

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Аль-Ібрахімі Метак М. А.

УДК 62-231:621.923.9

ДИСЕРТАЦІЯ

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ УМОВ АБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ КАРБОНОВИХ ВИРОБІВ НА ВЕРСТАТАХ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

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



Аль-Ібрахімі Метак М. А.

Науковий керівник – Кириченко Андрій Миколайович,
доктор технічних наук, професор

Кропивницький – 2019

АНОТАЦІЯ

Аль-Ібрахімі Метак М. А. Забезпечення раціональних умов абразивного різання композиційних карбонових виробів на верстатах паралельної структури. – 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, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної задачі підвищення якості розрізання карбон-карбонових композиційних виробів на основі встановлення закономірностей формування поверхневого шару при впливі абразивним інструментом за рахунок забезпечення раціональних умов різання маніпуляційною системою верстата паралельної структури.

Обробка композиційних матеріалів абразивним інструментом є досить складною, вимагає створення певних умов для раціональної взаємодії сполучених абразивних зерен із матеріалом неоднорідної структури. У роботі розроблено фізичну модель взаємодії та запропоновано математичний опис теплових явищ, які викликають деформацію інструмента. Показано, що нерівномірне тепловиділення пов'язане зі зміною динамічної плями контакту поверхні інструменту, яка забруднена частинками видаленого матеріалу (шламом), та поверхні обробки. В якості інструменту розглянуто абразивний відрізний круг, встановлений у шпindel верстата з механізмом паралельної структури.

Запропоновано нове технічне рішення верстата на основі механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю, сформульовано його кінематичні залежності та визначено матрицю просторової жорсткості. Встановлено, що запропонованому механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю властива підвищена жорсткість у порівнянні з повнопаралельними механізмами, та показана доцільність його застосування

у верстаті для абразивної обробки, що дозволяє не лише підвищити точність різання, а і зменшити пляму контакту і тепловиділення в зоні різання.

У **вступі** розглянуто актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, поставлена мета та задачі дослідження, сформульовано наукову новизну та практичну цінність роботи.

У **першому розділі** приведено аналітичний огляд проблеми, охарактеризовано карбоновмісні матеріали, що обробляються абразивним методом за допомогою відрізних кругів, спеціальних фрез, свердл та ін.. показано, що такі процеси, поряд із тим, що є високоефективними, досить складно реалізуються на діючому обладнанні, оскільки потребують створення спеціальних умов обробки, зокрема, залучення засобів боротьби із утворюваним пилом. При цьому існує проблема точної установки матеріалу, оскільки у переважній більшості випадків оброблення має здійснюватися з чітким орієнтуванням напряму різу відносно армувальних волокон.

Зроблено також висновок, що карбон-карбонові матеріали для розв'язання задач механіки можна вважати порожнистим напівпростором, який задовільно описується моделями Бінгама. У той же час показано, що при різанні композитів, незважаючи на значні напрацювання Koplev et al., T. Kaneeda і T. Masayuki, D. Arola et al., I. Singha et al., A. T. Marques, L. M. Durão, L. Lasri, X. M. Wang і L. C. Zhang Komanduri, Zitoune et al, Н.В. Вerezуба і А.П. Тарасюка, В.І. Дрожжина та ін., питання забезпечення якості, продуктивності та стабільності обробки повною мірою ще не вирішені.

Показано, що для обробки армованих матеріалів велике значення набуває точне орієнтування різального інструменту відносно армувальних волокон, що найбільш просто реалізовується саме на верстатах паралельної кінематичної структури. Зроблено висновок, що існуючі технічні рішення, призначені для орієнтування у просторі чи в площині робочого органа, потребують доопрацювання, оскільки не мають стабільних характеристик

жорсткості у площині обробки, а нежорсткість самого різального інструменту вносить додаткові впливи на процес різання.

Тож саме за рахунок удосконалення просторової системи верстата паралельної структури та використання кінематичної надлишковості можливе підвищення жорсткості технологічної обробної системи, що разом із створенням раціональних умов протікання процесів абразивного руйнування нещільного матеріалу в зоні обробки дозволить підвищити якість обробки та забезпечити її ефективність.

Поставлено мету та сформульовано задачі досліджень.

Другий розділ присвячено розробці методики визначення ефективності обробки на основі інтенсивності тепловиділення у зоні механічного впливу. Детально наведено опис використовуваного устаткування, а також вимірювальних приладів та інструментального забезпечення.

Оскільки у процесі обробки використовуваний інструмент зазнає деградації, для відтворюваності результатів вимірів запропоноване гідроструменеве очищення поверхневого абразивовмісного шару.

Приведено методику визначення параметрів шорсткості засобами електронної мікроскопії, удосконалено відомі рівняння для визначення параметрів шорсткості (застосовано відповідно до порожнистого матеріалу карбон-карбонової групи).

Наведені відомості щодо конструкції розробленої моделі верстата паралельної структури, методів вимірювання його характеристик тощо.

У третьому розділі розглянуто взаємодію алмазовмісного інструменту із нещільним напівпростором, проаналізовані теплові ефекти та явища у зоні контакту, запропоновано фізичну модель взаємодії та представлено математичний опис ТОС, який дозволяє розглянути термосилове навантаження робочого інструменту. У якості такого інструменту обрано абразивний круг із малою кількістю частинок абразиву, призначений для виконання прямолінійних різів матеріалу карбонової групи.

Розглянуто задачу виділення тепла на поверхні контакту (по периферійній і бічним поверхням інструменту) встановлено функціональні взаємозв'язки між плямою динамічного контакту інструмента із поверхнею та термосиловим навантаженням. При цьому встановлено, що надлишок тепла викликатиме різке зростанням температури на периферії інструменту та відповідно вестиме до його деформацій, внаслідок чого якість обробки поверхонь погіршиться, а ширина різку зросте. Зроблено припущення, що погіршення якості оброблюваної поверхні обумовлюється зростанням температури в зоні різання, і безпосередньо визначається забрудненням різального шару; при цьому провідну роль у силовому навантаженні зони обробки відіграє маніпуляційна система верстата. Забезпечення раціонального теплового режиму можливе лише при відповідній зміні режимів ведення обробки, шляхом зміни швидкості переміщень інструменту відносно оброблюваної поверхні. При цьому найбільш ефективними з точки зору керованості є маніпуляційні системи паралельної структури.

Виходячи із даного припущення, запропоноване нове технічне рішення механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю, проведений аналіз його кінематичних залежностей, характеристик жорсткості у порівнянні з відомими механізмами та показана доцільність його застосування у верстаті для маніпулювання шпинделем із абразивним інструментом.

У четвертому розділі наведені результати досліджень температури у зоні різання, що дозволило ідентифікувати моделі для визначення розподілу температур в процесів оброблення. Виконано детальний аналіз деградації та пошкодження кругів і показано, що для забезпечення надійності процесу різання круги мають очищатися, зокрема, гідроабразивним методом. Це дозволяє стабілізувати умови взаємодії абразивовмісного інструменту із нещільним напівпростором, отримати високі показники якості.

Показано, що існує певне значення кількості частинок, які взаємодіють із оброблюваним матеріалом, для якої максимальна температура внаслідок засалювання поверхні буде найбільшою.

Також дослідженнями було встановлено, що зі збільшенням часу роботи кругом щільність залипання продуктів різання на поверхні круга зростає, а обсяг видалення речовини при різанні – зменшується. Дане зменшення обумовлене пружними відтисненнями у верстатній системі, які зростають при зростанні сил різання. Отже, зміна профілю різального круга веде до зменшення продуктивності процесу, зростання пружних деформацій, зміни параметрів якості оброблених заготовок. Це дало змогу довести твердження, що для подолання зазначених негативних явищ необхідно підвищувати жорсткість системи, забезпечуючи її раціональне значення при зміні стану робочого інструменту.

Досліджено вплив зміни жорсткості верстатної системи на динамічні характеристики процесу мікрорізання. Встановлено, що із зменшенням жорсткості спостерігається зростання динамічних складових за амплітудою на 50–120% та зростання тривалості перехідного процесу до 0,3–1,2 с. Експериментальними вимірюванням на розробленій та виготовленій моделі верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю підтверджено, що величина його жорсткості на 16 – 28% більша у порівнянні з схемою «пентапод».

П'ятий розділ присвячений розробці інженерної методики визначення швидкості робочої подачі (як залежного фактору) від умов виконання обробки, використовуваного круга, схеми технологічного налагодження. Реалізований багатофакторний експеримент дозволив отримати прості регресійні рівняння, на основі яких запропонована послідовність інженерних розрахунків контрольованих параметрів процесу.

Наведено конструктивне виконання та передбачувані технічні характеристики верстата паралельної структури для обробки карбонових композитних виробів.

Приведене економічне обґрунтування прийнятих технічних рішень показало, що використання розробок дозволяє скоротити витрати на обробку на 25-30%.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше отримано закономірності формування поверхневого шару нещільного матеріалу карбон-карбонової групи 3-D плетіння абразивною обробкою та встановлено функціональні взаємозв'язки між плямою динамічного контакту інструменту з поверхнею та термосиловим навантаженням елементів технологічної обробної системи;

– вперше доведено, що порушення теплового балансу зони різання при обробці нещільних карбон-карбонових матеріалів 3-D плетіння веде до випереджаючого зростання локальних температур на поверхні абразивного інструменту та його деформування зі зміною силового навантаження утворених поверхонь і, як наслідок, погіршення якості і точності обробки;

– отримала подальший розвиток концепція визначеності умов взаємодії абразивних частинок інструменту із нещільним пружним матеріалом динамічними властивостями верстатної системи, зокрема, паралельної структури, на основі якої доведена ефективність застосування важільних маніпуляційних систем у верстатах для обробки карбон-карбонових композитів;

– вперше на основі аналізу сформульованих кінематичних залежностей та матриці просторової жорсткості підтверджено переваги запропонованого механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю у порівнянні з повнопаралельними механізмами за характеристиками жорсткості.

Практичне значення отриманих результатів:

– запропоновано принципи обробки карбон-карбонових композитів алмазовмісним інструментом на верстатах із надлишковими кінематичними ланками, який базується на забезпеченні раціональної плями контакту інструменту із оброблюваною заготовкою;

– запропоновано оригінальну інженерну методику призначення режимів різання матеріалів абразивними кругами, що враховує особливості взаємодії закріплених алмазних зерен із неоднорідним середовищем, впроваджену на ТОВ «Таксі-комфорт», м. Кременчук;

– запропоновано нове технічне рішення багатокординатного верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю для абразивної обробки композитних матеріалів;

– отримано математичну модель для розрахунку довжин штанг верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю під час обробки деталі та визначення характеристик його просторової жорсткості;

– отримані результати, методики та моделі використовуються у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» і «Теорія різання».

Ключові слова: карбоновмісні композиційні матеріали, абразивне різання, якість обробки, абразивний диск, тепловиділення, верстат паралельної структури, кінематична надлишковість, робочий орган, жорсткість.

ABSTRACT

Alibraheemi Methaq M. A. Providing rational conditions for abrasive cutting of composite carbon pieces on parallel kinematic machines. – 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, 2019.

The dissertation is dedicated to the solution of the scientific and applied task of improving the quality of cutting of carbon-carbon composite pieces on the basis of the establishment of regularities of the formation of the surface layer under the influence of an abrasive tool due to ensuring rational conditions of abrasive cutting by a manipulative system of a parallel kinematic machine.

The dissertation is devoted to solving the scientific and applied task of improving the quality of cutting of carbon-carbon composite products on the basis of establishing the regularities of the formation of a surface layer under the influence of an abrasive tool by providing rational cutting conditions by the manipulation system of a machine of parallel structure.

Machining of composite materials by abrasive tool is rather complicated, requiring the creation of certain conditions for the rational interaction of the combined abrasive grains with material of a non-uniform structure. In this work a physical model of the interaction was developed and a mathematical description of the thermal phenomena that caused deformation of the instrument was proposed. It is shown that uneven heat dissipation is associated with a change in the dynamic contact spot of the tool surface, which is contaminated by particles of the removed material (sludge), and the treated surface. As an instrument, an abrasive cutting disc, mounted on a spindle of a parallel kinematic machine, is considered.

A new technical solution of the machine based on a parallel manipulator with kinematic redundancy is proposed, its kinematic dependences are formulated and the spatial stiffness matrix is determined. It has been established that the proposed parallel manipulator with kinematic redundancy has increased stiffness in comparison with fully parallel manipulators, and the expediency of its application in the machine for abrasive machining is shown, which allows not only to improve the accuracy of cutting, but also to reduce the contact spot and heat dissipation in the cutting zone.

The introduction addresses the relevance of the topic, the connection of work with scientific programs, plans, themes, the goal and objectives of the research, the scientific novelty and practical value of the work are formulated.

In the first section an analytical review of the problem is given, carbon-containing materials processed by the abrasive method are characterized by cutting discs, special mills, drills, etc. It is shown that such processes, along with the ones that are highly effective, are quite difficult to implement on active equipment, as they require the creation of special conditions for treatment, in particular, the use

of means for eliminating the generated dust. In this case, there is a problem of the exact installation of the material, because in the vast majority of cases the machining should be carried out with an exact orientation of the cutting direction relative to the reinforcing fibers.

It is also concluded that carbon-carbon materials for solving mechanical problems can be considered as hollow semispace, which is satisfactorily described by Bingham's models. At the same time, it has been shown that despite significant advances by Koplev et al., T. Kaneeda and T. Masayuki, D. Arola et al., I. Singha et al., A.T. Marques, LM Durão, L. Lasri, X.M. Wang and L.C. Zhang Komanduri, Zitoune et al, H.V. Veresub and A.P. Tarasyuk, V.I. Drozhzhin etc., the issues of ensuring quality, performance and stability of composites machining are not yet fully resolved.

It is shown that for the machining of reinforced materials the exact orientation of the cutting tool relative to the reinforcing fibers becomes very important, which is most easily achieved on the parallel kinematic machines. It is concluded that the existing technical solutions intended for spatial orientation need to be finalized because they do not have stable characteristics of stiffness in the machining plane, and the compliance of cutting tool itself impacts the cutting process.

Therefore, due to the improvement of the spatial system of parallel manipulator with kinematic redundancy, it is possible to increase the stiffness of the technological machining system, which, along with the creation of rational conditions for the processes of abrasive destruction of the loose material in the machining area, will improve the quality of the machining and ensure its efficiency.

The purpose and objectives of the research are formulated.

The second section is devoted to the development of a method for determining the machining efficiency based on the intensity of heat emission in the zone of mechanical influence. Detailed description of used equipment, as well as measuring instruments and instrumentation is given.

As the instrument used in the machining process undergoes degradation, for the reproducibility of the measurement results, a water jet cleaning of the abrasive-containing layer surface is proposed.

The method of determination of roughness parameters by means of electronic microscopy is given, the known equations for determination of roughness parameters are improved (applied according to hollow material of carbon-carbon group).

Information about design of the developed prototype of parallel kinematic machine, methods of measuring its characteristics, etc. is given.

The third section deals with the interaction of a diamond-bearing instrument with a loose semispace, analyzes the thermal effects and phenomena in the contact area, proposes a physical model of interaction, and presents a mathematical description of the TOS, which allows us to consider the thermal force of the working tool. As an instrument, an abrasive wheel with a small amount of abrasive particles is chosen, designed to perform straight-line cuts of the material of the carbonic group.

The problem of heat allocation on the contact surface (peripheral and lateral surfaces of the instrument) is considered. The functional interconnections between the spot of the dynamic contact of the tool with the surface and the thermosensitive load are established. It is established that excess heat will cause an abrupt increase of temperature on the periphery of the instrument and, accordingly, will lead to its deformation, resulting in a deterioration of the treated surface quality, and the width of the cut will increase. It is assumed that deterioration of the treated surface quality is due to the increase in temperature in the cutting zone, and is directly determined by the contamination of the cutting layer. At the same time, the main role in the force load of the machining zone is defined by the machine manipulation system. Provision of a rational thermal conditions is possible only with an appropriate change in the machining conditions, by changing the feed velocity of the instrument relative to the surface to be processed. In this

case, the most effective in terms of controllability are manipulation systems of a parallel kinematic machine.

Proceeding from this assumption, a new technical solution of a parallel manipulator with kinematic redundancy is proposed, an analysis of its kinematic dependencies, stiffness characteristics as compared with known manipulators and the feasibility of its application in the machine for manipulating the spindle with the abrasive tool is shown.

The fourth section presents the results of temperature studies in the cutting zone, which allowed to identify the model for determining the temperature distribution in the machining processes. A detailed analysis of degradation and damage to abrasive disks has been carried out and it has been shown that the disks must be cleaned in order to ensure the reliability of the cutting process, in particular, by a water jet method. This allows to stabilize the conditions of the interaction of abrasive tool with a loose semispace, to obtain high quality indices.

It is shown that there is a certain value of the number of particles that interact with the material being processed, for which the maximum temperature due to the salination of the surface will be the highest.

Also, studies have found that with an increase of the disk machining time the density of sticking products of cutting to the surface of the disk increases, and the amount of removal of matter during cutting decreases. This reduction is due to elastic deformations of the machining system, which increases with the growth of cutting forces. Thus, changing the profile of the cutting disc leads to a decrease of the machining productivity, the growth of elastic deformations, changes in the quality parameters of the finished workpieces. This made it possible to prove the claim that in order to overcome these negative phenomena it is necessary to increase the stiffness of the system, ensuring its rational value when the state of the working tool is changing.

The influence of the change of the stiffness of the machine system on the dynamic characteristics of the cutting process is investigated. It was established that with a decrease in stiffness, growth of dynamic components in amplitude by

50-120% and increase in the duration of the transition process up to 0.3-1.2 s are observed. Experimental measurements on the developed and manufactured prototype of a parallel kinematic machine with kinematic redundancy confirmed that its stiffness value is 16 - 28% higher compared to pentapod manipulator.

The fifth section is devoted to the development of engineering techniques for determining the speed of the working feed (as a dependent factor) from the machining conditions and scheme and the disk used. The implemented multifactor experiment allowed to obtain simple regression equations, on the basis of which a sequence of engineering calculations of controlled parameters of the machining process is proposed.

The design and technical characteristics of a parallel kinematic machine for machining of carbon composite products are presented.

The economic validation of the adopted technical solutions has shown that the use of the developments allows to reduce machining costs by 25–30%.

Scientific novelty of the obtained results:

- the patterns of surface layer formation for non-dense carbon-carbon material of 3-D weaving by abrasive machining were obtained for the first time; functional interconnections between the spot of the dynamic contact of the tool with the surface and the thermosensitive load of the elements of the technological machining system were established;

- it was first proved that the violation of thermal balance of the cutting zone during machining of non-dense carbon-carbon materials of 3-D weaving leads to a pre-eminent increase in local temperatures on the surface of the abrasive tool and its deformation changing the force loading of the formed surfaces and, consequently, to the deterioration of the machining quality and accuracy;

- the concept has been further developed that the interaction conditions of abrasive particles of a tool with a loose elastic material are defined by the dynamic properties of the machine tool, particularly, parallel kinematic machine, which allowed to prove the efficiency of the application of spatial manipulative systems for the machine tools for machining of carbon-carbon composite;

- for the first time, based on the analysis of the formulated kinematic dependences and the spatial stiffness matrix, the advantages of the proposed parallel manipulator with kinematic redundancy in comparison with fully parallel manipulators by the stiffness characteristics have been confirmed.

