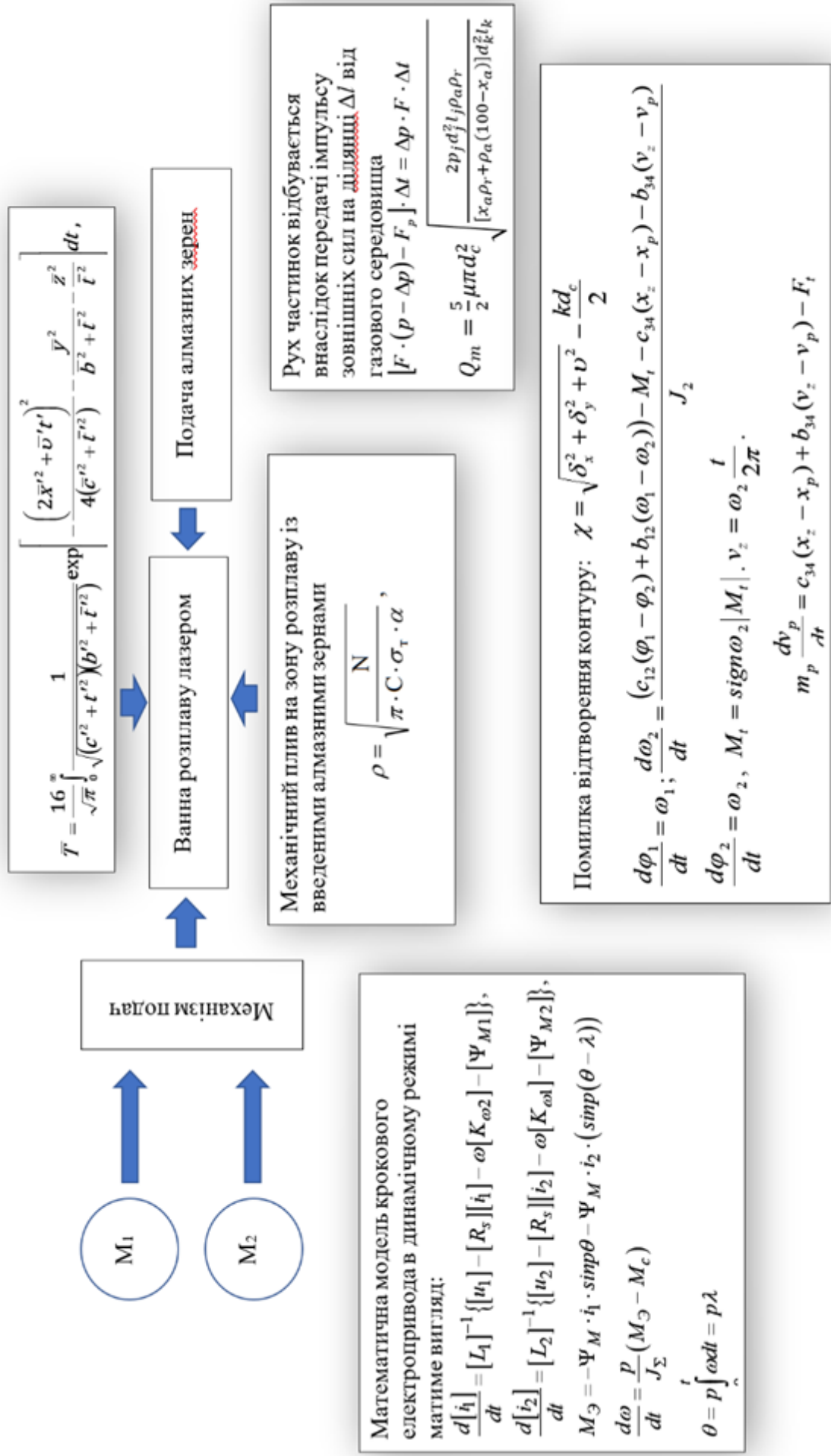


Рис. 2.22. Схема формування розміру кластеру при динамічній постановці задачі

Таким чином, схема формування кластеру буде наступною (рис. 2.22). Маємо, що на відміну від статичної постановки динамічна задача враховує похибки, пов'язані із рухом робочого органу чи заготовки, отже, на відміну від (2.37) розмір кластеру (або його елементу) становить

$$d_{n \max} = d + 3\chi. \quad (2.48)$$

Отримані закономірності дозволяють прогнозувати очікуваний розмір елементів кластеру (рис.2.13),  $l_1 \dots l_i$ ,  $T_{k1} \dots T_{kj}$ , та більш точно обирати матеріальні носії функцій у вигляді технологічних прийомів і відповідного технологічного оснащення для формування кластерів інструменту.

Таким чином, удосконалено математичну модель формування кластерів поверхні ЛТДС алмазного шару, яка враховує не тільки теплові процеси і явища у зоні обробки, а і динаміку руху робочих органів, та запропоновано залежності для визначення розміру кластеру.

## 2.6. Висновки за розділом

Розглянуто особливості взаємодії нежорстких інструментів із порожнистою структурою високоміцних композитів. Показано, що алмазно-абразивні інструменти можна поділити на гнучкі (інструменти із додатковими ступенями вільності) – типу пильних струн або полотен; пружні (типу пильних погрузних полотен реноватору), у тому числі, круги, свердла малих діаметрів, та жорсткі.

Показано, що для гнучких та пружних інструментів доцільне врахування динамічних явищ як наслідку взаємодії окремих зерен із порожнистим середовищем високоміцних композитів типу КІМФ, що дозволить більш точно прогнозувати обсяги вилучення шламу та описати процес затухання інтенсивності різання. Зазначена взаємодія характеризується відмінністю по локалізації та за часом, що дозволило зробити висновок про доцільність формування робочих поверхонь інструменту у вигляді окремих кластерів.

Застосування функціонального підходу до удосконалення процесів формування алмазного шару із використанням морфологічного та функціонально–вартісного аналізу дозволило сформулювати основні засади визначення особливостей роботи виробів та запропонувати матеріальні носії функцій у вигляді способів формування такого шару.

Висунуте припущення, що кластеризація робочих поверхонь інструменту дозволяє більш чітко адаптувати відмінні режими різання (окремими ділянками інструменту) до умов взаємодії. Найбільш доцільна така адаптація для інструментів із додатковими ступенями вільності – гнучкими нежорсткими оправками, здатними упродовж процесу постійно змінювати умови взаємодії зерен із матеріалом.

Подібна кластеризація дозволяє враховувати також і особливість будови оброблюваного композиту, його анізотропію та структуру (у тому числі, порожнистість, механічні властивості компонентів, умови деформацій та виключення волокон армувальника та ін.). Тож кластеризація постає універсальним засобом максимальної адаптації робочої поверхні інструменту до умов його використання.

Наведено графі обумовленості головних функцій інструменту матеріальними носіями – засобами формування кластерів та показано, що найбільш доцільним засобом забезпечення властивостей є лазерно–деформаційний спосіб формування поверхневого шару, який потребує певних удосконалень для отримання закономірностей керування процесом формування елементів поверхні або їх кластерів.

Удосконалено математичну модель формування кластерів поверхні ЛТДС алмазного шару, яка враховує не тільки теплові процеси і явища у зоні обробки, а і динаміку руху робочих органів, та запропоновано залежності для визначення розміру кластеру, моделі для визначення температурних полів на оправках інструменту, а також умови формування окремих елементів кластеру, які представлені у квазістатичній та динамічній постановках.

### РОЗДІЛ 3

#### ВИКОРИСТОВУВАНЕ ОБЛАДНАННЯ, ЗАСОБИ ФОРМУВАННЯ АЛМАЗНОГО ШАРУ НА ОСНОВІ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПІДХОДУ ТА ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Вимоги до обладнання і оснащення, що реалізує процеси лазерного термодформаційного спікання кластерів поверхонь

Процес лазерного термодформаційного спікання є складним та етапним процесом, який реалізується на основі подачі у ванну розплаву, сформовану пучком лазера, частинок абразиву, з наступним ущільненням механічним притисканням. Додатково в зону обробки подається присадковий матеріал у вигляді порошку, який розплавляється і утворює поверхневий валик [88], [89].

Такий процес відбувається при взаємодії лазерного променя з порошковою сумішшю зв'язуючого матеріалу і алмазів при відповідних умовах опромінювання, а утворений валик (рис.3.1), має достатньо високі характеристики якості (практично не змінна міцність алмазів, міцне утримання алмазів зв'язкою). Головною умовою ефективного формування такої елементарної ділянки є короткочасне (0,3 – 0,4с) і рівномірне нагрівання визначеної поверхні, на якій знаходиться суміш, до температури плавлення. Керуванням процесами нагрівання, подачі присадкових матеріалів та алмазів можна формувати геометричні розміри валику, його різальну здатність. При цьому загальна схема формування валику подана на рис. 3.2.

Відповідно до [88] для виготовлення такого інструментального композиту безпосередньо на ріжучій частині реального інструменту, йому треба надати відповідну форму і розміри. Крім того, композит повинен відповідати вимогам з точки зору концентрації алмазів, закономірностей їх розміщення в ньому тощо.



Рис. 3.1. Характерні валики алмазвміщуючого композиту, одержані лазерним спіканням (за [88])

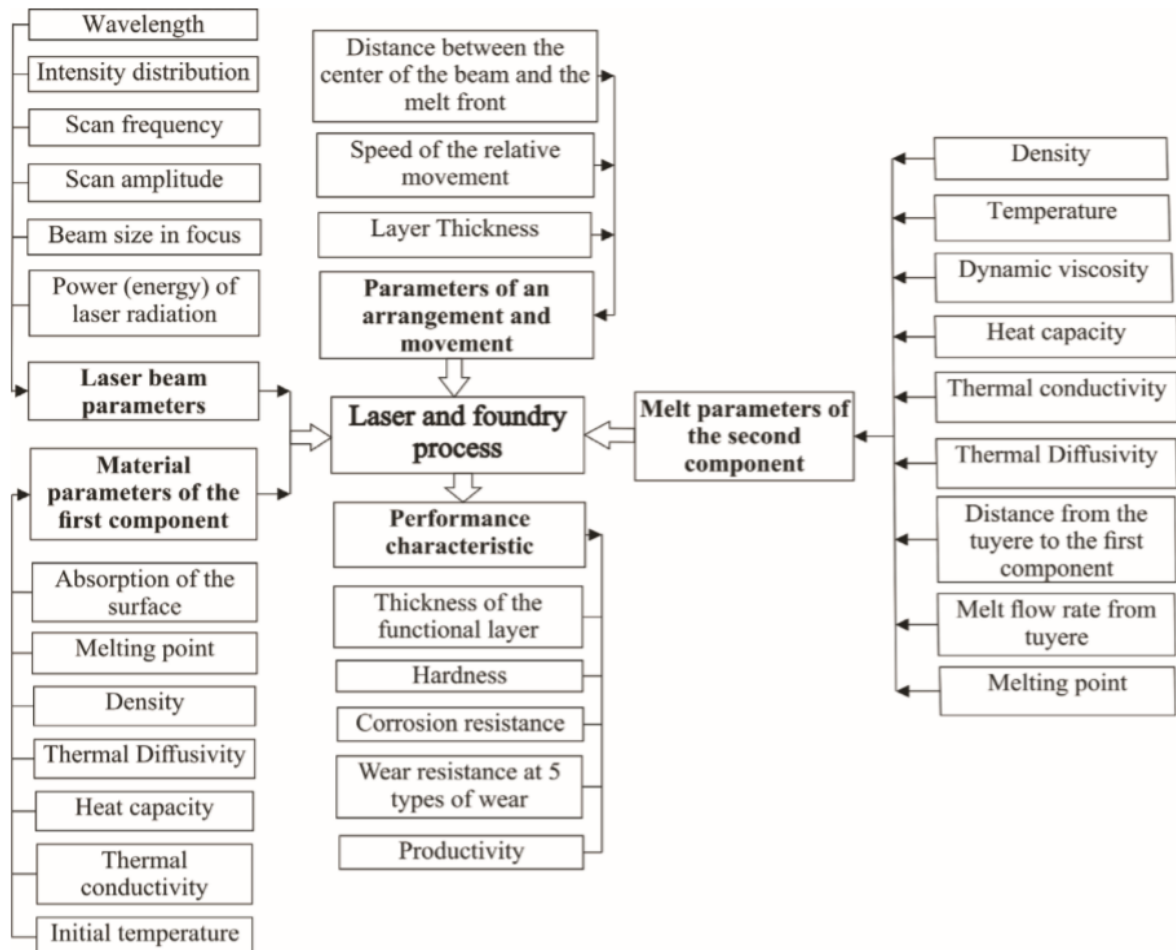


Рис. 3.2. Схема формування ділянки поверхні із алмазним шаром, створеним лазерним термодформаційним спіканням

Для того, щоб композит мав визначену форму і розміри, треба застосувати відповідну металеву матрицю, в якій буде кристалізуватись розплавлена лазерним випромінюванням суміш і оплавлений край корпусу інструмента, до якого приєднується ріжуча частина. Оскільки матриця не буде мати формуючої поверхні з боку дії лазерного променя, цю операцію виконують за допомогою пластичного деформування ще гарячого композиту, наприклад, обкаткою роликом. Це дозволить, крім надання шару композита необхідного розміру, додатково вирішити ще ряд питань: ущільнити і зміцнити композит, одержати необхідну шорсткість поверхні, підготувати поверхню для нанесення наступного шару. Формування робочої частини інструменту шляхом пошарового лазерного нарощування композиту можна здійснювати двома способами. Вони відрізняються напрямками нарощування – радіальним і осьовим (рис. 3.3).

Як видно із наведених схем, при осьовому напрямку нарощування діаметр лазерного променя в площині фокусування повинен відповідати ширині робочої частини інструменту. Збільшити розмір плями фокусування можна шляхом підвищення рівня дефокусування променя (рис.3.4,а), але при цьому суттєво збільшиться нерівномірність розподілу потужності випромінювання, що є не допустимим.

Збільшити ширину зони нагрівання, що важливо з погляду продуктивності способу і розширення його технологічних можливостей, можна застосувавши для обробки скануючий лазерний промінь (рис.3.4,б). Такий промінь, маючи навіть нерівномірний розподіл потужності в пучку, коливаючись з визначеною частотою і амплітудою при переміщенні забезпечує одержання на поверхні фактично рівномірного й однорідного теплового джерела.



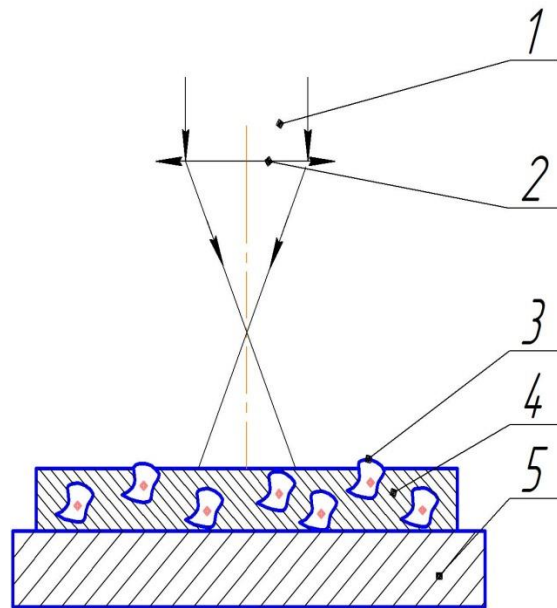


Рис. 3.3. Способи формування робочої частини інструменту шляхом пошарового лазерного спікання композиту

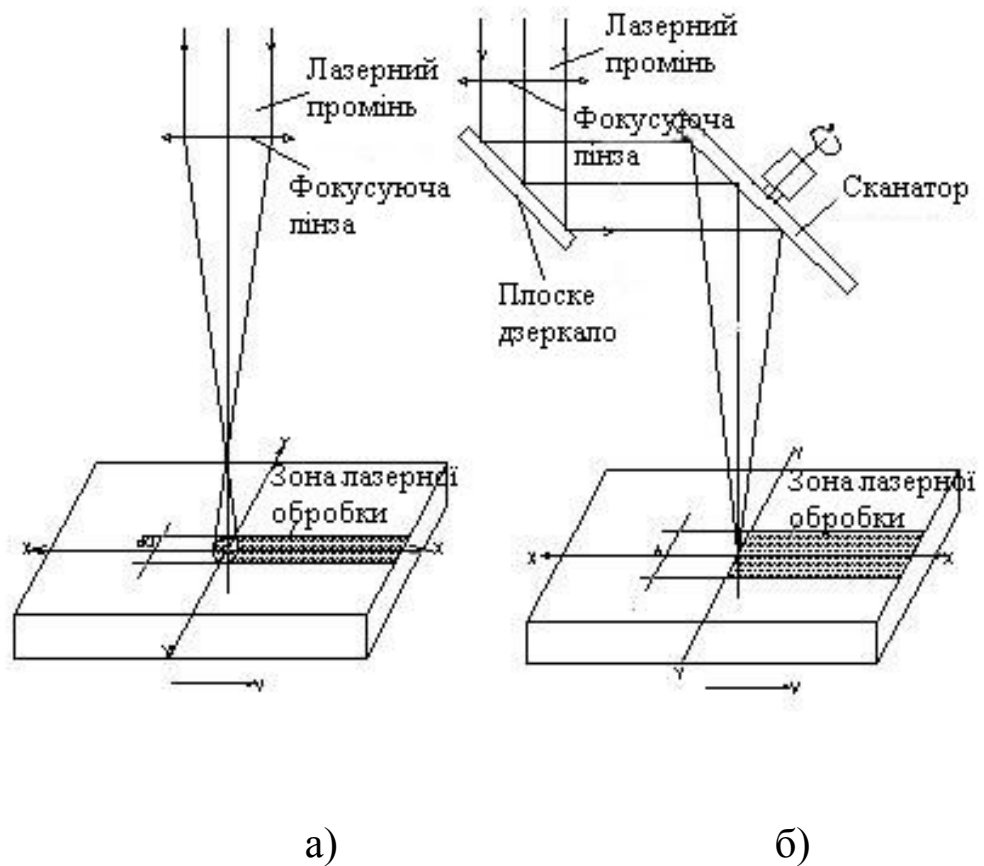


Рис. 3.4. Схеми лазерного нагрівання композиційних матеріалів розфокусованим (а) та скануючим (б) променем

Ці способи мають як спільні риси, так і принципові розбіжності.

Кожен з них призначений для вирішення певного кола технологічних задач. Вони не виключають один одного, а взаємно доповнюють, чим розширюють технологічні можливості методу. На рис.3.4 представлена принципова схема термодформаційного спікання алмазовміщуючого композиту з використанням скануючого лазерного променя.

У відповідності із цією схемою лазерний промінь, що сканує у радіальному напрямку з амплітудою, що дорівнює ширині алмазовміщуючого шару, розплавляє кромку корпусу круга і металеву зв'язку. Зв'язка при цьому безперервно разом з алмазами подається у спеціальну полу прес-форму, що обертається.

При цьому частота сканування лазерної плями забезпечує квазібезперервність теплового потоку необхідної інтенсивності для розплавлення металу. Закристалізована, але ще пластична зв'язка разом з алмазами по мірі переміщення прес-форми ущільнюється спеціальним деформуючим роликком. Таким чином, формуються необхідні розміри і профіль алмазовміщуючого шару на корпусі інструменту. Запропонована схема дозволяє реалізувати і інші варіанти організації процесу спікання. Наприклад, спікання попередньо зформованного на корпусі інструменту алмазовміщуючого робочого шару.

На рис.3.5. представлена принципова схема пристрою для пошарового лазерного термодформаційного спікання алмазовміщуючих композитів в радіальному напрямку.

Для вибору режимів лазерного опромінення, відпрацювання конструкцій технологічного устаткування, що реалізують приведені способи лазерного термодформаційного спікання алмазовміщуючих композитів, необхідно знати закономірності розподілу температур у композиті, у корпусі інструменту, на формуючих поверхнях матриці. Для визначення величини деформуючого зусилля та координат зони його прикладання зазвичай вирішують теплову задачу лазерного нагрівання трьох-компонентної системи «матриця – корпус – композит».

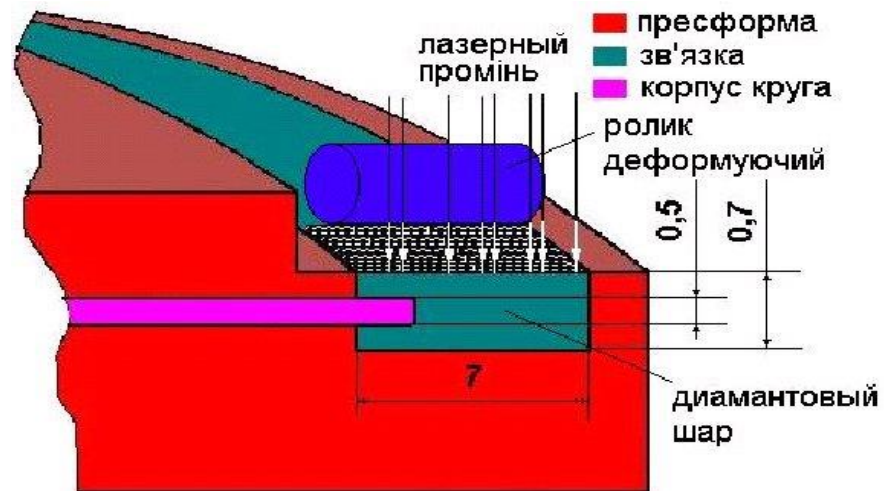


Рис. 3.5. Принципова схема осьового термдеформаційного спікання алмазвміщуючого композиту із використанням скануючого лазерного променя (за [90])

Ці закономірності необхідно знати як на етапі лазерного нагрівання, так і на етапі охолодження. Це дозволить правильно вибрати матеріал матриці, оцінювати доцільність використання примусового її охолодження, визначити координати прикладання деформуючого зусилля.

Таким чином, для реалізації процесу необхідно заготовці надавати обертальний рух із розташуванням вісі у вертикальній чи горизонтальній площині, одночасно здійснюючи поступальне переміщення в радіальному напрямку.

Для здійснення зазначених рухів необхідне використання двох приводів – обертального та радіального, які мають бути об'єднані у єдину систему і керуватися від загальної системи керування.

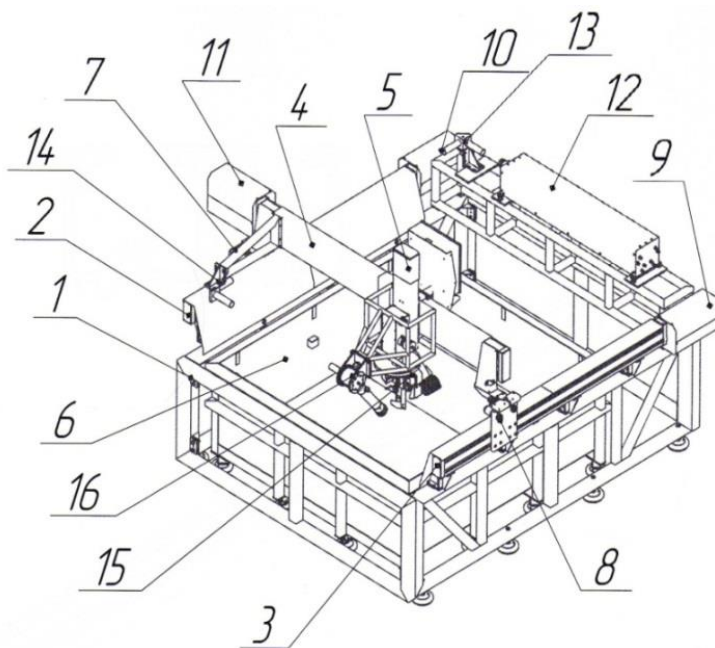
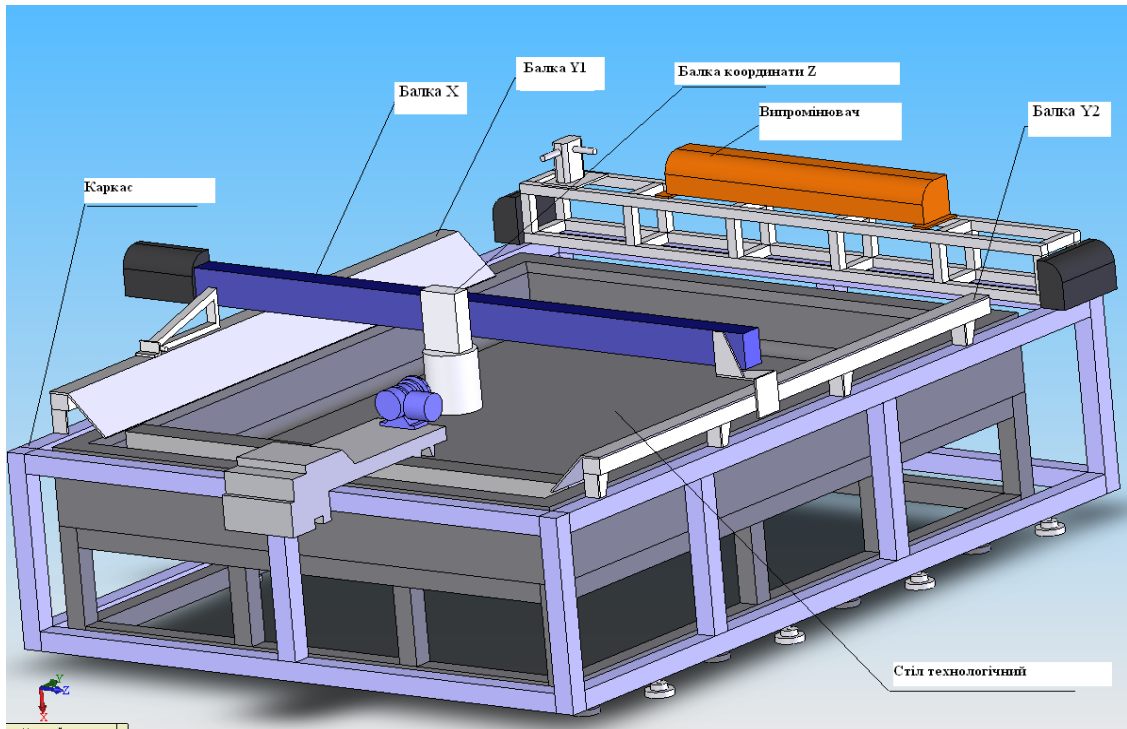
### 3.2. Обладнання для термодформаційного спікання кластерів поверхні та допоміжні пристрої

Для забезпечення сталого процесу лазерного термодформаційного спікання використовується універсальний лазерно–струминний комплекс ЛСК 400–5 (рис. 3.6), на якому встановлено допоміжне пристосування у вигляді модулю поздовжнього переміщення та поворотного столу для встановлення заготовок.

Зазначене пристосування має два окремих модуля – модуль лінійного переміщення у вигляді механізму із двома круглими напрямними та кульково–гвинтовою передачею, привод якої здійснюється за допомогою хвилевого мотор–редуктора, та горизонтального поворотного столу із механізмом вибору зазорів та черв’ячного приводу.

Універсальний лазерно–струминний комплекс ЛСК–400–5 оснащений твердотільним Nd:YаG лазером потужністю 0,5 кВт, з довжиною хвилі 1069 нм, з частотою слідування імпульсів 50-750 Гц (рис. 3.6).

Лазер має фокусуєчи систему та систему транспортування променя у вигляді «летючої оптики», із засобами переривання променя, а також ряду допоміжних систем, за допомогою яких можлива реалізації струминно–лазерної, криогенної та гідроабразивної обробки. Конструктивно робочий стіл комплексу ЛСК–400–5 виконаний нерухомим; переміщення здійснює струминна головка, яка встановлена на траверсі з можливістю вертикального переміщення по координаті  $Z$ , що переміщується уздовж координати  $X$  по напрямним столу. Переміщення виконується двома синхронізованими приводами подач, по одному на кожній балці, з синхронізацією за кутом повороту валів приводних двигунів. Сама головка на додатковій каретці прямує напрямними траверси за координатою  $Y$ .



1 – несуча система; 2, 3 – балки поздовжнього переміщення (Y-координати); 4 – балка поперечного переміщення (X-координати); 5 – балка вертикального переміщення (Z-координати); 6 – водоприймач; 7 – система «летючої оптики» твердотільного лазеру; 8 – каретка силового приводу; 9, 10, 11 – кожухи приводів; 12 – випромінювач лазеру; 13, 14, 16 – вузли повороту променя; 15 – обертова головка (з додатковими обертовими координатами B та C)

Рис. 3.6. Встановлення додаткових модулів лінійного та поворотного переміщень на робочому столі комплексу ЛСК 400–5

Додатково на вихідній ланці кінематичного ланцюга встановлено два обертових привода – довкола вертикальної осі  $c$  та осі, розташованій у горизонтальній площині  $a$ . Приводи подач – електромеханічні, оснащені кульково–гвинтовою передачею, із кроковими двигунами типу ШД–5М. Для досягнення необхідної точності напрямні розвантажуються стисненим повітрям. Структурна схема комплексу відповідає формулі  $Z_{xy}OXYZacP_z$  [91]. Основні характеристики наведені у табл. 3.1.

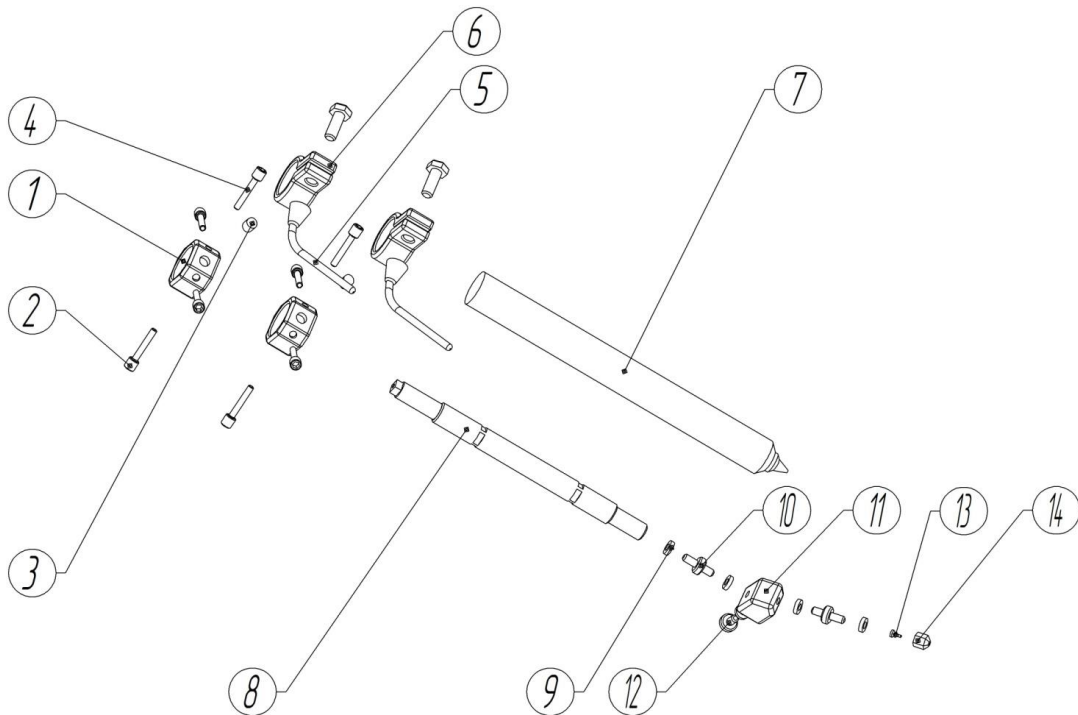
Таблиця 3.1 – Технічна характеристика універсального комплексу ЛСК–400-5

№ з/п	Характеристика	Розм.	Параметр
1	Потужність головного приводу	кВт	40
2	Максимальний тиск	МПа	380
3	Розм. робочого столу	мм	1500×2000
4	Точність відпр. переміщень	мм	±0,05
5	Фракційність абразиву	мм	0,05...0,22
6	Максимальна витрата рідини	см <sup>3</sup> /хв	45
7	Діаметри сопла $d_c$ та калібрувальної трубки $D_k$	мм	$d_c = 0,1...0,65$ $D_k = 0,8...1,35$
8	Тип лазера та довжина хвилі променя	нм	Yag:Nd, 1062
9	Потужність випромінювача середня	Вт	410
10	Частота повторення імпульсів	Гц	50–1000
11	Енергетична розходженість лазерного випромінювання по рівню 0,9 потужностей, не більше	мрад	8
12	Нестабільність потужності лазерного випромінювання впродовж 4 год безперервної роботи, не більше	%,	5
13	Клас лазерної небезпеки		III
14	Координати		X, Y, Z, c, b
11	Система керування		ЧПК «Графіка 3+»
12	Кількість керованих координат		5
13	Кількість інтерполяторів / одночасно керованих координат		2/3
14	Маса комплексу	кг	1850

Для введення алмазних частинок до робочої зони використовувався газово–дросельний пристрій транспортування. Робочу головку (рис. 3.7) виконували у двох варіантах: із боковим підведенням присадкового матеріалу та алмазів та із коаксіальним, тобто подавання частинок алмазів здійснюється газовим потоком крізь регульоване кільцеве сопло, в якому сфокусований промінь лазера прямує уздовж центральної осі. Додатково у зону наплавлення подається і присадковий порошковий матеріал (на основі дрібнодисперсного порошку Ni).