The practical significance of the obtained results:

- the principles of machining of carbon-carbon composites by the diamond tool on the parallel kinematic machines with kinematic redundancy is proposed, which is based on providing a rational contact spot of the tool with the workpiece;

- the original engineering method for assigning conditions of cutting materials with abrasive disks is proposed, taking into account the peculiarities of the interaction of fixed diamond grains with a nonuniform environment introduced at LLC "Taxi Comfort", Kremenchuk;

- a new technical solution for a multi-coordinate parallel kinematic machine with kinematic redundancy for abrasive machining of composite materials is proposed;

- a mathematical model for calculating the strut lengths of a parallel kinematic machine with kinematic redundancy during machining of a part and for determination of its stiffness characteristics;

- the obtained results, methods and models are used in the educational process of the Central Ukrainian National Technical University for teaching disciplines "Technological Equipment with Parallel Kinematics" and "Cutting Theory".

Key words: carbon-carbon composite materials, abrasive cutting, parallel kinematic machine, abrasive wheel, machining quality, heat generation, kinematic redundancy, end effector, kinematics, stiffness.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Кириченко А. Н., Метак Аль Ібрахіми, Щетинин В. Т., Ченчевая О. А. Повышение качества абразивной резки карбон-карбоновых композитов за счет обеспечения рациональных условий динамического контакта. *Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського*. Кременчук, 2018. Вип. 5 (112). С. 94–102. (включено до наукометричних баз даних «Ulrich's Web Global Serials Directory», eLIBRARY, «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor», «Scientific Indexing Services»).
2. Аль Ібрахімі Метак М. А. Возможности расширения ориентационных возможностей многокомпонентных верстатов. *Наукові нотатки : міжвуз. збірник*. Луцьк, 2018. Вип. № 63. С. 8–13. (включено до наукометричної бази даних РИНЦ).
3. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак М. А. Робочий простір та особливості 5-осьового паралельного верстата з надлишковими приводами. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво : наук. журнал*, Луцьк, 2018. Вип. 30–31. С. 196–200. (включено до наукометричних баз даних РИНЦ, «Universal Impact Factor», «Open Academic Journals Index»).
4. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак. Багатокоординатний верстат з надлишковим механізмом паралельної структури та спеціальним робочим органом. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : збірн. наук. праць КНТУ*. Кропивницький, 2017. Вип. 30. С. 57–64.
5. Аль Ібрахімі Метак М. А. Математична модель узагальнених координат робочого органа багатокоординатного верстату паралельної структури з надлишковим приводом. *Наукові доповіді НУБІП України : електронне видання*. – Вип. 4(74), вересень 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2018.04.020>. (стаття включена до наукометричних баз даних «Ulrich's Web Global Serials Directory», «Google

Scholar», «*Scientific Indexing Services*», «*BASE*», «*MIAR*», «*AGRIS*», «*ResearcBib*», «*USJ*», «*Index Copernicus*»).

6. 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. (включено до наукометричних баз даних «*Directory of Indexing and Impact Factor*», *eLIBRARY*, «*General Impact Factor*», «*International Scientific Indexing*»).

7. Аль Ібрахімі Метак М.А. Возможности повышения продуктивности обработки деталей за счет использования станков параллельной структуры с избыточными приводами и специальным рабочим органом. *Modern Science – Moderní věda*. Česká republika, Nemoros, 2018. № 4. P.160–167. (включено до наукометричних баз даних *eLIBRARY*, «*Google Scholar*», «*Index Copernicus*»).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Метак Мохамед Аль Ібрахімі, Кириченко А. М. Вдосконалення багатокординатних верстатів паралельної структури введенням надлишкових приводів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)*: матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. (26–29 квіт. 2016 р.). Чернігів, 2016. С. 126.

9. Метак Мохамед Аль Ібрахімі, Кириченко А. М. Особливості кінематики багатокординатних верстатів паралельної структури з надлишковими приводами. *Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів* : збірник наук. праць IV міжнар. наук.-техніч. конф. ТК–2016, 26–28 трав. 2016 р. Луцьк, 2016. С. 55–57.

10. Кириченко А. М., Гречка А. І., Аль-Ібрахімі Метак М. А. Визначення ефективної схеми верстата комбінованої структури. *Сучасні технології промислового комплексу* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., вип. 2. Херсон, 2016. С. 57–60.

11. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак М. А. Верстат паралельної структури з надлишковими приводами та спеціальним робочим органом.

Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2017) : матеріали тез доповідей VII міжнар. наук.-практ. конф. (24–27 квіт. 2017 р.) : у 2-х т. Чернігів, 2017. Т. 1. С. 136–137.

12. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак М. А. Компонівка верстата паралельної структури із спеціальним робочим органом. *Обладнання і технології сучасного машинобудування* : матеріали всеукр. наук.-практ. конф. пам'яті Нагорняка С. Г., 11–12 травня 2017 р. Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2017. С. 85.

13. Кириченко А. М., Аль-Ібрахімі Метак. Збільшення діапазону кутів орієнтації робочого органа багатокординатного верстата паралельної структури. *Сучасні технології промислового комплексу – 2017* : матеріали III-ої міжнар. наук.-практ. конф. (Херсон, 12 – 17 вересня 2017 р.). Херсон : ХНТУ, 2017. С. 143–144.

14. Кириченко А. М., Аль-Ібрахімі Метак М. Нова конструкція робочого органа надлишкового верстата паралельної структури. *Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації – 2018* : матеріали IV-ої міжнар. наук.-практ. конф., вип. 4. Херсон, 2018. С. 99.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

15. Привід переміщення вихідного органа верстата з шістьма штангами: Пат. 112828 Україна: МПК В23Q 5/00. № 201607885; заявл. 15.07.16; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. 4 с.

16. Привід переміщення вихідного органа верстата з п'ятьма штангами: Пат. 114304 Україна : МПК В23Q 5/00. № 201607831; заявл. 15.07.16; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5. 4 с.

17. Привід переміщення вихідного органа верстата з чотирма штангами: Пат. 114306 Україна: МПК В23G 5/02. № 201607833; заявл. 15.07.16; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5. 4 с.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ	21
ВСТУП	22
1. ПРОБЛЕМИ РІЗАННЯ КАРБОНОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ АБРАЗИВНИМ ІНСТРУМЕНТОМ	28
1.1. Карбон-карбоніві та карбон-полімерні композиції у сучасному машинобудуванні.....	28
1.2. Різання карбонівих матеріалів та місце абразивного різання серед інших видів обробки	33
1.3. Проблеми різання заготовок абразивними кругами та засоби і способи забезпечення ефективності обробки	41
1.4. Верстати паралельної структури як дієвий засіб підвищення продуктивності і якості обробки	44
1.5. Мета і задачі роботи.....	60
2. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ У ЗОНІ МЕХАНІЧНОГО ВПЛИВУ	63
2.1. Використовуване обладнання та вимірювальні пристрої	63
2.2. Методика досліджень та послідовність виконання експериментів	72
2.3. Застосування гідроструменевого очищення для відновлення різальної здатності інструменту	77
2.4. Використання РЕМ-аналізу для контролю стану алмазовмісного шару та для аналізу дисперсності шламу	81
2.5. Висновки за розділом.....	88
3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ АБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ КАРБОНОВИХ ВИРОБІВ НА ВЕРСТАТАХ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ	89
3.1. Взаємодія алмазовмісного інструменту із нещільним напівпростором, теплові ефекти та явища у зоні контакту	89

3.2. Вплив динамічних властивостей верстатної системи на явища у зоні різання	94
3.3. Кінематичний аналіз паралельного маніпулятора з кінематичною надлишковістю	96
3.4. Аналіз просторової жорсткості механізму паралельної структури ...	117
3.5. Зміна температури в зоні контакту та динамічні явища у момент контакту із оброблюваним тілом.....	124
3.6. Висновки за розділом.....	126
4. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ІЗ НЕЩІЛЬНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПОНОВАНОГО ВЕРСТАТА ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ	128
4.1. Дослідження температури в зоні різання та її зв'язку із силовим навантаження.....	128
4.2. Вплив умов обробки на показники якості сформованого поверхневого шару	138
4.3. Вивчення дисперсності шламу.....	142
4.4. Динамічні характеристики запропонованого механізму паралельної структури.....	145
4.5. Результати вимірювання жорсткості просторової пружної системи верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю	148
4.6. Висновки за розділом.....	151
5. ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ВСТАНОВЛЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ УМОВ АБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ НЕЩІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОПОНОВАНИХ НОВИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	153
5.1. Нові компоновки та прогнозування параметрів верстатів паралельної структури для розрізання карбонових композитів	153

5.2. Визначення функціональної обумовленості швидкості контурної подачі параметрами інструменту та схемою технологічного налагодження на верстатах паралельної структури	161
5.3. Економічне обґрунтування пропонованих нових технічних рішень.....	169
5.4. Висновки за розділом.....	173
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	174
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	176
ДОДАТКИ.....	200

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ВВГКМ – вуглецево-волокнистий графітовий композиційний матеріал

ВВКМ – вуглець-вуглецевий композиційний матеріал

КИМФ – ВВКМ на основі плетеного каркасу ортогональної 3D

структури з вуглецевого волокна та піровуглецевої матриці;

МПС – механізм паралельної структури;

ПАН – поліакрилонітрил;

ПКМ – полімерний композиційний матеріал;

ТОС – технологічна обробна система;

ЧПУ – числове програмне управління;

E – приведений модуль пружності;

f – коефіцієнт тертя;

J – якобіан кінематичної залежності;

K – матриця жорсткості;

k_k – крутильна жорсткість штанги;

k_n – поступальна жорсткість штанги;

\mathbf{n}_i – одиничний вектор напрямку штанги;

r_i – довжина штанги змінної довжини;

Q – виділення тепла;

R – матриця повороту системи координат;

\mathbf{X} – вектор узагальнених координат;

e – похибка обчислень;

u – виступання волокна над поверхнею матеріалу;

Q – вектор координат приводів;

t – час контактної взаємодії.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Стабільне зростання питомої ваги виробів, виконаних із композиційних матеріалів, перед усім, на основі скляних і вуглецевих волокон у сучасних технічних системах і комплексах є однією із головних тенденцій високотехнологічного машинобудування. Цьому сприяє і принципово нова концепція створення виробів із композитів, коли виріб проектується із врахуванням властивостей майбутнього матеріалу, анізотропії його основних характеристик. Володіючи набором унікальних фізико-механічних властивостей, у першу чергу, ортотропією міцності та пружності, малою вагою, стійкістю до дії агресивного середовища, ці матеріали є незамінними для авіаційної, ракетно-космічної техніки, автомобілебудування, виробництва сучасних обробних засобів і інструментів, товарів народного вжитку.

Однак, поруч із задачами створення нових матеріалів, розробки принципів конструювання виробів із композитів, нагальною постає і науково-технічна задача розробки способів і методів оброблення композитів, створення ефективного інструментального забезпечення.

Вуглець-вмісні матеріали, зокрема, карбон-карбонові, знаходять застосування в машинах, що працюють в екстремальних умовах: при високих температурах, в агресивних хімічних середовищах, в умовах високих навантажень. Як правило, карбон-карбонові матеріали створюють у вигляді плетеного 2-D або 3-D каркасу із суцільного вуглецевого волокна, який сполученого чистим вуглецем (переважно піровуглецем). На відміну від карбон-полімерних заготовок і препрегів, що можуть бути викладені на основу перед полімеризацією, початкові заготовки із карбон-карбону отримують у вигляді плит, кругів, або брусків, які потребують подальшого оброблення. Абразивне різання таких матеріалів на пластини або проміжні заготовки за допомогою кругів є одним із найбільш доцільних способів обробки, оскільки отримують вузький проріз із мінімальних пошкодженням

матеріалу та задовільною якістю поверхні. У той же час виконання таких операцій на відомих відрізних верстатах ускладнене внаслідок недостатньої жорсткості та малої потужності головного приводу, а також обмежених можливостей стосовно різання заготовки без її переустановлення.

Зважаючи на активний розвиток верстатних систем, що базуються на використанні механізмів паралельної структури, як машин широких технологічних можливостей, адаптація такого обладнання до задач абразивного розрізання карбонових заготовок є актуальною та значимою. Її розв'язання дозволить не лише покращити якість оброблення, підвищити точність виконуваних розмірів, а і значно покращити умови виробництва, зменшити вплив шкідливого пилоутворення на обслуговуючий персонал.

Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконана відповідно до наукової тематики кафедри «Металорізальні верстати та системи» Центральноукраїнського національного технічного університету і пов'язана з тематикою науково-дослідної роботи кафедри «Підвищення ефективності технологічного обладнання з механізмами паралельної структури» (номер державної реєстрації № 0111U000304).

Мета роботи полягає у підвищенні якості розрізання карбон-карбонових композиційних виробів на основі встановлення закономірностей формування поверхневого шару при впливі абразивним інструментом за рахунок забезпечення раціональних умов різання маніпуляційною системою верстата паралельної структури.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

– виконати аналіз особливостей абразивного різання композиційних матеріалів, встановити вимоги до абразивного інструмента та обробного обладнання, обґрунтувати доцільність використання верстатів паралельної структури для здійснення операцій розрізання;

– розробити фізичну та побудувати математичну модель взаємодії скріплених абразивних частинок із нещільним напівпростором, що відповідає структурі карбон-карбонових матеріалів;

– ідентифікувати модель, визначити раціональні умови формування плями динамічного контакту, що обумовлює формування показників якості обробки;

– сформулювати вимоги до пружних властивостей несучої системи, виконати аналіз компоновок і технологічних можливостей верстатів паралельної структури;

– запропонувати нове технічне рішення маніпуляційної системи верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю, виконати теоретичне дослідження його вихідних параметрів;

– розробити методику ідентифікації моделі взаємодії інструменту із заготовкою та провести експериментальні дослідження пропонованого технічного рішення.

Об'єкт дослідження – процес обробки карбон-карбонових заготовок абразивним інструментом на верстаті паралельної структури.

Предмет дослідження – якість та стабільність процесу обробки карбон-карбонових заготовок абразивним інструментом на верстаті паралельної структури.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження ґрунтуються на основних положеннях теорії різання матеріалів, теорії тепло- та масопереносу, теорії пружності та пластичності, теорії проектування металорізального обладнання, кваліметрії, векторної алгебри, теорії ймовірності та математичної статистики. Експериментальні та аналітичні дослідження виконувалися із застосуванням сучасних засобів досліджень – растрової електронної мікроскопії, пірометрії, засобів автоматичної фіксації вимірювальних величин, лазерної інтерферометрії.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше отримано закономірності формування поверхневого шару нещільного матеріалу карбон-карбонової групи 3-D плетіння абразивною обробкою та встановлено функціональні взаємозв'язки між плямою динамічного контакту інструменту з поверхнею та термосиловим навантаженням елементів технологічної обробної системи;

– вперше доведено, що порушення теплового балансу зони різання при обробці нещільних карбон-карбонових матеріалів 3-D плетіння веде до випереджаючого зростання локальних температур на поверхні абразивного інструменту та його деформування зі зміною силового навантаження утворених поверхонь і, як наслідок, погіршення якості і точності обробки;

– отримала подальший розвиток концепція визначеності умов взаємодії абразивних частинок інструменту із нещільним пружним матеріалом динамічними властивостями верстатної системи, зокрема, паралельної структури, на основі якої доведена ефективність застосування важільних маніпуляційних систем у верстатах для обробки карбон-карбонових композитів;

– вперше на основі аналізу сформульованих кінематичних залежностей та матриці просторової жорсткості підтверджено переваги запропонованого механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю у порівнянні з повнопаралельними механізмами за характеристиками жорсткості.

Практичне значення отриманих результатів:

– запропоновано принципи обробки карбон-карбонових композитів алмазовмісним інструментом на верстатах із надлишковими кінематичними ланками, який базується на забезпеченні раціональної плями контакту інструменту із оброблюваною заготовкою;

– запропоновано оригінальну інженерну методику призначення режимів різання матеріалів абразивними кругами, що враховує особливості

взаємодії закріплених алмазних зерен із неоднорідним середовищем, впроваджену на ТОВ «Таксі-комфорт», м. Кременчук;

– запропоновано нове технічне рішення багатокординатного верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю для абразивної обробки композитних матеріалів;

– отримано математичну модель для розрахунку довжин штанг верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю під час обробки деталі та визначення характеристик його просторової жорсткості;

– отримані результати, методики та моделі використовуються у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» і «Теорія різання».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, практичні та експериментальні результати досліджень, що містяться у дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто.

Статті [2, 5, 7] опубліковані одноосібно. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора такий: у [1] автором обґрунтовано фізичну та запропоновано математичну модель для визначення умов взаємодії скріпленого абразиву із нещільним напівпростором, що імітує карбон-карбоновий матеріал, у [3] – виконано дослідження характеристик 5-осьового верстата паралельної структури з надлишковими приводами, у [4] – запропоновано конструкцію та кінематику багатокординатного верстата паралельної структури, у [6] – визначено ефективну схему верстата, обґрунтовано метод оцінки його вихідних характеристик.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу» (м. Херсон, 15–18 вересня 2015 р.), шостій міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 26–29 квітня 2016 р.), сьомій міжнародній

науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 24–27 квітня 2017 р.), третій міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу» (м. Херсон, 12–17 вересня 2017 р.), Всеукраїнської науково-практичної конференції пам'яті Нагорняка С. Г. (м. Луцьк, 11–12 травня 2017 р.), четвертій міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації – 2018» (м. Херсон, 12–16 вересня 2018 р.), науково-технічних конференціях викладачів, аспірантів та співробітників Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький, 2015–2018 р.).

Публікації. За результатами роботи опубліковано 17 наукових праць, з них 7 друкованих праць у фахових виданнях України та зарубіжних збірниках наукових праць (з яких у міжнародній наукометричній базі даних eLIBRARY (РИНЦ) – 3 статті та «Ulrich's Web Global Serials Directory», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services» – 4 статті, «BASE», «MIAR», «AGRIS», «ResearchBib», «USJ» – 1 стаття, «Directory of Indexing and Impact Factor», «General Impact Factor», «International Scientific Indexing» – 1 стаття), 7 публікацій у збірниках матеріалів конференцій та 3 патенти на корисну модель.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку літератури з 210 найменувань та додатків на 25 сторінках. Повний обсяг дисертації складає 225 сторінок, з яких 154 сторінки основного тексту, 84 рисунки та 14 таблиць.