Використовуваний пристрій дозволяє транспортувати суміш компонентів. При продуванні захисним газом суміш ежектується та проходить через трубку підведення (6), згін (8), потрапляє до фітинга кутового (10) – потік змінює нахил, проходить через згін і сопло, виходить назовні. У створений потік вводиться промінь лазера.

У змонтованому стані у кільце (1) загвинчують чотири мікрометричні гвинти (2) у кожне з двох кілець. Орієнтуючись по поділкам на гвинтах встановлюють необхідну силу затиску трубки підведення суміші (6). Головка лазерна (7) закріплюється двома кільцями (6), які попередньо зібрані з кільцями (1) за допомогою стрижня з'єднувального (3). Безпосередня фіксація головки лазерної здійснюється обертанням ручок затискних (5), які затягують болти затискні (4). Перед монтуванням змішувальної частини здійснювали складання трубки підведення (8) з рештою деталей. Для цього у трубку закручується згон (10), на якому попередньо розміщені шайбі ущільнювальні (9). На вільний кінець згону накручується фітинг кутовий (11), у якому технологічний торцевий отвір закритий заглушкою (12) із шайбою ущільнювальною. В інший кутовий отвір закручується згін з ущільнювальними шайбами, вставляється сопло (13) і прижимається гайкою натискною (14). Необхідну відстань, на якій буде відбуватися введення променя лазера у потік, встановлюють при монтуванні. Фото обладнання ЛСК–400–5 та оригінального оснащення подано на рис. 3.8.



- 1 – кільце;
- 2 – гвинт мікрометричний;
- 3 – стрижень з'єднувальний;
- 4 – болт затискний;
- 5 – ручка затискна;
- 6 – кільце затискне;
- 7 – головка лазерна;
- 8 – трубка гідропідводу;
- 9 – шайба ущільнювальна;
- 10 – згін;
- 11 – фітинг кутовий;
- 12 – заглушка;
- 13 – сопло;
- 14 – гайка натискна.

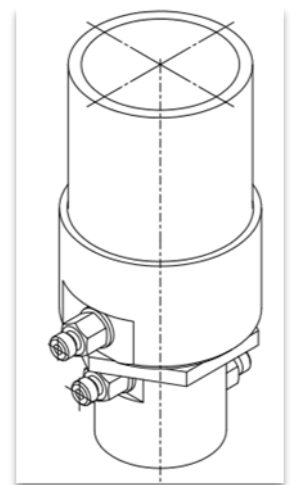
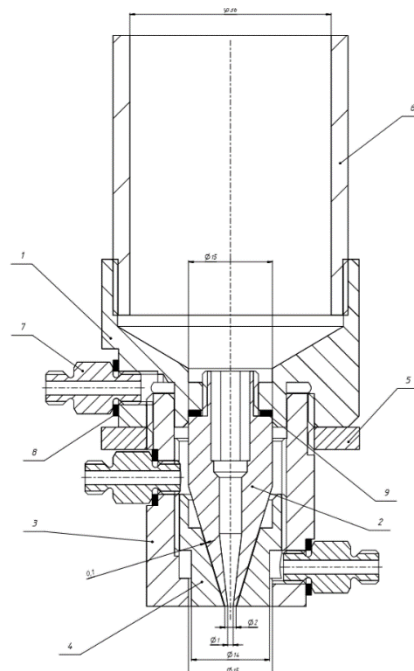


Рис. 3.7. Головки підведення частинок абразиву та присадкового матеріалу у зону обробки





а)



б)



в)

Рис. 3.8. Фото дослідницького обладнання ЛСК–400–5 (а), використовувані головки (б) та система фокусування, застосована у тубусі (в). Головку (б) з різальної перетворили на зварювальну шляхом розфокусування на поверхні нагрівання

Таке регулювання здійснюється шляхом переміщення затискних кілець по довжині лазерної головки, а потім у необхідній точці відбувається затиск за допомогою ручок.

Для здійснення операцій керованого викладання алмазів заготовкам необхідно надавати складні рухи, що дозволили б перенести точку формування властивостей усією робочою поверхнею інструменту (для формування відповідних кластерів алмазовмісного шару). Так як інструменти являють собою тіла обертання, на яких кластери формуються відповідно до твірних та дотичних профілю, розроблено спеціальний пристрій (рис. 3.9), який забезпечує одночасне обертальне і поздовжньо поступове переміщення інструменту за заданою траєкторією.

Запропонований пристрій складається із основи у вигляді типового хрестового столу 1 (рис. 3.9), оснащеного двома кроковими двигунами на яку змонтовано додатково панель 2, з встановленою консольно приводним патроном 3, який отримує обертовий рух від додаткового крокового двигуна 5 за допомогою ремінної передачі, нтяг якої забезпечує механізм 4 у вигляді коромислового важеля, оснащеного двома роликами. Додатково пристрій оснащено люнетом 6, встановленим на одній осі з патроном 3. Застосування зубчастого ременя для приводу патрону дозволяє забезпечити високу точність кутових переміщень, а використовуваний люнет надає змогу встановлювати заготовки значних діаметрів. Також в люнет може бути встановлена оправка для забезпечення обертового руху основ інструменту у вигляді струн та полотен.

Працює система від ПОЕМ із відповідними драйверами для крокових двигунів EMX-142.

Схемне рішення побудовано на мікроконтролері AVR® UC3 (рис. 3.10).

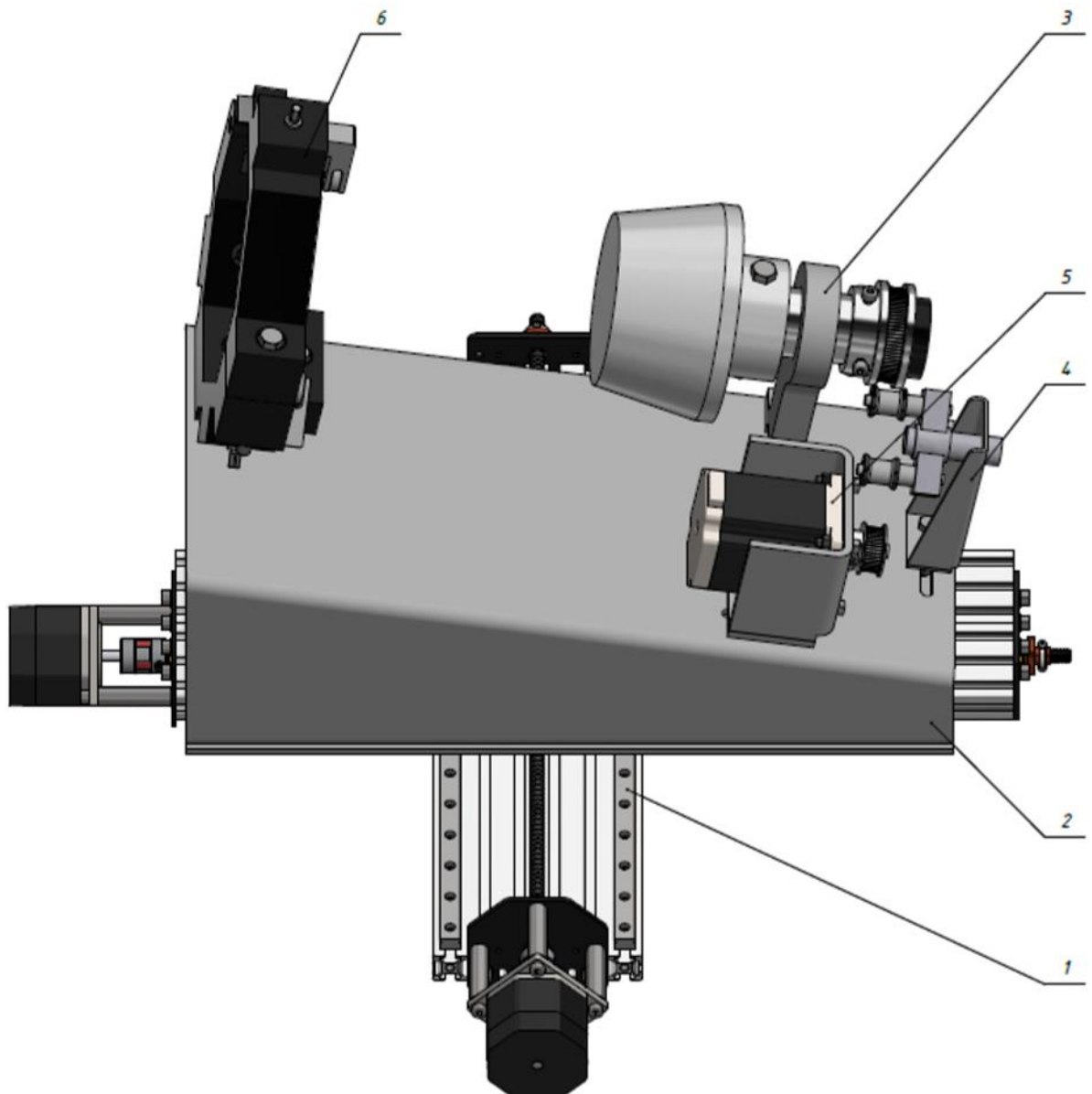


Рис. 3.9. Оснащення для забезпечення складного руху заготовки при формуванні кластерів поверхні:

1 – автоматизований хрестовий стіл, що забезпечує рух у повздовжньому та поперечному напрямках; 2 – плита, яка виконана з листового матеріалу; 3 – вузол обертання заготовки; 4 – механізм натягу зубчатого ременя; 5 – привід обертання; 6 – люнет

Периферійний контролер прямого доступу до пам'яті (DMA) і багаторівнева високошвидкісна шинна архітектура роблять мікроконтролери UC3 ідеальними для використання в сферах із жорсткими вимогами до продуктивності. Завдяки інтелектуальним периферійним пристроям та динамічному керуванню живленням ці мікроконтролери стають очевидним вибором для застосування в портативних системах та приладах із живленням від батареї.

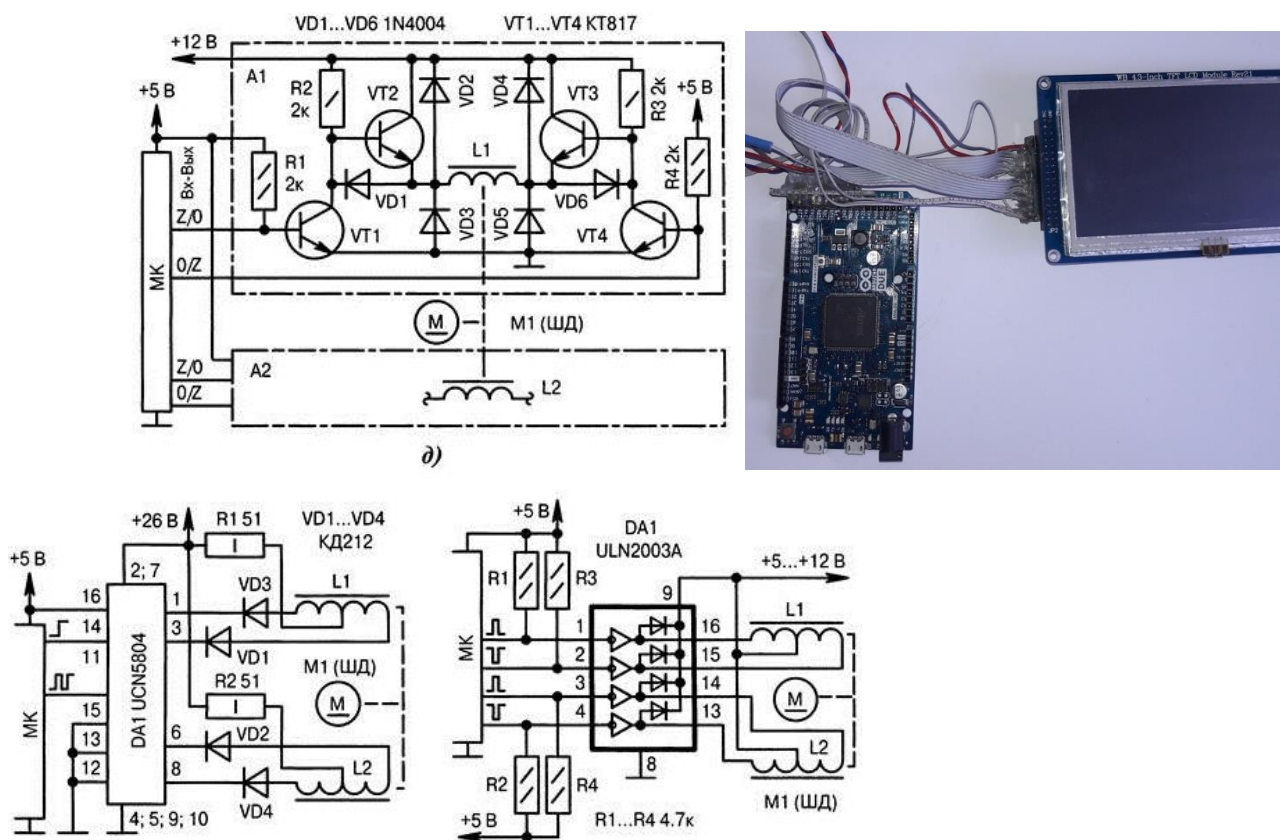


Рис. 3.10. Схемне рішення та загальний вигляд мікроконтролера для керування кроковими двигунами допоміжного пристрою

Деякі мікроконтролери UC3 оснащені вбудованим блоком операцій з плаваючою комою (FPU), який підвищує продуктивність арифметичних обчислень з десятковими дробами, а також збільшує їх точність і динамічний діапазон. Контролер працює у парі із TFT модулем із вбудованим LCD контролером. Пристрій працює наступним чином. Заготовка 14 закріплюється у патроні 15 після чого від TFT дисплею або ПЕОМ подається команда на здійснення обертового і поступового рухів і одночасно вимикається механічна діафрагма лазера, спрацьовують двигуни 1 та 2, вал 18 починає обертатися, одночасно із зворотно–поступовим рухом каретки 9 забезпечує спіралеподібне переміщення променя по оброблюваній поверхні.

### 3.3. Контрольні засоби та обладнання

Стан поверхні різання та алмазовмісного шару досліджували за допомогою растрового електронного мікроскопа з системою енергодисперсійного мікроаналізу РЕМ –106І (рис. 3.11).

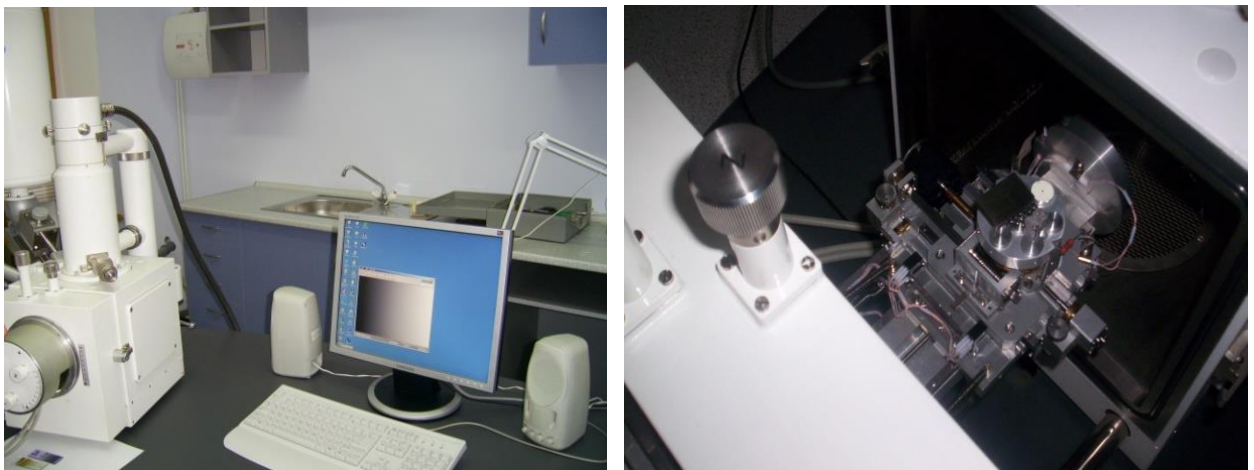


Рис. 3.11. Растровий електронний мікроскоп із системою енергодисперсійного мікроаналізу РЕМ – 106І

Мікроскоп призначено для вимірювань лінійних розмірів елементів технології та параметрів мікрорельєфу поверхні різних об'єктів у твердій фазі й вимірювань масової частки елементів у складі об'єктів методом рентгенівського мікроаналізу, для дослідження поверхні непровідних об'єктів без спеціальної підготовки в режимі низького вакууму.

РЕМ–106І передбачає роботу в режимі спостереження зображення у вторинних електронах (вторинні електрони – це електрони, що випускаються твердими тілами під час їх бомбардування первинними електронами) або у відображених електронах. У режимі високого вакууму в камері можливі два види зображення: у вторинних електронах (ВЕ) і у відбивних електронах (ОЕ). У режимі низького регульованого вакууму реєструється зображення, що створюється тільки ОЕ.

Схема растрового електронного мікроскопа наведена на рис. 3.12. Він складається з наступних основних вузлів: електронної гармати 1...3, що емітує електрони; електронно-оптичної системи 4...10, яка формує електронний зонд і забезпечує його сканування поверхнею зразка 12; системи, що формує зображення 11...17. РЕМ має вакуумну камеру, в якій створюється необхідне розрядження ( $\sim 10^{-3}$  Па) у робочому об'ємі електронної гармати та електронно–оптичної системи. Складовими частинами мікроскопа є механічні вузли (шлюзи, гоніометричний стіл тощо), які забезпечують установку й переміщення досліджуваного зразка, який може бути значних розмірів.

Електронна гармата складається з катода 1, циліндра Венельта 2 та анода 3. Як катод використовується вольфрамовий V-подібний дріт, зігнутий під певним кутом. При нагріванні катода прямим пропусканням струму відбувається термоемісія електронів. Електрони прискорюються напругою, прикладеною між катодом і анодом, яку можна змінювати від 1 до 50 кВ. Циліндр Венельта має високий негативний потенціал і служить для регулювання потоку електронів. Пучок електронів від гармати проходить

крізь три електромагнітні лінзи 5, 6, 9. Фокусування потоку електронів здійснюється магнітним полем, яке має осьову симетрію. Воно створюється електромагнітною лінзою соленоїдного типу. Магнітне поле виникає при пропусненні електричного струму через обмотку соленоїда, концентрується за допомогою так званого полюсного наконечника і впливає на минаючий крізь нього потік електронів. Фокусна відстань лінзи може плавно регулюватися шляхом зміни сили струму в обмотці соленоїда. У системі є дві діафрагми 4 та 10, які обмежують розбіжність пучка електронів.

Механізм переміщення об'єктів (рис. 3.12) призначено для переміщення в камері предметного столика з об'єктом дослідження. Досліджуваний об'єкт поміщають на утримувач, який кріпиться гвинтом. В обоймі розташовано еталонні зразки з  $\text{LaB}_6$ , Mn, C, Cu, Pb.

Вакуумну систему призначено для отримання і підтримки в колоні мікроскопа високого вакууму і регульованого вакууму в камері об'єктів.

Додатковий блок енергодисперсійного мікроаналізу застосовується для встановлення наявності речовини на поверхні. Рентгенівське випромінювання, що генерується в зразку під час бомбардування електронним променем, проходить крізь електронний уловлювач 5 (рис. 3.12,б), тонке вхідне вікно 4 та потрапляє на твердотільний Si-Li напівпровідниковий детектор. Для зменшення електричних шумів кристал та польовий транзистор детектору першого каскаду попереднього підсилювача охолоджуються до температури, близької до температури рідкого азоту. Для цього вони розміщені у вакуумному кріостаті та конструктивно встановлені на кінці холодопроводу, з'єданого із внутрішньою посудиною Д'юара та заправленою рідким азотом.

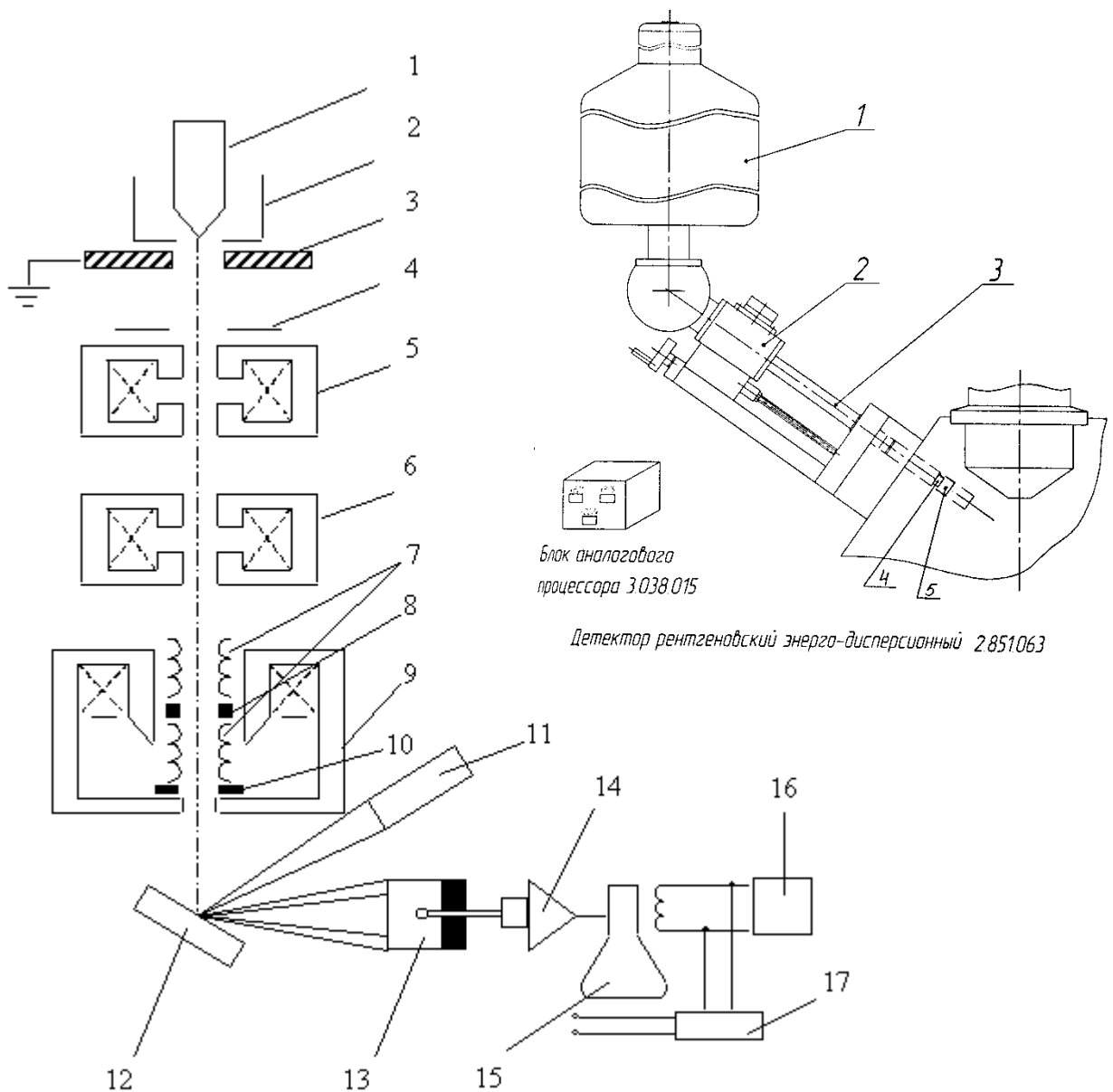


Рис. 3.12. Схема растрового мікроскопу та блоку енергодисперсійного мікроаналізу

При попаданні рентгенівського фотону на кристал в ньому утворюється питомий заряд порядку  $4 \cdot 10^{-17}$  С/keV. Утворений у детекторі заряд переноситься в область «затвор–виток» польового транзистора, на якому виконаний перший каскад попереднього підсилювача. На виході попереднього підсилювача формується імпульс напруги, амплітуда якого пропорційна енергії поглинутого рентгенівського кванта.



Технічні дані використовуваного мікроскопу подано в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Технічна характеристика приладу PEM-106 И

№ з/п	Характеристика	Розм.	Параметр
1	Роздільна здатність мікроскопа у вторинних електронах в режимі високого вакууму не більше,	Нм	4,0
2	Роздільна здатність мікроскопа у відображених електронах в режимі низького вакууму не більше	Нм	6,0
3	Діапазон зміни збільшення	Крат	30...300 000
4	Діапазон регулювання прискорюючої напруги	кВ	0,5...30,0
5	Граничний залишковий тиск у колоні мікроскопа (у ділянці гармати) не більше	Па	$6,7 \cdot 10^{-4}$
6	Переміщення зразка по координатах X, Y	мм	$\pm 25$
7	Крок переміщення	мкм	0,5
8	Обертання зразка		$2\pi$
9	Нахил платформи		$-\pi/6 \dots +\pi/3$
10	Діапазон вимірювання лінійних розмірів	мкм	0,2...5000
11	Діапазон аналізованих елементів у високовакуумному режимі		від $^{12}\text{Mg}$ до $^{92}\text{U}$ (високий вакуум) $^5\text{B}$ до $^{92}\text{U}$ (низький вакуум)
12	Діапазон регулювання струму зонда	А	$10^{-12} \dots 10^{-6}$

### 3.4. Обладнання для виконання обробки композитів створеним інструментом

Випробування свердл здійснювали на верстаті Proxon мод. РВ-10-250, з удосконаленою системою регулювання електроприводу, а також на розробленому стрічко–пильному верстаті із регульованими головним приводом. Загальний вигляд верстатів поданий на рис.3.13. Особливості даного обладнання полягають у тому, що застосування регульованого асинхронного приводу дозволяє виконувати плавне регулювання швидкості різання, а також фіксувати навантаження на головному шпинделі (тобто за витраченою потужністю роботи робиться висновок стосовно сил різання при обробці тестових деталей).



Рис. 3.13. Фото обладнання для дослідження обробки композитів

Технічна характеристика регульованого приводу подана в табл.3.3. Для регулювання двигунів використовували спеціальні перетворювачі частоти (рис. 3.14), що забезпечували можливість виміру миттєвої спожитої потужності.

Таблиця 3.3. – Технічна характеристика використовуваних для обладнання двигунів

№	Характеристика	Од.виміру	Параметр
1	Тип двигуна		АИР 63В2 (ІМ 2181)
2	Потужність приводу	кВт	0,55
3	Частота обертання номінальна	хв <sup>-1</sup>	3000
4	Номінальний струм	А	1,4
5	Регульована частота живлення	Гц	15-500
6	Кількість полюсів		2
7	Регулювання		частотне
8	Ступінь захисту		ІР 55
9	Маса двигуна	кг	9,8

Зв'язок між кутовою швидкістю обертання і частотою струму живлення впливає з рівняння  $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ .

При постійній напрузі джерела живлення  $U_1$  і зміні частоти змінюється магнітний потік асинхронного двигуна. При цьому для кращого використання магнітної системи передбачено при зниженні частоти живлення відповідне пропорційне зменшення напруги, оскільки у протилежному випадку значно збільшується струм намагнічення і втрати в сталі.

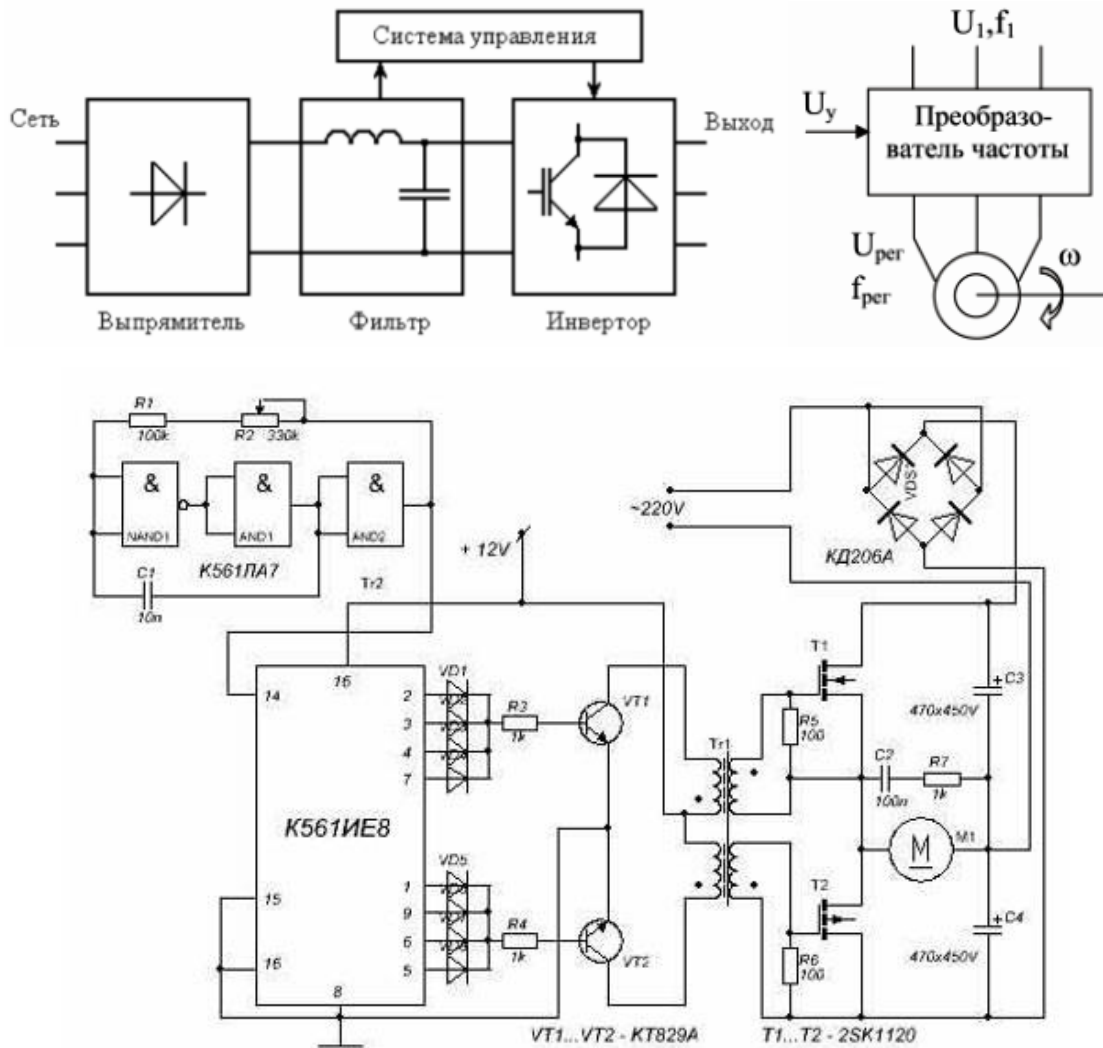


Рис. 3.14. Регулювання асинхронного електроприводу та схемне рішення драйверу

Для опису поведінки електроприводу верстата із робочим органом виходили із наступного. Система двомасова, із зосередженими масами, приведеними до валу електродвигуна та робочого шпинделю (у випадку свердлувального верстата) або редуктору із механізмом зворотно-поступального руху (рис. 3.15).

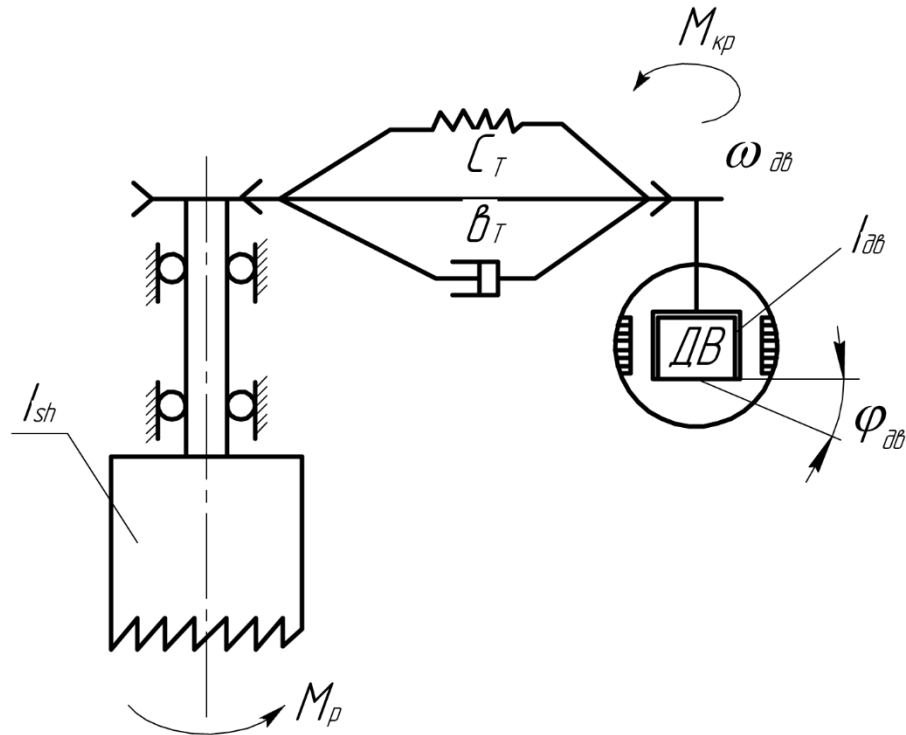


Рис. 3.15. Двомасова схема електромеханічної частини верстата

Опис механічної частини приводу наступний:

$$I_{gb} \frac{d\omega_{gb}}{dt} = M_e - M_c - c_t(\varphi_{gb} - \varphi_{sh}) - b_t(\omega_{gb} - \omega_{sh});$$

$$\frac{d\varphi_{gb}}{dt} = \omega_{gb};$$

$$I_{sh} \frac{d\omega_{sh}}{dt} = c_t(\varphi_{gb} - \varphi_{sh}) + b_t(\omega_{gb} - \omega_{sh}) - M_p; \quad (3.1)$$

$$\frac{d\varphi_{sh}}{dt} = \omega_{sh}.$$

Тут  $\varphi_{gb}, \varphi_{sh}$  – кути повороту ротору двигуна та шпинделя верстату (із інструментом відповідно),  $\omega_{gb}, \omega_{sh}$  – кутові швидкості;  $c_t, b_t$  – параметри динамічної моделі реміної передачі;  $I_{gb}, I_{sh}$  – моменти інерції двигуна та шпинделя відповідно,  $M_e, M_c, M_p$  – моменти електромагнітний, опору сил тертя та різання відповідно. Опис електричної частини наведений у Додатку В. Моделі зміни умов навантаження подано на рис. 3.16, рис. 3.17.