1. ПРОБЛЕМИ РІЗАННЯ КАРБОНОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ АБРАЗИВНИМ ІНСТРУМЕНТОМ

1.1. Карбон-карбовні та карбон-полімерні композиції у сучасному машинобудуванні

Сучасне машинобудування характеризується стабільним збільшенням в конструкціях питомої частки виробів, виготовлених із композиційних матеріалів, в першу чергу, на основі скляних і вуглецевих волокон [9]. Володіючи комплексом унікальних фізико-механічних властивостей, в першу чергу, ортотропією міцності і пружності, малою вагою, стійкістю до дії агресивних середовищ, ці матеріали все ширше проникають у виробництво авіаційної, автомобільної техніки, засобів виробництва, енергетичного машинобудування.

Широкі технологічні можливості формування виробів із ниток і джгутів, просочених дво- та багатоконпонентними клейними сумішами, можливість простого отримання оболонок шляхом викладення на формі-основі, максимальне наближення форми заготовки в процесі викладення до кінцевого вигляду готового виробу не тільки відкривають нові перспективи використання таких матеріалів, а і обумовлюють постійне вдосконалення способів і методів обробки елементів, формоутворення яких в процесі викладення ускладнене.

Вуглець-вмісні матеріали, на відміну від матеріалів, армованих скляними волокнами, мають вищу міцність і твердість, меншу вагу, а також володіють комплексом властивостей, обумовленим матрицею матеріалу. На сьогодні матеріали, армовані безперервними волокнами, можуть мати полімерний або вуглецевий зв'язник (матрицю); ведуться активні роботи з армування таких композитів наноструктурами на основі вуглецю [61].

За визначенням [78, 146] вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (ВВКМ) – це матеріали на основі вуглецевої матриці та вуглецевих волокон.

В якості матриці використовують піровуглець, коксові залишки термореактивних смол або нафтового пеку, у якості волокон-наповнювачів – високоміцні вуглецеві волокна (безперервні і рубані), джгути, тканини, просторові конструкції з волокна. ВВКМ в порівнянні з графітом характеризуються низькою щільністю (внаслідок пористості матеріалу), високими питомою міцністю і жорсткістю, що зберігаються необмежено довго в інертних середовищах при температурах до 3000 °С (при більш високих температурах властивості залежать від швидкості сублимації вуглецю з поверхні матеріалу), а також характером руйнувань.

Вироби з однонаправлених, перехресно- і хаотично армованих ВВКМ отримують карбонізацією відповідних вуглепластиків при температурі понад 1000 °С або ущільненням пористої вуглецевої матриці за допомогою повторюваних процесів просочення волокон термореактивними смолами з подальшою карбонізацією [79]. Вироби з просторово армованих матеріалів отримують формуванням вуглецевої матриці в обсязі попередньо виготовленого волокнистого каркаса шляхом карбонізації термопластичних пеков під тиском або осадженням на каркас вуглецю, що утворюється при піролізі газоподібних вуглеводнів. З урахуванням конкретних умов експлуатації виробу на практиці проводять поєднання різних технологічних прийомів з високотемпературною обробкою в інертному середовищі або вакуумі, що дозволяє змінювати структуру матеріалу і регулювати обсяг пір [146].

У порівнянні з іншими конструкційними матеріалами (передусім, сталлю) ВВКМ ідеальні для виробництва систем кріпильних пристроїв, використовуваних при високих температурах. Так, матеріалам типу КИМФ (CFRP – Carbon fiber reinforced polymer) [183] властива більша міцність при високих температурах, ніж жароміцній сталі. Вони також є практично недеформівними в умовах термічного удару, мають меншу щільність, меншу вагу. У порівнянні зі сталлю ВВКМ зазвичай мають довший термін служби в умовах високих температур.

ВВКМ виявляють свої властивості залежно від температури T , як зазначено у [7] (рис.1.1).



Рис. 1.1. Виявлення властивостей ВВКМ залежно від температури

Розглянемо більш детально будову ВВКМ. Вуглець-вуглецевий композиційний матеріал (ВВКМ) типу КИМФ на основі плетеного каркаса ортогональної тривимірної структури з вуглецевого волокна і піровуглецевої матриці. Матеріал має унікальні властивості міцності, високу ударну в'язкість. Трибологічні і абляційні характеристики композиту дозволяють використовувати його в якості високоміцного антифрикційного матеріалу та в якості захисного матеріалу для космічної техніки. Поряд із традиційним застосуванням ВВКМ у ракетно-космічній, авіаційній, атомно-енергетичній галузі, матеріал успішно використовується для виготовлення різних елементів фурнітури високотемпературних печей, нагрівачів, тиглів, форм для розливання кольорових металів тощо. Характеристики матеріалу КИМФ за [21] подано в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики матеріалу КИМФ [21]

№	Показник	Одиниця виміру	Значення
1.	Густина матеріалу	г/см ³	1,78
2.	Руйнівна напрузі при стисканні	кгс/см ²	157
3.	Руйнівна напруга при розтягуванні	кгс/см ²	34
4.	Руйнівна напруга при згині	кгс/см ²	49
5.	Коефіцієнт теплопровідності, не більше (при температурі 50°С)	Вт/м·град	8,1
6.	Питомий електроопір	Ом·м	30
7.	Пористість матеріалу	%	8,7
8.	Ударна в'язкість	КДж/м ²	10

Інший вуглецево-волокнистий графітовий композиційний матеріал ВВГКМ виготовляється на основі піровуглецевих матриць отриманих в результаті термоградієнтного насичення графітової шихти з добавкою з подрібнених вуглецевих волокон. Матеріали типу ВВГКМ є хімічностійкими та термоміцними, зберігають високі фізико-механічні характеристики в інертному середовищі до температури $T = 3200^{\circ}\text{C}$. Їм властива підвищена газонепроникність. Нові композити вирізняються також і підвищеною ударною в'язкістю. Як конструкційні матеріали загальнотехнічного призначення, пропоновані композити застосовують у виробках нової техніки хімічного машинобудування, автомобільної, тракторної, електротехнічної промисловості, металургії. Рекомендуються для виготовлення нагрівальних елементів стрижневої та профільної форми для електродових печей, гарячих пресформ для штампування, ливарних форм, футеровочних плиток, арматури термопар занурення, пар тертя. Властивості ВВГКМ подані у табл. 1.2.

На відміну від виробів, що виготовляють із карбон-полімерних матеріалів, матеріали типу КИМФ та ВВГКМ отримують у вигляді циліндричних або плоских заготовок досить значної товщини (рис. 1.2).

Таблиця 1.2 – Властивості матеріалів ВВГКМ [80]

№	Показник	Одиниця	Значення
1.	Щільність, не менше	г/см ³	1,68
2.	Міцність на стискання	МПа	125
3.	Міцність на згин	МПа	33,9
4.	Пористість	%	13,0
5.	Питомий електроопір	мкОм·м	18,0
6.	Температурний коефіцієнт лінійного розширення	°К ⁻¹	4,5x10 ⁻⁶

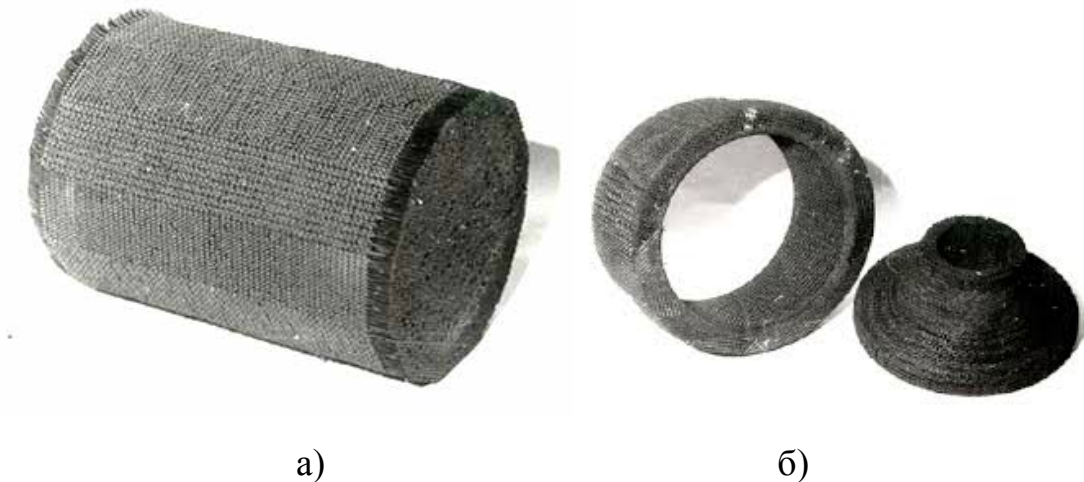


Рис. 1.2. Початкова заготовка (а) з 3-D карбонового матеріалу, отримана зв'язуванням ПАН-плетених волокон піровуглецем (КИМФ) та проміжні заготовки (б)

У подальшому заготовки піддають операціям переважно механічного різання, внаслідок чого формують проміжні заготовки або пластини, які потім методами розкроювання будуть доведені до форми готової деталі.

1.2. Різання карбонових матеріалів та місце абразивного різання серед інших видів обробки

Особливості структури і властивостей, а також специфіка композиційних матеріалів, як об'єкта обробки різанням виділяє їх у групу важкооброблюваних матеріалів, яка характеризується своїми закономірностями протікання процесу [26, 90]. Так, дослідниками, задіяними у царині вивчення особливостей процесів різання та мікрорізання (тобто обробки матеріалів вільним або скріпленим абразивом) встановлено, що явища, що супроводжують процес відокремлення стружки від неоднорідного армованого матеріалу принципово відрізняються від різання сталей та сплавів. Отже, використовувати відомі підходи при призначенні режимів різання практично неможливо. Не стають у пригоді і результати, що застосовуються при обробці різанням важкооброблюваних сталей і сплавів [26]. При механічній обробці (свердлінні, обрізці, точінні і фрезеруванні) деталей з композиційних матеріалів, у тому числі і з вуглепластику і склопластику, виникають дефекти, пов'язані із пошкодженням поверхневого шару – поверхні поділу (рис. 1.3). Через дані дефекти різко скорочуються сили, які протидіють втомним напруженням, що в цілому знижує ресурс конструкції і збільшує ймовірність появи відмови обладнання. Дефекти виявляються у вигляді розшарувань, сколювань, вириву волокон [106]. Серед дефектів, отриманих в результаті свердління, основним пошкодженням є відшарування [58, 187]. Аналогічні результати отримані також Wong F.R. та ін. [130, 203], P.A. Dearnley та ін. [129], аналізуючи вплив дефектів на надійність елементів авіаційної промисловості, зазначають, що відмова вуглепластикових деталей через розшарування, обумовлених процесами свердління і фрезерування, сягають 60%. Це, пов'язано із забезпеченням якості обробленої поверхні, точності виконуваних розмірів. Однак поряд із зазначеними, існують і дефекти стабільності та надійності процесу: нерівномірна шорсткість; змінна хвилястість; виривання і відколи на торцях;

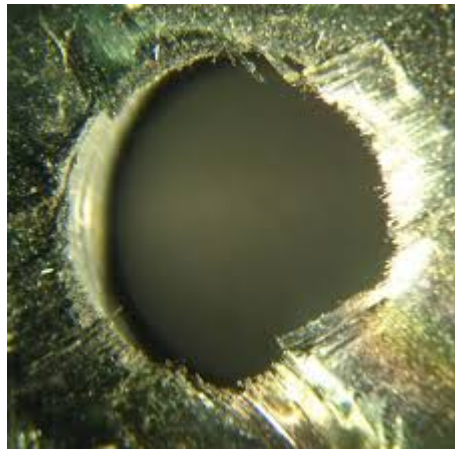
розшарування волокна на поверхні; ворсистість; тріщини; подряпини; несталість відхилень форми і взаємного розташування поверхонь. Ці дефекти вимагають додаткового розгляду задач надійності процесу із побудовою відповідних моделей виникнення відмов [160].

Фундаментальними особливостями у стружкоутворенні та формуванні вихідних показників якості оброблюваної поверхні під час різання композиційних матеріалів, у т.ч. і вуглепластиків, займалися наступні науковці: А. Kopleva et al. [150, 151], Т. Kaneeda і Т. Masayuki [147], D. Arola et al. [199], I. Singh et al. [195], А. Т. Marques, [177], L. M. Durão [132, 131], L. Lasri [175], X. M. Wang і L. C. Zhang [200, 135, 134], Komanduri [158], Zitoune et al. [140], Н.В. Вerezуб [18, 19] і А.П. Тарасюк [97, 64] та ін. Детальна інформація про механіку стружкоутворення може бути знайдена в роботі [27].

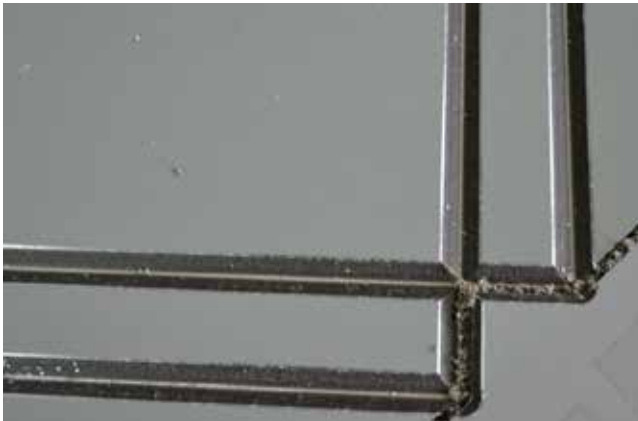
Порівнюючи обробку композиційних матеріалів з обробкою при різанні металів, слід відзначити, що багато в чому процес стружкоутворення пластиків несе в собі ознаки утворення елементної стружки і одночасно стружки надлому. Разом з тим окремі елементи і частинки матеріалу, що видаляється, залишаються пов'язаними між собою обривками волокон наповнювача, тобто стружка сходить у вигляді суцільної стрічки. Формування стружки супроводжується утворенням дрібних частинок матеріалу і пилу. Цей пил високотоксичний, а також згубний для вузлів верстата.

Зазначене стружкоутворення характерне для точіння, свердління і фрезерування деталей з композиційних матеріалів. Аналіз процесу деформації композиційного матеріалу при різанні показує, що на відміну від металу в композиційних матеріалів спостерігається наступне:

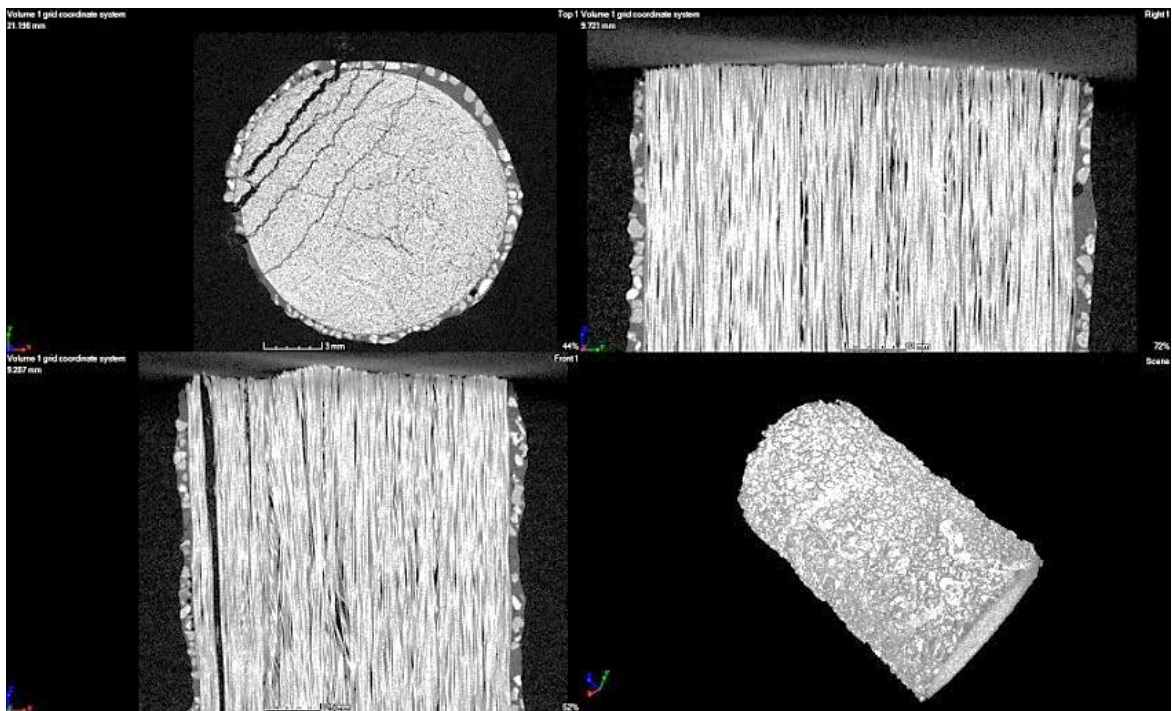
– анізотропія властивостей матеріалів, внаслідок чого деформації не передаються через шарувату структуру і сполучну смолу, а відбувається руйнування структури матеріалу у вигляді поздовжніх тріщин і відділення дрібних частинок пилу на передній поверхні інструменту замість стружки.



а)



б)



в)

Рис. 1.3. Дефекти поверхонь від лезового інструменту

У найпростішому варіанті, коли полімер армований односпрямованими безперервними волокнами і піддається розтягуванню в напрямку їх орієнтації, деформація компонентів однакова і виникаючі в них напруги пропорційні модулю пружності волокон матриці;

- висока твердість і міцність вуглеволокна, використовуваного в композиційних матеріалах перешкоджають нормальному процесу різання, викликають зростання сили опору різанню;

- висока твердість наповнювача і його абразивна дія на ріжучий інструмент викликають його підвищений знос;

- низька теплопровідність композитів, яка істотно впливає на співвідношення складових теплового балансу при різанні на відміну від різання металу. При підвищених температурах, що супроводжують обробку різанням, викликає порушення стійкості і руйнування хімічних зв'язків молекулярних ланцюгів полімеру, поява прижогів з утворенням коксового шару, виділенням газоподібних продуктів розпаду зв'язуючого і супроводжується при цьому потемнінням поверхні матеріалу. Для відповідальних вузлів різної техніки це є неприпустимим дефектом [11];

- високі пружні властивості композиційних матеріалів, що викликають підвищений знос інструменту по задній поверхні через інтенсивні контактні явища [64].

Дослідження процесів підвищення ефективності обробки наведено у [98], де автором запропоновано модель систематизації поліпшення процесів різання. Проблема обробки композиційних матеріалів присвячена значна кількість робіт, а у [185, 186] відзначені два напрямки: лезова обробка композиційних матеріалів і процес обробки композиційних матеріалів на гідроабразивній і лазерній установках.

У [64] показано, що волокнисті композити (перш за все полімерні) володіють низькою оброблюваністю, а деталі з них піддаються механічному розрізанню тільки за допомогою спеціального інструменту. Також матеріали схильні до розшарування, деструкції, пошкоджень верхньої і нижньої

кромок, а також виникнення ряду інших дефектів, які можуть призвести до вибракування готового виробу. Більш якісна обробка (з мінімальною кількістю дефектів) можлива тільки спеціальним інструментом. При свердлінні [207] питання оптимізації режимів різання, що забезпечують обробку в межах критичної температури матеріалу, вивчені не до кінця. При фрезеруванні [116] залишається невирішеною проблема, як зазначалось, стружкоутворення і подальший перегрів інструменту. Абразивна обробка [100] вимагає подальшого вивчення супутніх явищ у вигляді дефектів поверхонь, поява яких досить імовірна.

У [185] показано можливість застосування струменевих методів обробки, що застосовуються для розрізання деталей з композитів, в якій зазначається про неоднорідну структуру матеріалів і анізотропію їх властивостей, що вимагає додаткових заходів щодо запобігання процесів деструкції оброблюваних композитів із зниженням ймовірності проявів браку. Так, у [64] наведена порівняльна таблиця ефективності для різних існуючих і застосовуваних способів обробки матеріалів з композитів, що включають скляні і вуглецеві волокна, але не наведено умови отримання поверхонь із відповідною якістю.

Дослідження механічних властивостей вуглецевих композиційних матеріалів [127] показало залежність якості виробів від процесів їх отримання, проте питання впливу силової схеми впливу на матеріал при обробці залишилися не розкритими.

У [114] розкрито питання використання іншого класу надтвердих матеріалів з наноконпозиційними покриттями для обробки нових конструкційних матеріалів і сплавів. У цьому випадку авторами не надано конкретних даних, що стосуються можливості їх використання при різанні карбонових композитів. У [89] відзначається, що з появою будь-яких дефектів проявляються особливості термобаричних впливів на поверхневий шар оброблюваної деталі від використовуваного інструменту. Тому фіксується наявність певного зв'язку між дефектами, що виникають у

приповерхневих шарах деталі в результаті обробки і умовами виконання обробки. Також у [105] відзначено про обробку поперечно-армованих пластиків, яка призводить до значного розшарування волокон і самої композиційної матриці, а в результаті відбувається порушення структури поверхневих шарів, що призводить до істотного зниження якості обробленого поверхневого шару виробу [107].

У [114] відзначається, що при розгляді напруженого стану вершини тріщини, що утворюється під дією різального інструменту уздовж поверхневої лінії, відбувається забезпечення розвитку з поступовим поширенням тріщин в напрямі дії вектору швидкості руху інструменту.

Дослідженнями особливостей різання лезовим інструментом заготовок, армованих неметалічними матеріалами [201] показано, що неоднорідність структури матеріалів викликає перерозподіл окремих областей, де відбулось накопичення мікротріщин.

Дослідження механічного різання композитів карбонової групи виконане у [142]. Також у [161] наводяться відомості щодо процесу сколювання фрагментів матеріалу, який протікає при утворенні бічних тріщин.

Ряд робіт [57, 115, 180] присвячено питанням абразивного різання матеріалів, а у [182] наведено відомості стосовно використання трубчастих свердл із алмазоносним шаром для виконання операцій свердлування.

При цьому автори зазначають, що обробка матеріалів типу КИМФ и ВВГКМ потребують додаткового вивчення питань, пов'язаних із різанням.

На основі проведеного аналізу та спираючись на рекомендації роботи [12] нами виокремлено способи і методи обробки карбон-карбонівих матеріалів для виготовлення деталей із плоских заготовок, які приведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Обробка карбон-карбонів матеріалів

Тип верстата	Характеристики	Фото	Приклад різку
Різння заготовок на пильних верстатах			
ВПП-0,75	Потужність 0,7 кВт Довжина ходу полотна 50 мм Кількість подвійних ходів 100 хв ⁻¹		
Абразивне розрізання на відрізних верстатах			
Einhel 120-280DL	Потужність 1,8 кВт Максимальна глибина прорізу 90 мм		
Гідроабразивне різання та гідорізнному обладнанні			
ЛСК-400-5	Потужність 40 кВт Діаметр струменя 0,15 мм/1,02 мм Кількість координат 3 Зернистість абразиву 30-40 меш Робоча подача 300-700 мм/хв		

Розглянемо більш детально зазначені методи. Різння заготовок на пильних верстатах належить до механічного оброблення. Основний недолік даного методу – утворення великої кількості пилу. Попадання дрібних частинок в робочу частину – на зубці пилки – веде до її активного затуплення, а якість поверхні різання внаслідок недостатньої жорсткості верстата залишається вкрай низькою. Також під час роботи матеріал

схильний до деламінації, з порушенням цілісності його армувального шару. Такі процеси негативно позначаються на якості готового виробу і змінюють початкові характеристики матеріалу. Сам процес різання є недостатньо продуктивним. Однак, незважаючи на такі недоліки, обробка на пильних верстатах все ж використовується, оскільки не потребує постійної присутності оператора.

Абразивна обробка, зокрема, різання пильними дисками (сполученим абразивом) є більш продуктивною, дозволяє виконувати розрізання заготовок значної товщини, забезпечує задовільну якість поверхні. Однак обмежена жорсткість круга не дозволяє вести обробку на інтенсивних режимах; в процесі різання виділяється шкідливий пил, а сам інструмент перегрівається. У той же час, саме розрізання заготовок пильними дисками є найбільш перспективним способом отримання листових заготовок, особливо зважаючи на те, що початкові заготовки як правило виконані у формі циліндру (рис. 1.1, а). Зазвичай при різанні скріпленим абразивом (пильними дисками) вдається досягти шорсткості за Ra 3,2 мкм, однак цей показник залежить від орієнтації площин різання відносно укладки джгутів волокон.

Гідроабразивне різання (обробка незв'язаним абразивним потоком) характеризується високою продуктивністю та точністю. У той же час слід ретельно контролювати водонасичення оброблюваних поверхонь з метою недопущення активного водопоглинання прилеглими шарами. Слід також відзначити, що властива методу косина різку, а також відмінність шорсткості за перетином різки обмежують застосування такої обробки на виробництві і потребують додаткового оснащення серійного гідрорізального обладнання.

Аналіз публікацій [115] показує, що шорсткість отриманих поверхонь за Ra 6,3 мкм - 3,2 мкм, а точність відтворення контуру знаходиться на рівні IT 7-8.

Однак авторами не приводиться системної інформації стосовно призначення раціональних умов обробки. Недостатня вивченість цього питання є підґрунтям для проведення даного дослідження.

1.3. Проблеми різання заготовок абразивними кругами та засоби і способи забезпечення ефективності обробки

Складнощі механічної обробки композиційних матеріалів визначаються їх характеристиками: схильністю до розшарування в процесі обробки через їх шаруватість, структурною неоднорідністю, високою твердістю наповнювача матеріалу та низькою пластичністю зв'язки тощо.

При обробці полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) необхідно використовувати інструменти зі спеціальними твердосплавними або алмазними покриттями ріжучої кромки, а також враховувати якість, способи заточування, конструкцію робочих зон і геометричну форму крайок, які б забезпечували одночасно обробку складників матеріалу - високов'язкої полімерної матриці та високоміцного і високомодульного наповнювача. Рядом робіт, зокрема [97], [27], [98], що належать харківській школі обробників композиційних матеріалів, встановлено експериментальні закономірності впливу режимів різання на температуру при обробці різних композитів. Вони зазначають, що при обробці ПКМ (з урахуванням їх теплофізичних характеристик) максимальні температури в зоні контакту деталі з інструментом спостерігаються при середніх швидкостях різання, оскільки у цьому випадку збільшується пластична деформація полімеру. При високих швидкостях різання і мінімальному тепловиділенні полімер не переходить до пластичного стану, що призводить до крихкого руйнування у зоні різання – відбувається локалізація зони руйнування і зниження температури у зонах обробки.

Для ПКМ необхідно застосовувати свої спеціальні режими різання, особливо при обробці металокомпозитних пакетів з урахуванням розташування шарів матеріалів в залежності від напрямку обробки.

Суттєвий вклад у галузь обробки композиційних матеріалів здійснено у [105, 107], де розроблена та науково обґрунтована імітаційна модель об'ємної будови одношарового алмазно-абразивного інструменту,

виготовленого методом гальваностегії, яка базується на статистичному моделюванні, включає в себе завдання форми та розмірів одношарового алмазно-абразивного простору; статистичні характеристики алмазних зерен і їх склад; вимоги до електропровідності та чистоті поверхні алмазних зерен; властивості поверхневого зв'язника і функціонально-орієнтовані параметри контактних поверхонь робочих елементів інструменту з урахуванням величини закріплення зерен алмазу в зв'язці. Така модель дозволяє встановлювати основні закономірності формування параметрів робочої поверхні інструменту, зокрема номінальної і фактичної площі контакту технологічної системи «інструмент-деталь».

Дослідники також зазначають, що під дією механічних напружень, теплоти і окислювально-хімічних процесів поверхня неминуче деструктується і механічно диспергується, погіршуючи експлуатаційні показники виробів. Глибина поширення деструкції та механодиспергування в поверхневому шарі залежить від умов обробки, головним чином, від швидкості різання і подачі. Товщина дефектного шару в залежності від умов різання змінюється від кількох десятків до декількох сотень мікрометрів. Схематизуючи структуру поверхневого шару, його можна розділити на чотири субмікрочасти: зовнішній структурований шар полімеру, що становить 3-5% загальної товщини; механічно ущільнений шар, що зазнав деструкції полімеру (5-10%); розпушений шар механодиспергованого наповнювача та деструкції полімеру (50-60%); шар переходу в початкову структуру ПКМ (30-40%) (рис. 1.4).

У [88] запропонована концепція високопродуктивної алмазно-абразивної обробки ПКМ, яка базується на управлінні механохімічними і теплофізичними явищами шляхом спрямованого і регульованого управління контактними взаємодіями і тепловими процесами в зоні обробки. Така спрямованість мінімізує механічні та структурні перетворення в полімерній матриці матеріалу. При цьому контактні процеси спрямовані виключно на підтримання високої ріжучої здатності алмазного інструменту за рахунок

направленого створення ефективних функціонально-орієнтованих параметрів контактних поверхонь робочих елементів у інструменті, а теплофізичні процеси спрямовані на формування бездефектного поверхневого шару оброблюваного матеріалу. На основі зазначеної концепції запропоновано нову конструкцію пильних дисків (рис. 1.5), що враховує особливість взаємодії зерна із поверхнею ПКМ.

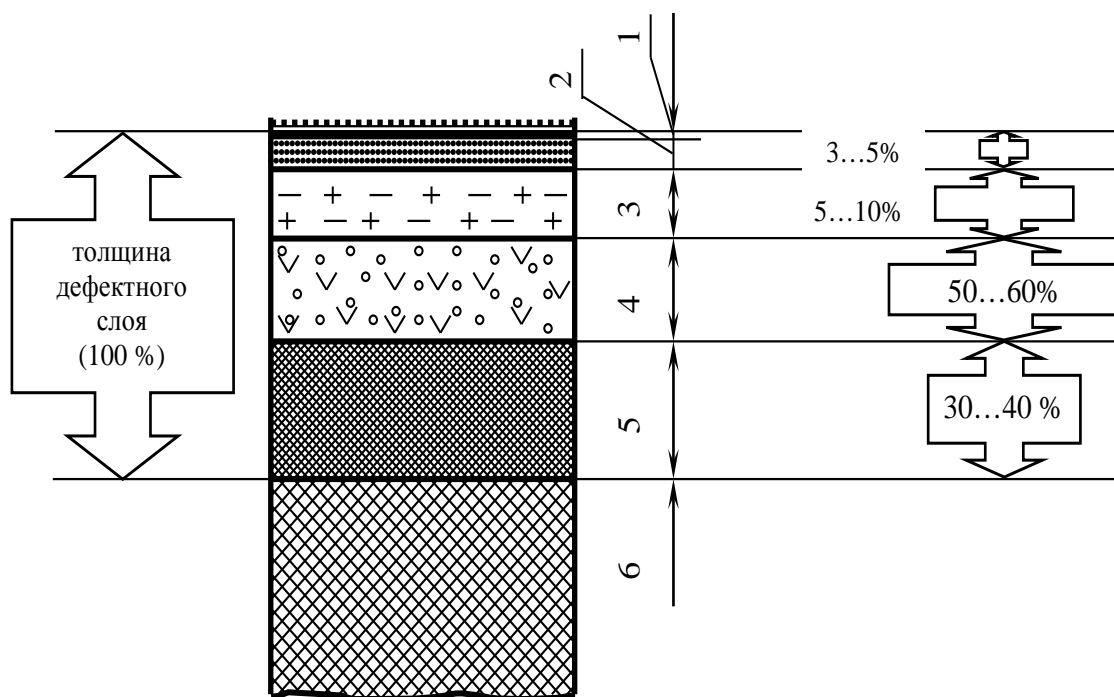


Рис. 1.4. Утворення деструктивного шару (за [88])



Рис. 1.5. Пильні диски для обробки ПКМ

Такий висновок є вкрай важливим, оскільки дозволяє на основі аналізу динамічної плями контакту розглядати усі подібні процеси обробки матеріалів інструментом зі скріпленням абразивом.

1.4. Верстати паралельної структури як дієвий засіб підвищення продуктивності і якості обробки

Вирішення задачі максимального збільшення продуктивності обробки при забезпеченні гнучкості виробництва можливе лише з використанням верстатів з ЧПУ для високошвидкісної обробки, в тому числі багатокординатної. Особливого значення це питання набуває при обробці регулярно армованих композитів, для яких важливе правильне орієнтування робочого інструмента відносно армувальника.

У [99] зроблено висновок, що створення високопродуктивних багатокординатних фрезерних верстатів і обробних центрів можливе за рахунок використання механізмів паралельної структури.

На відміну від традиційних систем переміщення робочого органа верстатів, які використовують послідовно змонтовані на базових елементах рухомі блоки (рис. 1.6, а), верстати з паралельними кінематичними ланцюгами (верстати паралельної структури) використовують просторову важільну систему ланок, одночасно шарнірно під'єднаних до робочого органа (рис. 1.6, б) [141].

Перевагами таких верстатів є низькі рухомі маси, що дозволяє досягнути надвисоких швидкостей та прискорень робочого органа, просторова рамна конструкція, яка забезпечує порівняно високу жорсткість при низькій матеріаломісткості тощо [8, 15, 16, 71, 72, 202].

Розробка та дослідження верстатів з механізмами паралельної структури ведеться в усьому світі, зокрема, великий внесок у цю галузь зробили D. Stewart [196], J-P. Merlet [164-169], С. Gosselin [137-139],

К. Sugimoto [197], Т. Yoshikawa [204, 205], D. Zlatanov [208-210], I. Bonev [117-120] та багато інших.

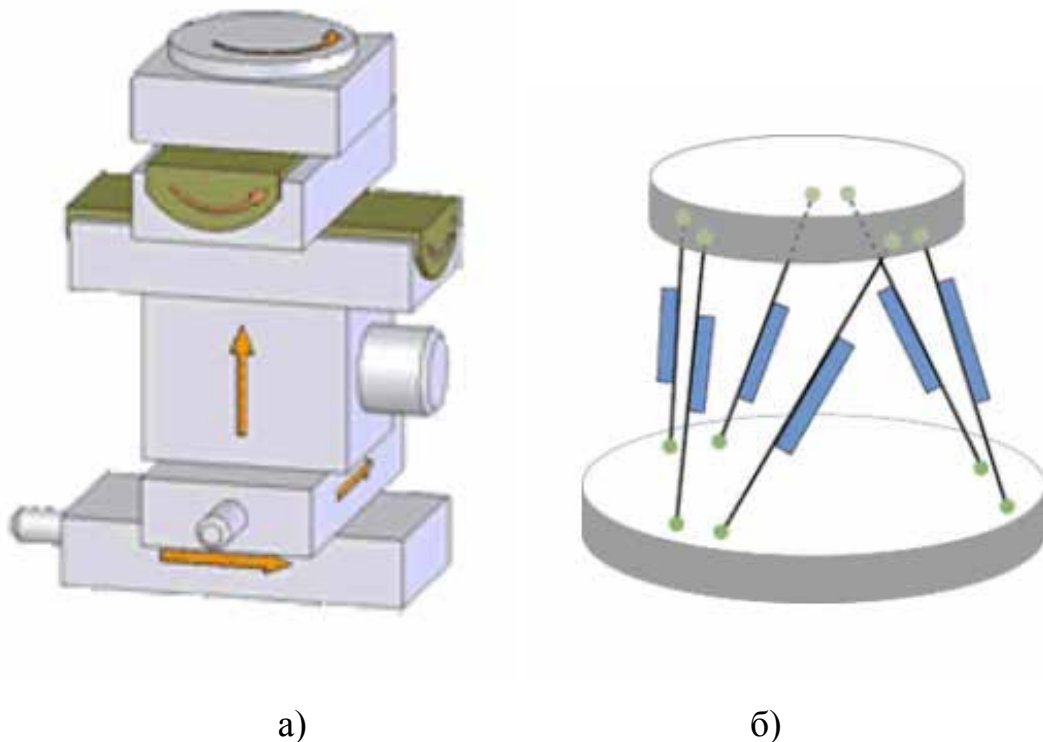


Рис. 1.6. Верстати з маніпуляторами:
а) традиційної (послідовної); б) паралельної структури

Значний внесок у проектування та дослідження обладнання з механізмами паралельної структури зробили українські вчені Д. О. Дмитрієв [23-25], К. І. Заблонский [28], А. М. Кириченко [33-38], В. А. Крижанівський [99], Ю. М. Кузнецов [52-54], І. І. Павленко [67, 68], В. Б. Струтинський [91-96], В. П. Яглінський [109, 110] та інші.

На сьогоднішній день серійно виробляють промислові верстати паралельної структури фірми Metrom (Німеччина) [170], Exechon (ОАЕ) [133], Microlar (США) [171].

Зокрема, відомі багатокоординатні верстати паралельної структури із робочим органом, у якому спільна вісь шарнірних опор одночасно є віссю шпинделя, який має п'ять ступенів вільності [136]. За такою схемою побудовано п'ятикоординатний фрезерний верстат Р1000 (рис. 1.7) німецької фірми Metrom Mechatronische Maschinen GmbH [170], на якому можна

здійснювати точіння, фрезерування в тому числі некруглих поверхонь обертання. Кінематичні характеристики таких верстатів розглянуті у [45, 112]. Основними недоліками слід вважати обмежену рухомість робочого органа та порівняно низьку жорсткість на краях робочої зони, обумовлені наявністю особливих положень [121, 122].



Рис. 1.7. Промисловий верстат P1000 фірми Metrom (Німеччина) [170]

Компанія Metrom Mechatronische Maschinen GmbH [170] також активно займається виготовленням верстатів для обробки композиційних матеріалів, виконавши модифікацію відомих технічних рішень для особливостей обробки композитів. Так, у [108] приведено аналіз верстатів для обробки великогабаритних виробів з композиційних матеріалів (рис. 1.8, 1.9). Автори вважають, що верстати для подібної обробки мають проектуватися, виходячи з наступних вимог (табл. 1.4).