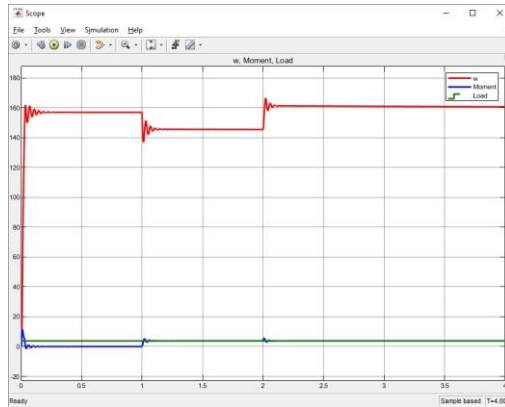


Рис. 3.16. Зміна потужності приводу при розгоні та зміні крутного моменту регульованого приводу

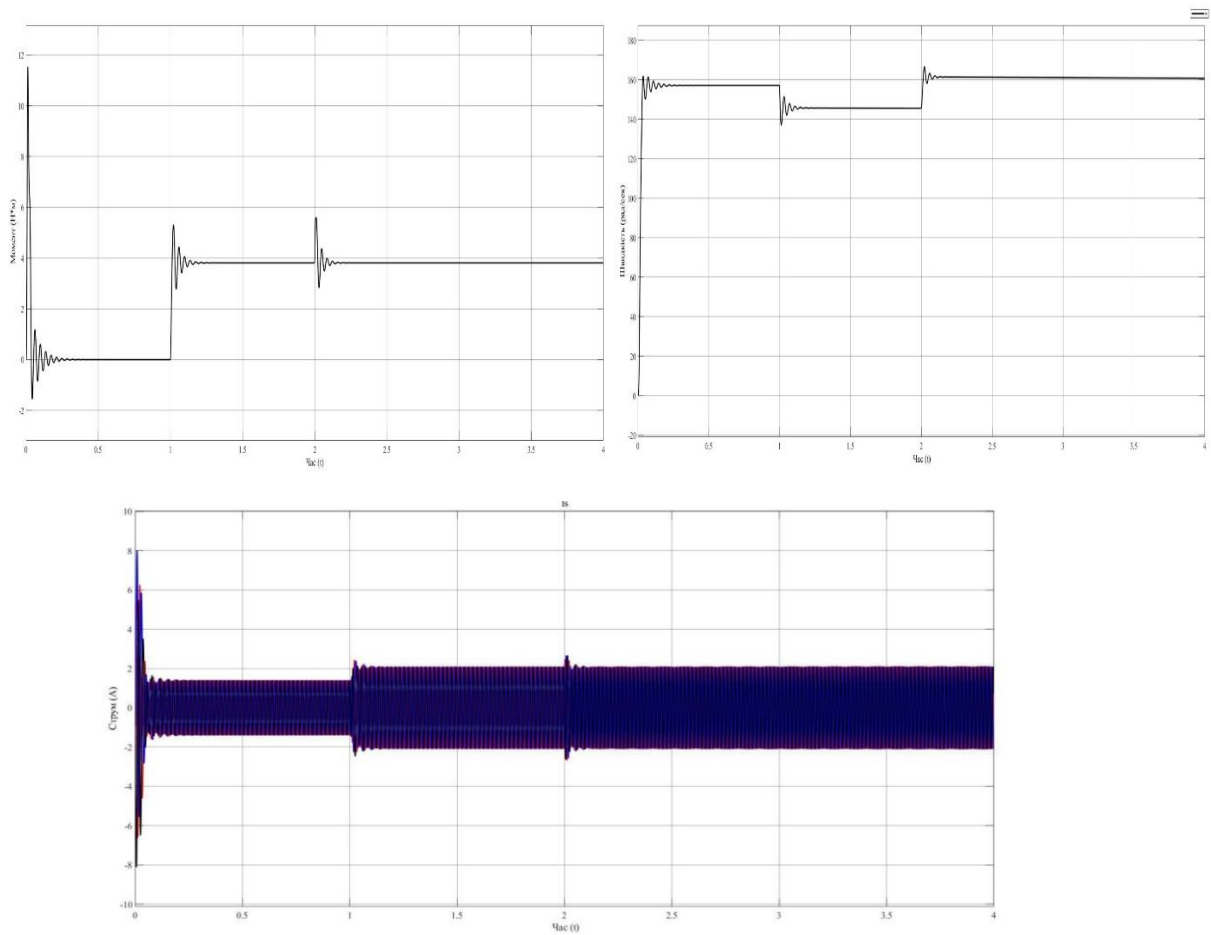


Рис. 3.17. Зміна потужності приводу при розгоні та зміні крутного моменту регульованого приводу

Таким чином, в результаті моделювання встановлено, що регулювання частоти обертання або частоти подвійних ходів є сталим у межах 600–1800 хв<sup>-1</sup> та 10–50 подв.ходів/хв. без істотного втрачання потужності; для прийнятих умов використання пропонованого інструменту такий діапазон регулювання є достатнім.

### 3.5. Визначення досяжного розміру кластеру та точності його відтворення

Оскільки у якості робочих двигунів використали крокові двигуни, до уваги було прийнято модель їх обертання, виходячи із наступного.

1. Магнітну проникність осердя статора і ротора приймають рівною нескінченності, це дійсно дозволяє однозначно визначати картину поля від струму кожної обмотки і використовувати принцип накладання для визначення результуючого поля в зазорах при одночасній дії струмів всіх обмотках електричної машини.

2. Розподіл полів взаємоіндукцій обмоток статора і ротора, і полів самоіндукції трифазних обмоток уздовж окружності електричної машини є синусоїдальним, з просторовим напівперіодом, який дорівнює полюсному поділу.

3. Магнітопровід і обмотки є симетричними, тобто магнітопровід має однакові обриси на всіх полюсних діленнях, а в межах полюсного ділення симетричний відносно поздовжніх і поперечних осей.

Отримані перехідні процеси для крокових двигунів разом із рівняннями (2.44) – (2.48) розд.2. дозволили зробити такі висновки. Було встановлено, що швидкість робочих переміщень безпосередньо визначатиме очікуваний розмір кластеру, оскільки, як наведено на рис.3.18, зі зростанням швидкості зростає також і похибка відтворення переміщень, а, отже, і точність

положення точкового джерела у кожний конкретний момент часу відносно оброблюваної поверхні.

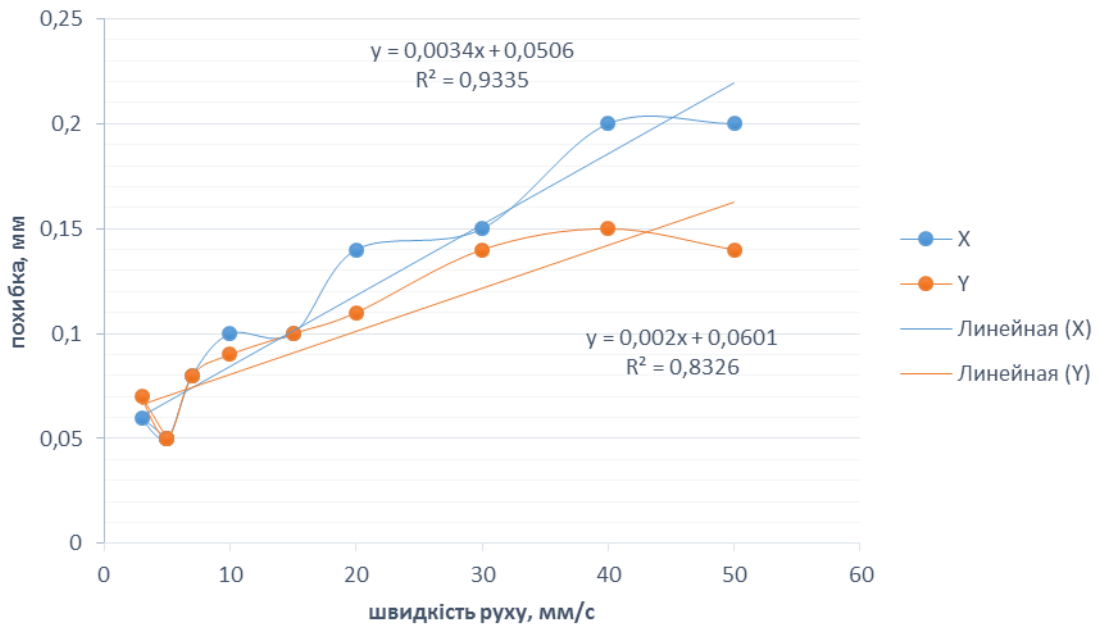


Рис. 3.18. Залежність похибки відтворення переміщень швидкістю руху робочого органу – засобом маніпулювання заготовкою

Отримано регресійні рівняння, що пов'язують величину очікуваної похибки із швидкістю робочих переміщень об'єкту маніпулювання. При цьому взято до уваги, що робочий стіл відповідає рис. 3.9,  $m=2,85$  кг,  $I=0,00342$  кг·м<sup>2</sup>, крокові двигуни типу 17HS343, вагою заготовки знехтували. Рівняння мають вигляд:

$$\delta_x = 0,0034v + 0,0506; \delta_\varphi = 0,001\omega D_0 + 0,0601, \quad (3.12)$$

де  $v$  – швидкість лінійного переміщення, м/с;  $\omega$  – швидкість обертального руху с<sup>-1</sup>;  $D_0$  – діаметр оправки інструменту, м.



### 3.6. Порядок виконання досліджень та розрахунків параметрів обробки

Керування системою лазерного термодформаційного припикання зерен алмазів на основу інструменту є складною і багаторівневою. Загальна схема формування шару алмазів подана на рис. 3.19. Керовані та контрольовані параметри процесу подані в табл. 3.4 та на рис. 3.20.

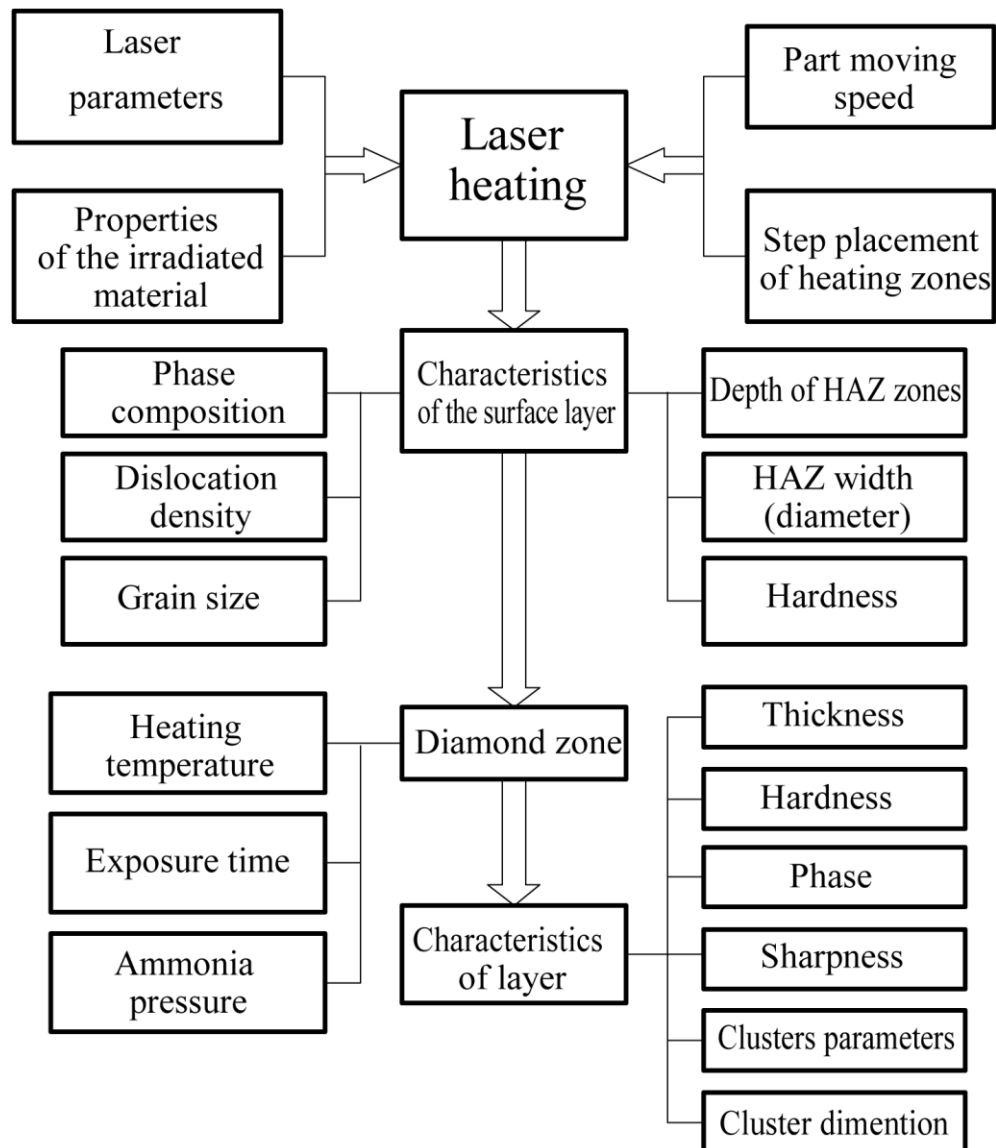


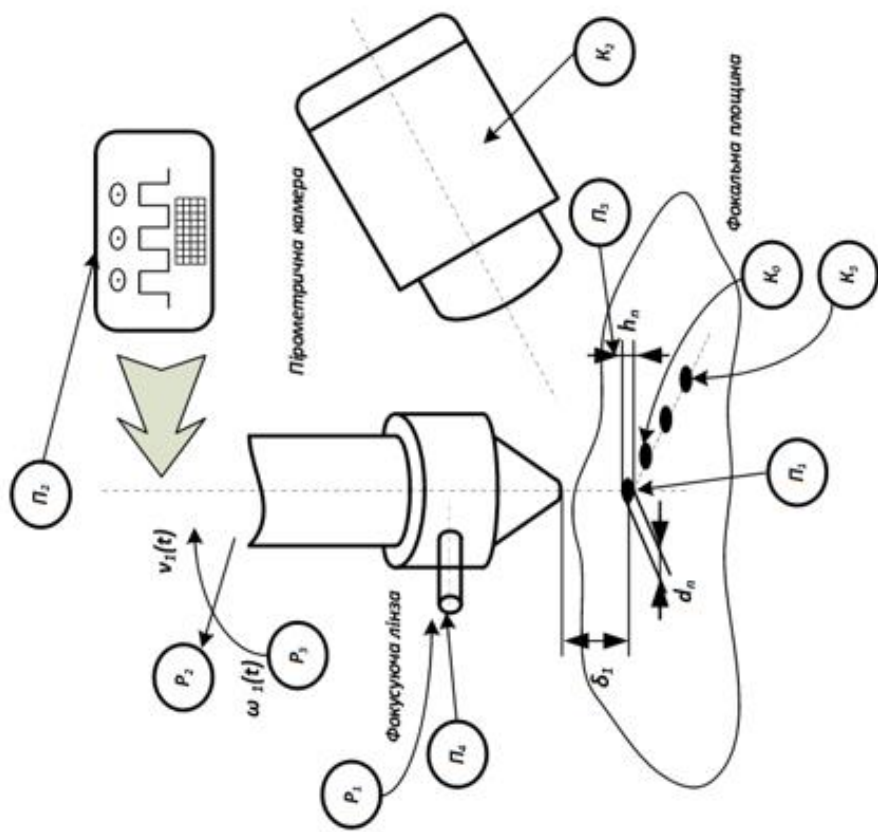
Рис. 3.19. Схема формування поверхневого шару та засоби контролю процесу

Таблиця 3.4 – Параметри, регулятори та вимірювальні показники

№	Кодування пар.	Фізична конст.	Рівні змін		Примітка
			Мін	Мах	
Регулятори					
1	$P_1$	Тиск робочого газу $p_b$	0,05 МПа	0,2 МПа	Газ виконує захисну функцію і функцію транспортування частинок композиту і алмазів
2	$P_2$	Лінійна (тангенціальна) швидкість $S_1(t)$	0,5 мм/с	5 мм/с	
3	$P_3$	Обертובה швидкість $\omega_1(t)$	0,2	$2\pi$	
Параметри					
1	$P_1$	Діаметр плями нагріву $d_n$	0,25 мм	1,2 мм	
2	$P_2$	Частота слідування імпульсів			
3	$P_3$	Товщина заготовки для нанесення			
4	$P_4$	Використовуваний присадковий матеріал			
Контрольовані величини					
1	$K_1$	$\sigma_{kr}^*$			Залежить від температури
2	$K_2$	$T_1$	-	-	Контроль атестованим пірометром
3	$K_3$	$T_2$	-	-	
4	$K_4$	$v_s$			
5	$K_5$	$R(t)$	Визначення функцій		
6	$K_6$	$B(t)$			



а)



б)

Рис. 3.20. Дослідницький комплекс ЛСК-400-5(а) та схема контрольованих параметрів, регуляторів і вимірвальних показників (б):  $P_1$  – тиск робочого газу;  $P_2$  – лінійна (тангенціальна) швидкість  $S_1(t)$ ;  $P_3$  – обертова швидкість  $\omega_1(t)$ ;  $P_4$  – діаметр плями нагріву  $d_n$ ;  $P_5$  – частота слідування імпульсів;  $P_6$  – товщина заготовки для нанесення;  $P_7$  – використований присадковий матеріал;  $K_1 - \sigma_{kr}^*$ ;  $K_2 - T_1$ ;  $K_3 - T_2$ ;  $K_4 - v_s$ ;  $K_5 - R(t)$  (функція поверхні);  $K_6 - B(t)$

Після лазерного закріплення алмази випробовували на статичну міцність за стандартною методикою. У разі, коли контрольовані параметри відповідали вимогам, інструмент піддавали випробуванням на обладнанні, описаному в п.3.5. При цьому випробували різання вуглепластиків до моменту засалювання, встановлюючи час до настання так званої параметричної відмови, а потім піддавали очищенню, і випробування продовжували.

Зіставлення отриманих термогравіметруванням даних про температуру деструкції полімеру з експериментально отриманими даними про температуру в зоні різання при механічній обробки ПКМ [94] дозволяє зробити важливий висновок. Висока температура зони різання практично завжди перевищує термостійкість полімеру ПКМ, інтенсифікує протягом механохімічних процесів, які неминуче руйнують поверхневий шар, як обробленої поверхні полімерної композиції, так і алмазний шар інструменту.

Нанесення алмазного шару здійснювали на заготовки свердла кільцевого діам. 18,0 мм. Швидкість обертання заготовки становила  $0,1 \text{ c}^{-1}$ , радіальне переміщення здійснювалося із перекриттям доріжок на величину 0,1–0,15 мм, а за напрямком формування кластеру – до 3 мм/с. Шар наносили на 10 корпусів, за однаковими режимами обробки та виконували подальші виміри точності відтворення положення кластерів та визначаючи відмінність очікуваного результату від розрахункового.

Нанесення алмазовмісного шару здійснювали також і на вставки полотна реноватору (рис. 3.21), а також на алмазний дріт для операцій пилкового різання вуглецевих заготовок. У цьому випадку швидкість обертання заготовки становила  $0,9 \text{ c}^{-1}$ , радіальне переміщення здійснювалося із перекриттям доріжок на величину 0,1–0,15 мм, формування кластеру здійснювали у тангенціальному напрямку зі швидкістю до 5 мм/с. Шар наносили на 10 стрічок.



Рис. 3.21. Фото інструменту із нанесеним шаром

Перевірку працеспроможності виготовленого інструменту виконували на обладнанні рис. 3.13, при цьому контролювали показники процесу різання: потужність різання, виникаючі в зоні різання сили, обсяг шламу та зміну умов процесу (його продуктивності) з плином часу. Схема вимірів параметрів відповідає рис. 3.15. Засоби виконували із автоматичною фіксацією даних.

Після нанесення алмазовмісного шару готували препарат для мікроскопу РЕМ–106И розмірами 10×10 мм. Досліджували як стан поверхні інструменту, так і якість поверхневого шару обробленої заготовки.

### 3.7. Висновки до розділу

Розроблено ряд оригінальних пристроїв для випробування інструменту при обробці карбон–карбонівих та карбон–полімерних композитів. Запропоновано використовувати для промислового обладнання (такого як пильний верстат або верстат свердлувальний), що живиться від мережі змінного струму, перетворювачі частоти, які дозволяють виконувати регулювання частоти обертання або частоти подвійних ходів у межах 600–1800 хв<sup>-1</sup> та 10–50 подв.ходів/хв. Регулювання у зазначених межах не веде до істотних змін потужності приводу, отже, умови процесу різання залишатимуться сталими.

Для контролю поверхні обробки обґрунтована доцільність використання мікроелектронного аналізу, який виконувався на приладі РЕМ–106–И. Маючи роздільну здатність на рівні 3...5 мкм при кратності  $\times 250 \dots \times 1000$  визначено залишки шламу між зернами, досліджено їх форму та щільність.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕТИЧНИХ ПОЛОЖЕНЬ ТА ПОШУК РАЦІОНАЛЬНИХ РІШЕНЬ ГІБРИДНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

4.1. Симуляція процесу взаємодії нежорсткого інструменту із композиційним матеріалом

Симуляцію процесу виконували у середовищі Solid Works при моделюванні оброблюваного композиту як нещільного середовища із геометричними параметрами відповідно до п.2.3. Розрахункова схема процесу відповідала рис. 2.3., розд.2, умови силового навантаження – відповідно до (2.7), параметри виникаючих вібрацій – (2.8), модель матеріалу відповідає рис. 2.6. Базові механічні характеристики наведені у табл. 2.2., а властивості, у тому числі, анізотропія, - подана в табл. 4.1. Умови руху нежорсткого інструменту як інструменту із додатковими ступенями вільності подані в табл. 4.2.

Таблиця 4.1 – Основні характеристики карбон-карбонових композиційних матеріалів

Characteristics of material KIMF	
Bulk (apparent) density, not less than, g / cm <sup>3</sup>	1,7
Breaking stress kg / cm <sup>3</sup> during compression along the axes of reinforcement X (Y), not less	1200
Breaking stress kg / cm <sup>3</sup> during tension along the axes of reinforcement X (Y), not less than	240
Breaking stress during shear, MPa, not less	24,5
Breaking stress at bending, MPa, not less	88,2
The coefficient of thermal conductivity (at a temperature of 50 ° C), kcal / m hour, deg	7
Modulus of elasticity in compression along the axes of reinforcement X (Y), MPa, not more than	2,45·10 <sup>4</sup>
The porosity of the material,%	*8,7
Impact strength, kJ / m <sup>3</sup>	*10
Electrical resistivity, Ohm· mm <sup>2</sup> / m	30

Рівень розбиття модельної сітки ставили у відповідність мінімальності розміру кластеру поверхні інструменту (у даному випадку, застосовували крок розбиття 0,25 мм, що давало змогу відслідкувати зміну умов роботи кожного кластеру в певних обставинах та на різних ділянках поверхні.

Ступінь зношування алмазного шару оцінювали із наступних міркувань [92].

Відповідно до [93] зміна глибини різання одиничним алмазним зерном, які проходять через зону контакту, визначається залежністю

$$t_{zi} = t_{zi-1} + \Delta H_{i-1} - \Delta h_{zi-1}, \quad (4.1)$$

де  $t_{zi}$  і  $t_{zi-1}$  – глибина різання алмазним зерном в основній площині при здійсненні  $i$ -го і  $i-1$ -го рухів робочого інструменту;  $\Delta H_{i-1}$  і  $\Delta h_{zi-1}$  – відповідно розмірний знос інструменту і вершини зерна при  $i-1$ -му русі інструменту.

Оскільки знос зерна на етапі сталого процесу пропорційний відносному зносу  $h_0$  і шляху різання  $L_p$ , то

$$\Delta h_{zi-1} = h_0 L_{pi-1}.$$

Величина відносного зносу залежить від матеріалу оброблюваної заготовки, матеріалу абразивного зерна і температури на площадці контакту зерна з матеріалом заготовки:

$$h_0 = K \frac{\sigma_N}{H_a}, \quad (4.2)$$

де  $\sigma_N$  – нормальний тиск на поверхні контакту;  $K$  – коефіцієнт, який визначається матеріалами тіл, що контактують;  $H_a$  – твердість (мікротвердість) матеріалу при температурі тертя,  $H_a = A e^{-\alpha \Theta}$ , де  $\Theta$  – температура на майданчику контакту абразивного зерна з матеріалом заготовки;  $K$ ,  $\alpha$  – емпіричні коефіцієнти.

Температура на площадці контакту абразивного зерна з матеріалом



заготовки визначимо по залежності, запропонованої в роботі [93],

$$\Theta(z, t) = \frac{aP_0Vt}{\sqrt{\pi F \Delta t \lambda}} 2\sqrt{at},$$

де  $a$  – температуропровідність оброблюваного матеріалу;  $P_0$  – осьова сила різання ( $P_0 = Q_n/N_a$ );  $V$  – швидкість різання;  $t$  – час одиничного контакту алмазного зерна, який приблизно дорівнює  $t = d/V$ , де  $d$  – діаметр зерна;  $\Delta t$  – час генерування тепла;  $F$  – площа контакту алмазного зерна,  $F = \frac{\pi d^2}{4}$ ,  $\lambda$  – теплопровідність алмазу.

Тоді відносний знос шару алмазів на поверхні контакту визначатиметься нормальним тиском на поверхні контакту  $\sigma_N$ , а також умовами притискання зерна до поверхні матеріалу, вираженими також через силу притискання  $P_0$

$$\xi = K \frac{\sigma_N}{Ae^{-\alpha \frac{aP_0Vt}{\sqrt{\pi F \Delta t \lambda}} 2\sqrt{at}}} \quad (4.3)$$

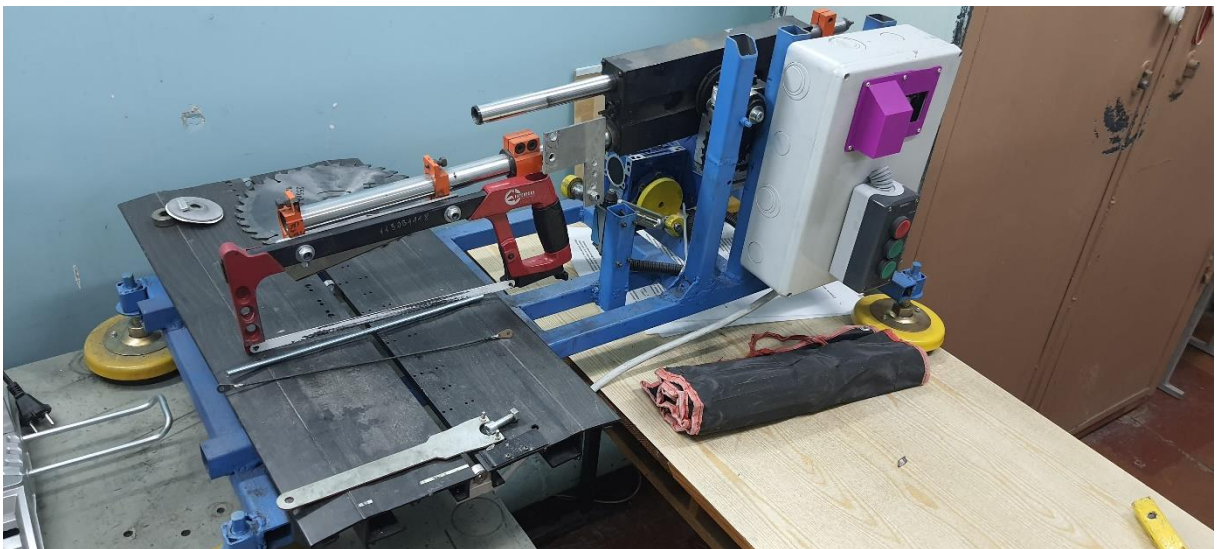
Таблиця 4.2 – Дані моделі при симуляції взаємодії

№	Параметр	Од. виміру	Значення
1	Розмір заготовки $B \times L \times H$	мм	100×50×10
2	Довжина струни $L$	мм	250
3	Крок розташування зерен $T_1 - T_i$	мм	1,5...2,5
4	Крок між впадинами $T_p$	мм	1,8
5	Діаметр впадин $d_u$	мм	1,2
6	Глибина $h_u$	мм	0,2
7	Фракція алмазних зерен	мкм	150/200
8	Виліт над зв'язкою	мкм	50
9	Сила притискання струни по зовнішніх точках $P$	Н	80
10	Швидкість руху $v_x$	м/с	1,2

Розв'язок (2.8) відповідно схеми рис.2.3 здійснено для наступних умов: має місце розпил круглої заготовки  $\varnothing 290$  мм (рис. 4.1,а) струною довжиною 300 мм, кількість алмазних зерен під час взаємодії – 35...55, діаметр волокон композиту 1,2 мм, крок порожнин – 2,4 мм, глибина 0,25...0,45 мм, струна  $\varnothing 3,8$  мм (Stanley) та  $\varnothing 3,2$  мм (виготовлена) рис. 4.1,б.



а)



б)

Рис. 4.1. Заготовки КІМФ (а) та пристрій для розпиловки заготовки на випробувальні пластини (б)

Результати моделювання показали, що зношування, як і затухання інтенсивності шламоутворення, зменшується протягом нетривалого часу  $t=50\dots250$  с, після чого процес може повністю припинитися.

Установлено, що збільшення робочого навантаження  $Q$  веде до певного зростання зйому матеріалу, яке з часом починає затухати, рис. 4.2

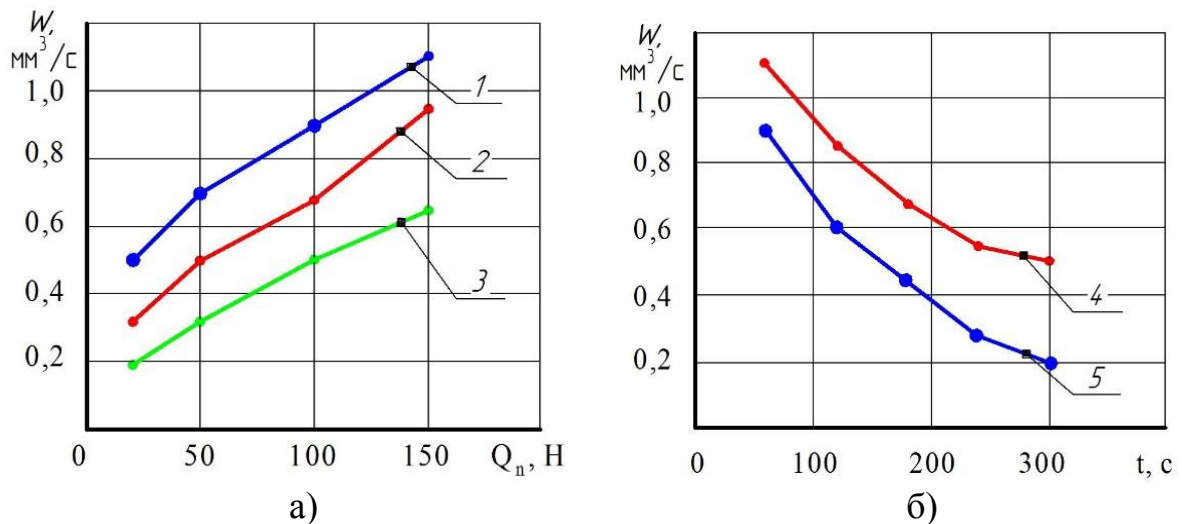


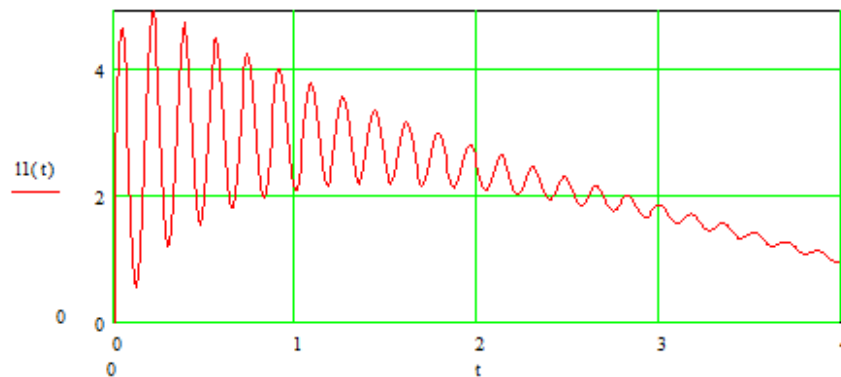
Рис. 4.2. Зміна продуктивності  $W$ ,  $\text{мм}^3/\text{с}$ , для струни залежно від сили робочого навантаження  $Q_n$ , Н (а), та часу обробки  $t$ , с (б) для різних ділянок (рис. 1): 1, 2 – вихідні ділянки; 3 – центральна ділянка; 4 – пропонований інструмент; 5 – типовий інструмент

Це підтверджено також експериментальними дослідженнями. Динаміка затухання різна для типового інструменту та пропонованого, зі сформованими поверхневими кластерами.

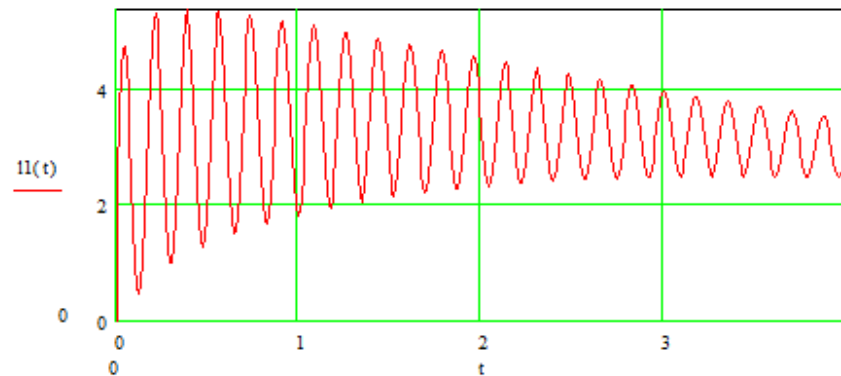
Останнє явище обумовлюється тим, що утворений шлам не виноситься за межі зони різання. Виявлено істотну відмінність в умовах різання вхідної ділянки I, вихідної III та центральної II (рис. 2.1). При цьому зазначена відмінність є меншою для кластеризованого інструменту (рис.4.3).

Це доводить ефективність модифікації поверхні інструменту за функціональною ознакою. Отже, якщо поверхня  $P$  деталі складається із ряду функціональних зон  $Z_{ij}$ , що відрізняються своїми властивостями  $V_{ij}^f$  та забезпечують виконання функцій  $FR_k$ , узагальнююча функція має максимум

при зниженні відмінностей у процесі роботи, тобто при забезпеченні умов навантаження ділянок інструменту практично однакових  $\sigma_N$ .



а)



б)

Рис. 4.3. Порівняння інтенсивності шламовиносу на бічних частинах заготовки (зона I та III) (а) та у центрі (зона II) (б)

На основі моделювання поведінки інструменту встановлено закономірності зміни навантажень частин робочої поверхні, і відповідно, функціональних особливостей кластерів робочих поверхонь інструменту, за якими сформульовано вимоги до параметрів алмазного шару (табл.4.3). Це дало змогу також довести твердження про можливість опису функціональних відмінностей математичними закономірностями, поданими у вигляді поліномів другого та третього ступеня.

Зміни властивостей кластерів поверхні в радіальному та поздовжньому напрямку (рис. 4.4): густина нанесення  $W$ :  $W_1=\text{const}$ ;  $W_2=b_{01}+b_{11}l+b_{21}l^2$  крок нанесення  $t$ :  $t_1=\text{const}$ ;  $t_2=b_{02}+b_{12}l+b_{22}l^2$ . Профіль нанесення  $h$ :  $h_1=\text{const}$ ;  $h_2=b_{03}+b_{13}l+b_{23}l^2$ . Аналогічні результати отримано для свердла, пилки реноватора, а також алмазного диску (рис. 4.5).

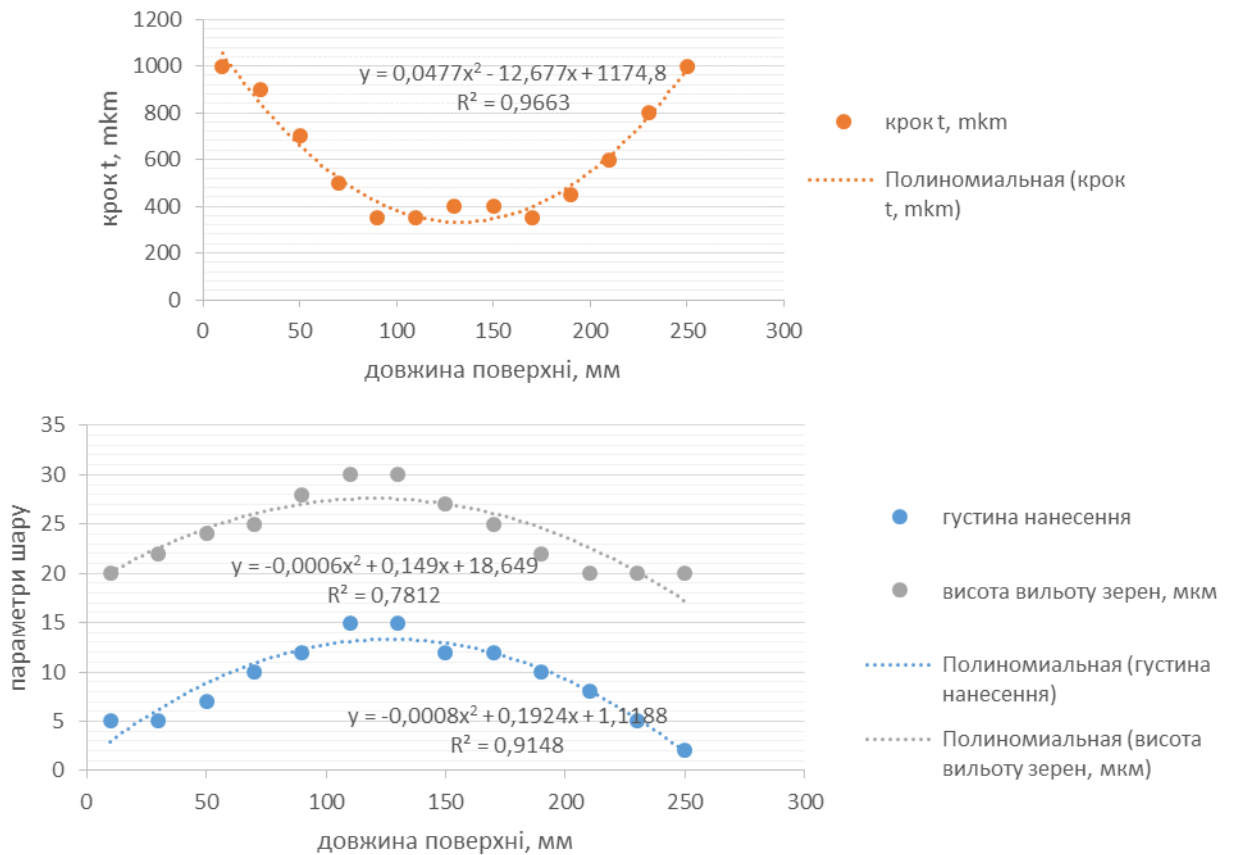
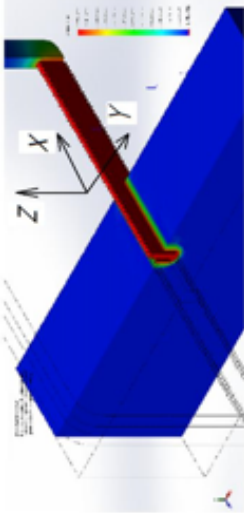
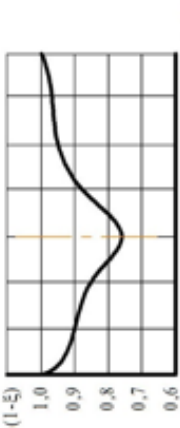
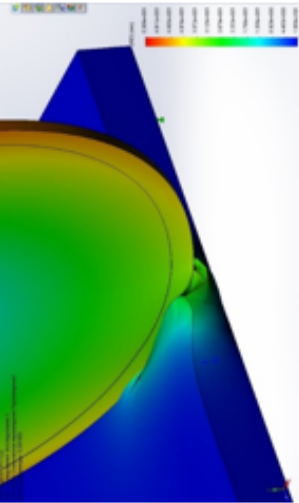
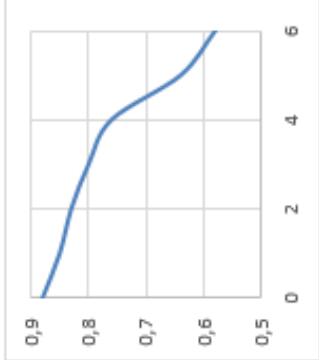


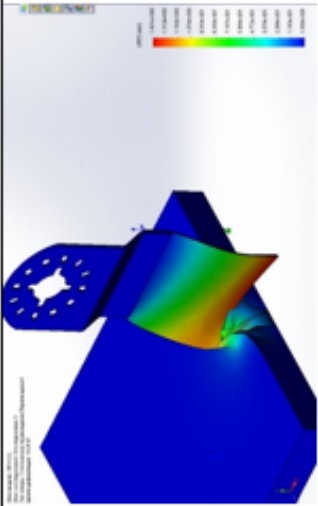
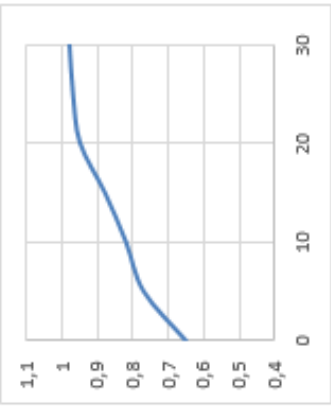
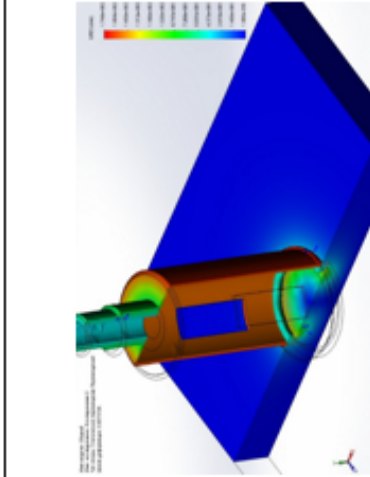
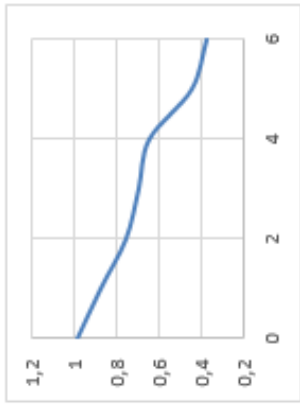
Рис. 4.4. Зміна властивостей кластерів поверхні відповідно до умов роботи поверхонь інструменту (приклад – пильна струна  $\varnothing 3,2$  мм)

Отримані закономірності дозволили підтвердити сформульовані у п. 2.1. положення про функціонально-орієнтований підхід до створення алмазно-абразивного інструменту шляхом залучення процедур опису умов роботи кластерів та співставлення із засобами – матеріальними носіями – їх формування. При цьому відмінність функціональних особливостей кластерів описується поліномами другого порядку; врахування відмінностей дозволяє активізувати інтенсифікуючі та пригнітити стримуючі чинники процесу взаємодії.

Таблиця 4.3 – Результати моделювання умов взаємодії та очікуваного рівня зносу робочих крайок інструменту

№	Умови моделювання	Модель взаємодії (стаг. деформування від $Q_n$ )	Зношування робочої поверхні $\xi$ (за (4.3))	Рівняння для визначення параметрів алмазного шару
1	2	3	4	5
	<p>Різання матеріалу КІМФ (табл.2.1, табл.4.1)  <math>V_p=0,4</math> м/м;  <math>P_n=80</math> Н;  <math>n=60</math> подв.х/хв;  <math>d_r=3,5</math> мм</p>			$h_1=25 \dots 30$ мкм $t_1=900 \dots 1100$ мкм $W_1=2 \dots 3$ шт/мм $h_2=-0,0006l^2+0,149l+18,6$ $t_2=0,047l^2-12,6l+1175$ $W_2=-0,0008l^2+0,192l+1,12$
	$V_p=35$ м/с; $P_k=45$ Н; $n=1800$ об/хв; $d_r=125,0$ мм			$h_1=10 \dots 15$ мкм $t_1=2400 \dots 2500$ мкм $W_1=1 \dots 2$ шт/мм $t_2=-194l^2+8218l+228$ $h_2=-0,0003l^2+0,169l+2,38$ $W_2=0,002l+1,5$

Продовження табл.4.3

1	2	3	4	5
	$V_p=12$ м/с; $P_k=25$ Н; $n=3200$ подв.х/хв; $l_r=5,0$ мм			$h_1=10 \dots 15$ МКМ $t_1=2400$ МКМ $W_1=2 \dots 5$ ШТТ/ММ $t_2=11,93l^2 - 202,7l + 1356$ $h_2=-0,152l^2 + 4,152l + 4$ $W_2=-0,00061l + 2,3333$
	$V_p=0,3$ м/с; $P_k=45$ Н; $n=1500$ об/хв; $d_r=18,0$ мм			$h_1=10 \dots 15$ МКМ $t_1=2400$ МКМ $W_1=2 \dots 5$ ШТТ/ММ $t_2=-16,4l^2 + 7564l + 14,4$ $h_2=-0,0012l^2 + 0,214l + 0,42$ $W_2=0,02l + 13,58$

Для визначення впливу динамічних явищ на процес алмазно-абразивного різання нежорстким інструментом (інструментом із додатковими ступенями вільності) виконане дослідження впливу кроку  $t$ , мкм, відмінних за параметрами алмазних зерен кластерів на винесення шламу за зону різання  $Q$ , мм<sup>3</sup>/с. Змінним параметром обрали швидкість руху інструменту відносно поверхні оброблюваного матеріалу  $v$ , м/с, рис. 4.5.

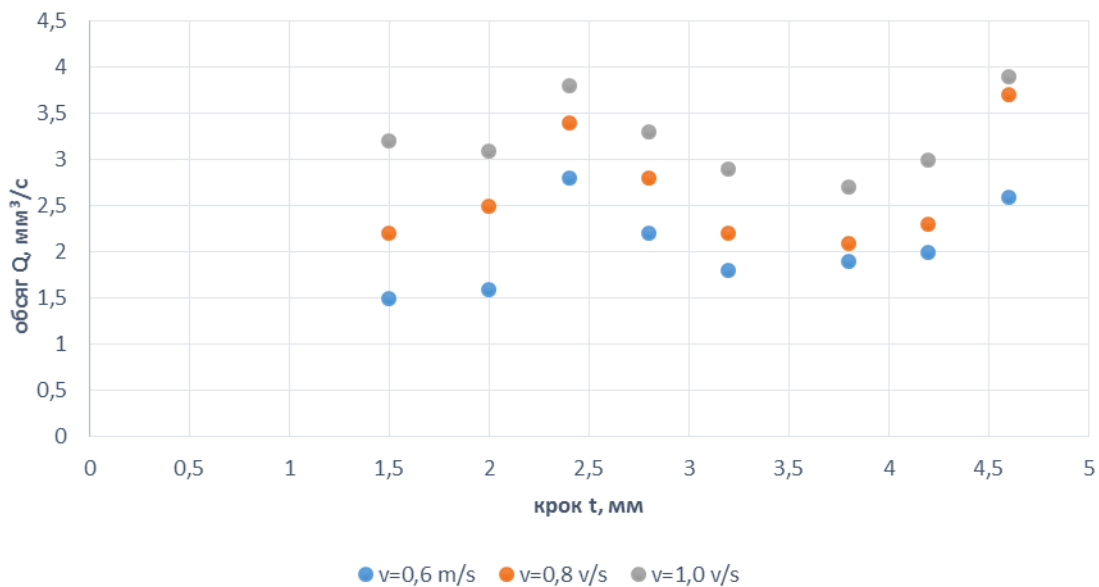


Рис. 4.5. Зміна обсягу вилучення матеріалу залежно від кроку нанесення кластерів на робочу поверхню інструменту

Аналіз отриманих результатів довів, що існує кілька виражених піків зростання  $Q$ , які припадають на визначений крок кластеру  $t$ . При цьому зазначені піки властиві усьому діапазону швидкостей, однак відносна амплітуда більш виражена на швидкості 0,6 м/с. Для матеріалу КІМФ розмір кластеру відповідає кроку армування матеріалу (а це приблизно 2,4 мм) і становить 2,8..3,0 мм (дослідження виконувалися для інструментів із виступом зерен 15...90 мкм та щільністю нанесення 3...8 з/мм<sup>2</sup>). На основі (2.5) та (2.7) можна зробити висновок, що саме динамічні явища впливають на процес мікрорізання, отже, для інструментів із додатковими ступенями вільності їх необхідно враховувати.



#### 4.2. Формування кластерів поверхні лазерним термодформаційним спіканням

Приведено результати досліджень процесу ЛТДС на предмет формування надійних поверхневих кластерів мінімально потрібного розміру, властивості яких змінюються за прогнозними залежностями.

Припускали, що потужність випромінювання розподілена рівномірно по деякій поверхні, і випромінювання орієнтоване по нормалі до поверхні. За інтервал  $\delta t$  часу надходить енергія  $W\delta t$ . Нехай довжина виникаючої вирви нагріву дорівнює  $\delta$ , тоді можливе випаровування матеріалу через перегрівання обсягом  $Sb\delta l$ . За законом збереження енергії

$$Sh\rho b\delta l = W\delta t . \quad (4.4)$$

Тут  $h$  – кількість тепла, потрібного для випаровування одиниці маси матеріалу,  $\rho$  – щільність матеріалу. Перетворюючи цей вираз і вважаючи  $\delta t \rightarrow 0$ , отримаємо швидкість росту довжини виїмки у вигляді:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{W}{h\rho Sb} . \quad (4.5)$$

Тож для будь-якого матеріалу гранична швидкість зростання пропорційна щільності енерговиділення  $W/A$ . Інтегруючи (4.5) і вважаючи  $s=0$  при  $t=0$ , довжина вирви  $l$  у довільний момент часу

$$l(t) = \frac{E(t)}{h\rho Sb} \int_0^t W dt , \quad l(t) = \frac{E(t)}{h\rho Sb} ,$$

де  $E(t)$  – повна енергія, виділена джерелом за проміжок часу  $(0, t)$ . Для випадку, коли швидкість руху кордону близька до швидкості в граничному режимі випаровування, має місце рівняння

$$\left| \frac{K(\partial T / \partial t)}{L_v \rho (dl / dt)} \right| = \frac{KO(T_v / l^*)}{L_v \rho O(W / h\rho A)} , \quad (4.6)$$

де  $l^*$  є певна характерна відстань, на якій відбувається падіння температури в матеріалі. Ця відстань визначається співвідношенням:

$$l^* = \frac{D}{(W/h\rho A)} \quad (4.7)$$

Позначаючи через швидкість руху кордону в граничному режимі випаровування, з рівняння (4.6) отримаємо:

$$g = \frac{W}{(cT_v + L_v)\rho A} = \frac{W/(L_v\rho A)}{1 + \varepsilon}. \quad (4.8)$$

Щоб визначити нульове наближення для розподілу температури, виконали розв'язання рівняння теплопровідності в області, кордон якої рухається з постійною швидкістю  $d\xi_0/d\tau=1$ , при температурі на кордоні  $\theta_0=1$ .

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \left[ e^{-(\zeta-\tau)} \operatorname{erfc}\left(\frac{\zeta/2-\tau}{\tau^{1/2}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{\zeta}{2\tau^{1/2}}\right) \right], \quad (4.9)$$

де  $\operatorname{erfc}(x)$  – додаткова функція помилок

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_x^\infty e^{-y^2} dy \quad (4.10)$$

Після перетворень отримуємо вираз для безрозмірної швидкості рухомого кордону:

$$\frac{d\xi}{d\tau} = 1 + \varepsilon \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\tau^{1/2}}{2}\right) - \frac{1}{(\pi\tau)^{1/2}} e^{-\tau/4} \right\} + O(\varepsilon^2), \quad (4.11)$$

При визначенні розмірів плями фокусування слід ураховувати розбіжність лазерного променя. Кут розбіжності лазерного променя суцільного круглого перерізу визначають з:

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{d}, \quad (4.12)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання;  $d$  – діаметр променя.

Розбіжність лазерного променя кільцевого перерізу визначають:

$$\theta = \frac{1,2\lambda}{t}, \quad (4.13)$$

де  $t$  – ширина кільця лазерного випромінювання.

Порядок розрахунку режимів обробки при проектуванні операції розплаву плями діаметром  $d$  і глибиною  $z$  включає в себе:

1. Визначення тривалості імпульсу по всій глибині порожнини  $z$  :

$$\tau = \frac{\rho L_u}{W_{pa}} z, \quad (4.14)$$

де  $W_{pa} > W_p^u$  – для матеріалу, що обробляється.

2. Дійсна густина потужності світлового потоку з урахуванням приросту глибини через плавлення:

$$W_{pa} = \frac{\rho L_u}{\tau} \cdot z \cdot \frac{d - 0,7\sqrt{\alpha\tau}}{d - 1,2\sqrt{\alpha\tau}}, \quad (4.15)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{см}^2/\text{с}$ .

3. Енергія імпульсу лазерного випромінювання:

$$E_0 = W_{pa} \cdot \tau \cdot \frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot z \cdot L_u \cdot \rho \cdot \frac{(d - 0,7\sqrt{\alpha\tau})^3}{d - 1,2\sqrt{\alpha\tau}}. \quad (4.16)$$

4. Діаметр плями фокусування:

$$d_0 = d - 0,7\sqrt{\alpha\tau}. \quad (4.17)$$

Перерозподіляючись після закінчення дії імпульсу і кристалізуючись, рідкий метал здатний викривити форму порожнини і навіть її закупорити, тому для отримання отворів циліндричної форми необхідно обмежити тривалість дії з умови мінімізації питомої енергії обробки:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{4E_a}{\pi d^2 z} \right) = 0.$$

Тоді

$$\tau = 0.33 \frac{d^2}{\alpha}, W_{pa} = 5.5 \cdot z \cdot L_u \cdot \rho \cdot \frac{\alpha}{d^2}, E_a = 0.5 \cdot z \cdot L_u \cdot \rho \cdot d^2, d_0 \approx 0.6 \cdot d$$

Виходячи із наведеного, та на основі рівнянь (2.34) із граничними умовами (2.35), результати нагрівання відповідно до режимів роботи лазера будуть відповідними табл. 4.4. Моделі та схема нагріву подана на рис. 4.6. Самі інструменти подано на рис. 4.7.

Таблиця 4.4 – Режими обробки та нагрівання заготовки

Параметр	Модельовані			Експ.визначені		
	Струна	Свердло	Круг	Струна	Свердло	Круг
Розбіжність лазерного променя кільцевого перерізу $\theta$	30''	30''	30''	30''	30''	30''
Тривалість опром. $\tau$ , мс	250	250	250	250	250	250
Енергія імпульсу лазерного випромінювання $E_0$ , Дж	12,5	12,5	12,5	10,9	10,9	10,9
Діаметр плями фокусування $d_0$ , мм	0,22	0,23	0,35	0,35	0,4	0,4
Діаметр плями нагріву $D_0$ , мм	0,65	0,89	1,12	0,8	1,2	1,35
Температура на поверхні, К	1750	1730	1840	1580	1610	1670
Приклади інструментів						

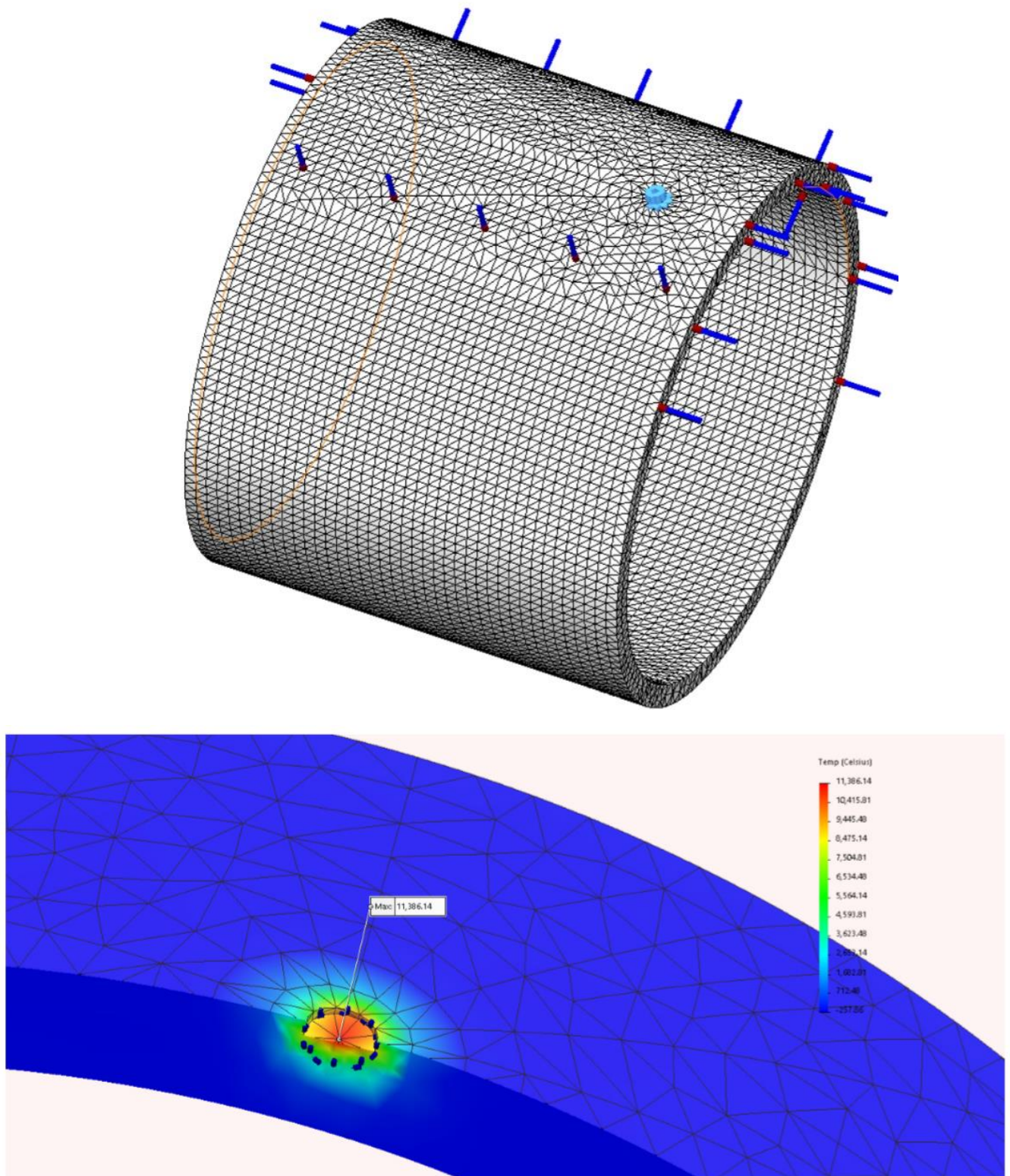


Рис. 4.6. Моделювання лазерного впливу на поверхню основи заготовки у вигляді кільцевого сегменту (оправки кільцевого свердла  $\varnothing 17,0$  мм)

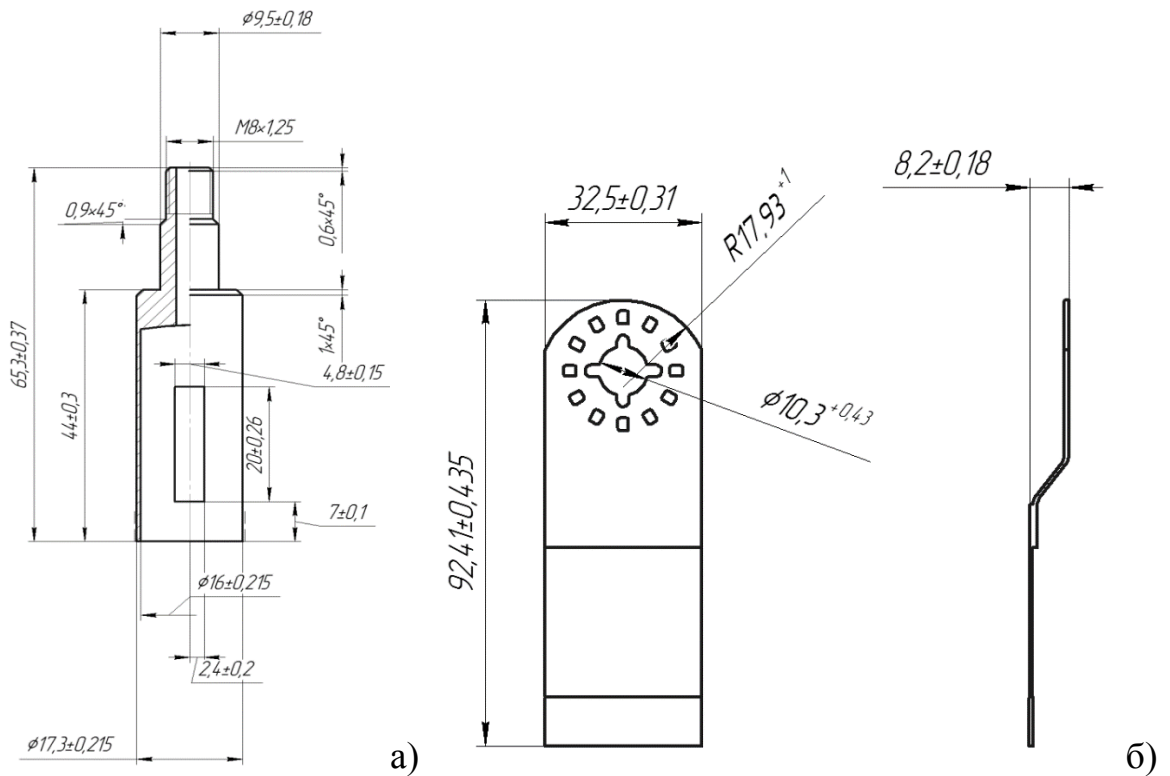


Рис. 4.7. Геометричні параметри інструменту: кільцевого свердла  $\phi 18,0$  мм (а), полотна реноватору шириною 32 мм (б) та кругів  $\phi 125$  мм (в)

Таким чином, тривалість лазерного впливу  $\tau=250$  мс при енергії імпульсу не меншій за 12,5 Дж за умови фокусування 0,22...0,5 мм дозволяє отримувати на поверхні температури понад 1500 К, що достатньо для

виконання прикатування зерен алмазу механічним способом.

Аналіз отриманих картин нагрівання поверхні засвідчив, що для малої кількості імпульсів лазера відмінність епюр розподілу температур є незначною (не більша за 10%); за умови, що нагрів поверхні для здійснення наступного деформаційного ущільнення має бути більшим за 750 °С, діаметр локалізованої плями при нерухомому промені становить від 0,32 мм до 0,4 мм; для прогнозування ступеня локалізації впливу можна використовувати рівняння розподілу температур на поверхні тіла з обмеженнями за температурою  $T_{кр}$ . Збільшення локалізації можливе за рахунок зміни методів і способів механічного ущільнюючого впливу на зону розплаву.

Порівняння результатів модельного і експериментального досліджень щодо властивостей поверхні показали їх відносно високу схожість результатів (похибка складає 12–15%). Так, встановлено, що формування кластерів поверхневого шару на експериментальному обладнанні із кроком між зернами 100 мкм та 150 мкм відбувається досить стабільно, без істотних пошкоджень зерен, без значного виходу присадкового металу. Розсіювання параметрів викладання зерен  $\pm 35$  мкм, більша дисперсія параметру властива більшій фракційності використовуваного алмазного порошка (60 мкм та 100 мкм).

Оскільки на розміри кластеру має вплив кілька діючих факторів, виконано багатофакторне дослідження з метою отримання відповідних регресійних рівнянь очікуваних значень розмірів кластеру  $F$ .

При цьому прийняті до уваги фактори, які зведені до табл.4.5.

Для отримання моделі було згенеровано матрицю плану експерименту  $2^5$  у двох блоках, що викликало необхідність реалізації 32 модельних експериментів, відповідно до табл. 4.6.