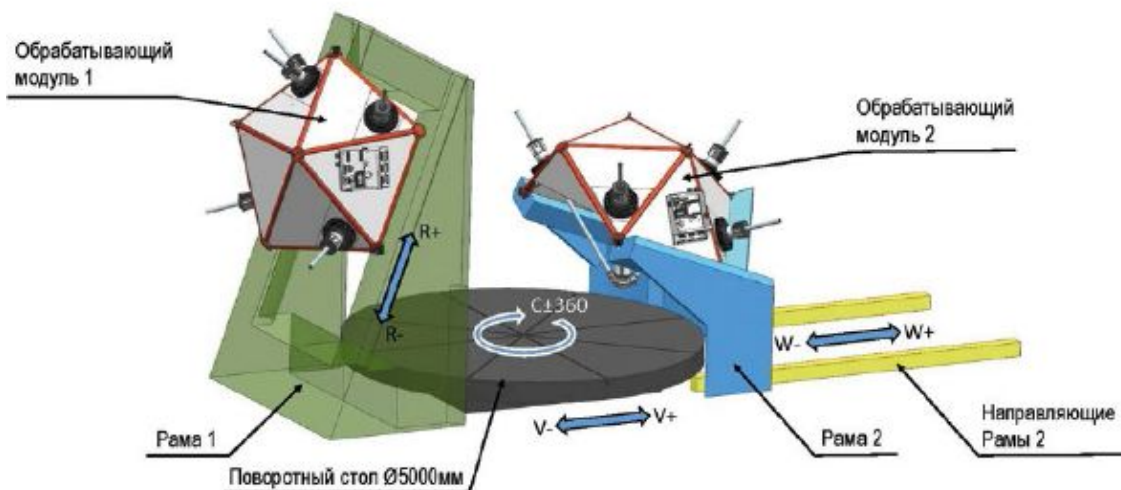
Таблиця 1.4 – Вимоги до верстатів для композиційних матеріалів [108]

Усунення пилу.	Оскільки при обробці композитних матеріалів утворюється велика кількість дрібних частинок, які можуть мати негативний вплив на точність обробки і відмовостійкість обладнання, необхідно подбати про те, щоб пил не порушував оптимальні умови експлуатації обладнання.
Охолодження.	Щоб матеріал не оплавився в місці різання або свердління, а сама матриця не змінила свої початкові властивості в результаті впливу високої температури, необхідно охолоджувати заготовки і різальний інструмент струменем води або повітря.
Відповідна конфігурація, кількість обертів і подача	Часто при лезовій обробці виникають такі дефекти, як розшарування матриці, поява в ній тріщин, непрорізання або висмикування волокон. Для запобігання цьому, а також мінімізації інших можливих дефектів, застосовують інструмент, який працює за принципом осьового високошвидкісного обертання від електроприводу. Це запобігає порушенню цілісності поверхні і внутрішньої руйнації в близьких до зрізу місцях.
Обробка виробів відразу по кількох осях.	Для багатоосьової обробки виробів необхідне обладнання, яке забезпечить високу точність. Це дозволить отримувати готовий до використання виріб відразу після проходження повного циклу на одному верстаті.

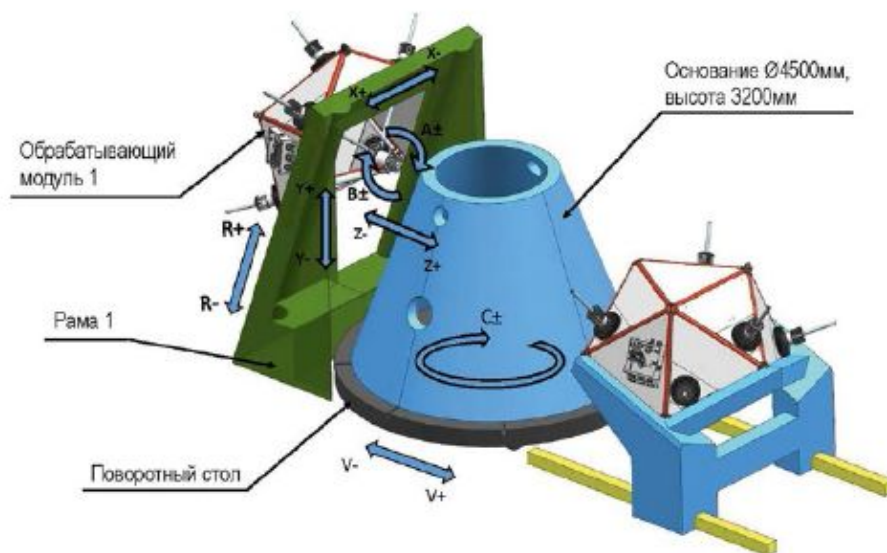


Рис. 1.8. Верстати Metrom для обробки габаритних виробів [108]

Схема расположения основных узлов обрабатывающего центра



Обработка изделия типа «кусечный конус»



Обработка изделия типа «кусечный эллипсоид вращения»

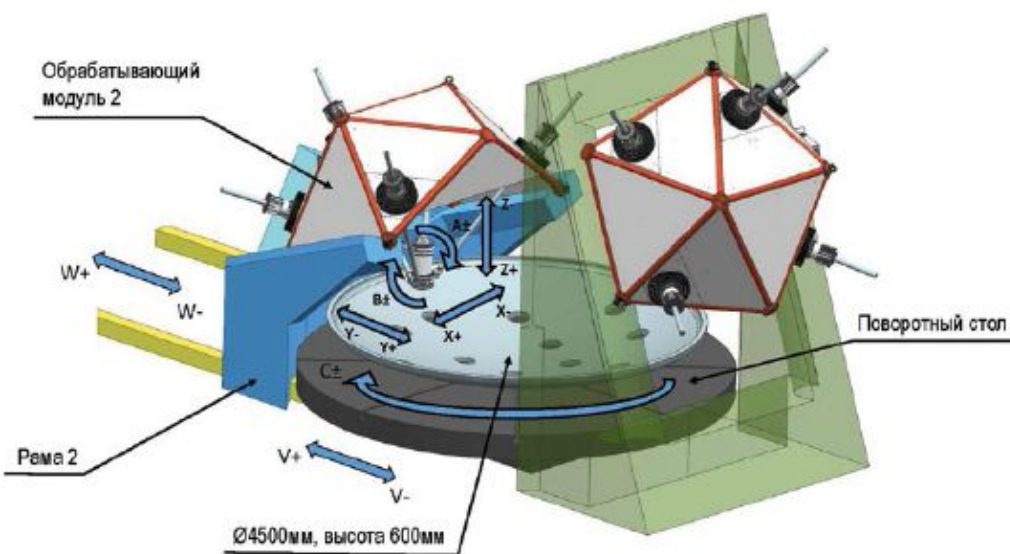


Рис. 1.9. Перспективный гнучкий обробний комплекс на основі мобільних 5-осьових верстатів METROM [108]

Абразивна обробка на верстатах із багатьма ступенями вільності розглядалася лише окремими авторами [191]. Однак, виходячи із потреб у створенні засобів для розкрійних операцій матеріалів КИМФ, такі роботи є актуальними та затребуваними.

Оскільки різання відрізними кругами на багатокоординатних верстатах передбачає послідовне виконання прямих різів (при певній компенсації похибок, пов'язаних із особливостями застосовуваних механізмів), актуальними при створенні верстатів є не тільки методи генерування нових конструктивних рішень [52], а і оцінка властивостей того чи іншого конструювання [35].

На жаль, традиційні механізми паралельної структури мають ряд недоліків, які перешкоджають їх широкому застосуванню у багатокоординатних верстатах. Основним з таких недоліків є обмеження робочого простору та кутів орієнтації робочого органа внаслідок виникнення особливих положень [118, 121, 138, 156, 167, 169, 179, 209, 210].

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування надлишкових механізмів паралельної структури, які потенційно дозволяють зменшити вплив особливих положень та принципово покращити характеристики робочого простору [123, 168, 174].

Надлишковість у механізмах паралельної структури можна розділити на два типи [144, 173]:

1. Надлишковість приводів – для заданого навантаження на робочий орган можлива нескінченна кількість комбінацій зусиль приводів. Кількість приводів більша, ніж кількість керованих ступенів вільності (координат). Сприяє підвищенню жорсткості механізмів.

2. Кінематична надлишковість – для заданого положення робочого органа можлива нескінченна кількість комбінацій положень приводів. Кількість приводів дорівнює кількості керованих ступенів вільності, але більша необхідної кількості керованих координат. «Зайві» ступені вільності

можна залишити вільними або використати для калібрування, управління затиском тощо [144].

Приклад розподілу шарнірів та додаткових ступенів вільності при їх використанні для управління затискним механізмом багатокоординатного маніпулятора наведено на рис. 1.10.

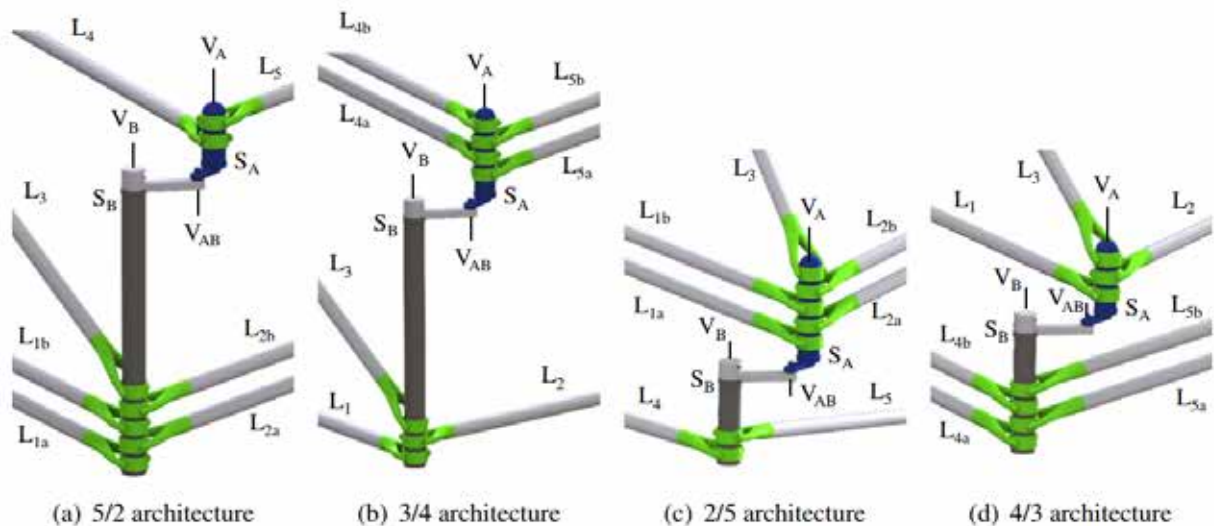


Рис. 1.10. Розподіл ступенів вільності у надлишковому механізмі [144]

Відома значна кількість зарубіжних досліджень, присвячених надлишковим механізмам паралельної структури [159, 168, 174, 157, 192, 206]. Показано, що надлишковість спрощує вирішення прямої задачі кінематики, дозволяє керувати формою еліпсоїдів статичної та динамічної маніпульованості [168]. Якщо розглядати надлишковий механізм паралельної структури як сукупність повнопаралельних механізмів, отриманих виключенням надлишкових ланок, для того, щоб надлишковий механізм знаходився у особливому положенні, необхідно, щоб усі такі механізми знаходились у особливих положеннях. Таким чином, надлишковість дозволяє ефективно усунути особливі положення у робочому просторі паралельних маніпуляторів [168].

Досить вичерпно досліджені прості плоскі надлишкові механізми, зокрема у [173] для маніпулятора 3RPR (рис. 1.11) встановлено, що використання надлишкової приводної ланки дозволяє кардинально

покращити маніпульованість у робочому просторі порівняно з двохланковим механізмом.

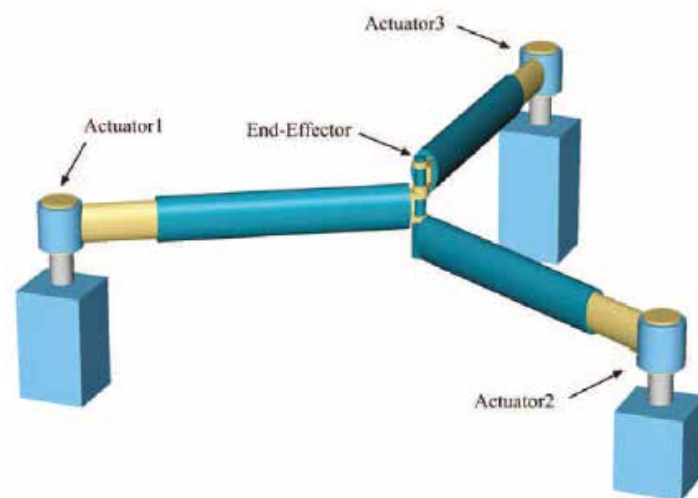


Рис. 1.11. Плоский надлишковий механізм паралельної структури [173]

Одним з найбільш розповсюджених застосувань для надлишкових механізмів є кабельні маніпулятори. Наприклад, у [111] показано, що для таких маніпуляторів (рис. 1.12) надлишковість приводів дозволяє підвищити жорсткість, забезпечити більш ефективне використання робочого простору.

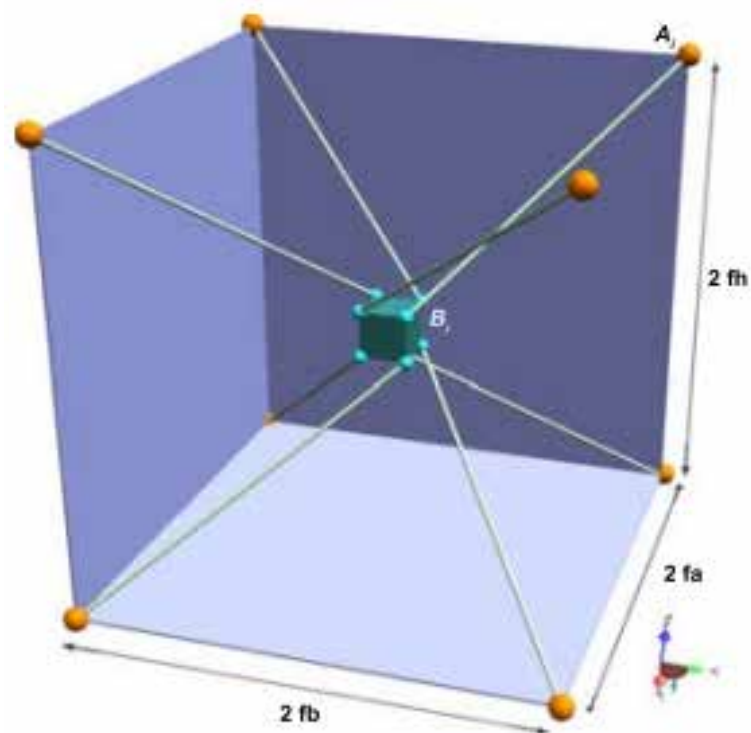


Рис. 1.12. Кабельний маніпулятор з 8 приводами [111]

На відміну від повнопаралельних механізмів, управління надлишковими маніпуляторами повинно здійснюватись за моментами приводів ланок з використанням доповнених пропорційно-диференціальних регуляторів [190], при цьому необхідно враховувати неточності виготовлення, які можуть призвести до виникнення значних напружень у просторовій структурі механізму [172]. Для врахування навантаження на робочий орган швидкісних надлишкових механізмів запропоновано використовувати адаптивне управління у подвійних координатах – приводів та робочого органа [188].

Відомі конструкції надлишкових механізмів паралельної структури: плоского 3-осьового ARCHI [162] з нескінченним обертанням навколо осі (рис. 1.13) та просторового 5-осьового EUREKA [152] з можливістю повороту $\pm 90^\circ$ навколо одної з осей та повороту на повний оберт навколо іншої (рис. 1.14). Недоліками обох механізмів є невисока жорсткість у одному або кількох напрямках.

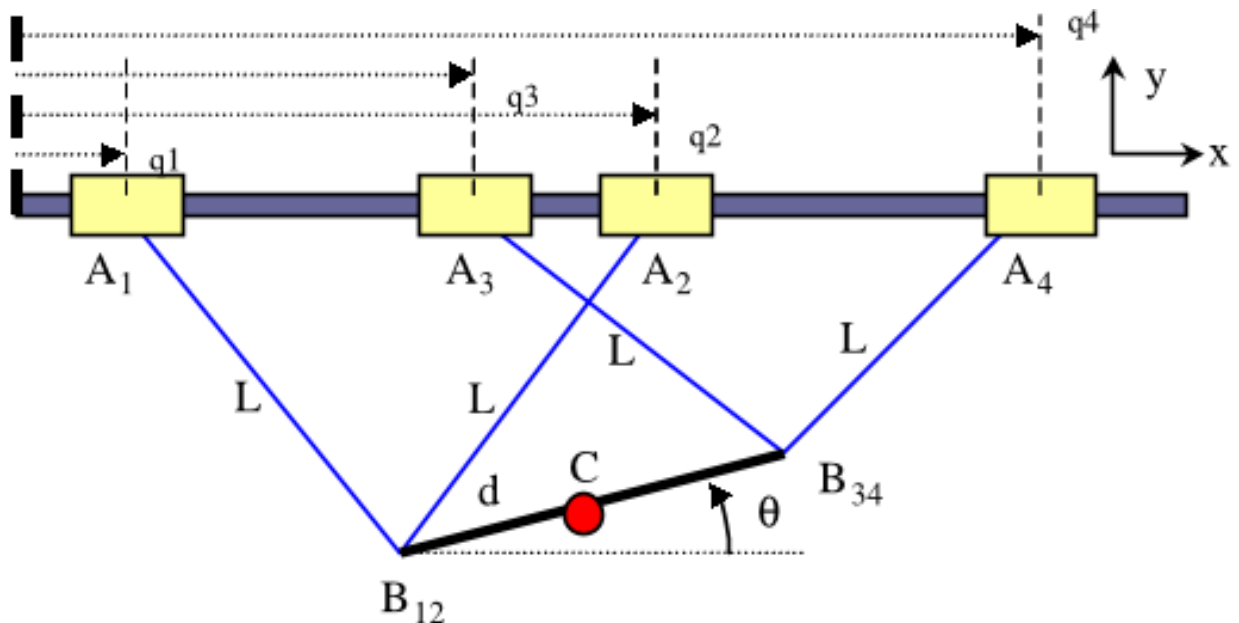


Рис. 1.13. Надлишковий механізм ARCHI [162]