Таблиця 4.5 – Прийняті до уваги фактори

	Параметр	Позн.	Розмірність	-1	+1	Примітка
1	Швидкість переміщення	$v_i$	м/с	0,002	0,015	
2	Механічний вплив	$N$	Н	50	150	
3	Тиск газу	$p$	МПа	0,01	0,08	
4	Розмір частинок	$\rho$	мкм	50	150	
5	Температура поверхні	$T$	К	1100	1350	

Таблиця 4.6 – Матриця плану експерименту (фрагмент) для прийнятих до уваги факторів

\BLOCK v	N	p	$\rho$	T	F	
1	0,002	150	0,08	50	1350	2,3
1	0,002	50	0,08	100	1350	2,4
1	0,015	50	0,08	50	1350	2,6
1	0,015	150	0,01	100	1100	2,1
1	0,015	150	0,01	50	1350	2,7
1	0,002	50	0,08	50	1100	1,9
1	0,0	100	0,045	75	1225	1,8
1	0,015	50	0,01	100	1350	2,1
1	0,002	150	0,01	50	1100	1,9
1	0,002	150	0,01	100	1350	2,1
1	0,015	50	0,08	100	1100	1,8
1	0,002	50	0,01	50	1350	1,7
1	0,002	50	0,01	100	1100	1,5
1	0,015	150	0,08	100	1350	2,4
1	0,002	150	0,08	100	1100	1,7
1	0,015	50	0,01	50	1100	1,9
1	0,015	150	0,08	50	1100	2,05



Таблиця 4.6 (продовження)

2	0,0	100	0,045	18	1225	1,6
2	0,0	100	0,045	131	1225	2,1
2	0	100	0,045	75	1225	1,4
2	0,023	100	0,045	75	1225	2,2
2	0,0	100	0,12	75	1225	2
2	0,0	100	0,045	75	1225	1,5
2	0,0	0	0,045	75	1225	1,3
2	0,0	100	0	75	1225	1,4
2	0,0	100	0,045	75	1509	2,7
2	0,0	100	0,045	75	940	1,2
2	0,0	213	0,045	75	1225	1,5

В результаті виконання статистичного оброблення даних у програмному середовищі Statgraphic Centurion отримано поверхні відгуків, головні ефекти та власне регресійну модель обумовленості розміру кластеру умовами його формування (рис. 4.8).

На основі методу багатфакторного планування експерименту отримано регресійне рівняння очікуваного розміру кластеру  $F$ , мм, від умов його формування:

$$F = -1,3319 + 0,00091454 \cdot N + 2,07633 \cdot p + 0,00119545 \cdot \rho + 0,00226548 \cdot T + 26,6801 \cdot v, \quad (4.18)$$

де  $N$  – сила притискання, Н,  $p$  – тиск газу, МПа,  $\rho$  – розмір частинки, мкм,  $T$  – температура у ванні розплаву, К,  $v$  – швидкість руху, м/с.

Значимість коефіцієнтів регресії перевірено за  $t$ -критерієм Стьюдента. При цьому коефіцієнт кореляції розраховували за співвідношенням

$$r_x(t, t') = \frac{R_x(t, t')}{\sigma_x(t) \cdot \sigma_x(t')}.$$

З наведеного можна зробити висновок, що найбільш значимим фактором є температура  $T$ , яка власне, визначає зону розплаву присадкового матеріалу та розігріву поверхні основи, на якій закріплюються зерна алмазів.



може бути мінімізованим за розмірами. У прийнятному діапазоні розмірів найбільш доцільним є використання частинок із  $\rho=75\dots100$  мкм. Тиск газу транспортування присадкового матеріалу і частинок у зону обробки та сила механічного притискання  $p$  особливого впливу не мають.

Мікроелектронне дослідження поверхні інструменту, сформованої з використанням кільцевого сопла та присадкового припою з фракціями частинок 45–100 мкм, а також зерен алмазу показали (рис.4.9), що регулювання витратою присадкових матеріалів, які прямують двома каналами, дозволяє отримувати достатньо гомогенні поверхневі алмазовмісні шари.

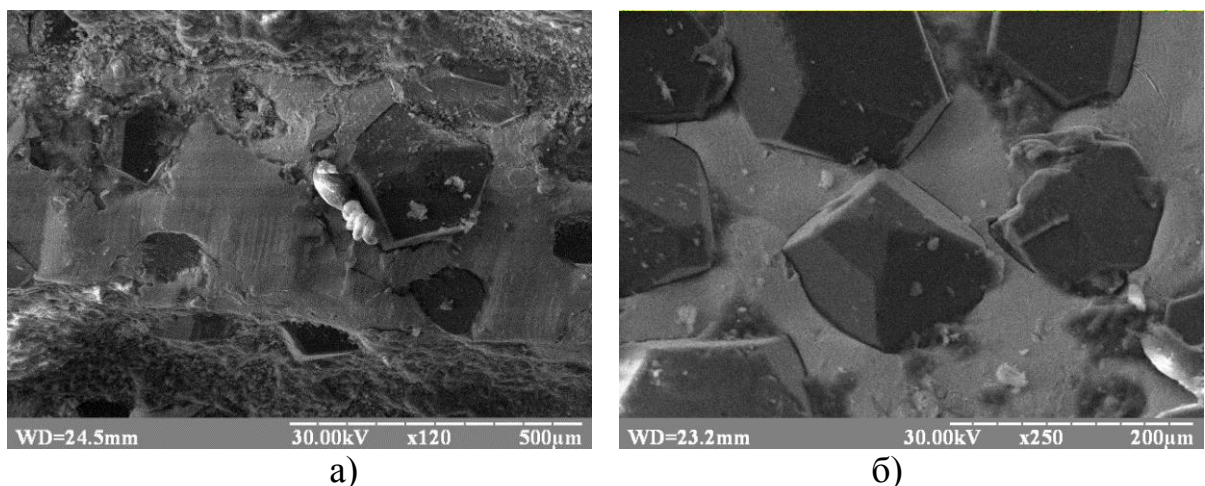
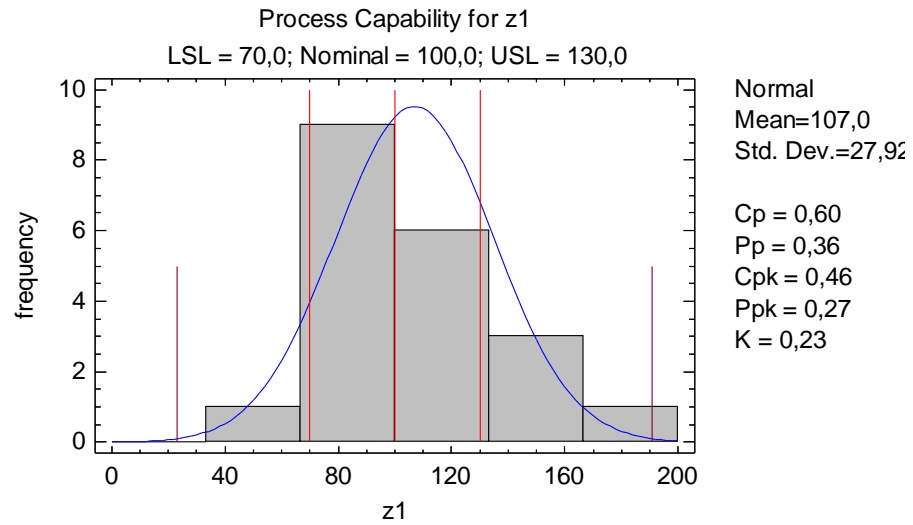
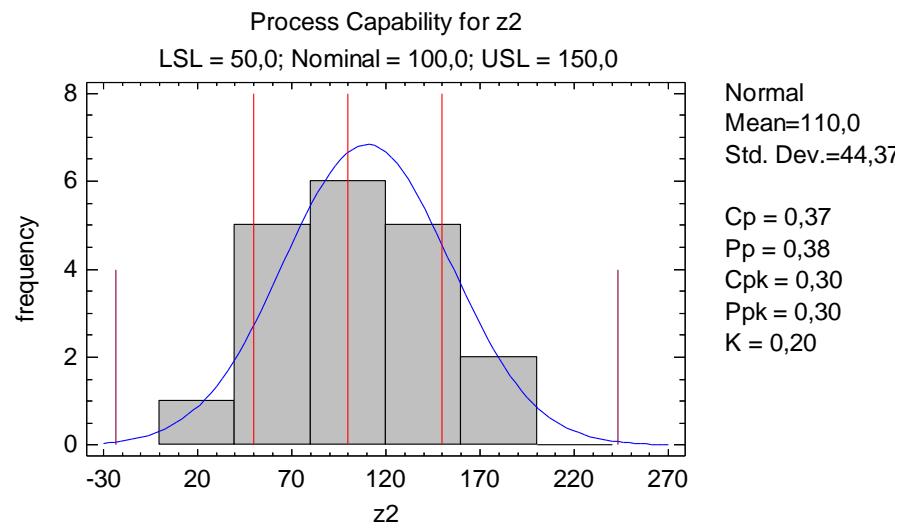


Рис. 4.9. Мікрофото переходу між кластерами різної фракційності (а) та кластер поверхні із викладенням зернами 100 мкм (б)

Зв'язник виявився повністю розплавленим, і вкривав поверхню основи інструменту шаром товщиною 25–40 мкм. Спостерігається включення бруду, які, очевидно, потрапили в зону обробки внаслідок забруднень каналу підведення робочого газу. Також встановлено, що на дослідженій поверхні знаходиться і дефектне зерно. Розсіювання параметрів викладання  $\pm 90\dots120$  мкм (рис.4.10).



a)



б)

Рис. 4.10. Статистичний аналіз розсіювання параметрів викладання елементів кластеру більшої (а) та меншої (б) фракційності

Таким чином, маємо, що розсіювання геометричних розмірів відповідно до рис. 2.13 табл. 2.6 становить біля 0,25 мм, що відповідає прогнозованим значенням похибок позиціонування механічної частини пристрою для викладання зерен.

### 4.3. Випробування інструменту з кластеризованою робочою поверхнею

Після нанесення алмазвмісного шару готували препарат для мікроскопу РЕМ–106И розмірами 10×10 мм. Мікроелектронне дослідження поверхні інструменту, сформованої з використанням кільцевого сопла та присадкового припою з фракціями частинок 10/20 мкм, а також зерен алмазу фракцією 100 мкм показали, що регулювання витратою присадкових матеріалів, які прямують двома каналами, дозволяє отримувати достатньо гомогенні поверхневі алмазвмісні шари (рис. 4.11, табл. 4.7). Зв'язник виявився повністю розплавленим, і вкривав поверхню основи інструменту шаром товщиною 25–40 мкм. На растрі спостерігається включення бруду, які, очевидно, потрапили у зону обробки внаслідок забруднень каналу підведення робочого газу.

Таблиця 4.7 – Формування кластерів алмазного шару

Умови формування кластерів поверхні		Мікроелектронне фото	Примітка
Розбіжність лазерного променя кільцевого перерізу $\theta$	30''		Викладання крупних зерен, торцеве
Тривалість опром. $\tau$ , мс	250		
Енергія імпульсу лазерного випромінювання $E_0$ , Дж	12,5		
Діаметр плями фокусування $d_0$ , мм	0,22		Викладання дрібних зерен, локальний кластер
Діаметр плями нагріву $D_0$ , мм	0,65		
Температура поверхні, К	на 1350		Викладання крупних зерен, рядкове

Також встановлено, що на дослідженій поверхні можуть бути дефектні зерна. Оскільки однозначного висновку щодо псування зерна під час нанесення зробити не можна, потребує додаткового мікроелектронного аналізу стан зерен перед нанесенням.

Перевірка геометричних параметрів інструменту, які змінювалися внаслідок нагрівання лазером периферійної частини (із виникненням напружень відповідно до (2.9)) показала, що викривлення від початкової форми не перевищує 0,15 мм на зовнішньому боці леза.

Формування кластерів поверхні здійснено у відповідності до розрахунків п.2.2,2.4.



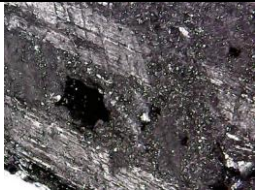





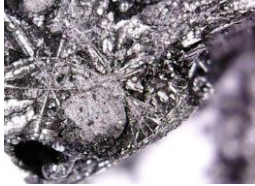
Застосування інструменту для обробки матеріалу КІМФ показало наступне. Пропонований інструмент має суттєві переваги перед аналогами, використовуваними для подібних операцій (рис. 4.11).

Із приведених на рис. 4.11 діаграм стає очевидним, що занурення інструменту (глибина  $h$ , мм) хоч і має певний вплив, не є дієвим фактором, що обумовлює контрольовані величини шорсткості (за параметром  $Ra$ ) та дефектності ( $R$ ). У той же час спостерігається істотна відмінність якості поверхні, обробленої традиційним (рис. 4.10,в) та пропонованим (рис. 4.10,а) інструментом. Так, якщо пильна алмазна струна  $\varnothing 3,8$  мм (Stanley) на матеріалі ВКУ 25 дозволяє отримувати різні задовільної якості із  $R=0,045-0,055$  при  $Ra=5..6$  мкм, то застосування запропонованого інструменту забезпечує  $R=0,01-0,02$  при  $Ra=2.5$  мкм.

Однак із часом, зазначені показники погіршуються, і після тривалої роботи спостерігається погіршення якості (рис. 4.11,б): маємо відповідно  $R=0,02-0,03$  при  $Ra=3.2$  мкм.

Причиною є те, що частина матеріалу після оброблення все ж таки залишається у поверхневому шарі (рис. 4.12); існують й інші окремі пошкодження алмазоносного шару.

Таблиця 4.8 – Результати досліджень якості обробки поверхонь

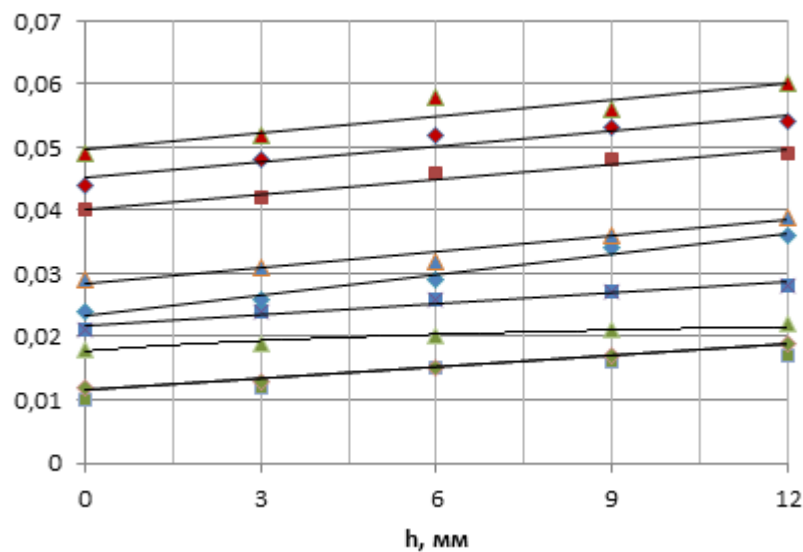
№	Модель і параметри інструменту	Мікрофото поверхні, ×25	Оброблена поверхня КІМФ, ×25
1	$t=3,0$ мм; $h=0,015$ мм; $w=20...50\%$ ; $p = 120$ Н; $v = 2,5$ м/с; рух обертовий 		
2	$t=3,0$ мм; $h=0,025$ мм; $w=20...40\%$ $p = 25$ Н; $v = 7,5$ м/с; $l=10,0$ мм; $\delta=0,8$ мм; рух зворотно–поступальний 		
3	$t=2,8$ мм; $h=0,015...0,09$ мм; $w=20...60\%$ ; $p = 80$ Н; $v = 1,2$ м/с; $d= 3,2$ мм; рух зворотно–поступальний 		

Порівнювали також і обсяг зйому матеріалу кругом запропонованої конструкції та відомих (у тому числі струни  $\varnothing 3,8$  мм (Stanley) із високим вмістом алмазних частинок). Результати порівнянь приведені на рис.4.13.

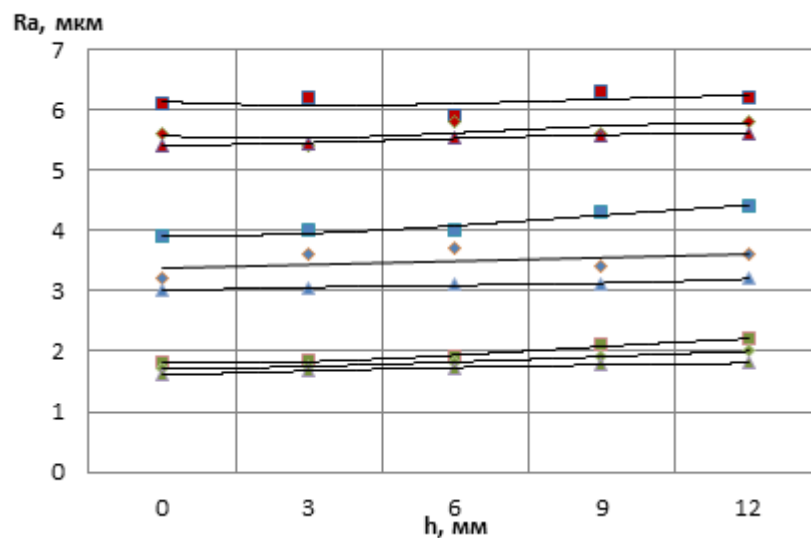
Стає очевидним, що відносно невисока щільність нанесення алмазних частинок на поверхню інструменту (до 25 шт. на  $1\text{ см}^2$ ) забезпечує об'ємний зйом матеріалу  $1,5 - 2$  мм<sup>3</sup>/с, у той час як звичайна струна досить швидко наповнюється шламом і процес різання припиняється. Дослідження проводили при навантаженні інструменту зусиллям 15 Н на маятниковій відрізній машині.

Отриманий результат дозволив зробити важливий висновок стосовно

того, що для підвищення продуктивності процесу поверхня інструмента повинна мати певні визначені ділянки, які умовно можна називати кластерами. Такі кластери можуть відрізнятися щільністю алмазних зерен, товщиною їх викладання, профілем тощо. Це підтверджує доцільність залучення функціонально–орієнтованого підходу до створення алмазних шарів та отримати високоефективні абразивні поверхні, орієнтовані на використання конкретного матеріалу (зокрема, застосувати підхід [122]).



а)



б)

Рис. 4.11. Якість поверхневого шару у визначенні дефектності ( $R$ ), (а) та шорсткості за параметром  $Ra$ , мкм, (б), при обробці пропонованим інструментом та традиційним



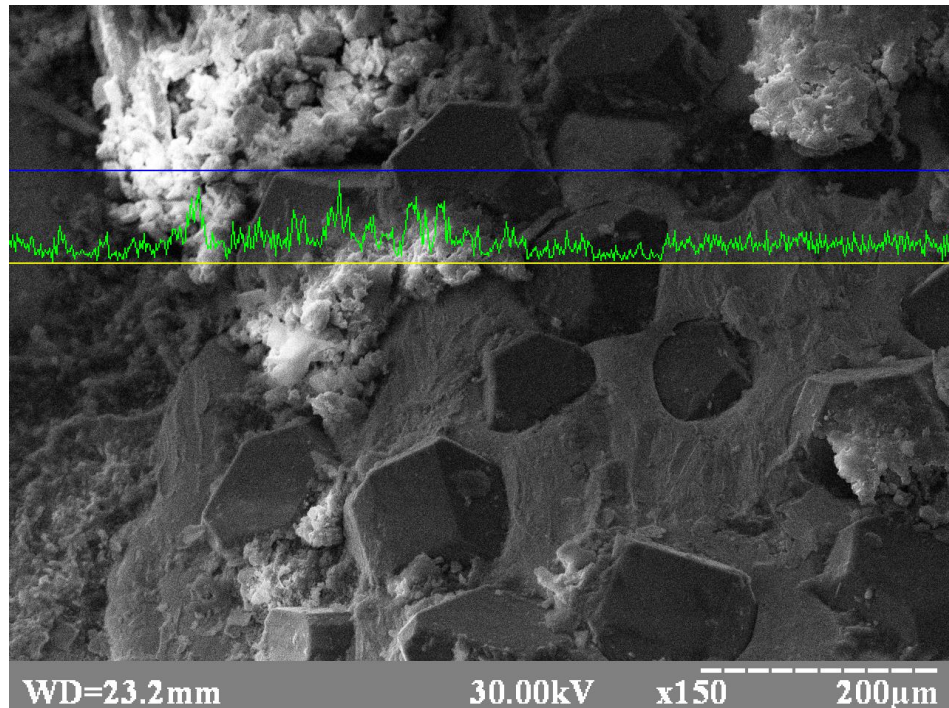


Рис. 4.12. Залишки продуктів мікрорізання між зернами алмазу

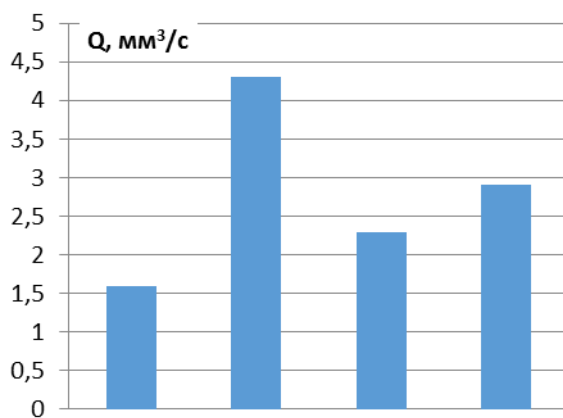
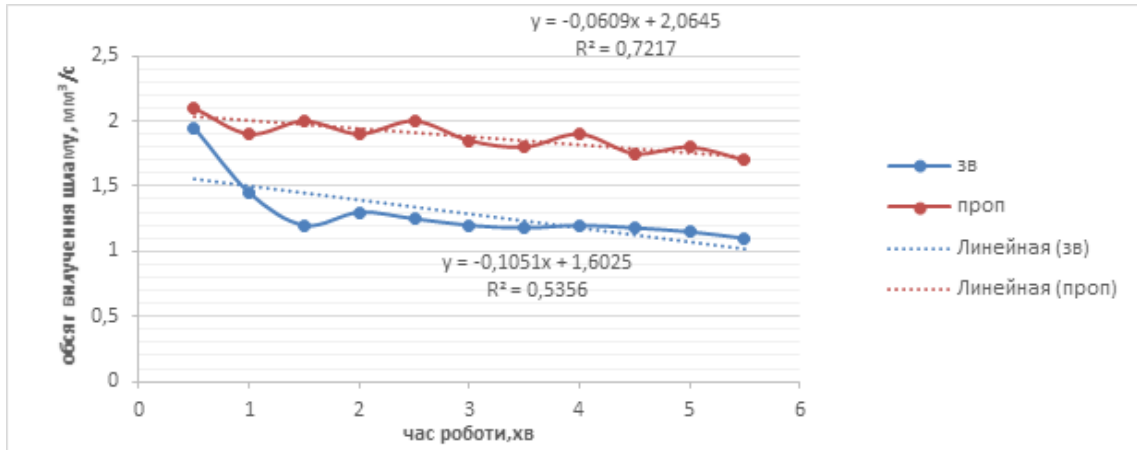
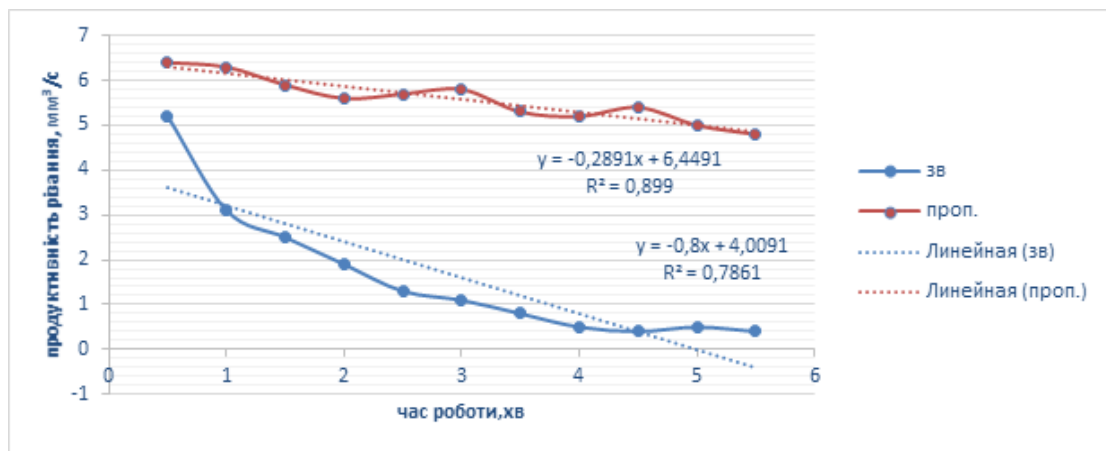


Рис. 4.13. Порівняння об'ємного зйому матеріалу КІМФ звичайним інструментом із малою часткою алмазних зерен (1), трубокругом (2), сегментним (3) та інструментом пропонованої конструкції (4)

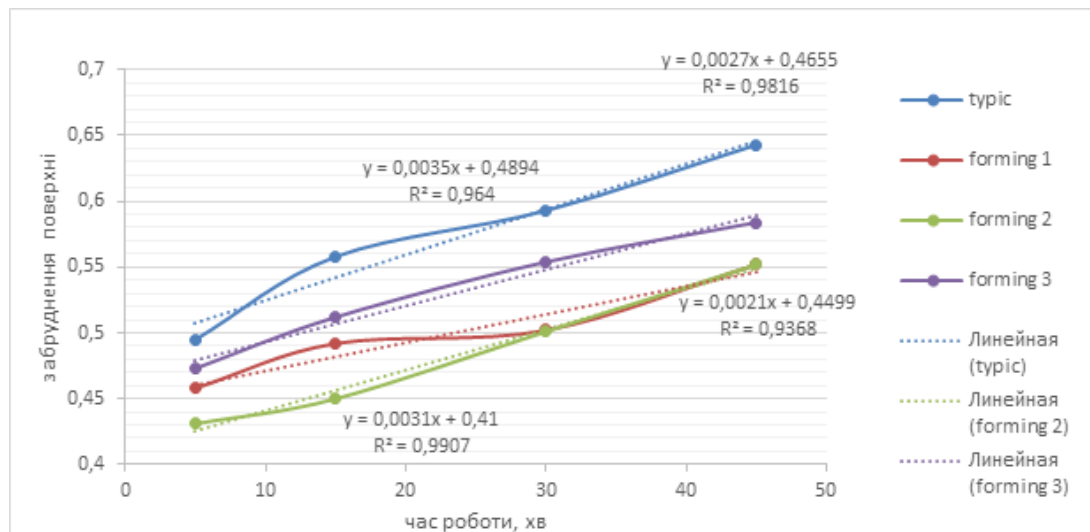
Різальні характеристики інструментів ілюструються наступними діаграмами (рис. 4.14). Стає очевидним, що пропоновані технічні рішення працюють більш стабільно, і менше піддаються забрудненню на робочих поверхнях.



а)



б)



в)

Рису. 4.14. Зміна продуктивності різання алмазною струною (а) та пилкою реноватора (б); зростання забрудненості поверхні (в) для інструменту звичайного 1 і пропонуваного 2

Про це свідчать також і мікрофото робочих поверхонь інструменту. Однак залежності є досить відмінними, що обумовлює необхідність виконання багатofакторного експерименту, який дозволив би пов'язати впливові фактори різальних властивостей із параметром ефективності обробки, зокрема, обсягом утворення шламу  $Q$ , мм<sup>3</sup>/с.

Прийняті до уваги фактори на межі їх варіювання наведені в таблиці 4.9, структура матеріалу із поверхні різання – на рис 4.15, а мікрофотографії частинок шламу – на рис.4.16. Статистичний аналіз – на рис. 4.17.

Таблиця 4.9 – Межі варіювання прийнятих до уваги факторів

Фактор		Позн.	Розм.	max	min
1	Крок кластерів	$t$	мм	3	15
2	Виліт зерен	$h$	мм	0,05	0,1
3	Щільність нанесення на поверхню	$w$	%	20	80
4	Швидкість руху	$v$	м/с	0,4	2,0
5	Зусилля притискання	$P$	Н	20	90
6	Параметр відгуку	$Q$	мм <sup>3</sup> /с		

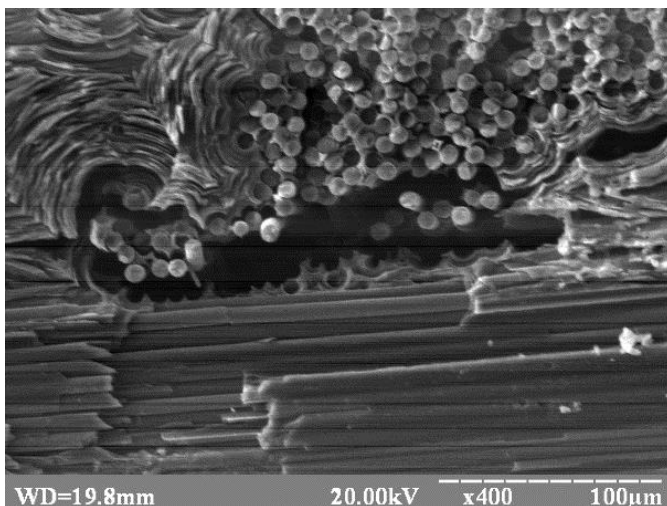


Рис. 4.15. Фрагмент розрізаного матеріалу КІМФ із відкритою порожниною

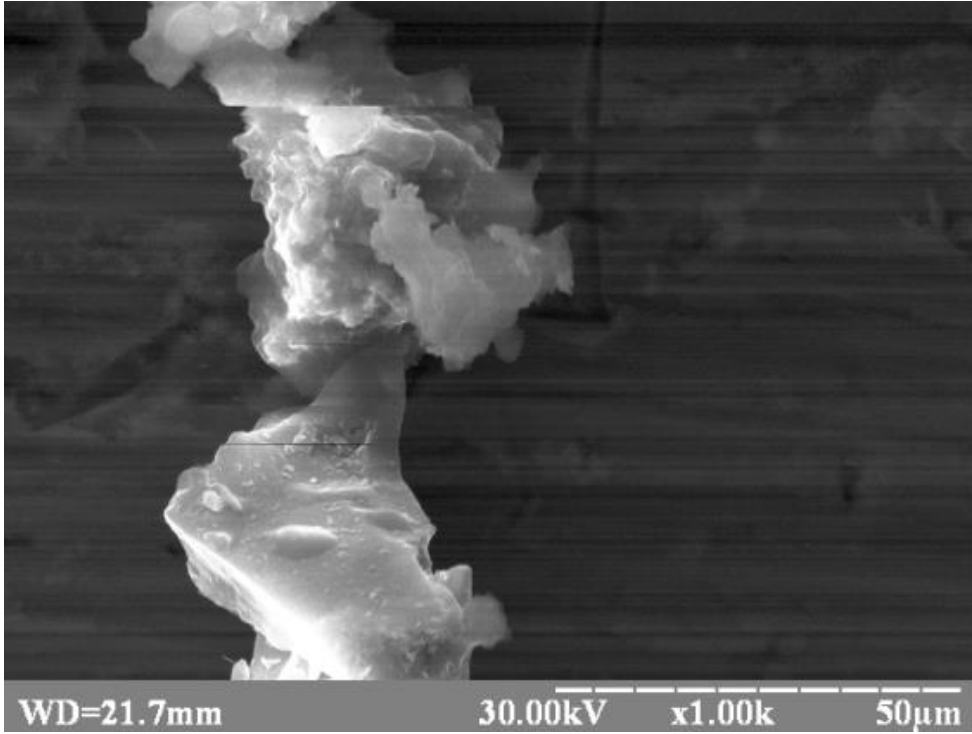
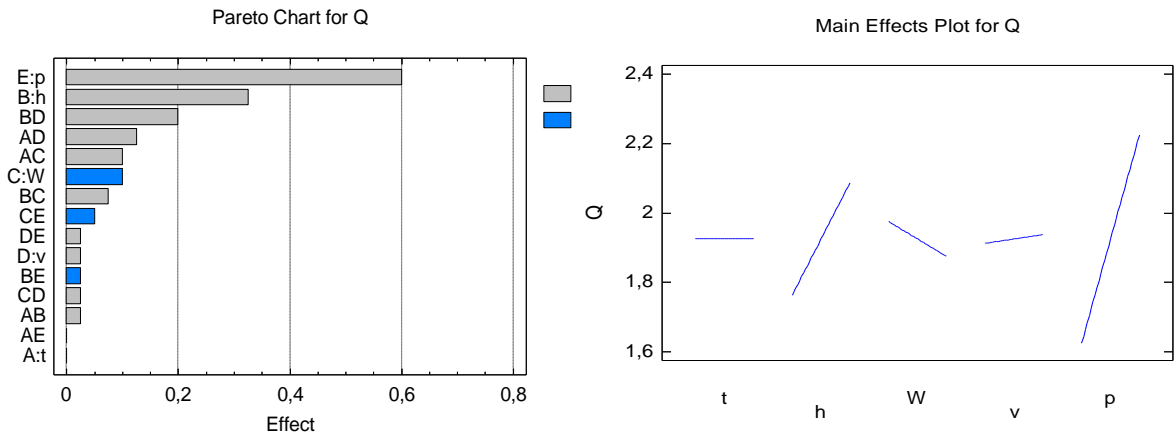
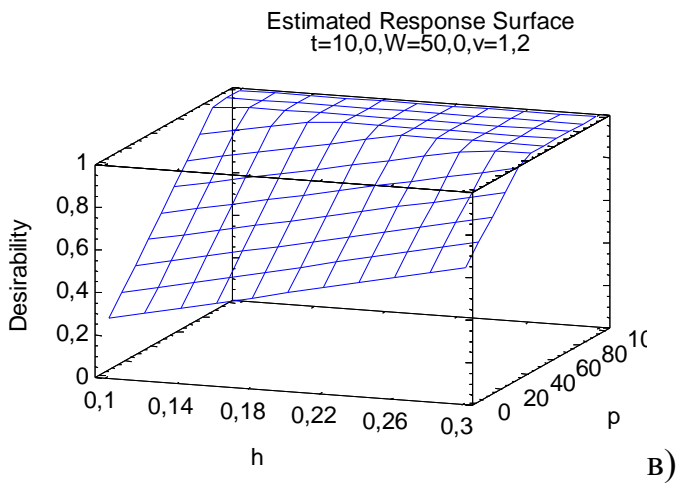


Рис. 4.16. Дослідження шламу, утвореного після обробки



а)

б)



в)

Рис. 4.17. Ступінь впливу факторів (а), їх головні ефекти (б) та поверхня відгуку (в)

Статистична обробка результатів плану експериментів дозволила побудувати наступну регресійну залежність:

$$Q = 1,193 + 1,625 \cdot h + 0,008571 \cdot p + 0,01562 \cdot v - 0,0017 \cdot W. \quad (4.19)$$

Порівняння впливу швидкості руху інструменту (в даному випадку, різальної струни) відносно оброблюваної поверхні дозволила зробити такі висновки (рис. 4.18).