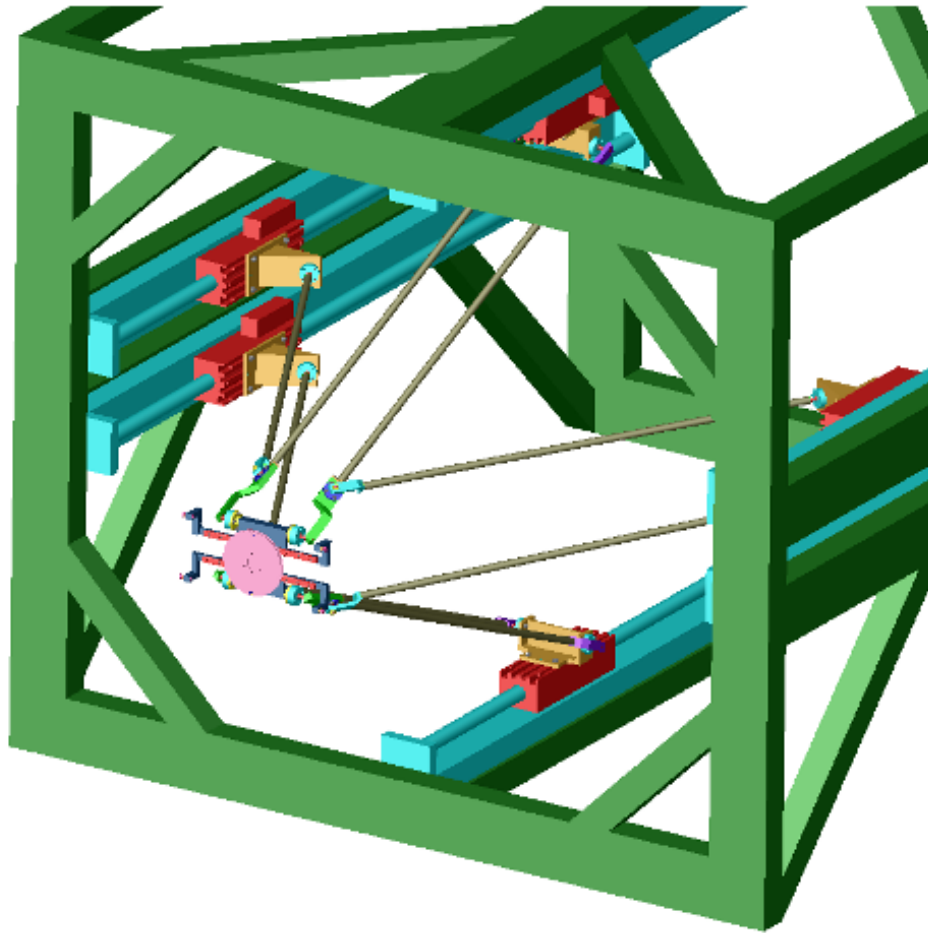


Рис. 1.14. Механізм Eureka [152]

Надлишкові механізми паралельної структури знайшли застосування й у верстатобудуванні. Одним з небагатьох дослідних верстатів, побудованих на основі маніпуляторів паралельної структури з надлишковими приводами, є Eclipse (рис. 1.15), розроблений у Сеульському національному університеті (Південна Корея) [184]. Використання 8 приводів для керування 6 ступенями вільності дозволяє позбавитись від особливих положень у робочому просторі, забезпечуючи можливість вільного переходу від вертикальної до горизонтальної орієнтації шпинделя. Недоліками верстата Eclipse є використання кільцевих напрямних, які мають високу вартість та ускладнюють калібрування, а також зміна жорсткості від 50 Н/мкм до 15 Н/мкм при переході від вертикальної до горизонтальної орієнтації робочого органа [148].

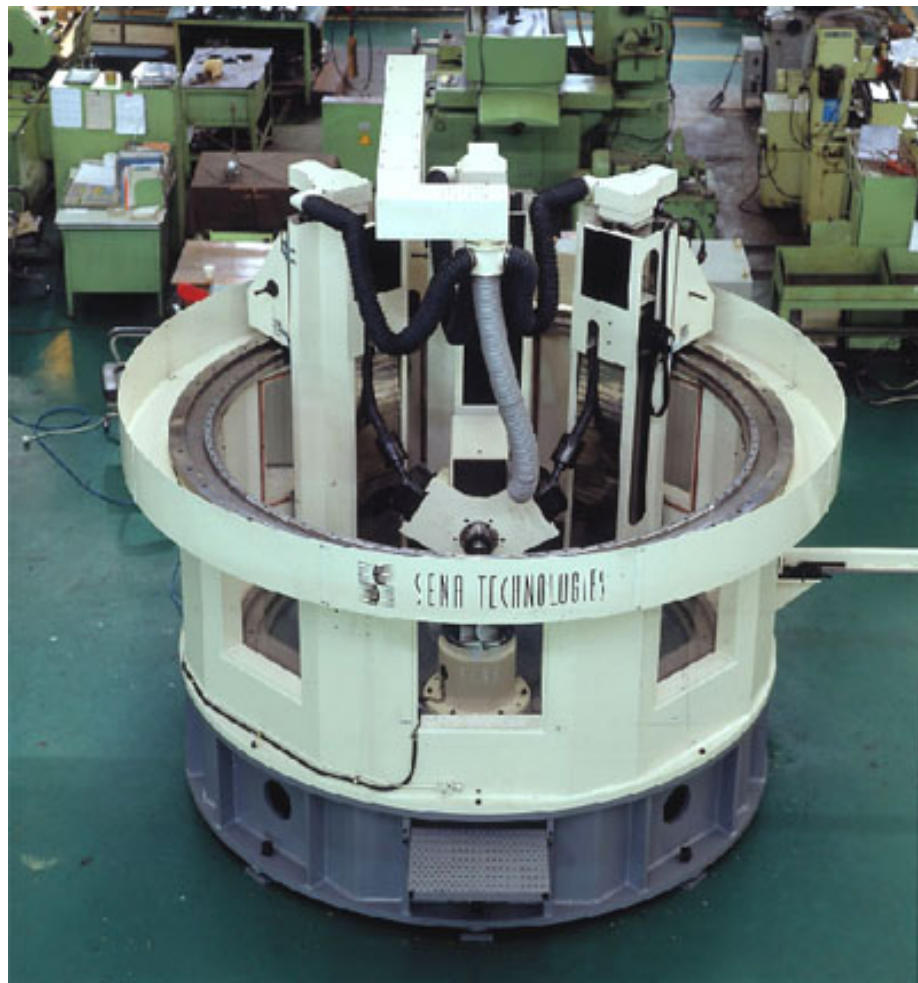


Рис. 1.15. Прототип верстата Eclipse (Південна Корея) [184]

Відомі розробки щодо застосування надлишкових приводних ланок для усунення особливих положень платформи Гауфа-Стюарта [123], проте дослідження надлишкових механізмів із робочим органом з спільною віссю шарнірних опор відсутні.

На рис. 1.16 приведено загальну кінематичну схему приводу переміщення вихідного органа верстата з шістьма штангами на основі механізму паралельної кінематичної структури.

Просторові механізмами паралельної структури мають складну нелінійну залежність між положенням приводів та робочого органа [167].

Для опису параметрів та характеристик обладнання з механізмами паралельної структури найчастіше використовуються вектори шостого порядку [92, 128]. Координати робочого органа представляють собою вектор узагальнених координат $\mathbf{X} = (x, y, z, j, y, q)^T$, який задає положення та

орієнтацію робочого органа, а координати приводів – вектор $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$, що містить переміщення кожного приводу.

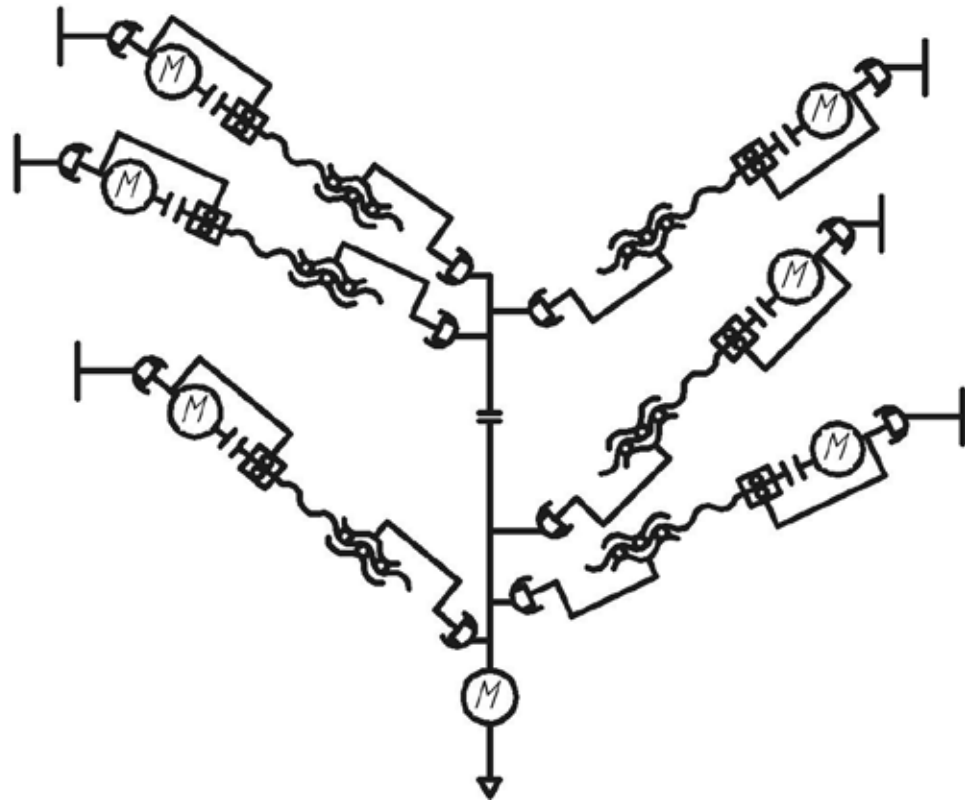


Рис. 1.16. Схема приводу переміщення вихідного органа верстата паралельної кінематичної структури

Тоді кінематичні залежності встановлюють співвідношення між координатами приводів Q та узагальненими координатами робочого органа X (пряма кінематика), а також співвідношення між узагальненими координатами робочого органа X та координатами приводів Q (зворотна кінематика).

Кінематичні залежності використовуються як для управління обладнанням з механізмами паралельної структури, так і для визначення його характеристик, таких як просторова жорсткість, робочий простір, динамічні властивості тощо [112, 113, 167].

Механічну систему будь-якого маніпулятора можна описати системою рівнянь кінематики і динаміки [35, 110, 167]. Оскільки в процесі роботи верстата необхідні положення його приводів будуть залежати від положення

робочого органа, то потрібні рівняння можна вивести на основі розв'язку зворотної задачі кінематики.

У багатьох роботах [149, 167] опис кінематики механізмів паралельної структури з орієнтацією ступенів рухомості виконують на основі кутів Ейлера: прецесії ψ , нутації θ і власного обертання φ .

У [167] показано, що кінематика може описуватись наступними рівняннями:

$$l_i = l_i(\varphi_1, \varphi_2) = \sqrt{\sum (A_{i,j} - [B_{i,j}])^2}, \quad j = 1, 2, 3, \dots, \quad (1.1)$$

де $A_{i,j}, [B_{i,j}]$ – величини, що визначаються координатами кінців штанг; $l_i(\varphi_1, \varphi_2)$ – довжини рухомих штанг; φ_1, φ_2 – кути Ейлера, що визначають розташування платформи відносно основи.

Для розробки та проектування верстатів паралельної структури необхідно мати показники ефективності, за якими можна проводити оцінку та порівняння схем, компоновок та конструкцій верстатів.

У якості критеріїв оцінки властивостей компоновок багатокоординатних верстатів Заблонський К.І. [28], Івахненко А.Г. [31], Кобринський А.А. [49], Козлов В.В. [50], Пашкевич А.П. [69], Пейсах Е.Е. [70] та інші пропонують математичні моделі, критерії якості та алгоритми оптимізації для початкових етапів проектування, які включають: загальні критерії, математичні критерії оцінки якості верстата орієнтувати інструмент в просторі, практичні критерії [153].

В якості критеріїв оцінки компоновок верстатів у [49, 69] розглянуті мобільність, точність, податливість, керованість, кут сервісу, коефіцієнт сервісу.

Маніпулятивність представлена кутом сервісу, що визначається як тілесний кут ψ (\bar{r}, \bar{p}), та як зона сервісу або зона обслуговування, максимальне значення якого 4π , що має в певній точці простору виконавчий механізм, який надає інструменту задану орієнтацію [49, 69]. Характеристика

багатоланкового виконавчого механізму являє собою коефіцієнт сервісу у вигляді співвідношення кута сервісу до повного тілесного кута:

$$k_s(\bar{r}, \bar{p}) = \frac{\Psi(\bar{r}, \bar{p})}{4\pi}, \quad (1.2)$$

де $k_s(\bar{r}, \bar{p})$ – коефіцієнт сервісу; $\Psi(\bar{r}, \bar{p})$ – тілесний кут; 4π – максимальне значення кута сервісу.

Коефіцієнт поверхневого сервісу [49, 69], при якому розглядається виключно частина тілесного кута сервісу:

$$k_s(\bar{r}, \bar{p}) = \frac{\Psi(\bar{r}, \bar{p})}{2\pi}. \quad (1.3)$$

Критерій мобільності можна визначити наступними методами:

- за допомогою багатогранника допустимих швидкостей [49];
- як образ у просторі декартових швидкостей із простору узагальнених швидкостей [204, 205];
- за допомогою нормалізованої матриці Якобі [143].

Одною з основних характеристик верстатів є просторова жорсткість, що характеризується матрицею просторової жорсткості, яка встановлює співвідношення між узагальненим навантаженням та викликаним ним узагальненим переміщенням [34, 167].

Якщо навантаження на робочий орган механізму має вигляд

шестивимірному вектору $\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{\tau} \end{pmatrix}$, де $\mathbf{f} = (P_x, P_y, P_z)^T$ – вектор сил,

$\mathbf{\tau} = (M_x, M_y, M_z)^T$ – вектор моментів, а узагальнене переміщення –

шестивимірним вектором $\Delta \mathbf{X} = \begin{pmatrix} \mathbf{D}\mathbf{r} \\ \mathbf{D}\mathbf{\theta} \end{pmatrix}$, де $\mathbf{D}\mathbf{r} = (D_x, D_y, D_z)^T$ – вектор малих

лінійних переміщень, $\mathbf{D}\mathbf{\theta} = (Dq_x, Dq_y, Dq_z)^T$ – вектор малих поворотів

рухомого тіла, матриця просторової жорсткості K визначає співвідношення між ними

$$\mathbf{W} = K\Delta \mathbf{X}. \quad (1.4)$$

Просторову жорсткість механізмів паралельної структури розглянуто у багатьох роботах [34, 35, 95, 125, 139, 193, 198].

У [34] показано, що робочий орган просторових механізмів, в тому числі паралельної структури, можна розглядати як тверде тіло, з'єднане з основою пружними ланками у вигляді лінійних та крутильних пружин (рис. 1.17), які передають відповідно силу або момент.

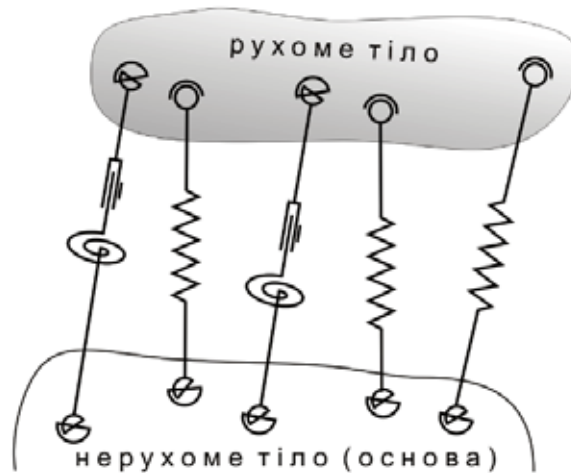


Рис. 1.17. Жорсткість узагальненого просторового механізму [34]

Тоді матриця жорсткості ланки, яка розглядається як лінійна пружина, дорівнює [34]

$$K_o = k_n \mathbf{N}_o \mathbf{N}_o^T, \quad (1.5)$$

матриця жорсткості ланки, яка розглядається як крутильна пружина

$$K_o = k_k \mathbf{N}_k \mathbf{N}_k^T, \quad (1.6)$$

а матриця жорсткості системи з n ланок дорівнює сумі матриць жорсткості усіх окремих ланок

$$K_o = \mathop{\mathbf{a}}_{i=1}^n K_{oi}. \quad (1.7)$$

У роботах Д. Часкаров [124-126] окреслено шляхи до синтезу механізмів паралельної структури із необхідною просторовою жорсткістю, яка оцінюється за напрямками осей орієнтації еліпсоїдів жорсткості та податливості.

Динаміка механізмів паралельної структури визначається рівняннями руху узагальненої системи тіл [35, 128]. Зокрема, диференційне рівняння динаміки вихідної ланки механізму паралельної структури (рис. 1.18) можна представити наступним чином

$$M \ddot{\mathbf{X}} + D \dot{\mathbf{X}} + K \mathbf{X} = \mathbf{W}, \quad (1.8)$$

де M – матриця інерції платформи 6×6 , D – матриця демпфування 6×6 , K – матриця жорсткості 6×6 , \mathbf{X} – вектор 6×1 узагальненого положення робочого органа, \mathbf{W} – вектор 6×1 узагальненого навантаження.

Матриця інерції 6×6 має вигляд [35]

$$M = \begin{pmatrix} \hat{e} m_{\pi} E & 0 \\ \hat{e} & 0 \\ 0 & I_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{u}} \end{pmatrix}, \quad (1.9)$$

де m_{π} – маса рухомої платформи, I_0 – тензор моментів інерції рухомої платформи у нерухомій системі координат основи.

Матриця демпфування може бути визначена з використанням матриці D_q , яка містить коефіцієнти демпфування штанг із шарнірними опорами [35]

$$D = J^T D_q J. \quad (1.10)$$

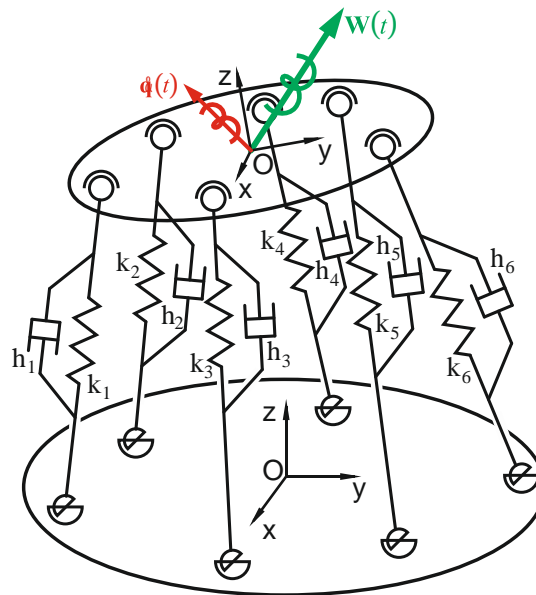


Рис. 1.18. Схема вихідної ланки механізму паралельної структури [35]

У [33, 35] розглянуто динаміку штанги змінної довжини і рухомої платформи верстата паралельної структури на основі платформи Стюарта (методом Ньютона-Ейлера) та виконане моделювання за допомогою програмного комплексу Simulink, встановлено, що траєкторії коливань полюсу рухомої платформи концентруються навколо напрямків осей динамічної податливості механізму паралельної структури.