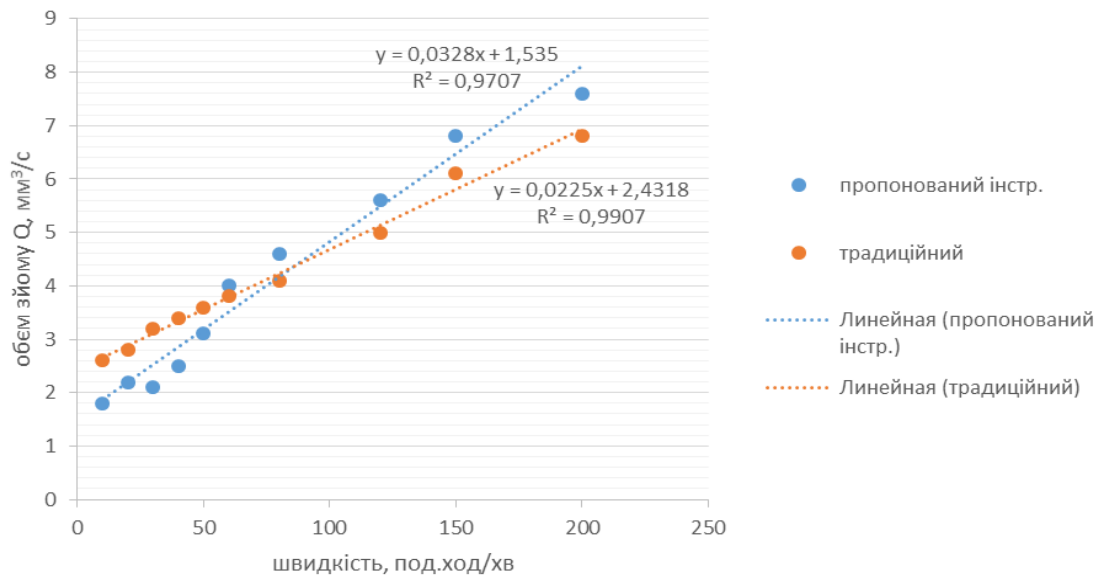


Рис. 4.18. Відмінності продуктивності обробки  $Q$ , мм<sup>3</sup>/с традиційного та пропонованого інструментів (різальної струни) залежно від швидкості різання  $v$ , м/с

Кластеризація поверхонь дозволяє покращити стабільність обробки упродовж основного часу ( $T_0=0,8...2,5$  хв), однак при цьому такий інструмент потребує більш точного визначення режимів різання, а також їх коригування з огляду на досягнення максимальної продуктивності  $Q$ . Наприклад, однакова продуктивність різання порівняно із традиційною струною досягається при кількості подвійних ходів не менших за  $125 \text{ хв}^{-1}$ , що відповідає середній швидкості різання  $0,8$  м/с. Таку особливість можна пояснити динамічними явищами контакту окремих зерен із нещільним середовищем композиту.

Підсумовуючи наведене, можна зробити такі висновки. Порівнюючи із традиційним інструментом, зазначимо, що пропонований володіє меншою швидкістю розвитку пошкоджень, водночас із тим, що початкове розсіювання параметрів також на 27–32 % менше, що підтверджує його ефективність.

Показано, що похибки симуляції та отриманих регресійних моделей не перевищують 10–12%, а використання інструменту, створеного на основі функціонального підходу, вища на 20–25% для кільцевих свердл, на 40–50% для гнучкого інструменту (алмазних струн) та на 15–20% для пружного інструменту (пилки реноватора). При цьому ефективність використання інструменту, створеного на основі використання функціонального підходу, є високою (рис. 4.14.). Забруднення поверхні визначено як відношення об'ємного залишку шламу  $w_z$  до відкритих пор нового інструменту  $w_p$ ,  $z=w_z/w_p$ .

#### 4.4. Висновки за розділом

Приведено результати комплексу теоретико–експериментальних досліджень застосування традиційного та пропонованого інструменту. Так, із використанням розробленої математичної моделі виконана симуляція для визначення умов і відмінностей при роботі алмазного свердла, пилки реноватора, алмазної струни під час різання матеріалу типу КІМФ. На основі випробовування інструментів із сформованим кластерним шаром доведено, що теорія алмазного мікрорізання композиційних армованих матеріалів повинна врахувати динамічні явища у зони різання як наслідку сукупності роботи окремих поверхневих кластерів. При цьому показано, що більш стабільним і ефективним є різання інструментом, крок розміщення кластерів на якому відповідає кроку армування матеріалу джгутами волокон. Цим доведено одне із наукових положень, винесених на захист роботи.

Також встановлено, що стійкість інструменту, створеного на основі функціонального підходу, вища традиційних на 20–25% для кільцевих свердл, на 40–50% для гнучкого інструменту (алмазних струн) та на 15–20% для пружного інструменту (пилореноватору). Сходженість результатів моделювання та експериментальних даних має похибку не більшу за 10...15%, і обумовлюється складністю врахування особливостей взаємодії інструменту на значній довжині поверхні різання (понад 150...300 мм). При обробці КІМФ матеріалів розмір кластеру відповідає кроку армування матеріалу, і становить 2,8..3,0 мм; виліт зерен зростає з 15 до 90 мкм зі зменшенням щільності нанесення з 60 до 20%.

Кластеризація поверхонь дозволяє покращити стабільність обробки упродовж основного часу ( $T_0=0,8...2,5$  хв), однак при цьому такий інструмент потребує більш точного визначення режимів різання, а також їх коригування з огляду на досягнення максимальної продуктивності  $Q$ .

## РОЗДІЛ 5

### ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ ТА ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

5.1. Визначення рівня рентабельності при виробництві інструментів із кластеризацією поверхні

Пропонується методика визначення рівня рентабельності удосконалення інструменту, виходячи із умов надійності забезпечення процесу обробки.

В роботах [131-134] було показано, що втрата працеспроможності інструменту при обробці вуглецевих композиційних матеріалів пов'язана однозначно із явищами зміни умов контактуючих елементів – поверхні обробки, яка внаслідок шаржування продуктами руйнування втрачає порожнистість у поверхневому шарі, та різальної поверхні, на якій у проміжках між абразивними зернами накопичується пиловий ущільнений осад, наслідок чого різко зростає контактна площа, і при відповідних високих робочих тисках починає стрімко зростати температура. Як зазначається в [138] продуктивність різання різко скорочується і процес може припинитися. Дієвим засобом поновлення різання є вилучення частинок шламу із міжповерхневого зазору; іншими словами інструмент має бути самоочищувальним [150].

На виявлення саме таких ознак направлений функціональний підхід, який дозволяє максимально адаптувати інструмент до умов його експлуатації.

З економічної точки зору, нове технічне рішення повинно володіти такою вартістю, яка б у порівнянні із вартістю типового інструменту надавала б перевагу за рахунок меншої кількості очищень поверхонь різання зі збереженням властивостей інструменту, направлених на забезпечення якісного розрізання [141-145].

Елементами, які піддаються явищам зношування і які безпосередньо визначають, наприклад, продуктивність різання  $q_p$ , є алмазний шар та корпус



інструменту (для шару це умовна кількість частинок на площині різальної поверхні  $k_c$  та характеристика чистоти різальної поверхні  $\mu$ ; для корпусу – його геометричні параметри, наприклад, діаметр  $D_k$ ). Процеси зношування для цих елементів протікають з різною інтенсивністю, відповідно, різними є періоди стійкості  $T_k$  та  $T_D$ . Доля собівартості  $W$ , яка залежить від зазначених елементів (швидкозношувальних), визначиться так:

$$W = C_D \frac{t_0}{T_D} + C_k \frac{t_0}{T_k} = t_0 \left( \frac{C_D}{T_D} + \frac{C_k}{T_k} \right), \quad (5.1)$$

де  $t_0$  – операційний час, що визначається швидкістю робочої подачі  $s_p$  та довжини контуру  $L_k$  при обробці однієї заготовки:

$$t_0 = \frac{L_k}{s_p}. \quad (5.2)$$

Доля собівартості, віднесена на 1 продукції, визначається:

$$W = \frac{L_k}{s_p} \left( \frac{C_D}{T_D} + \frac{C_k}{T_k} \right). \quad (5.3)$$

У разі, коли виникне параметрична або функціональна відмова, заготовка, яка в цей час буде оброблятися, виявиться забракованою, тобто виробник отримає втрати, що дорівнюють вартості заготовки (як правило, виникаючий брак є не виправним)  $C_3$ .

Оскільки зазвичай стійкість інструменту перевищує час машинної обробки, ситуація виникнення браку настане тоді, коли після початку роботи елементів буде оброблена певна партія деталей  $N$ . Передувати виникненню браку можна, якщо зменшити цю кількість на одиницю, тобто обробити  $(N-1)$  виріб. При цьому, критичного зношування елемента досягнуто не буде, а заміна елемента дозволить ще певний час працювати у докритичних межах. Отже, для виробника повинна виконуватися умова:  $W \cdot (N - 1) < W \cdot N + C_3$

Меншу стійкість елементів прийемо за лімітуючу. Тоді остання умова у виразі часу набуде вигляду:

$$T_m - \Delta t < T_m - \left( \frac{C_3}{W} + 1 \right) t_0 \quad (5.4)$$

А після перетворення отримаємо вираз:

$$\Delta t > \left( \frac{C_3}{W} + 1 \right) t_0. \quad (5.5)$$

На рис. 5.1. наведено закономірності зміни результативної функції у параметрах запропонованої моделі, з яких витікає наявність певного раціонального рівня обраних факторів.

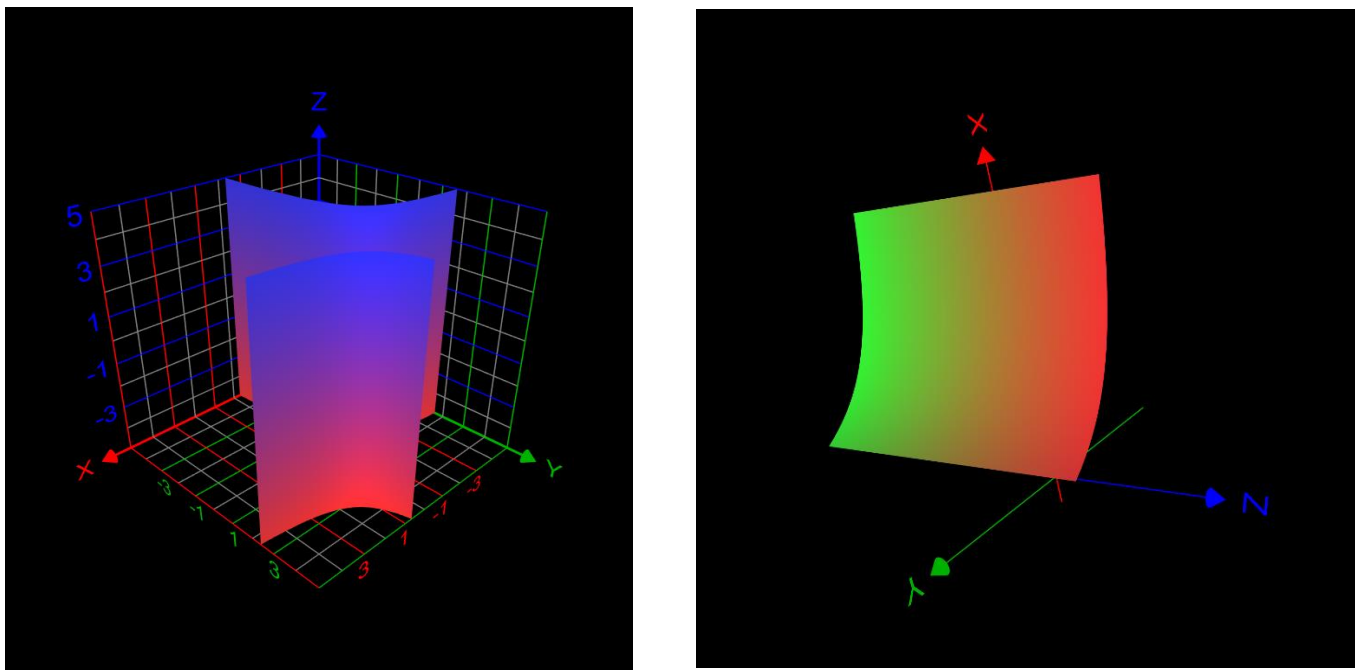


Рис. 5.1. Зміна результативної функції у прийнятих до уваги параметрах

З приведених діаграм стає очевидним, що зростання рівня рентабельності залежить від часу обробки, і чим більший останній чинник, тим ефективнішою є використання інструменту із кластеризованою поверхнею.

Отже, можна очікувати, що найбільшу ефективність отримуємо при використанні, наприклад, стрічок і ниток для розпиловки масивів композиту.

5.2. Визначення економічного ефекту та ефективності впровадження функціонально-орієнтованого підходу

Скористаємося методикою, наведеною у [142-146].

У загальному випадку, витрати при виробництві визначатимуться за формулою:

$$C = N_{cm} + E_m + A_m + Z_o + Z_d, \quad (5.8)$$

де  $N_{cm}$  – витрати на матеріали;

$E_m$  – витрати на електроенергію;

$A_m$  – витрати на амортизацію використовуваного устаткування та оснащення;

$Z_o, Z_d$  – витрати на заробітну плату.

Затрати на сировину і матеріали визначають прямим розрахунком, виходячи із норм витрат матеріалів на одиницю продукції і діючих оптових цін з врахуванням транспортно-заготівельних витрат і розраховують за формулою:

$$N_{cm} = \sum_{i=1}^n N_g \cdot C_m \cdot K_{mp} - Q_g \cdot C_g, \quad (5.9)$$

де  $n$  – кількість матеріалів, що використовується;

$N_g$  – норма витрат матеріалів;

$C_m$  – ціна матеріалу;

$K_{mp}$  – коефіцієнт, який враховує транспортно-заготівельні витрати;

$Q_g$  – кількість відходів матеріалу, яка реалізовується;

$C_g$  – ціна реалізації відходів матеріалу.

Змінні витрати визначаються так

$$C_{zm} = M_g + Z_o + Z_{від} + E_l + A_m + Z_{рем}, \quad (5.10)$$

де  $M_g$  – затрати на матеріали;

$Z_o$  – заробітна плата основна;

$Z_d$  – заробітна плата додаткова;

$E_n$  – витрати на електроенергію;

$A_m$  – сума амортизаційних відрахувань;

$Z_{від}$  – відрахування до соціальних фондів;

$Z_{рем}$  – затрати на ремонт обладнання.

Оскільки виготовлені інструменти ремонту не підлягають, значення  $Z_{рем}$  не враховуємо.

Основна заробітна плата становитиме:

$$Z_o = \sum t_{н(i)} \cdot Z_{zod}, \quad (5.11)$$

де  $t_{н(i)}$  – норма часу на виконання  $i$ -ої операції;

$Z_{zod}$  – тарифна ставка робочих на  $i$ -ій операції.

Додаткова заробітна плата може бути визначена так:

$$Z_d = K_d \cdot Z_o, \quad (5.12)$$

де  $K_d$  – коефіцієнт, що враховує додаткову плату,  $K_d = 0,3$ ;

$Z_d$  – додаткова заробітна плата.

Відрахування в соціальні фонди (пенсійний, соціального страхування, страхування від безробіття) здійснюються згідно формули:

$$Z_{відр} = \frac{K_c}{100} \cdot (Z_o + Z_d), \quad (5.13)$$

де  $K_c$  – відсоток відрахувань у соціальні фонди,  $K_c = 22\%$ .

Розрахунок вартості технологічної електроенергії виконували за рівнянням

$$E_m = \frac{N_e \cdot K_d \cdot K_N \cdot K_W \cdot t_M}{\eta} \cdot C_e, \quad (5.14)$$

де  $N_e$  – встановлена потужність електродвигунів;

$K_d$  – середній коефіцієнт завантаження електродвигунів,  $K_d = 0,3 \dots 1,0$ ;

$K_N$  – середній коефіцієнт завантаження електродвигунів за потужністю,  $K_N = 0,6 \dots 0,7$ ;

$K_W$  – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі,  $K_W = 1,05$ ;

$t_M$  – машинний час на операцію;

$\eta$  – ККД установки,  $\eta=0,85$ ;

$C_e$  – вартість одного кВт·год електроенергії,  $C_e=1,68$  грн/кВт·год.

Амортизаційні відрахування становитимуть:

$$A_M = \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_{\text{бал}(i)} \cdot t_{n(i)} \cdot n}{F_{\text{д}} \cdot \eta_z \cdot 100}, \quad (5.15)$$

де  $\Phi_{\text{бал}(i)}$  – балансова вартість обладнання  $i$ -ої операції;

$t_{n(i)}$  – норма часу на  $i$ -ту операцію;

$n$  – норма амортизації;

$F_{\text{д}}$  – дійсний фонд робочого часу;

$\eta_z$  – коефіцієнт завантаження,  $\eta_z=0,9$ .

За наведеною вище методикою обчислення кошторису затрат та встановлення собівартості одного (першого) виробу виконаний розрахунок, результати якого наведені у табл. 5.1.

Приведений розрахунок відноситься до отримання першого готового виробу. Очевидним є те, що при обробці кількох виробів вартість кожного наступного буде знижуватися за рахунок перерозподілу умовно-постійних і умовно-змінних затрат [149]. При розрахунку також не враховані додаткові накладні витрати, а амортизацію роботи обладнання оцінено у вартості 1 верстато–години [150].

Таблиця 5.1 – Порівняння собівартості виробництва традиційного і пропонуваного інструментів

Показники	Одиниця виміру	Традиційний інструмент	Пропонований із кластеризованим поверхневим шаром
1	2	3	4
Балансова вартість обладнання	грн.		
Лазерний комплекс із системою забезпечення кластеризації			1536000
Гальванічна ванна		1436780	
Засоби контролю		-	-
Вартість 1 верстато-години		74,32	74,32
Кількість верстато-годин	год.	2,6	3,8
<b>Пряма вартість обробки</b>		<b>564,83</b>	<b>282,42</b>
Вартість матеріалу	грн./виріб	1240	680
Норма витрат на виріб із урахуванням коефіцієнту використання матеріалу		4,9	0,6
<b>Разом</b>			<b>441</b>

### 5.3. Реверсний інженерінг робочих крайок інструменту

Нехай алмазовмісний інструмент має параметри (наприклад, різальну здатність), яка змінюється протягом часу. Як і будь-яка складна технічна система, обробна система, що поєднує інструмент, робочу машину, заготовку та носії зовнішнього впливу при функціонуванні має певний ансамбль реалізацій процесу, визначеного для подібних проміжків часу і обумовлених явищами системного [151-154] та випадкового [155] характеру (рис. 5.2).

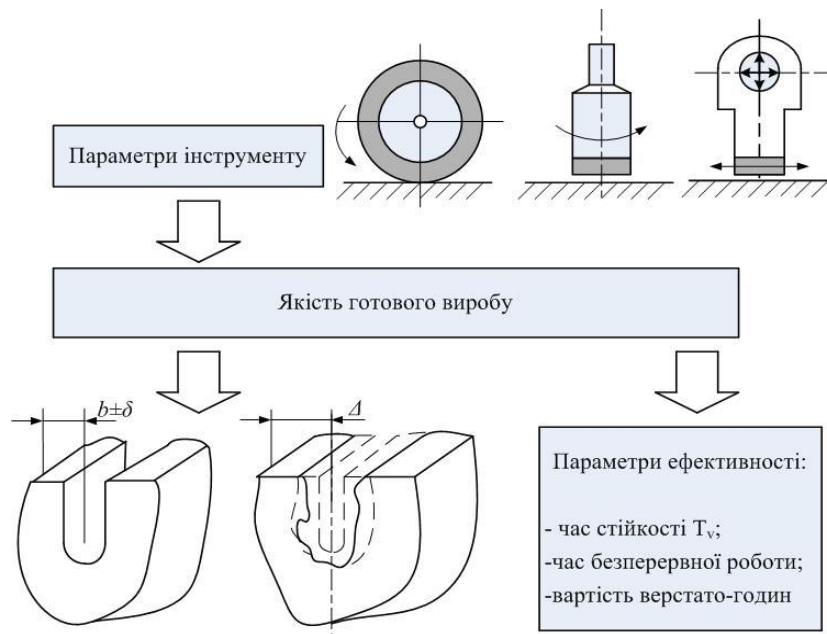


Рис. 5.2. Формування вихідних показників процесу різання ПКМ алмазним інструментом

Системні явища мають квазісталий, довготривалий характер, і можуть бути описані функціональними закономірностями, виявленими на основі статистичних спостережень за процесом або на основі теоретичного аналізу перетворень, що протікають при його реалізації [156].

Розглядаючи загальну схему формування відмови виробу (рис. 5.3), коли протікання різних процесів пошкодження приводить до зміни в часі вихідного параметра  $X$ , можна зазначити, що відмова виникне по досягненні параметром свого граничнодопустимого значення  $X_{max}$  через деякий

випадковий проміжок часу роботи виробу.

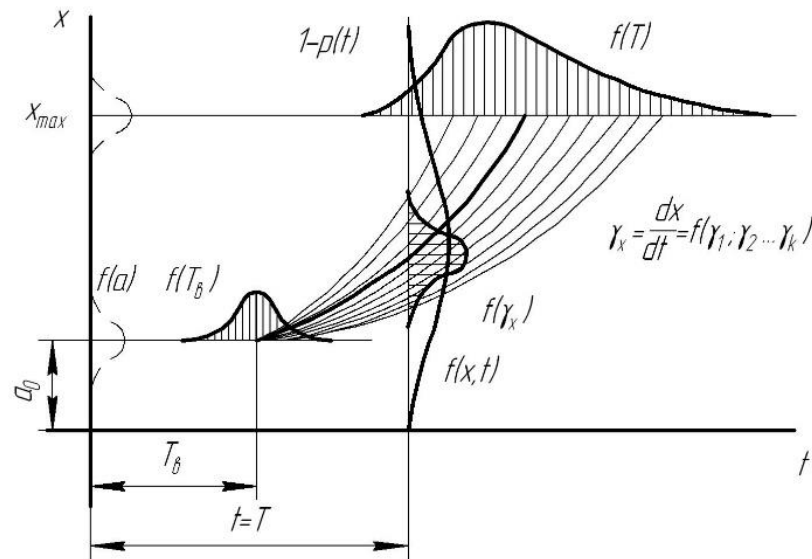


Рис. 5.3 Загальна схема формування відмов

При цьому основні етапи формування закону розподілу  $f(t)$  наступні. Спочатку має місце розсіювання параметрів виробу  $f(a)$  щодо свого математичного очікування  $a_0$ . Потім на погіршення параметрів виробу в процесі експлуатації позначаються повільноплинні процеси, наприклад, знос. У загальному випадку зміна параметра може початися через деякий проміжок часу  $T_\delta$ , який так само є випадковою величиною і пов'язаний з накопиченням пошкоджень (наприклад, втомних) або з дією зовнішніх чинників.

Згідно [149], у разі, коли випадкові аргументи  $a$  і  $\gamma$  розподілені за нормальним законом, параметр  $X$  для кожного значення  $t = T$  буде розподілений по тому ж закону з параметрами: математичне очікування  $X_{cp}$  і середнє квадратичне відхилення  $\sigma_x$  становитимуть:

$$X_{cp} = a_0 + \gamma_{cp} T, \quad \sigma_x = \sqrt{\sigma_a^2 + T^2 \sigma_\gamma^2},$$

де  $a_0$  – математичне очікування;  $\sigma_a$  – середньоквадратичне відхилення випадкового параметра  $a$ . Тоді ймовірність  $P(T)$  визначиться:



$$P(T) = 0,5 + \Phi \left[ \frac{X_{\max} - a_0 - \gamma_{cp} T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\gamma^2 T^2}} \right]. \quad (5.16)$$

Одночасний прояв поступових і раптових відмов характеризується тим, що значення  $P(t)$  може бути обчислене по теоремі множення ймовірностей, так як безвідмовність роботи деталі за час  $t$  полягає у виконанні двох умов: безвідмовності від зносу, обумовленого пошкодженнями  $P_u(t)$  і безвідмовності від раптових виходів з ладу  $P_e(t)$ . При незалежності цих відмов

$$P(t) = P_u(t)P_e(t)$$

і при відомих параметрах законів розподілу ( $T_{cp}$ ;  $\sigma$ ,  $\lambda$ ), ймовірність безвідмовної роботи становитиме:

$$P(T) = \left[ 0,5 + \Phi \left( \frac{X_{\max} - a_0 - \gamma_{cp} T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\gamma^2 T^2}} \right) \right] \cdot e^{-\lambda T} \quad (5.17)$$

за умови, що повільно плинні процеси підкоряються закону нормального розподілу, а раптові – експоненціальному.

Відповідно до [148], математичне очікування випадкового процесу в перерізі для відомої щільності ймовірності при безкінечній кількості реалізацій визначається залежністю:

$$m_x(t) = M[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx \quad m_{2_x}(t) = M[x^2(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 p(x)dx,$$

$$D_x(t) = \sigma_x^2(t) = M[(x(t) - m_x)^2]$$

Зазвичай у технічних системах є елементи або підсистеми (ланки), надійність функціонування яких безпосередньо визначає надійність реалізації заданого процесу в цілому.

Такою ланкою у даному випадку є сам алмазний інструмент або гама інструментів [148, 149, 158]. Таким чином, збільшення часу експлуатації різального інструменту можливе як за рахунок повного відновлення його різальних властивостей шляхом нанесення алмазного шару, так і за рахунок

часткового відновлення, при якому повної заміни не відбувається, а поліпшення різальних властивостей досягається, наприклад, шляхом відповідного очищення. Однак міцність алмазного шару має бути такою, при якій виконання операцій очищення не завдаватиме шкоди самому шару.

Задача оцінки надійності процесу обробки алмазним інструментом може бути вирішена шляхом пошуку функціональної обумовленості вихідних показників прийнятими до уваги параметрами елементів самого інструменту (в першу чергу,  $k_c$  або  $D_k$ ), тобто

$$\Delta \bar{J} = f(\Delta k_c, \Delta D_k, \Delta \mu, \dots, P_a), \quad (5.18)$$

де  $J$  – матриця відхилень показників якості крайки та продуктивності різання, отримуваний при реалізації процесу.

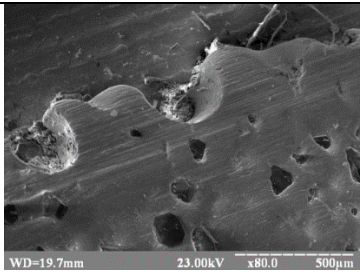
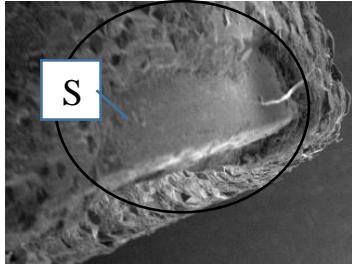
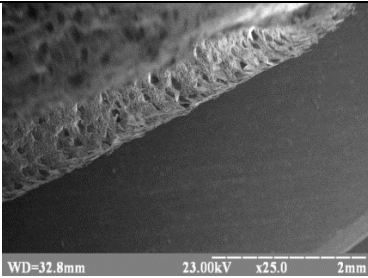
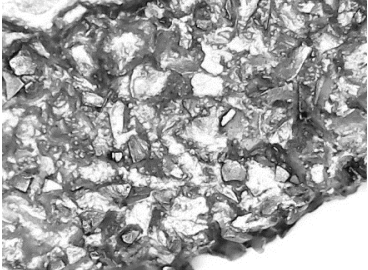
Тоді, зважаючи на міркування розд.2, п.2.2, відхилення показників якості крайки визначатиметься умовами дії інструменту, а оскільки система різання є замкненою системою, можна вважати, що умови взаємодії вестимуть до прояву поступових відмов як пошкоджень різальних поверхонь інструменту. Відтоді рівняння п.2.2. можуть відображати вимоги до відповідних кластерів поверхні з алмазними зернами.

Так, в табл. 5.2 та табл. 5.3. наведені дефекти алмазного шару інструментів – пилок реноватору та кільцевих свердл.




Робота інструментів виконувалася відповідно до технічних вимог та схем п.2.1. при забезпеченні відповідної схеми різання.

Для співставлення рівня зносу інструменту було змодельовано умови роботи, спираючись на властивості матеріалу табл. 4.1.

Таблиця 5.2 – Дефекти поверхонь свердл трубчастих, Ø18,0 мм

№ п/п	Тип дефекту	Приклад	Контрольований параметр	Кількість
1	Наявність пошкодження алмазовмісного шару та відносна площа ділянок викрошування зерен		$N_{сер}=22$ шт При $N_a=58$ шт, $k_{oa} = \frac{N_a}{N_{сер}} =$ $\frac{22}{58} = 0,379$	8
2	Наявність ділянок пошкодження підложки		$k_{sb} = \frac{S_b}{S_o} =$ $\frac{7}{320} = 0,022$	1
3	Наявність порушення адгезійного зчеплення підложки із основою		$k_{sp} = \frac{S_p}{S_o} =$ $\frac{18}{320} = 0,056$	4
4	Нерівномірність зношування алмазного шару, викрошування алмазів		$k_{oa} = \frac{N_a}{N_{сер}} =$ $\frac{22}{58} = 0,379$	

Таблиця 5.3 – Типові дефекти насадок реноватору (12 шт., товщина алмазного слою 0,25 мм, концентрація зерен 54–62 од/мм<sup>2</sup>, розмір зерна 0,13–0,15мм)

№ п/п	Тип дефекту	Приклад	Контрольований параметр	Кількість
1	Наявність пошкодження алмазовмісного шару та відносну площу ділянок викрошування зерен		$N_{сер} = 28$ шт При $N_a = 58$ шт, $k_{oa} = \frac{N_a}{N_{сер}} =$ $\frac{28}{58} = 0,483$	4
2	Засалювання		$k_{sb} = \frac{S_b}{S_o} =$ $\frac{161}{227} = 0,71$	12
3	Наявність порушення адгезійного зчеплення підложки із основою	Не виявлено		
4	Відхилення геометричних розмірів корпусу інструменту		$k_d = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_0}$ $= 0,05$	2
5	Деформація та псування корпусів	Не виявлено		

Забезпечуючи відповідні температурні режими, витрату алмазів та умови нанесення їх на поверхню, формуються певні властивості інструменту, які у майбутньому забезпечують надійність його функціонування за рахунок рівномірного зношування.

Алгоритм реверсного інжинірингу поверхні різання має наступний вигляд (рис.5.4).