Розглянуті вище методи кінематичного та динамічного аналізу та синтезу просторової жорсткості можна використати для розробки верстата на основі механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю для підвищення просторової жорсткості та динамічних властивостей з одночасним розширенням можливості орієнтації робочого органа.

1.5. Мета і задачі роботи

Виконаний огляд наукових джерел та вивчення стану питання ефективності різання карбон-карбонових матеріалів з метою отримання проміжних або кінцевих заготовок для використання у передових наукоємних галузях свідчить, що розрізання заготовок дисковим абразивовмісним інструментом (сполученим абразивом) є перспективним методом обробки, подальше підвищення ефективності якої вбачається не тільки в розробці нового інструментального забезпечення, а й в удосконаленні обробного обладнання, зокрема, верстатів нових компоновань (як машин із паралельними кінематичними ланцюгами). Зазначені верстати мають очевидні переваги перед верстатами традиційного компоновання, що і обумовлює необхідність їх подальшого дослідження і удосконалення.

Перш за все мова йде про те, що для обробки армованих матеріалів велике значення набуває точне орієнтування різального інструменту відносно армувальних волокон, що найбільш просто реалізовується саме на верстатах, які мають паралельні кінематичні ланцюги. Однак існуючі технічні рішення,

призначені для орієнтування у просторі чи в площині робочого органа, потребують доопрацювання, оскільки не володіють стабільними характеристиками жорсткості у площині обробки, а не жорсткість і самого різального інструменту накладає додаткові обмеження на процес різання.

Тож саме за рахунок удосконалення важільної системи та використання надлишкових приводів можливе підвищення жорсткості технологічної обробної системи, що разом із створенням раціональних умов протікання процесів абразивного руйнування нещільного матеріалу в зоні обробки дозволить підвищити якість обробки та забезпечити її ефективність.

Таким чином, метою досліджень є підвищення якості розрізання карбон-карбонових заготовок на основі встановлення закономірностей формування поверхневого шару при впливі абразивним інструментом за рахунок забезпечення раціональних умов динамічного контакту маніпуляційною системою верстата паралельної структури.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати аналіз особливостей абразивного різання композиційних матеріалів, встановити вимоги до абразивного інструмента та обробного обладнання, обґрунтувати доцільність використання верстатів паралельної структури для здійснення операцій розрізання;

- розробити фізичну та побудувати математичну модель взаємодії скріплених абразивних частинок із нещільним напівпростором, що відповідає структурі карбон-карбонових матеріалів;

- ідентифікувати модель, визначити раціональні умови формування плями динамічного контакту, що обумовлює формування показників якості обробки;

- сформулювати вимоги до пружних властивостей несучої системи, виконати аналіз компоновок і технологічних можливостей верстатів паралельної структури;

– запропонувати нове технічне рішення маніпуляційної системи верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю, виконати теоретичне дослідження його вихідних параметрів;

– розробити методику ідентифікації моделі взаємодії інструменту із заготовкою та провести експериментальні дослідження запропонованого технічного рішення.

З приведеної точки зору *об'єктом дослідження* є процес обробки карбон-карбонівих заготовок абразивним інструментом на верстаті паралельної структури, а *предметом дослідження* – якість та стабільність процесу обробки карбон-карбонівих заготовок абразивним інструментом на верстаті паралельної структури.

В процесі досліджень міркування, висновки та узагальнення планується здійснювати на базі основних положень теорії тепло- та масопереносу, теорії пружності та пластичності, теорії проектування металорізального обладнання, кваліметрії, векторної алгебри, теорії ймовірності та математичної статистики. До експериментальних досліджень планується залучення растрової електронної мікроскопії, пірометрії, засобів автоматичної фіксації вимірюваних величин.

2. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ІНТЕНСИВНОСТІ ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ У ЗОНІ МЕХАНІЧНОГО ВПЛИВУ

2.1. Використовуване обладнання та вимірювальні пристрої

Проведено комплекс експериментальних досліджень, спрямованих на виявлення особливостей формування поверхневого шару при дії абразивного інструменту з алмазоносним шаром, виявлено умови ефективного використання такого інструменту на верстатах із надлишковими приводами та паралельними кінематичними ланцюгами.

Для доведення теоретичних посилок стосовно впливу параметрів зони контакту на ефективність та якість отриманого поверхневого шару при обробці матеріалів типу КИМФ абразивовмісним інструментом та встановлення теплового режиму скористалися відрізним верстатом FDB Maschinen GYQ400B / 220 (рис. 2.1); обробку виконували алмазним кругом марки 400 H15 60 VICTORY ST зернистістю 25/50 мкм з різною кількістю зерен на периферії (для досліджень використовували 6 кругів різної щільності, діаметр кругів 115 x 22,23 мм); дослідження поверхневого шару, а також вивчення одержуваного шламу виконувалося на растровому електронному мікроскопі PEM-106-I (рис. 2.2); зразки готувалися з карбон-карбонівих матеріалів регулярного плетіння; різання здійснювали з режимами, рекомендованими виробником інструменту для обробки каменю. Температуру в зоні різання вимірювали пірометром Maurer Digital Infrared-Pyrometer Series KTRD 1065 (рис. 2.3), обробку результатів проводили з використанням спеціального програмного забезпечення Maurer Software IR-LOG. Сили різання в зоні контакту визначали за допомогою тензOMETричного перетворювача ZEMIC BM3-C3-0,2-3B, підключеного до АЦП m-DAQ з роздільною здатністю 2,0 Н і записом в файл EOM.



Рис. 2.1. Верстат для тестового різання заготовок із карбону
FDB Maschinen GYQ400B

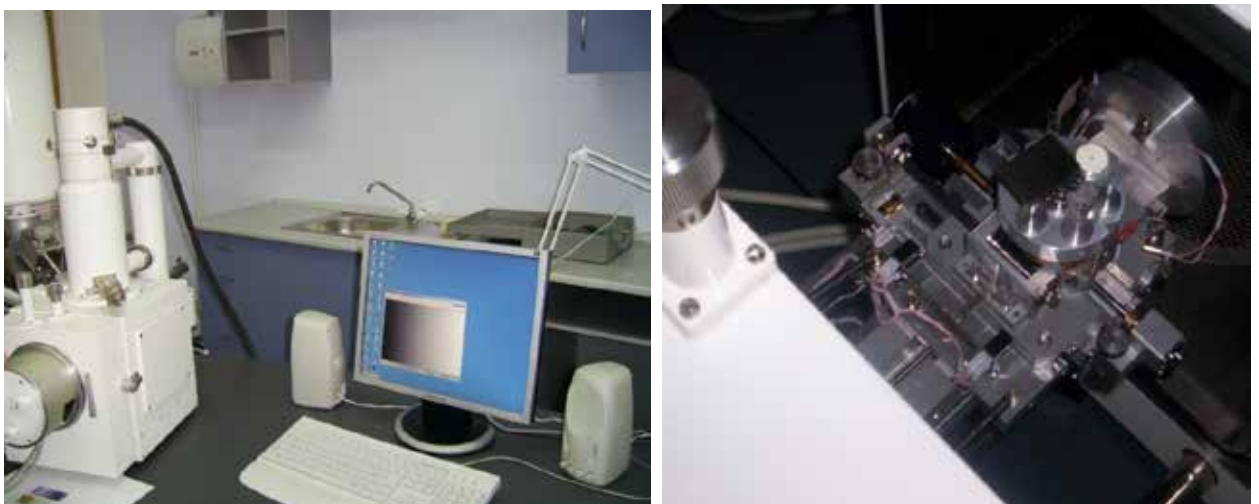


Рис. 2.2. Растровий електронний мікроскоп РЕМ-106-І



а)

б)

Рис. 2.3. Пірометричний комплекс для визначення температури в зоні різання при обробці нещільних матеріалів:
а) загальний вигляд; б) досліджуваний зразок

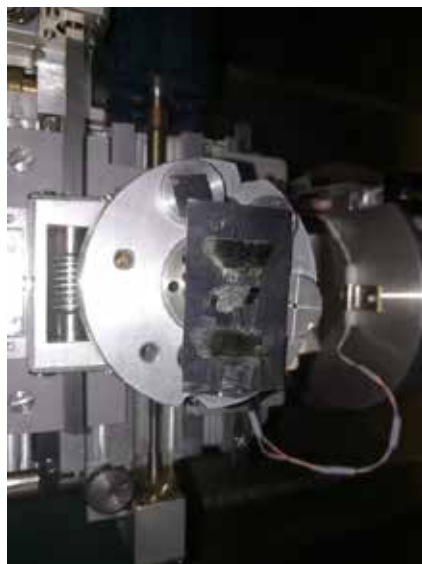
Визначення впливу ступеня забруднення поверхневого шару інструменту здійснювали шляхом зважування зразків прецизійними вагами типу RADWAG із поділкою 0,0001 г та межею визначення ваги до 150,000 г (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Ваги типу RADWAG для зважування зразків до та після обробки тестових матеріалів

Перевіряли також і утворений шлам. Вивчення дисперсності та виду отриманого при абразивному різанні шламу виконували засобами растрової мікроелектронної мікроскопії.

З цією метою після обробки заготовок були підготовлені препарати для мікроелектронного дослідження як отримуваних поверхонь, так і шламу матеріалу (мікростружки) після обробки. Зразки були наклеєні на струмопровідну фольгу (рис. 2.5,а) та витримані при температуру $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ у вакуумній камері ВУП-5 (рис. 2.5,б) на низькому вакуумі (1,0-2,0 Па) протягом 12 год. Після цього зразки встановлювали на предметний столик мікроскопа, забезпечуючи надійний електричний контакт для відведення електронного потенціалу з предметного столику.



а)



б)

Рис. 2.5. Підготовлені препарати (а) та вакуумний універсальний пост ВУП-5 (б), в якому здійснюється просушування зразків

У зв'язку із інертністю забруднення (карбонового шламу) вилучення останнього із поверхневого шару здійснювали гідроструменевим очищенням, із використанням струменя рідини надвисокого тиску, чим досягалася висока ступінь очищення із одночасним збереженням цілісності алмазовмісного шару. Використовувалося обладнання ГАР-400-5 (рис. 2.6).

Для встановлення умов використання абразивного інструменту на верстатах із паралельними кінематичними структурами на основі запропонованого нового технічного рішення створено дослідний маніпулятор із надлишковими приводами, з регульованими штангами та змінними динамічними параметрами. Проведено його ідентифікацію, визначено параметри робочого простору, встановлено параметри жорсткості важільної системи, що дозволило підтвердити результати отримані при теоретичних дослідженнях, та запропонувати методику прогнозування раціональних умов обробки нещільних карбоновмісних матеріалів такими робочими машинами.



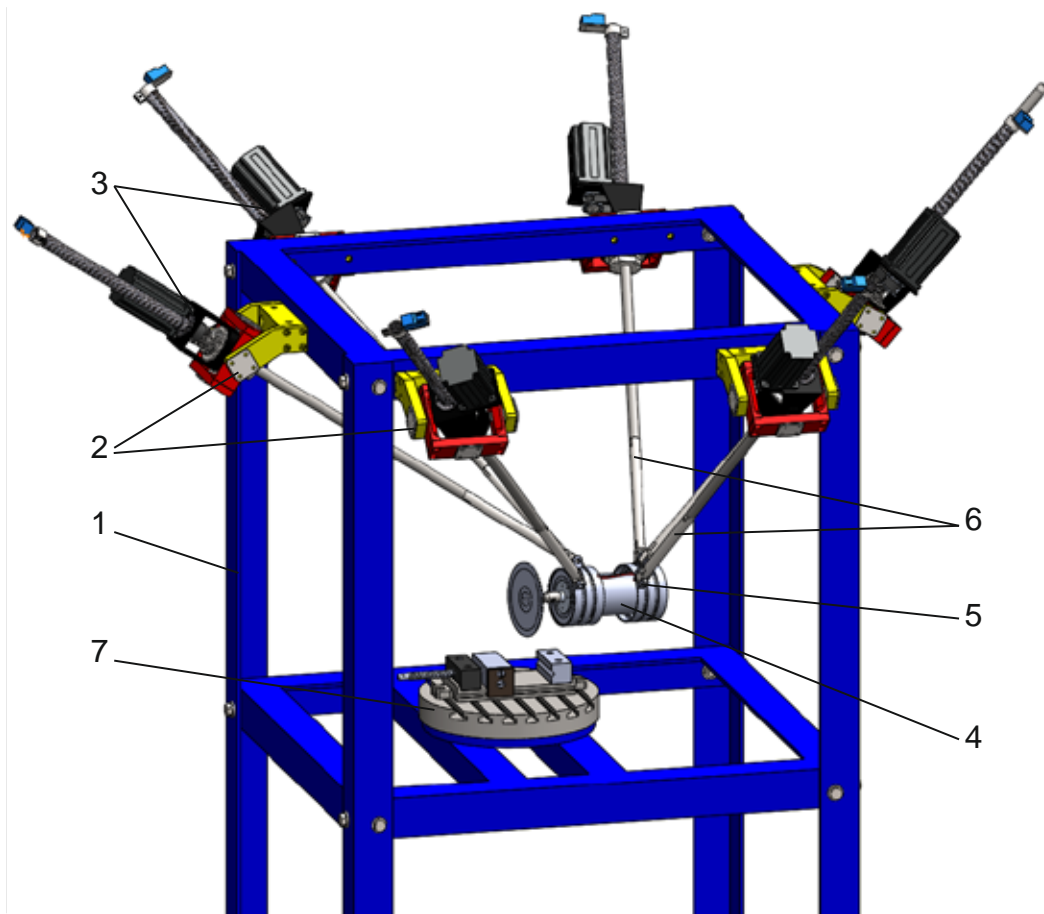
Рис. 2.6. Гідроструменевий комплекс ГАР-400-5

Розроблену модель дослідного зразка верстата на основі механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю наведено на рис. 2.7.

Верстат складається з основи, на якій розміщено шість карданних підвісів з штангами змінної довжини. Іншим кінцем кожна штанга прикріплена до робочого органу через шарніри таким чином, що вісь кожної штанги проходить через вісь робочого органу.

Характерною особливістю верстата є те, що робочий орган здатен повертатися на кут більше 90° відносно одної з осей. Це дає можливість здійснювати обробку заготовок при розміщенні робочого органу як у

горизонтальному, так і у вертикальному положеннях, що суттєво збільшує сферу застосування даного прототипу верстата паралельної структури з шістьма штангами.



1 – основа; 2 – шарнірні опори; 3 – приводи; 4 – робочий орган;
5 – шарнірні опори; 6 – штанги змінної довжини; 7 – стіл

Рис. 2.7. Модель дослідного зразка верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю

Виготовлений робочий орган верстата показаний на рис. 2.8. Робочий орган містить безколекторний мотор-шпиндель типу WS55-220 з драйвером (рис. 2.9). Максимальна частота обертання шпинделя 12000 хв^{-1} , потужність 500 Вт, зовнішній діаметр 55 мм, цанга для закріплення інструмента ER11, напруга живлення шпинделя 48 В, драйвера 220 В. Мотор-шпиндель співвісно закріплений у трубі, на якій встановлені 6 кілець шарнірних опор робочого органа з різьбовим під'єднанням для штанг змінної довжини (рис. 2.8).

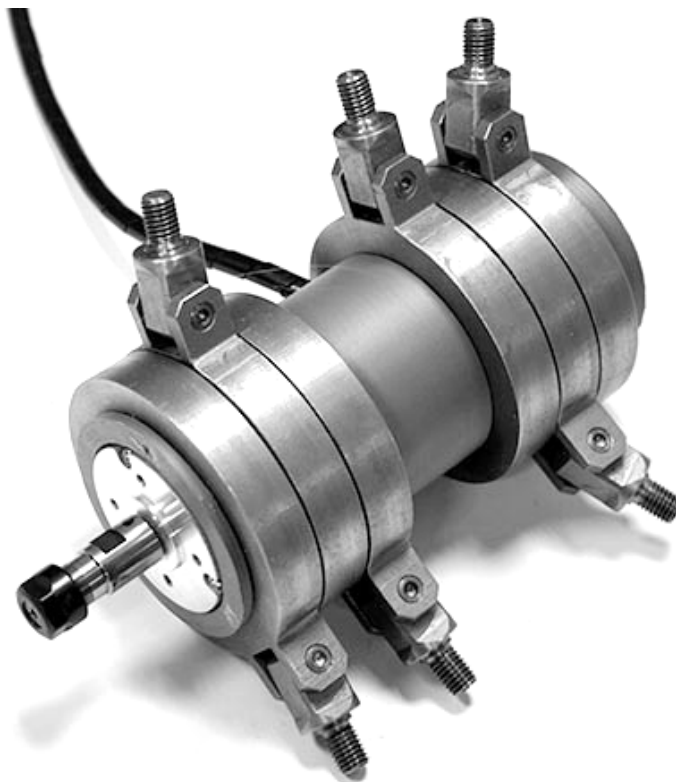


Рис. 2.8. Робочий орган



Рис. 2.9. Мотор-шпиндель

Штанга змінної довжини складається з кулькогвинтової передачі з гайкою SFU1610, до гвинта якої закріплено подовжувач-перехідник, що з'єднується із шарніром робочого органа (рис. 2.10). Зовнішній діаметр гвинта 16 мм, хід гвинтової канавки 10 мм.

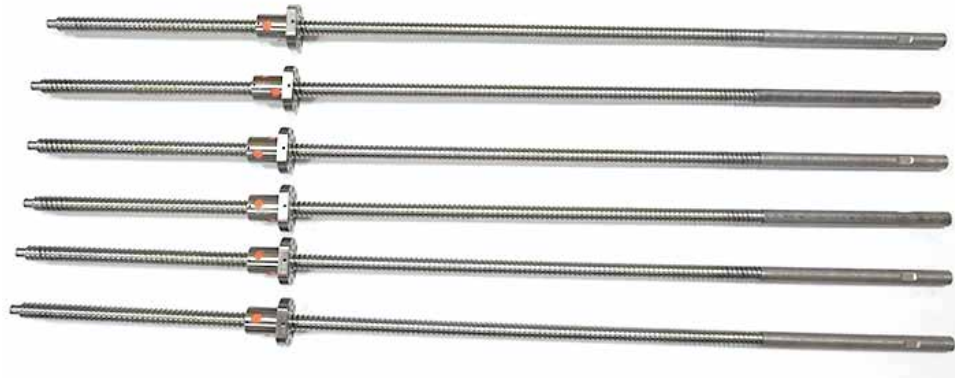


Рис. 2.10. Штанги змінної довжини

Привід штанги змінної довжини конструктивно об'єднано у вузол з шарнірною опорою нерухою основи верстата (рис. 2.11).