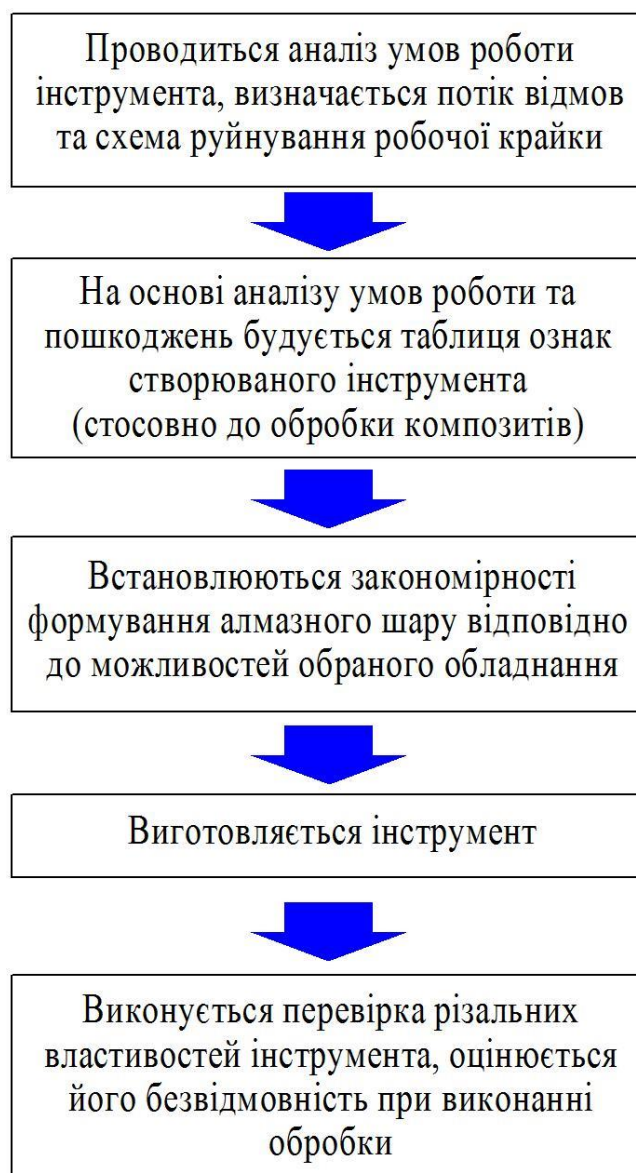


Рис. 5.4. Схема реверсивного інжинірингу поверхні інструменту для формування відмінних кластерів

Проведені дослідження виконувалися до повного руйнування поверхневого алмазовмісного шару, що дало змогу отримати певну статистичну вибірку для визначення параметрів моделі настання відмов за (5.17). Оскільки випробуванням піддавали фактично один зразок інструменту, достовірність результатів складає 95%.

Якщо за параметр  $X_{\max}$  прийняти продуктивність процесу (цей параметр є узагальнюючим для моделей надійності), визначену при фіксованій робочій подачі або фіксованому зусиллю різання (у даному випадку 15 Н), то параметричною відмовою можна вважати зниження продуктивності менше ніж на 1 мм<sup>3</sup>/с. Тоді  $a_0=0,27$ ,  $\sigma_a=0,045$ ,  $\gamma=0,00037\text{мм}^3/\text{с}$ ,  $\sigma_\gamma=0,000012$ , а очікуваний потік відмов  $\lambda=0,000025$ .

Таким чином, отримані параметри моделі (5.17) дозволяють прогнозувати тривалість обробки без істотного втрачання продуктивності.

#### 5.4. Висновки до розділу

Приведене економічне обґрунтування пропонуванних технічних рішень та інженерна методика їх використання. Оскільки ефективність створеного інструменту вбачається не тільки у зростанні періоду стійкості  $\tau$ , а і у скороченні обсягу матеріалу, перетворюваного у шлам, показано, що використання інструменту із адаптацією кластерів до процесу різання дозволяє підвищити коефіцієнт використання матеріалу на 18–22%, отримати економічний ефект до 150 тис.грн. при розрізанні одного блоку КІМФ.

Для забезпечення відповідності умов формування кластерів поверхні умовам подальшої роботи інструменту запропоновано виконувати реверсивний інжиніринг, заснований на принципі аналізу зношування інструменту після роботи.

Сформульовано вимоги до інструментів, що використовуються для різання матеріалів типу КІМФ, розроблено, виготовлено і апробовано ряд

нових технічних рішень інструментів із нанесеним алмазним шаром, зокрема, різальних струн, занурюваних пилок реноватору та свердл.

Розроблено методику визначення функціональних особливостей жорстких (свердл), пружних (пильні полотна реноватору) та гнучких (струни) інструментів, призначених для обробки матеріалів, армованих скляними та вуглецевими волокнами.

Наведено приклади та перспективи застосування підходу при використанні виробів із алмазовмісними шарами в машинобудуванні, зроблено висновок щодо економічної доцільності його використання. Показано, що впровадження даного підходу у вигляді інженерних методик, рекомендацій та алгоритмів вибору умов та режимів різання дозволяє підвищити ефективність обробки та отримати істотний економічний ефект.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено модель взаємодії нежорсткого інструменту із додатковими ступенями вільності (зокрема алмазної струни, полотен реноватора) з композитом типу КІМФ. Отримано закономірності взаємодії абразивних зерен із нещільною поверхнею та показано, що збільшення робочого навантаження  $Q$  веде до непропорційного зростання зйому матеріалу та затухання різання з плином часу. Встановлено, що причиною втрати різальних властивостей інструментів при обробці спеціальних карбон–карбонових матеріалів та вуглецевих пластиків типу КІМФ є надмірне пиловиділення, внаслідок чого змінюються умови взаємодії алмазних зерен із матеріалом, а температура зростає до критичних 1100...1200 К. Зроблено припущення про подолання зазначених недоліків процесу трансформацією робочих поверхонь інструменту.

2. Виконано адаптацію методики пошуку раціональних матеріальних носіїв функцій до задач удосконалення виробів із алмазним шаром, причому для пошуку оптимальних носіїв функцій – нових технічних рішень аналізованих виробів – запропоновано застосовувати метод розрахунку питомої вартості корисної функції. Доведено, що додаткові ступені вільності інструменту зумовлюють відмінність умов роботи за локалізацією на 20–40%, збільшуючи таку відмінність за часом (при обробці понад 5...8 хв.). Це пов'язано зі зміною різальних властивостей внаслідок активного виділення шламу та зростанням температури на робочих поверхнях.

3. На основі застосування морфологічного аналізу визначено принципи декомпозиції робочих поверхонь, доведено доцільність її кластеризації. Сформульовано основні вимоги до кластерів, зокрема: сумісні кластери мають допускати відмінності у сформованих структурах; кластери не повинні мати різні механічні характеристики, зокрема КЛТР,  $\sigma_a$  та ін., що сприяє формуванню з таких елементів суцільної робочої поверхні; послідовність сумісних кластерів має наближатися до огинаючої заданого геометричного профіля виробу в цілому; сумісні кластери не повинні мати розривів у



структурі, а отже, мусять мати схожі фізико–механічні характеристики.

4. Доведено, що найбільш доцільним засобом забезпечення властивостей є лазерний деформаційний спосіб формування поверхневого шару, який потребує певних удосконалень для отримання закономірностей керування процесом формування елементів поверхні або їх кластерів. Розрахунок очікуваної зони локалізації показав, що за умови нагріву поверхні для здійснення наступного деформаційного ущільнення понад 750 °С діаметр локалізованої плями при нерухомому промені становить від 0,32 мм до 0,4 мм.

5. Встановлено, що стійкість інструменту, створеного на основі функціонального підходу, вища традиційної на 20–25% для кільцевих свердел, на 40–50% – для гнучкого інструменту (алмазних струн) та на 15–20% – для пружного інструменту (полотен реноватора). Порівняння результатів моделювання та експериментальних даних має похибку не більшу за 10...15% і зумовлюється складністю врахування особливостей взаємодії інструменту на значній довжині поверхні різання (понад 150...300 мм). При обробці КІМФ матеріалів розмір кластера відповідає кроку армування матеріалу і складає 2,8..3,0 мм; виліт зерен зростає з 15 до 90 мкм зі зменшенням щільності нанесення з 60 до 20%.

6. Для визначення параметрів поверхневих кластерів запропоновано використання реверсивного інжинірингу поверхні інструменту, що дає змогу за рівнем зношування формулювати вимоги до окремих кластерів робочої поверхні. При цьому відмінність функціональних особливостей кластерів доцільно описувати поліномами другого порядку.

7. Результати досліджень впроваджено у виробництво та в навчальний процес. Запропоновані методики, моделі і технічні рішення передано до впровадження на підприємство ТОВ «Кіровоградський інструментальний завод «Лезо»», а також використано в навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологія фізико–технічної обробки матеріалів» і «Технологія і обладнання фізико–технічної обробки матеріалів».

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Su, Y., Ouyang, Q., Zhang, W., Li, Z., Guo, Q., Fan, G., & Zhang, D. (2014). *Materials Science & Engineering A Composite structure modeling and mechanical behavior of particle reinforced metal matrix composites*, 597, 359–369.
2. Везезуб Н.В., Тарасюк А.П., Хавин Г.Л., Гетманов А.А. Механическая обработка волокнистых полимерных композитов: Монография. – Харьков, из-во ХНАДУ, 2001. – 180 с.
3. Лорд Э.Э., Маккей А.Л., Ранганатан С. Новая геометрия для новых материалов / пер.с англ. Под ред. В.Я.Шевченко, В.е. Дмитриенко. – М. Физматлит, 2010. – 360 с. – ISBN 978-5-9221-1243-7
4. V. Dhand, G. Mittal, K.Y. Rhee, S.-J. Park, D. Hui A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. – *Composites Part B: Engineering*, 73 (2015), pp. 166–180
5. V.Yu. Skeebea, V.V. Ivancivsky, D.V. Lobanov, A.K. Zhigulev, P.Yu. SkeebeIntegrated processing: quality assurance procedure of the surface layer of machine parts during the manufacturing step "Diamond smoothing" – *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 125 (2016), p. 012031
6. Alexandr Salenko, Viktor Shchetynin, Galina Gabuzian, Evgeny Lashko, Mohamed RF Budar, Sergey Klimenko, Alexandr Potapov. Cutting Superhard Materials by Jet Methods (on Functional Approach). *Recent Advancements in the Metallurgical Engineering and Electrodeposition*. IntechOpen, 2019. С.1–21.
7. Gay D. *Matériaux Composites*. 4th ed. Paris: Hezrmes; 1997. 640 p. ISBN2-86601-586-X.
8. Barbero EJ. *Introduction to Composite Materials Design*. USA: West Virginia University; 1998. 336 p. ISBN 97e8-1-4200-7915-9.
9. Jones RM. *Mechanics of Composite Materials*. 2nd ed. Philadelphia: Taylor and Francis; 1999. 519 p. ISBN 1-56032-712-X.

10. Kollar LP, Springer GS. *Mechanics of Composite Structures*. Cambridge: Cambridge University Press; 2003. 480 p. ISBN 978-0-511-05703-8
11. Norbert Geier, Paulo Davim, Tibor Szalay. - Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites: A review. - *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. - Volume 125, October 2019, 105552. – <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105552>.
12. A.S. Yuanyushkin, D.A. Rychkov, D.V. Lobanov Surface quality of the fiberglass composite material after milling. – *Applied mechanics and materials*, 682 (2014), pp. 183–187
13. P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, S.I. Petrushin The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface. - *Applied mechanics and materials*, 379 (2013), pp. 124–130.
14. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: Учебн. пособие. – Харьков: НТУ [ХПИ], 2006. – 364 с.
15. Интегрированные генеративные технологии : учеб. пособие [для студ. выс. учеб. заведений] / А.И. Грабченко, Ю.Н. Внуков, В.Л. Доброскок [и др.] ; под ред. А.И. Грабченко. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. — 416 с.
16. В.Л. Доброскок, А.Н. Шпилька, Полтава, Украина, В.Б. Котляров, Получение триангуляционной модели рельефа рабочей поверхности шлифовальных кругов. - *Резание и инструмент в технологических системах*, 2014, выпуск 84. С. 85-92.
17. IMPACT ON STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITES DURING MACHINING AND CUTTING: A REVIEW. - Deepa A., Padmanabhan K. and Kuppan P. School of Mechanical Engineering, VIT University, Vellore, VOL.11,NO.17,SEPTEMBER 2016. - ISSN 1819-6608 ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences ©2006-2016 Asian Research Publishing Network.

18. András Izer, MSc and Tamás Bárány. 2010. Development and investigation of Self- Reinforced Polypropylene composites based on the polymorphism of PP. Budapest University of Technology and Economics, Budapest. 109–115.

19. Верезуб Н.В. Создание высокоэффективных процессов механической обработки полимерных композитов на основе закономерностей механики разрушения. // Развитие процессов резания и холодного пластического деформирования металлов. – Сб. научн. трудов. – Киев: ИСМ НАН Украины, 1994.

20. Верезуб Н.В., Соломкин Г.М. Статистико-вероятностный метод оценки формирования микропрофиля обрабатываемой поверхности стеклопластика. //Резание и инструмент, № 37. - Харьков, 1987. – с.3–7.

21. Гавриш А.П., Саленко О.Ф. Забезпечення параметрів якості при гідроструменевій обробці. //Вісті академії інженерних наук України (спец. темат. додаток). – 1998. – с.66–75.

22. Альтшуллер Г. С. Найти идею: Введение в теорию решения изобретательских задач. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1991. – 225 с.

23. Михайлов А. Н., Михайлова Е. А., Маджид А. Д. Особенности синтеза структуры функционально-ориентированных технологических процессов комбинированной отделочной обработки осевых лезвийных инструментов // Высокие технологии в машиностроении: Сб. науч. тр. НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – Вып. 1(18). – С. 131–150.

24. Голибардов Е.И., Кудрявцев А.В., Синенко М.И. Техника ФСА. - Киев: Техника, 1989. – 239 с.

25. Щетинін В.Т. Кириченко А.М., Метак Аль Ібрахім., Ченчева О.О. Закономірності формування вихідних показників якості при обробці нещільних карбоновмісних матеріалів абразивним інструментом. - Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. - Кременчук: КрНУ, 2019. - Випуск 1(114). – С. 41–49.

26. A. Salenko, O. Chencheva, V. Gluchova, V. Schetinyn, Mohamed RF Budar, S. Klimenko, E. Lashko. Effect of slime and dust emission on micro-cutting when processing carbon-carbon composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3/1 (105) 2020, pp.38–51.

27. Functionally oriented approach to improve processes waterjet perforation of honeycomb composites. - О.Ф. Саленко, О.М. Мана, В.А. Нікітін, Ю.О. Павлюченко, С.В. Коваленко// *Промислова гідравіка і пневматика*, №4. – 2014. – с.27-32.

28. A. Salenko, V.Docenko, A.Fomovskaya The energetic approach for analysis of form-building at hidro abrasive engraving // *Journal of the Technical University of Gabrovo*, №37, 2009. – p.31–45.

29. Influence of material properties on the machinability in face milling Milenko Sekuli, Miodrag Had`istevi, Marin Gostimirovi, Renata Turisova, Vlastimir Peji - Doboј- *Materiali in tehnologije / Materials and technology* 46 (2012) 6, 601–606.

30. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей резанием. – К.: Вища школа, 1977. – 422 с.

31. Мелентьев Р.Ю. Особенности сверления углепластиков / Р.Ю. Мелентьев., В.В. Натальчишин // *Праці Одеського політехнічного університету*.– 2014.–2(44). – С. 27–33. 5.

32. Хавин Г.Л. Образование дефектов при сверлении слоистых композитов и механизм появления расслаивания /Г.Л. Хавин // *Вісник НТУ «ХП»*: Збірник наукових праць. Серія Технологія машинобудування. – Х.: НТУ «ХП».–2015.–№4(1113).–С.96–100.

33. Comparison of Natural Frequencies Values of Circular Saw Blade Determined by Different Methods. - Article (PDF Available) in *Drvna Industrija* 66(2):123 - 128 · July 2015. DOI: 10.5552/drind.2015.1316.

34. Instantaneous Cutting Force Variability in Chainsaws Adam Maciak 1, Magda Kubu´ska 1 and Tadeusz Moskalik. - Forests 2018, 9, 660; doi:10.3390/f9100660 www.mdpi.com/journal/forests.

35. Тарасюк А. П. Проблемы исследования поверхностного слоя детали из волокнистых полимерных композитов, обработанных резанием / А. П. Тарасюк // Високі технології в машинобудуванні : збірник наукових праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2001. – № 1. – С. 259–262.

36. Тарасюк А.П. Влияние условий процесса резания на механические свойства анизотропных полимеров / А.П. Тарасюк // Вісник Чернігівського державного технологічного університету: Серія: Технічні науки – Чернігів: ЧНТУ, 2012. – №4 (61). – С. 49–57.

37. Дрожжин В. И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмас : дис... д-ра техн. наук / В. И. Дрожжин. – Харьков, 1982. – 388 с.

38. Саленко О.Ф., Струтинський В.Б., Загірняк М.В. Ефективне гідрорізання. – Кременчук, в-во КДПУ, 2005. – 488 с.

39. Тихомиров Р.А., Гуенко В.С. Гидрорезание неметаллических материалов. – К.: Техника, 1984. – 150 с.

40. Саленко О.Ф. Експериментальні дослідження механізму формування параметрів мікрогеометрії поверхневого шару при гідроструменевій обробці // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Сборник научных трудов. – Донецк, ДонГТУ, 2000. Вып. 13. – с. 152-155.

41. Кузьмин, А.М. Формы применения функциональностоимостного анализа / А.М. Кузьмин, А.А. Барышников // Машиностроитель. – 2001. – №1. – С. 41–46.

42. Кузьмин, А.М. Функциональный анализ как инструмент подъема и развития российской экономики // А.М. Кузьмин, А.А. Барышников /Машиностроитель. – 2001. – №11. – С. 48–50.

43. Кузьмин, А.М. Функциональный анализ: выявление, определение и

классификация функций / А.М. Кузьмин, А.А. Барышников, Е.А. Кузьмина // Машиностроитель. – 2001. – №9. – С. 33–39.

44. Саленко О.Ф., Клименко С.А., Щетинін В.Т., Лашко Є.Є., Коваленко С.В., Будар Мохамед Р.Ф. Про використання функціонально–орієнтованого підходу при розробці гібридних процесів обробки композиційних матеріалів. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали ХХ Міжнародної науково–технічної конференції, 10–13 вересня 2019 р. Херсон, 2019. С.290–294.

45. Мана О. М. Запобігання деструкції композитних матеріалів при виконанні операцій струминно-абразивного прошивання малих отворів / О. М. Мана // Промислова гідравліка і пневматика. – 2012. – № 3. – С. 46–51. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/inhpn\\_2012\\_3\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/inhpn_2012_3_13).

46. Саленко О.Ф., Мельничук С.П., Гаврушкевич А.Ю., Щетинін В.Т., Ченчева О.О., Будар Мохамед Р.Ф., Мельничук П.П. Гібридні процеси оброблення композиційних матеріалів: тенденції сучасного машинобудування. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: матеріали Х Всеукраїнської науково–технічної конференції з міжнародною участю, 06–09 листопада 2019 р. Житомир, 2019. С.29–37.

47. Григорьев О. Н., Мильман Ю. В., Панченко Э. Л. Прочность и разрушение зерен синтетических алмазов // Физика разрушения. Тез. док. IV. Всесоюзная конф. – Киев: ИПМ АН УССР. – 1980. – Т. 2. – С.57–62.

48. Повышение эффективности гидроструйного резания использованием средств управляемого трещинообразования. – В.Н. Орел, В.Т. Щетинин, А.Ф. Саленко, Н.Н. Яцына. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, С.45–56.

49. Про доцільність використання засобів 3D друку для підвищення точності статичних і динамічних досліджень важільно-обертових механізмів – В.М. Орел, В.Т. Щетинін, О.О. Ченчева, А.П. Павлюченко, О.Ф. Саленко. –

2015 Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського 1 (2) 111-117

50. Кириченко А. Н. Повышение качества абразивной резки карбон-карбонных композитов за счет обеспечения рациональных условий динамического контакта / А. Н. Кириченко, Метак Аль Ибрахим, В. Т. Щетинин, О. А. Ченчевая // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – Кременчук : КрНУ, 2018. – Вип. 5(112). – С. 94–102.

51. Kyrychenko A., Al-Ibraheemi Metak Muhammad. Practical application of criteria for the evaluation of the properties of the layouts of multi-axis machines. - Sciences of Europe. – 2018. – Vol.1, No. 27. – P. 64 – 69.

52. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. - Vivek Dhand, Garima Mittal, Kyong Yop Rhee,, Soo-Jin Park, David Hui. - Composites: Part B. – 73. – 2015p. 166–178.

53. Ross A. Basalt fibers: alternative to glass. Compos Technol 2006;12:44–8.

54. Dehkordi MT, Nosratty H, Shokrieh MM, Minak G, Ghelli D. The influence of hybridization on impact damage behavior and residual compression strength of intraply basalt/nylon hybrid composites. Mater Des 2013;43:283–90.

55. Ary Subagia IDG, Kim Y, Tijing LD, Kim CS, Shon HK. Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers. Compos Part B – Eng 2014;58:251–8.

56. Reinforcements in multi-scale polymer composites: Processing, properties, and applications. - Garima Mittal, Kyong Yop Rhee, V. B. Mišković-Stanković, David Hui. – November 2017. – Composites Part B Engineering 138 /DOI:10.1016/j.compositesb.2017.11.028.

57. Новиков Н. В., Шульженко А. А. Новые сверхтвердые материалы и их применение в промышленности // Сверхтвердые материалы. – 1987. – № 5. – С. 9–14.

58. Новиков Н. В., Майстренко А. Л., Кулаковский В. Н. Сопротивление разрушению сверхтвердых композиционных материалов. – Киев: Наук.думка, 1993. – 220 с.



59. Бакуль В. Н. Поликристаллические сверхтвердые материалы // Синтетические алмазы. – 1975. – № 4. – С. 17–22.
60. Верещагин В. А., Журавлев В. В. Композиционные алмазосодержащие материалы и покрытия. – Минск: Наука и техника, 1991. – 208 с.
61. Графитизация алмазных порошков при высоких температурах / Федосеев Д. В., Внуков С. П., Буховец В. Л., Аникин Б. А. // Докл. АН СССР. – Т. 279. – 1984. – № 1. – С. 149–153.
62. Григорьев О. Н., Мильман Ю. В., Панченко Э. Л. Прочность и разрушение зерен синтетических алмазов // Физика разрушения. Тез. док. IV. Всесоюзная конф. – Киев: ИПМ АН УССР. – 1980. – Т. 2. – С.57–62.
63. Применение лазерной технологии для спекания алмазосодержащих композиционных материалов / Л.Ф. Головкин, Н.И. Анякин, О. Эхсан, Н.В. Новиков, А.А. Шепелев, В.Г. Сороченко // Автоматическая сварка. – 2008. – № 8 (664). – С. 15–23.
64. Сорокин В. К. Изготовление тонких пластин и отрезных кругов с алмазными микропорошками / В. К. Сорокин, Л. С. Шмелев, А. Г. Елизаров // Сталь. – 1994. – № 7. – С.67–69.
65. Саленко О.Ф., Мельничук С.П., Гаврушкевич А.Ю., Щетинін В.Т., Ченчева О.О., Будар Мохамед Р.Ф., Мельничук П.П. Гібридні процеси оброблення композиційних матеріалів: тенденції сучасного машинобудування. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: матеріали X Всеукраїнської науково–технічної конференції з міжнародною участю, 06–09 листопада 2019 р. Житомир, 2019. С.29–37.
66. Еременко В.Н.,Найдич Ю.В.,Лавриненко И.А. Спекание в присутствии жидкой металлической фазы. К.: Наукова думка,1966, 165 с.
67. Скороход В.В.,Солонин Ю.М., Уварова И.В. Химические, диффузионные и реологические процессы в технологии порошковых металлов. К.: Наукова думка, 1990, 248 с.

68. Рагуля А.В., Стеценко В.П., Верещак В.М. Селективное лазерное спекание. Спекание многослойных тугоплавких композиций. Технология XXI века. – 1998.

69. Измерение поглощательной способности свободно насыпанных одно компонентных металлических порошков и ее изменение в процессе лазерной обработки / Н.К. Толочко, Ю.В. Хлорков и др. // Порошковая металлургия -1997. – № 7/8. – С. 89–94.

70. Технологические лазеры. Т.1. Расчет, проектирование, эксплуатация. // Г.А. Абельситов, В.С. Голубев, В.Г. Гонтарь и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 432 с.

71. Семко М. Ф., Грабченко А. И., Ходоревский М. Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. – Х.: Вища школа.1980. – 192 с.

72. Шепелев А.А., Сороченко В.Г. Высокоэффективное шлифование полимерных композиционных материалов алмазноабразивными кругами– барабанами // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. Вип.30. – С.246–255.

73. Vibration of Wide Band Saw Blades Article in Journal of Engineering for Industry February 1982 DOI: 10.1115/1.3185801.

74. Resonant vibrations of the moving band saw blade with variable tension Lidiya Dzyuba , Olha Khytriak , Olha Menshykova , Ihor Rebeznyuk. - Technical Sciences 18(1), 2015, 49–59.

75. Васильев Е. В. Тепловые процессы при алмазном шлифовании // Омский научный вестник: Машиностроение и машиноведение. 2007. – № 2(56). – С. 113–115.

76. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор): монография / Криворучко Д. В., Залого В. А., Колесник В. А. и др.; под общей ред. проф. В. А. Залого. – Сумы : Университетская книга, 2013. – 272 с.

77. Ярославцев В.М. Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.

78. Рогов В.А. Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении / Велис А.К. В.А. Рогов, / ВЕСТНИК РУДН. 2012. – с. 41–49.

79. Oleksandr Salenko, Olga Chencheva, Viktor Shchetynin, Valentina Gluchova, Evgeny Lashko, Mohamed R.F. Budar. Cutting carbon-carbon composites by the diamond drills variable cyclic feed. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2019. Vol 87, No 3. P.47–60.

80. Тарасюк А.П. Влияние условий процесса резания на механические свойства анизотропных полимеров / А.П. Тарасюк // Вісник Чернігівського державного технологічного університету: Серія: Технічні науки – Чернігів: ЧНТУ, 2012. – №4 (61). – С. 49–57.

81. Feygenson O.N. Specifics of function analysis for engineering systems at the exploitation stage. 8th Conference of the International TRIZ Association – TRIZfest-2012.

82. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Ж.А. Герра, Олійник К.О. Жорсткісні характеристики самодіючого мотор-шпинделя для верстатів з ЧПУ, №2 // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції // Сучасні Напрямки і Перспективи Розвитку Технологій Обробки і Обладнання в Машинобудуванні «Механообробка. – Севастополь, 23 – 25.10.2013г. – с.64 – 73.

83. Кузнецов Ю.Н., Хамуйела Жоаким А.Г. Применение морфологического анализа для адаптации, расширения мобильности и сферы использования станков // Збірник Вісник СевНТУ №120, Серія: Механіка, Енергетика, Екологія. – Севастополь, 2011. – с.106 – 111.

84. Salenko O.F., Golovko L.F., Salenko A.O., R.H. Arhat, Budar Mohamed R.F. Principles of creating a diamond abrasive tool taking into account

the features of the microcutting process. Journal of the Technical University of Gabrovo. 2020. № 61. P.8–21.

85. Cutting Superhard Materials by Jet Methods (on Functional Approach) Alexandr Salenko, Viktor Shchetynin, Galina Gabuzian, Evgeny Lashko, Mohamed RF Budar, Sergey Klimenko, Alexandr Potapov. - Recent Advancements in the Metallurgical Engineering and Electrodeposition. – Inter Tech open. – 2019.

86. V. S. Kovalenko, L. F. Golovko, N. V. Novikov, A. A .Shepelev, W.G.Sorochenko. On the possibility of using laser technology for diamond tool manufacturing // JOURNAL OF Engineering Manufacture , August 2004 Vol 218 No B8. –P.1029-1036.

87. Features of application of laser technology for a sintering diamond of composite materials / V. S. Kovalenko, L. F. Golovko, N. V. Novikov et al. // Intern. conf. on laser technologies in welding and materials processing. – Katsieveli, Crimea, 21–28 May, Kiev, 2005. – P. 121–125

88. Будар Мохамед Р.Ф. Новий підхід до розробки інструментів, що використовуються для оброблення композиційних матеріалів, застосовуваних в авіації. Авіація, промисловість, суспільство: матеріали І Міжнародної науково–практичної конференції, присвяченої 60-річчю КЛК ХНУВС. Ч.1. Кременчук, 2020. С.166–169.

89. Коваленко В.С., Кривцун І.В. Комбіновані лазерно-дугові процеси обробки матеріалів. Ч.1. Ефекти комбінованої обробки і способи їх реалізації // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2001. – «№ 5. – С.33 – 44.

90. Коваленко В.С., Кривцун І.В. Комбіновані лазерно-дугові процеси обробки матеріалів. Ч.2. Технологічні можливості комбінованого джерела тепла і взаємовплив його складових // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2001. – «№ 6. – С.47 – 66.

91. Саленко О.Ф., Клименко С.А, Щетинін В.Т, Лашко Є.Є, Коваленко С.В, Будар Мохамед Р.Ф. Про використання функціонально–

орієнтованого підходу при розробці гібридних процесів обробки композиційних матеріалів. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали XX Міжнародної науково–технічної конференції, 10–13 вересня 2019 р. Херсон, 2019. С.290–294.

92. Саленко О. Ф., Смірнова А. Л. Використання принципів цифрового регулювання в системах управління гідроструминним різанням” - Вісник КДПУ. – Кременчук, 2004р. – с. 39–45

93. Salenko Oleksandr, Chencheva Olga, Shchetynin Viktor, Gluchova Valentina, Lashko Evgeny, Budar Mohamed R.F. Cutting carbon–carbon composites by the diamond drills variable cyclic feed. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2019. Vol 87, № 3. P.47–60.

94. Шепелев А.А., Сороченко В.Г. Механизм образования поверхностного слоя при алмазно–абразивной обработке полимерных композиционных материалов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2004. Вып.28. – С.202–205.

95. Композиционные инструментальные материалы /Отв. ред.. А.Е.Шило. – Киев: ИСМ им.В.Н.Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2005.–280 с.

96. Тарасюк А. П. Проблемы исследования поверхностного слоя детали из волокнистых полимерных композитов, обработанных резанием / А. П. Тарасюк // Високі технології в машинобудуванні : збірник наукових праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2001. – № 1. – С. 259 –262.

97. Дрожжин В. И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмас : дис... д–ра техн. наук / В. И. Дрожжин. – Харьков, 1982. – 388 с

98. Рогов В.А., Велис А.К., Шкарупа М.И. Инструменты, применяемые при обработке труднообрабатываемых материалов сверлением "Технические науки". – 2012. – № 11. – С. 645–651.

99. Балыков А.В. Повышение эффективности алмазного сверления отверстий. М., Журнал "Технология металлов", №10, 2003.

100. Ричардсон М. Промышленные полимерные композиционные материалы / под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
101. Новое поколение алмазно-абразивного инструмента // РусАтлат. 2007. URL: <http://www.rusatlant.com>.
102. Рощупкин, С.И. Моделирование износа инструмента при алмазном сверлении хрупких неметаллических материалов / Рощупкин С.И., Братан С.М. // Сборники научных работ НТУ "ХПИ" : Різання та інструмент в технологічних системах №80 - НТУ "ХПИ", 2011.
103. Вerezуб Н.В. Создание высокоэффективных процессов механической обработки полимерных композитов на основе закономерностей механики разрушения. // Развитие процессов резания и холодного пластического деформирования металлов. – Сб. научн. трудов. – Киев: ИСМ НАН Украины, 1994.
104. Вerezуб Н.В., Соломкин Г.М. Статистико-вероятностный метод оценки формирования микропрофиля обрабатываемой поверхности стеклопластика. //Резание и инструмент, № 37. - Харьков, 1987. – с.3–7.
105. Determination of young's modulus of electrochemically codeposited Ni - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite / Xueyong Wei, Hanshan Dong, Chen-Han Lee et al.// Materials Letters. - 2008. - Vol. 62. - P. 1916-1918.
106. Preparation, microstructure and tribological properties of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ni brush plated composite coatings / L. Du, B. Xu, S. Dong, H. Yang et al. // Surface & Coatings Technology. - 2005. - Vol. 192. - P. 311-316.
107. Effect of Alumina Dispersion on Microstructural and Nanomechanical Properties of Pulse Electrodeposited Nickel/Alumina Composite Coatings / A. Gupta, S. Barkam, D. Lahiri, R. Balasubramaniam, K. Balani // J. Mater. Sci. Technol. – 2014. – Vol. 30. – P. 808–813.
108. A comparative study of the effect of mechanical and ultrasound agitation on the properties of electrodeposited Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coatings / E. Garcia-Lecina, I. Garcia-Urrutia, J.A. Diez, J. Morgiel et al. // Surface & Coatings Technology. – 2012. – Vol. 206. – P. 2998–3005.

109. LIA Handbook of Laser Materials Processing / editor in chief, John F. Ready: associate editor, Dave F. Farson Copyright, 2001 by Laser Institute of America, 715 p.

110. Головка Л.Ф., Коваленко В.С., Валид Нусейрат, Роман В.В. Формирование износостойких поверхностей в условиях лазерной наплавки // Технологические системы.- К., 7,1, 2001. – С.25 – 32.

111. Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головка Л.Ф., Подчерняева И.И. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. М. : Наука, 1986. – 276 с.

112. Упрочнение деталей лучом лазера / Коваленко В.С., Головка Л.Ф., Меркулов Г.В., Стрижак А.И. Под общ. ред. Коваленко В.С. – К.: Техника, 1981. – 131 с.

113. Скоростное спекание дисперсных систем: теория, технология, проблемы / В.В.Скорород // Порошковая металлургия - 1999. № 10. – С.30 –39.

114. Звіт НДР №1952 «Дослідження та оптимізація процесів локального термічного та лазерного спікання інструментальних однорядних багатошарових композитів з надтвердих абразивних матеріалів» (заключний). № держреєстрації 0100U004821. – Київ, 2002. ІНМ ім.В.М.Бакуля НАН України . Науковий керівник А.О.Шепелев. – 212 с.

115. Новиков Н.В., Шепелев А.А., Коваленко В.С., Головка Л.Ф., Сороченко В.Г. Применение лазерной технологии для изготовления дисковых алмазных инструментов // Сверхтв. материалы. - 2004. – №1. – С.52 – 63.

116. Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин: Зб. наук. праць (Серія Г «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти») / НАН України. ІНМ ім. В.М.Бакуля. – Київ, 2006. – 240 с.

117. Галицкий В.Н., Курищук А.В., Муровский В.А. Алмазно-абразивный инструмент на металлических связках для обработки твердого сплава и стали. – К. : Наук. думка, 1985. – 144 с.

118. Прудников Е.Л. Алмазный инструмент на гальванической связке// Инструментальный світ. – 2000. - № 9. – С.2–30.
119. Технология изготовления и контроль качества алмазных порошков/ Никитин Ю.И. – Киев: Наук. думка, 1984. – 264 с.
120. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М., «Машиностроение», 1977. – 526 с.
121. Федорченко И.И., Скороход В.В. Теория и практика спекания. Порошковая металлургия, 1964, №10, С.2–50.
122. Скороход В.В. Спекание порошковых материалов при электротермическом, плазменном и лазерном нагреве. Технология XXI века. 1998, С. 228-248.
123. Инструменти з надтвердих матеріалів / Під ред. М.В.Новікова. – Київ: ІНМ НАНУ, 2001. – 528 с.
124. Тарасюк А. П. Расширение функциональных возможностей волкнистых композитов за счет разработки эффективных процессов механической обработки: дис.... д-ра наук / А. П. Тарасюк. Харьков, 2011. 567 с.
125. Саленко О.Ф., Щетинін В.Т., Глухова В.І., Лашко Є.Є., Головка Л.Ф., Саленко А.О., Будар Мохамед Р.Ф. Забезпечення надійності роботи алмазовмісного інструменту, отриманого лазерним термомодеформаційним спіканням, при обробці армованих вуглепластиків. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Кременчук, 2019. Вип. 3 (116). С.147–157.
126. Salenko Alexandr, Shchetynin Viktor, Gabuzian Galina, Lashko Evgeny, Budar Mohamed R.F., Klimenko Sergey, Potapov Alexandr. Cutting Superhard Materials by Jet Methods (on Functional Approach). Recent Advancements in the Metallurgical Engineering and Electrodeposition. IntechOpen, 2019. P.1–21.
127. Salenko A., Chenchewa O., Gluchova V., Schetynyn V., Budar Mohamed R.F., Klimenko S., Lashko E. Effect of slime and dust emission on



micro-cutting when processing carbon-carbon composites. Eastern–European Journal of Enterprise Technologies, 2020. 3/1 (105). P.38–51.

128. Salenko Oleksandr, Chencheva Olga, Schetinyn Viktor, Budar Mohamed R.F., Gluchova Valentina. New design of combined electric machines to increase the efficiency of processing composite materials. Journal of the Technical University of Gabrovo. 2019. № 59. P.27–31.

129. Salenko Oleksandr, Chencheva Olga, Schetinyn Viktor, Gluchova Valentina, Lashko Evgeny, Budar Mohamed R.F. Increasing the efficiency of diamond drilling of carbon composites by a device with combined electric machines. Journal of the Technical University of Gabrovo. 2020. № 60. P.52–65.

130. Будар Мохамед Р.Ф., Шепеленко І.В. Формування поверхонь та їх властивостей в деталях із композиційних матеріалів і металів. Молодь і сільськогосподарська техніка у ХХІ сторіччі: матеріали XVI – го міжнародного форуму молоді. Харків, 2020. С.45.

131. Саленко О.Ф., Шепеленко І.В., Будар Мохамед Р.Ф. Формування алмазовмісних шарів на робочих поверхнях інструменту. Инженерия поверхности и реновация изделий: матеріали XX Міжнародної науково–практичної конференції, 01–05 червня 2020 р. Київ: АТМ України, 2020. С.100–103.

132. Пристрій для фрикційно–механічного нанесення антифрикційних покриттів: Пат. 102038 Україна: МПК В24В 39/00. № 201504042; заявл. 27.04.2015; опубл. 12.10.2015, Бюл. №19, 2 с.

133. Пристрій для визначення міцності зчеплення покриття з основним матеріалом. Пат. 133205 Україна: МПК G01N 19/04. № 201810652; заявл. 29.10.2018; опубл. 25.03.2019, Бюл. №6, 2 с.

134. Сверхтвердые материалы. Получение и применение. Монография в 6 томах / Под общей ред. Н.В.Новикова. – Киев : ИСМ им.В.Н.Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2005.

135. Скороход В.В., Солонин Ю.М., Физико-металлургические основы спекания порошков. М.:Металлургия, 1984, 159 с.

136. Клименко Г.П. Надежность сборных инструментов и процесса их обслуживания на тяжелых токарных станках. Надійність різального інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. статей. Краматорськ: ДДМА, 2001. Вип. 10. с. 13–18.

137. Клименко Г.П., Андронов А.Ю. Повышение надежности технологической системы при механообработке на тяжелых токарных станках. Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. Наукових праць. Харків: НТУ «ХП», 2009. Вип. 3. с. 42–49.

138. Klymenko G.P., Ya.V. Vasilchenko. Opredelenie nadezhnosti obsluzhivaniya rezhuschego instrumenta. [Determination of the reliability of service cutting tools]. Visokie tehnologii v mashinobuduvanii: Zb. naukovih prats. [Modern technologies in mechanical engineering: Sat. sci. tr.]. Kharkov: HGPU Publ., 2000, pp. 134–137.

139. Klymenko G.P. Tehnologichne upravlinnya yakistyu ekspluatats instrumentu dlya vazhkih verstativ. [Technological quality management of the tool for heavy machine tools]. Sovremennyye voprosyi proizvodstva i remonta v promyshdennosti i na transporte. [Modern issues of production and repair in industry and transport]. Brno - Kiev: ATM Ukraine Publ., 2018, pp. 97–100.

140. Klymenko G.P., Homenko, K.S. Chaban. Opredelenie nadezhnosti kontsevyih frez sbornoy konstruktsii. [Determination of the reliability of end mills assembly team]. Nadiynist instrumentu ta optimizatsiya tehnologichnih sistem. [Reliability of the cutting tool and optimization of technological systems. Sat. articles]. Kramatorsk: DDMA Publ., 2010, Vol. 26. pp. 63–67.

141. Methodological recommendations on evaluation of investment projects (third edition). Ministry of Economy of the Russian Federation. Ministry of Finance of the Russian Federation. Moscow, 2008.

142. Boboshko V.I. Develop a mechanism of ecological and economic regulation of small businesses: the theory, methodology, practice / Abstract of the thesis ... Doctors of Economics. – M., 2009.

143. Borlakova A.K. Ecological and economic evaluation of investment projects / Collection of scientific works of participants of the II International Youth Forum financiers goda. Pod 2012 ed. O.V. Karamova and A.P. Buevich. // <http://www.fa.ru/PROJECTS/MMFF/Pages/default.aspx>.

144. Medvedev O.E. Guidelines for the implementation of environmental and economic evaluation of the effectiveness of projected economic activity / O.E. Medvedev. – M., 1999.

145. A.V. Neverov. Environmental Economics: Textbook for universities. – M.: Higher School, 1990.

146. Nuzhina I.P. Evaluating the effectiveness of the investment project as a tool for ecological and economic regulation of investment and construction activities in the region // Regional economy: theory and practice. Tomsk: Publishing House finance and credit. 2010, № 34.

147. Ferraru G. Problems and evaluate the effectiveness of economic activity at the micro level, taking into account the environmental dimension // Scientific Bulletin of Moscow State Mining University. – 2013. – № 11 (44) / International Conference «Ecology. Nature. Economy».

148. Methodological approach to estimation and control of the economic effectiveness of competitory strategy of the industrial enterprise. – Glukhikh Liliya Viktorovna. – Научный Журнал КУБГАУ, №87(03), 2013.

149. М. Ю. Копейкина, С. А. Клименко, Ю. А. Мельничук, В. М. Береснев Работоспособность режущего инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ с вакуумно-плазменным покрытием. Сверхтвердые материалы, 2008, № 5- ISSN 0203-3119. – стр.87–95.

150. Инструментальная техника на ЭМО-2003 // Комплекс ИТО. Инструмент. – 2004. – № 1. – С. 17–21.

151. Гмурман, В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике / В.Е. Гмурман. – М. : «Высшая школа», 1999. – С. 400.

152. More A. S., Jiang W., Brown W. D., Malshe A. P. Tool wear and machining performance of cBN – TiN coated carbide inserts and PCBN compact inserts in turning AISI 4340 hardened steel // J. Mater. Proc. Technology. – 2006. – N 180. – P. 253–262.

153. Machining Navigator — Новости 2006 г. — Seco Tools AB, 2006. – 45 p. 8. Turkevich V. Z., Klimenko S. A., Kulik O. G. Thermodynamics of the interaction in the CBNbased tool material–Fe(Ni) system // Transactions. – 1999. – XXVIII, N 2. – P. 8–11.

154. Базовский, И. Надежность. Теория и практика / И. Базовский. Перевод с английского. – М. : Изд. «Мир», 1965. – 362 с.

155. Гнесин Г. Г., Фоменко С. Н. Износостойкие покрытия на инструментальных материалах (Обзор) // Порошк. металлургия. – 1996. – № 9–10. – С. 17–28.

156. Матвеевский В.Р. Надежность технических средств управления : Учеб. пособие. – М.: МГИЭМ,1993. – 92с.

157. Козлов В.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Советское радио, 1985. – 462 с.

158. Сугак Е.В. надежность технических систем / Е.В. Сугак, Н.В. Василенко, Г.Г. Назаров. Красноярск : МПГ «Раско», 2001. – 608 с.

## ДОДАТКИ

Додаток А

### АКТ

передачі основних результатів дисертаційної роботи

Будар Мохамеда Р.Ф.

На підприємство ТОВ «КІЗ «Лезо»» на підставі двосторонньої співпраці передані матеріали дисертаційної роботи Будар Мохамеда Р.Ф., здобувача кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету на тему «Підвищення ефективності алмазного абразивного інструменту для обробки високоміцних композиційних матеріалів», в тому числі:

- результати теоретичних та експериментальних досліджень процесу лазерного термодформаційного спікання кластерів робочих поверхонь алмазного інструменту;

- методику визначення функціональних особливостей жорстких (свердл), пружних (пилінні полотна реноватору) та гнучких (струни) інструментів, призначених для обробки матеріалів, армованих скляними та вуглецевими волокнами;

- практичні рекомендації щодо виконання операцій різання алмазним інструментом та принципи ведення обробки.

Аналіз вказаних матеріалів фахівцями підприємства дозволяє зробити висновок про можливість їх використання при обробки високоміцних композиційних матеріалів.

Директор з виробництва  
ТОВ «КІЗ «Лезо»»

Науковий керівник, к.т.н.,  
доцент кафедри експлуатації  
та ремонту машин ЦНТУ



Гавришко В.В.

Шепеленко І.В.

## Акт впровадження у навчальний процес

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
 Проректор  
 з наукової роботи ЦНТУ  
 О.М. Левченко  
 « 14 » 10 2020 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
 Перший  
 проректор ЦНТУ  
 В.М. Кропивний  
 « 14 » 10 2020 р.



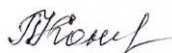
## АКТ

про використання у навчальному процесі результатів дисертаційної роботи  
 Будар Мохамед Р.Ф.  
 на тему: «Підвищення ефективності алмазно-абразивного інструменту для  
 обробки високоміцних композиційних матеріалів»

Акт складений у тому, що результати, отримані в дисертаційній роботі Будар Мохамед Р.Ф., використовуються в навчальному процесі на підставі рішення кафедри обробки металів тиском та спецтехнологій (протокол №3 від 13 жовтня 2020 року).

Результати дисертаційної роботи використовуються при викладанні дисципліни «Технологія і обладнання фізико-технічної обробки матеріалів» (освітній рівень «бакалавр») та дисципліни «Технологія фізико-технічної обробки матеріалів» (освітній рівень «магістр») для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка».

Начальник  
 навчального відділу



Л.І. Кондратець

В.о. завідувача кафедри  
 обробки металів тиском  
 та спецтехнологій



В.М. Шмельов

### Математична модель електричного двигуна, встановленого на верстат

...

Електричну частину уявляти так. Опис електричної машини виконували у синхронній системі координат  $u, v$ . Звідси на підставі [93] для будь-якої частоти та амплітуди фазної напруги система дозволяє визначати перехідні процеси як під час регулювання, так і в моменти пуску або зміни умов виконання обробки.

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{su} \cdot r_s + \frac{\partial X_{su}}{\partial t} - \omega_x \cdot X_{sv} = u_{su} \\ i_{sv} \cdot r_s + \frac{\partial X_{sv}}{\partial t} + \omega_x \cdot X_{su} = u_{sv} \\ i_{ru} \cdot r_r + \frac{\partial X_{ru}}{\partial t} - (\omega_x \cdot \omega_r) X_{rv} = 0 \\ i_{rv} \cdot r_r + \frac{\partial X_{rv}}{\partial t} + (\omega_x - \omega_r) \cdot X_{su} = 0 \\ M_s(t) + \frac{J_\Sigma}{p} \cdot \frac{\partial \omega_r}{\partial t} = M_{эм} \\ \frac{J_\Sigma}{p} \frac{\partial \omega_r}{\partial t} - \psi \omega_r - c\varphi = M_r \end{array} \right. \quad (3.2)$$

де  $u_{su}, u_{sv}$  – напруги;  $i_{su}, i_{sv}, i_{ru}, i_{rv}$  – струми,  $r_s, r_r$  – опори;  $X_{su}, X_{sv}, X_{ru}, X_{rv}$  – потокозчеплення обмоток статора і ротору узагальненої машини;  $M_{эм}$  и  $M_s(t)$  – рушійний електромагнітний та навантажувальний моменти;  $J_\Sigma$  – момент інерції зосередженої маси – ротору,  $p$  – кількість пар полюсів двигуна;  $\omega_x$  и  $\omega_r$  – кутова частота обертання системи координат  $u, v$  та ротора.

Оскільки система координат  $u, v$  обертається синхронно з магнітним полем статора з кутовою частотою  $\omega_x = 2\pi f_x$ , де  $f_x$  – частота на виході ПЧ, систему диференціальних рівнянь доповнено рівняннями потокозчеплення обмоток статора і ротору:

$$\begin{vmatrix} X_{su} \\ X_{ru} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{su} \\ i_{ru} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} X_{sv} \\ X_{rv} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_{sv} \\ i_{rv} \end{vmatrix}. \quad (3.3)$$

Повні індуктивні опори фаз обмоток статора  $L_s$  і ротору  $L_r$  становитимуть  $\begin{cases} L_s = L_{\sigma 1n} + L_m \\ L_r = L_{\sigma 2n} + L_m \end{cases}$ , де  $L_{\sigma 1n}$  та  $L_{\sigma 2n}$  – індуктивності розсіювання фаз обмоток статора і ротору з урахуванням насичення,  $L_m$  – взаємна індуктивність.

Рівняння розв'язуються методом Рунге–Кутта 4 порядку при введенні позначень

$$k_{rs} = L_r/L_{ms}; k_{rs} = L_r/L_{ms}; k_{rs} = L_r/L_{ms};$$

$L_{ms} = L_s \cdot L_r - L_m^2$  – визначник матриць при представленні системи у вигляді [87]

$$\begin{cases} \partial X_{su} = [u_{su} + \omega_x \cdot X_{sv} - r_s \cdot (X_{su} \cdot k_{rs} - X_{ru} \cdot k_m)] \cdot dt; \\ \partial X_{sv} = [u_{sv} + \omega_x \cdot X_{su} - r_s \cdot (X_{sv} \cdot k_{rs} - X_{rv} \cdot k_m)] \cdot dt; \\ \partial X_{ru} = [(\omega_x + \omega_r) \cdot X_{rv} - r_r \cdot (X_{ru} \cdot k_{sr} - X_{su} \cdot k_m)] \cdot dt; \\ \partial X_{sv} = [(\omega_r + \omega_x) \cdot X_{ru} - r_r \cdot (X_{rv} \cdot k_{sr} - X_{sv} \cdot k_m)] \cdot dt; \end{cases} \quad (3.4)$$

Причому напруги  $u_{su}$  і  $u_{sv}$  обмоток статора представлено через напруги на виході ПЧ

$$\begin{cases} u_{su} = U_x \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_k), \\ u_{sv} = U_x \cdot \sin(\varphi_u - \varphi_k). \end{cases} \quad (3.5)$$

Результатом розрахунку є частота обертання  $\omega_x$ , електромагнітний момент  $M_{зм} = \frac{m}{2} \cdot p \cdot (X_{su} \cdot i_{sv} - X_{sv} \cdot i_{su})$ , частота обертання ротору  $\omega_r = \omega_r + d\omega_r$  та частота або швидкість руху робочого органу.

Активна потужність двигуна становитиме

$$P_a = \frac{m}{2} U_x I_{s1} \cos \varphi_a, \quad (3.6)$$

за умови що  $\cos \varphi_a = \cos(\varphi_i)$ ;  $\varphi_i = \varphi_u - \operatorname{arctg}(i_{sv}/i_{su})$ .

Також на кожному кроці інтегрування розраховуються ковзання

$$S_x = \left(1 - \frac{\omega_r}{\omega_1}\right) \cdot \frac{f_x}{f_1} \text{ та коефіцієнт зміни активного опору ротора}$$

$$k_{rx} = 0,2 + \left(\frac{r_{2p}}{r_2} - 0,2\right) \cdot \sqrt{\operatorname{abs}(s_x)}, \text{ де } f_1 \text{ – базова частота двигуна, } \omega_1 = 2\pi f_1$$

– кутова частота,  $r_2$  – опір обмотки ротору. Реакція регульованої системи на



## Математична модель крокового двигуна

Структура крокового електроприводу відповідатиме рис. Г1.

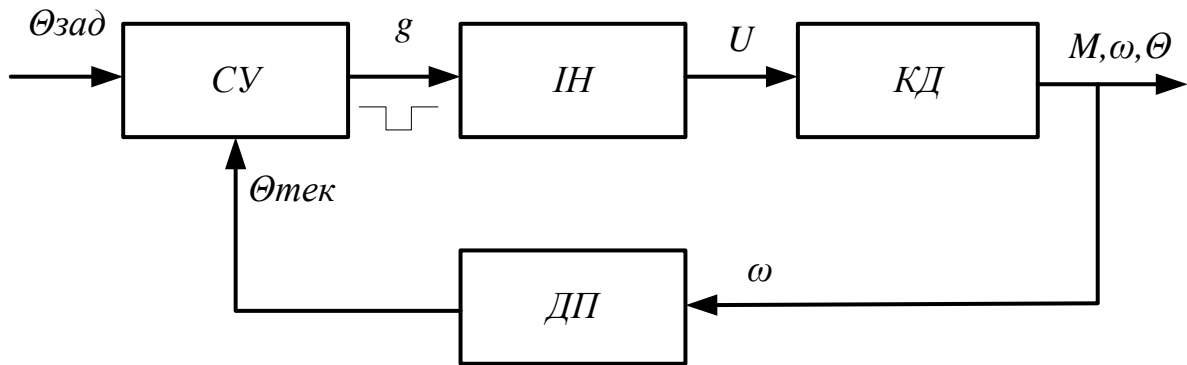


Рис. Г1. Структурна схема крокового електроприводу

Виходячи із законів Кірхгофа рівняння електричної рівноваги напруг і ЕРС. обмоток статора КД:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_s \cdot i_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + W \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{d\Psi_{M1}}{dt}; \\ u_2 &= R_s \cdot i_2 + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + W \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{d\Psi_{M2}}{dt}; \end{aligned} \quad (\Gamma 1)$$

де:  $u_1, u_2$  – напруги, прикладені до обмоток фаз;  $i_1, i_2$  – струми фаз, що протікають по обмотках статора;  $R_s$  – активний опір обмотки статора;  $\Psi_{M1} = \Psi_M \cdot (\sin p\theta)$ ,  $\Psi_{M2} = \Psi_M \cdot (\sin p(\theta - \lambda))$  потокозчеплення фаз;  $\Psi_M$  – максимальне значення потокозчеплення створюване постійним магнітом;  $\lambda$  – кут кроку полюсів  $p$ ;  $\theta$  – кут положення ротора;  $L_1 = L_0 + L \cdot \cos 2p\theta$  – індуктивність 1 фази;  $L_2 = L_0 + L \cdot \cos 2p(\theta - \lambda)$  – індуктивність 2 фази;

$$W = M \cdot \Delta\theta = M \cdot \cos 2p(\theta - \lambda), \quad (\Gamma 2)$$

де:  $M$  – електромеханічний момент двигуна формується фазою;  $W$  – механічна енергія, формована фазою на інтервалі кута повороту ротора;  $\Delta\theta$  – зміна кута повороту ротора;  $\theta$  – кут положення ротора в радіанах.

Доданок електричної рівноваги для обмотки має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi}{dt} &= \frac{d\Psi(i, \theta)}{dt} = \frac{\partial\Psi(i, \theta)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial\Psi(i, \theta)}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \\ &= L(i, \theta) \frac{di}{dt} + W(i, \theta) \frac{d\theta}{dt} = L(i, \theta) \frac{di}{dt} + K_\omega \cdot \omega \end{aligned} \quad (Г3)$$

де:  $L(i, \theta) = \frac{\partial\Psi(i, \theta)}{\partial i}$  – диференційна індуктивність фази;  $K_\omega = \frac{\partial\Psi(i, \theta)}{\partial \alpha}$  –

коефіцієнт ЕРС;  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  – кутова частота обертання ротору.

Рівняння електричної рівноваги фаз в матричній формі матиме вигляд:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_1 + \Psi_{M1} \\ \Psi_2 + \Psi_{M2} \end{bmatrix}$$

Потокозчеплення трьох фаз першої секції в матричній формі:

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1(i_1, \theta) & 0 \\ 0 & L_2(i_2, \theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_\omega(i_2, \theta) & 0 \\ 0 & K_\omega(i_1, \theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{M1} \\ \Psi_{M2} \end{bmatrix}$$

Рівняння рівноваги напруг в матричній формі з урахуванням потокозчеплень:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_1(i_1, \theta) & 0 \\ 0 & L_2(i_2, \theta) \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} + \\ &+ \omega \cdot \begin{bmatrix} K_\omega(i_2, \theta) & 0 \\ 0 & K_\omega(i_1, \theta) \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{M1} \\ \Psi_{M2} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Матричні рівняння рівноваги напруг у фазах КД у нормальній формі Коші мають вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{d[i_1]}{dt} &= [L_1]^{-1} \{ [u_1] - [R_s][i_1] - \omega [K_{\omega 2}] - [\Psi_{M1}] \}, \\ \frac{d[i_2]}{dt} &= [L_2]^{-1} \{ [u_2] - [R_s][i_2] - \omega [K_{\omega 1}] - [\Psi_{M2}] \},\end{aligned}\tag{Г4}$$

де:  $[i_1]$ ,  $[i_2]$  – матриці невідомих (струм статора);  $[u_1]$ ,  $[u_2]$  – матриці напруг;  $[R_s]$  – матриця активних опорів;  $[L_1]$ ,  $[L_2]$  – прямі матриці диференціальних індуктивностей у функції фазних струмів і поточного положення ротора;  $[K_{\omega 1}]$ ,  $[K_{\omega 2}]$  – матриці коефіцієнтів проти-ЕРС у функції фазних струмів і поточного положення ротора;  $\omega$  – частота обертання ротора;  $[\Psi_{M1}]$ ,  $[\Psi_{M2}]$  – максимальне значення потокозчеплення створюване постійним магнітом [12].

Електромагнітний момент, створюваний обмотками фаз статора:

$$M_E = -\Psi_M \cdot i_1 \cdot \sin p\theta - \Psi_M \cdot i_2 \cdot (\sin p(\theta - \lambda)).$$

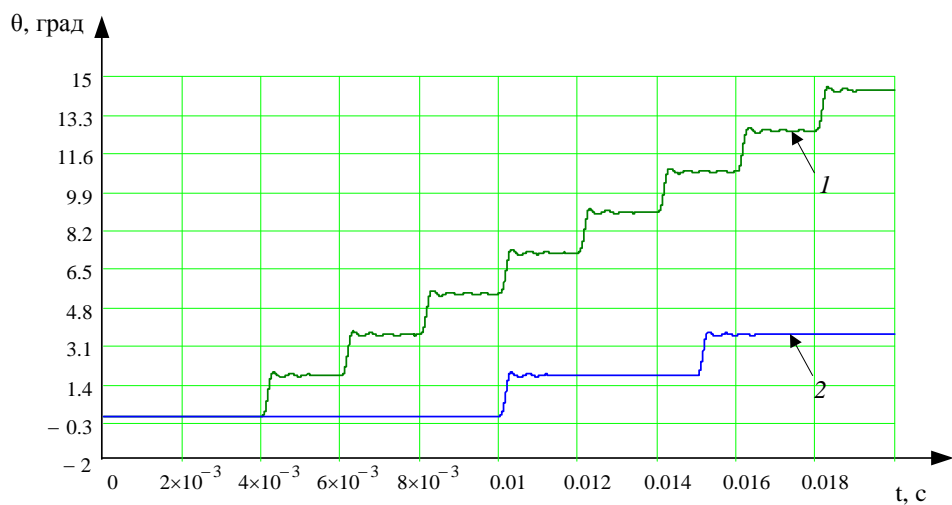
Тоді система рівнянь математичної моделі крокового електропривода в динамічному режимі матиме вигляд:

$$\begin{aligned}\frac{d[i_1]}{dt} &= [L_1]^{-1} \{ [u_1] - [R_s][i_1] - \omega [K_{\omega 2}] - [\Psi_{M1}] \}, \\ \frac{d[i_2]}{dt} &= [L_2]^{-1} \{ [u_2] - [R_s][i_2] - \omega [K_{\omega 1}] - [\Psi_{M2}] \}, \\ M_E &= -\Psi_M \cdot i_1 \cdot \sin p\theta - \Psi_M \cdot i_2 \cdot (\sin p(\theta - \lambda)) \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{p}{J_\Sigma} (M_\Delta - M_c) \\ \theta &= p \int_0^t \omega dt = p\lambda\end{aligned}\tag{Г5}$$

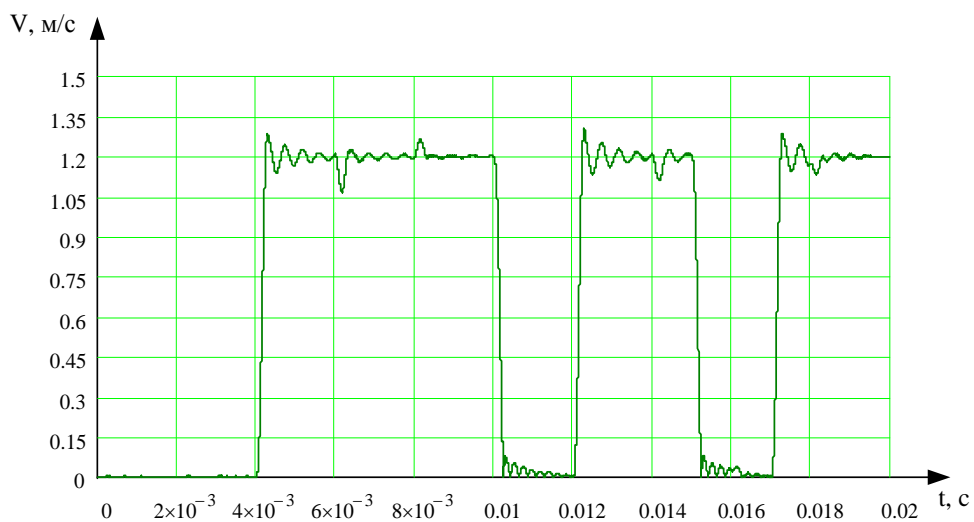
де:  $[i_1]$ ,  $[i_2]$  – матриці невідомих (струмів статора);  $[u_1]$ ,  $[u_2]$  – матриці напруг;  $[R_s]$  – матриця активних опорів;  $[L_1]$ ,  $[L_2]$  – прямі матриці диференційних індуктивностей в функції фазних струмів і діючого положення ротора;  $[K_{\omega 1}]$ ,  $[K_{\omega 2}]$  – матриці коефіцієнтів проти-ЕРС в функції

фазних струмів і діючого положення ротора;  $\omega$  – частота обертання ротора,  $[\Psi_{M1}]$ ,  $[\Psi_{M2}]$  – максимальне значення потокозчеплення, що створюється постійним магнітом,  $M_E$  – електромагнітний момент, що створюється обмотками фаз статора;  $M_c$  – момент опору двигуна;  $J_\Sigma$  – сумарний момент інерції ЕП;  $\theta$ ,  $\lambda$  – механічний та електричний кути ДПР;  $p$  – число пар полюсів [54].

Робочі процеси у крокових двигунах подано на рис. Г.2, Г.3.

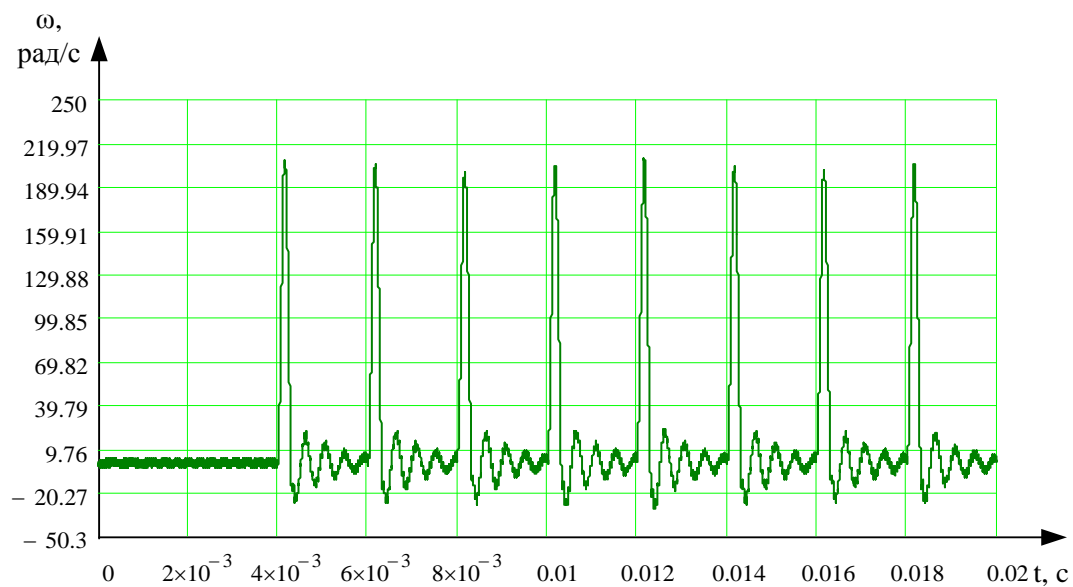


а)

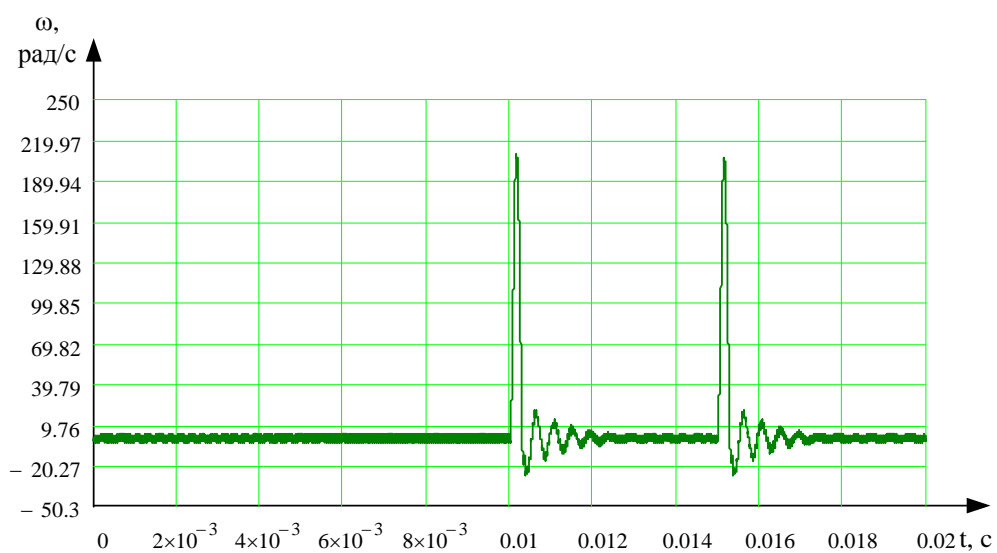


б)

Рис. Г.2. Кути повороту крокових двигунів (а) обертового (1) та поздовжнього (2) та швидкість переміщення контрольної точки на поверхні (б)



а)



б)

Рис. Г.3. Частоти обертання двигунів поздовжньої та обертової подачі