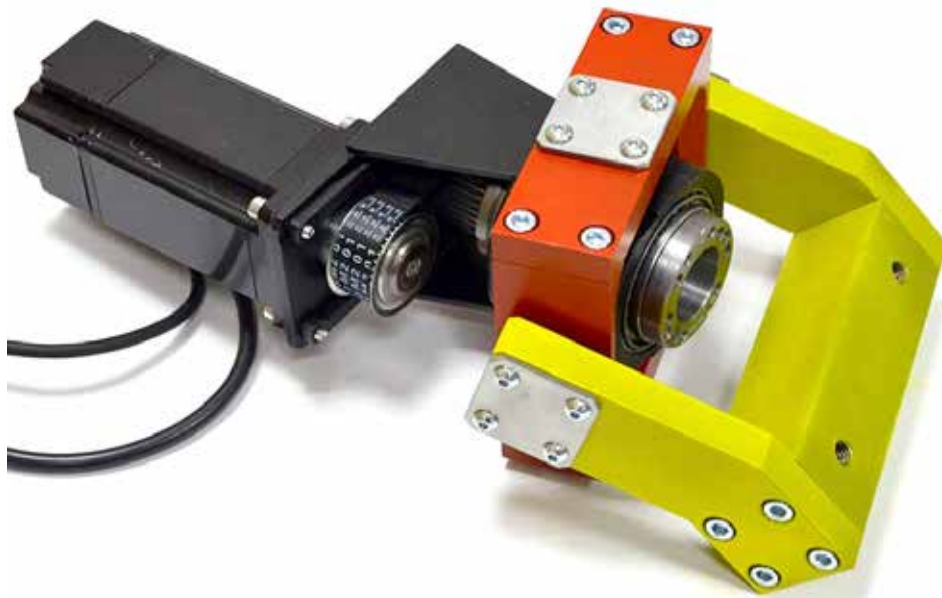


Рис. 2.11. Шарнір з приводом зміни довжини штанги

Привід містить пристрій типу «обертюва гайка», який складається з гільзи із нарізаним зубчастим шківом, яка встановлена у корпусі з можливістю обертання у двох роликових радіально-упорних підшипниках та містить приєднувальні поверхні для гайки кулькогвинтової передачі. Корпус містить штифти, які входять у голкові підшипники внутрішнього кільця шарнірної опори, у якості яких використані підшипники карданної хрестовини автомобіля ВАЗ. Аналогічні штифти закріплені і на кільці шарнірної опори, які входять до голкових підшипників опорної вилки

шарніру. Гільза з гайкою приводиться до руху від електродвигуна SGMAH-04A через зубчасто-пасову передачу типу HTD-3М з шківками 36 зубів (1:1).

Двигун SGMAH-04A має наступні параметри: номінальна частота обертання 3000 хв^{-1} , номінальний момент 1,27 Н·м.

Загальний вигляд дослідного зразка верстата показаний на рис. 2.12, а шпинделя із встановленим інструментом – на рис. 2.13.

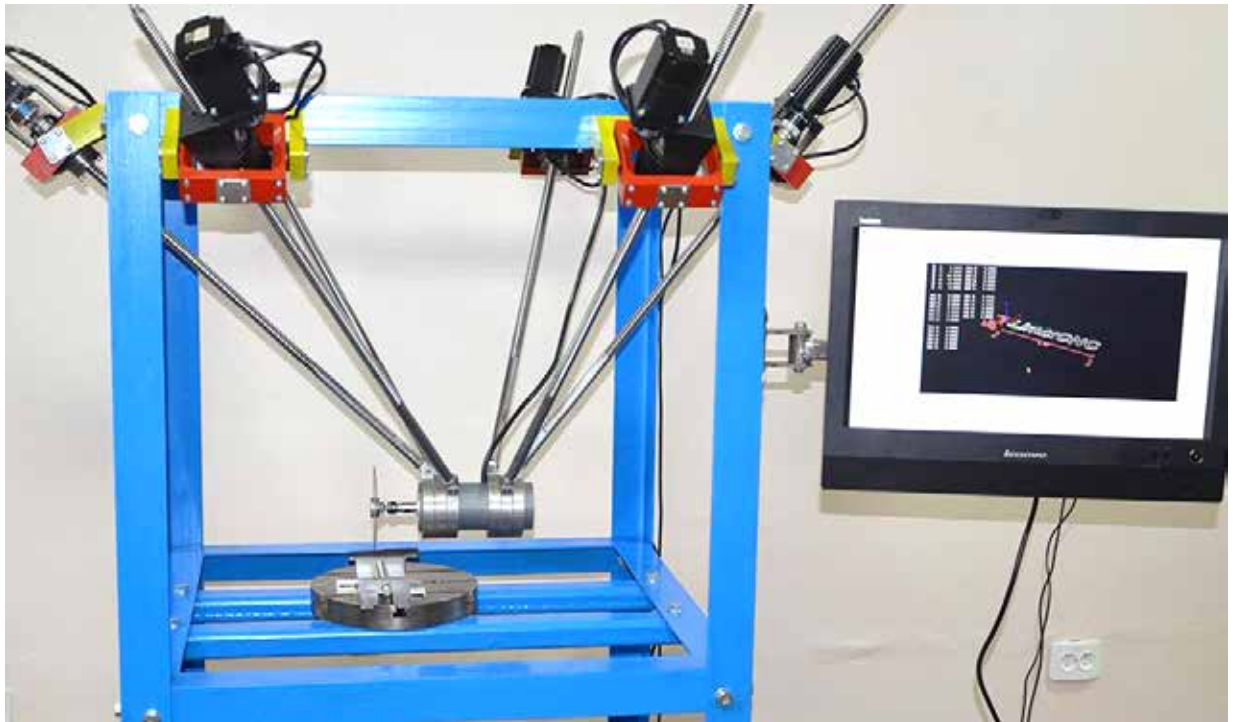
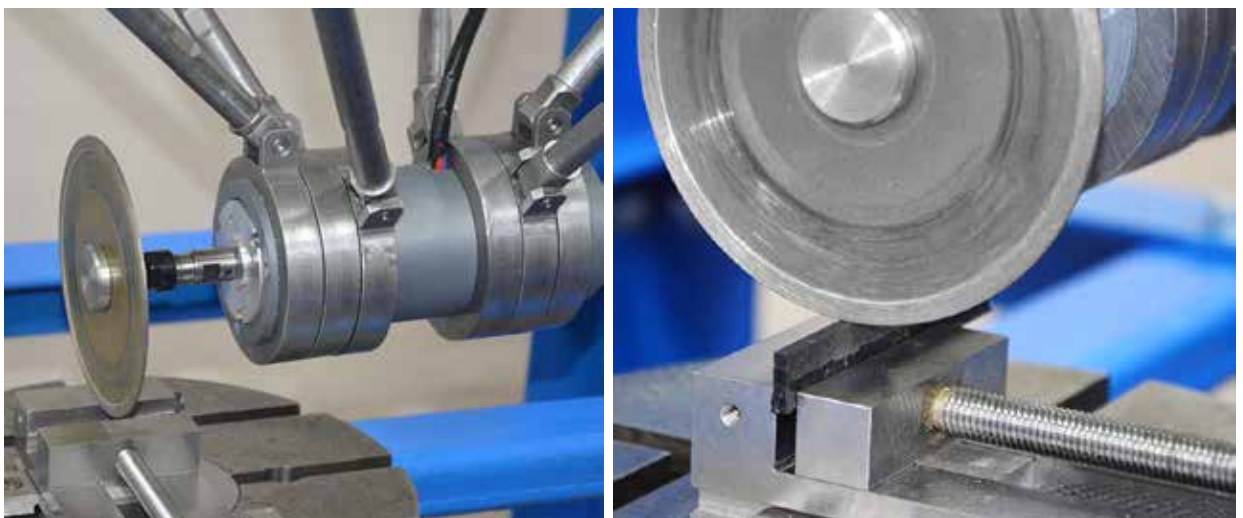


Рис. 2.12. Загальний вигляд дослідного зразка верстата



а)

б)

Рис. 2.13. Робочий орган з абразивним кругом у шпинделі (а) та оброблювана заготовка у лещатах (б)

Для вимірювання пружних переміщень шпинделя верстата застосовано індикатори годинникового типу ИЧ-10, закріплені у штативах на столі дослідного зразка верстата (рис. 2.14).



Рис. 2.14. Вимірювання пружних деформацій просторової несучої системи верстата

Для вимірювання величини силового навантаження, прикладеного до робочого органа, застосовано електронні ваги з діапазоном вимірювання 0-50 кг і роздільною здатністю 0,01 кг.

2.2. Методика досліджень та послідовність виконання експериментів

Відповідно до ідей і гіпотез досліджень, ефективність обробки матеріалів типу КИМФ на верстатах із паралельними кінематичними ланцюгами визначається термо-силовим навантаженням зони контакту при обробці абразивним інструментом. Останнє залежить від кількох чинників: від профіля поверхні круга, зокрема, від висоти виступу абразивних зерен над периферією δ та кількості зерен n ; від ступеня забруднення поверхні круга ψ (коли пляма контакту різко збільшується і починає активно проявлятися тепловиділення від тертя по торцю і боковим поверхням); від швидкості робочої подачі s , яка безпосередньо визначає умови стійкості

інструменту та динамічні явища, що протікають при різанні, тобто силу різання $P_p = f(b_j, c_j, \alpha, t)$.

При цьому будемо виходити з того, що при абразивному руйнуванні поверхневого шару, яке відбувається за рахунок контакту одиничного зерна із матеріалом, площа безпосереднього контакту визначиться на основі пружної взаємодії елементів технологічної системи, однак в міру зниження продуктивності обробки (визначається обсягом зйому матеріалу за одиницю часу W_r , причому $W_r = t_f b s_r$, s_r – швидкість робочої подачі, b – ширина кругу) при попередніх режимах обробки невилучений матеріал збільшить контактний тиск (і площу контакту). Дійсно, нехай зерно, рухаючись в масиві матеріалу, здійснює роботу руйнування на довжині контакту l_p . При цьому вважатимемо, що форма штриха відповідає формі виступаючої частини зерна, яку уявлятимемо у вигляді напівсфери висотою y . Тоді об'ємний зйом матеріалу складе

$$W_r' = \frac{\pi \psi^2}{2} l_p n, \quad (2.1)$$

а різниця в обсязі зменшить t_f в рівнянні

$$t_f = t_z - (x_k + x_d), \quad (2.2)$$

з одночасним зростанням пружних деформацій (і, відповідно, сили F у місці контакту. Таким чином, $R_x = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} (x_k + x_d) = F$, що дозволяє за величиною фактично знятого шару визначити умови контакту в зоні різання.

Так, зважаючи на рівняння (3.2) температура на поверхні диску за умови нехтування складовими відведення тепла (3.1) при малому часі спостереження, визначатиметься

$$T_0(t) = \frac{2fpv\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T}, \quad (2.3)$$

або з урахуванням того, що тиск визначатиметься із сили F , віднесеної до площі контакту s , матимемо:

$$T_0(t) = \frac{2fFv\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T s},$$

тобто

$$s_i = \frac{2fFv\sqrt{\alpha_T t}}{T_0(t)\lambda_T}, \quad (2.4)$$

де плинний час t визначається від початку контакту інструменту із заготовкою, F та $T_0(t)$ вимірюються за допомогою відповідних приладів, інші параметри рівняння (2.4) є відомими константами.

У (2.4) сила F являтиме собою сумарну силу, що виникає на периферії та на бічних поверхнях, а площа контакту – сумарну площу по усім трьом поверхням.

Відповідно до розрахункової схеми рис. 2.2. теоретична повна площа контакту змінюватиметься з плинном часу, оскільки внаслідок робочої подачі круг занурюватиметься у оброблюване тіло. Іншими словами,

$$s_s = s_b + S = \frac{R_1^2(\alpha - \sin(\alpha))}{2} + bl. \quad (2.5)$$

Якщо б зміни поверхні круга не відбувалося, тобто шлам не змінював профілю поверхні, температура круга відповідала б підведеній потужності, без зростання із зміною площі контакту.

При цьому виникаючій шлам обсягом W_s частково потрапляє у пори матеріалу (W_r), частково – на поверхню інструменту (W_i), частково видаляється потоком повітря (W_p):

$$W_s = W_p + W_r + W_i. \quad (2.6)$$

Теоретичний обсяг

$$W_s = f(t) = \left[\frac{R_1^2(\alpha - \sin(\alpha))}{4} + vt \right] l\vartheta,$$

де ϑ – щільність матеріалу (оскільки вважаємо, що оброблюване середовище не є щільним), у то й час як на поверхню інструменту (при припущенні, що залипання може відбуватися як на торцях, так і на периферії круга) може потрапити

$$W_i^{max} = 3\pi D_k h \delta - \frac{2}{3} \pi r_a^3 N$$

шламованої речовини, N – кількість зерен абразиву; r_a – радіус абразивного зерна, який умовно вважатимемо півсферою. За умови, коли кількість речовини становитиме W_i^{max} , контакт круга буде відповідати контакту диску із поверхнею при відсутності роботи руйнування, і тепловиділення буде максимальним.

Сам абразивний інструмент – круг (рис. 2.15) може бути відновлений засобами струменевої техніки, оскільки у цьому випадку зберігається як алмазовмісний шар, так і надійно видаляється увесь шлам, що знаходиться у міжзеренному просторі.

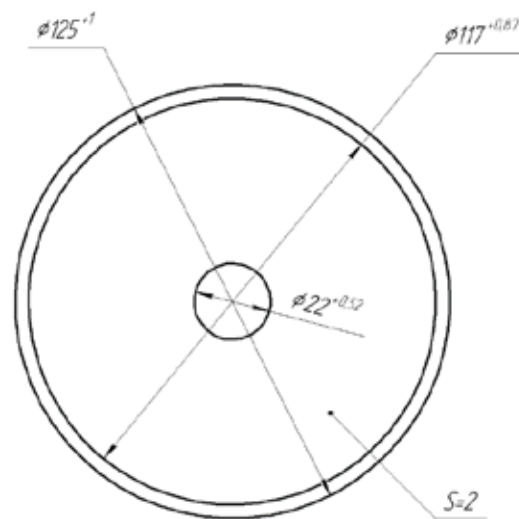


Рис. 2.15. Використовуваний відрізний круг

Отже, зменшення динамічних навантажень плями контакту інструменту з оброблюваною поверхнею можливе у випадку, коли режими абразивної обробки визначені так, що механічна робота руху різального шару максимально витрачається на роботу мікрорізання. Іншою умовою є те, що шлам і мікростружка мають належно видалятися із зони різання та не сприяти зменшенню фактичної глибини різання із одночасним різким зростанням температури. Таким чином, інструментально можливий контроль температури (за допомогою пірометричних приладів), а зміна форми і розмірів шламу може бути проконтрольована оптичними або електронно-мікроскопічними дослідженнями.

Послідовність виконання досліджень.

1. Нові пильні диски (8 шт.) піддають метрологічному контролю, визначають їх геометричні розміри шляхом вимірювання плинного радіусу при встановленні на оправку шпинделя відрізного верстата мод. FDB Maschinen GYQ400B/220. Будують відповідні кругові діаграми радіусів дисків. У випадку, якщо ексцентриситет перевищує 0,15 мм, диск замінюють на інший.

2. Пильні диски піддають гідроструменевому очищенню, відповідно до п. 3.3 даного розділу, після чого їх висушують та зважують, визначаючи масу m_k^p . Зважування виконують не менше 3 разів, а відповідні дані заносяться до узагальнюючих таблиць.

3. Для кожного диска виконують зняття профілограми за периферією та на торцевих поверхнях, відповідно визначають параметри δ , кількість зерен n .

4. Після підготовки диски встановлюють на оправку шпинделя верстата, на робочому столі якого кріплять оброблювану заготовку у вигляді бруска товщиною не меншою за 20,0 мм та перетином не меншим за 80,0 мм.

5. За допомогою приводу лінійної подачі задають хвилинну подачу пильного диска, а за АЦП із тензометричним елементом контролюють виникаючі при цьому сили. Температуру за точкою контакту визначають за допомогою пірометра Maurer Digital Infrared Pyrometer Series KTRD 1065.

6. Проводять обробку до повного прорізання заготовки. Дослід повторюють не менше 10 разів, фіксуючи виникаючі сили у даному випадку F_p та температуру T_i .

7. Після обробки диски знімають і піддають повторному зважуванню, визначаючи масу m_k^0 . Визначають різницю ваги між початковою масою кожного із дисків та масою після обробки: $\Delta m_k = m_k^0 - m_k^p$. Вважаючи, що викришування зерен протягом нетривалого часу обробки не відбувалося, різниця свідчить про появу забруднення на робочих поверхнях інструменту.

8. Проводять вивчення шламу.
9. Повторюють миття кругів відповідно до п. 2 та після просушування повторно зважують. Отримані значення маси m_k^{pm} мають практично співпадати із масою m_k^p , оскільки вважаємо, що абразивні зерна надійно закріплені у зв'язці та їх викришування не відбулося.
10. Проводять повторне випробування дисків, знімаючи показання температури T та сили різання F_p .
11. Будуєть відповідні регресійні залежності.
12. Проводять випробування дослідного зразка верстата, визначають його характеристики та жорсткість важільної системи.
13. Виконують опрацювання та будують відповідні діаграми.
14. Встановлюють контрольний диск на оправку шпинделя верстата та виконують різання заготовки, знімаючи динамічні характеристики процесу (записуючи осцилограму коливань диску та зміни сили різання з одночасним підвищенням температури у зоні обробки).
15. Отримують регресійні рівняння, що пов'язують між собою якість обробки, її ефективність із режимами ведення обробки.

2.3. Застосування гідроструменевого очищення для відновлення різальної здатності інструменту

В основу розробки технологічного процесу гідроструменевого очищення поверхні алмазовмісного шару покладено теоретичні положення взаємодії струменя із пружною шорсткою основою. Як правило, очищення ведеться як струменем низького тиску (10-35 МПа) так і струменем високого тиску (понад 120 МПа). Сама обробка може вестися одиничним струменем (сфокусованим), роторним пристроєм, а також струменем певної форми (рис. 2.16).



а)



б)



в)

Рис. 2.16. Засоби струменевого очищення: роторними обертовими струменями (а), моноструменем (б) та спеціально сформованим профільним струменем (в)

Дія швидкоплинного струменя рідини призводить до деформування поверхневого шару заготовки, внаслідок чого на ній виникає втиснення у формі чаші, розмір якої обумовлюється діаметром струменя. Як правило, механічні властивості забруднення внаслідок того, що таке забруднення не є щільним, набагато гірші за властивості основи. Далі на межі деформованої та недеформованої зон відбувається зародження мікротріщин, що швидко зростають до критичних, внаслідок чого мікрообсяги забруднення у зоні

струменевого впливу деструктуються, руйнуються і виносяться потоком стічної рідини.

При видаленні поверхневої плівки енергетичні параметри струменя приймають такими, щоб під його впливом руйнуванню піддавалася тільки плівка, у той час як основа – поверхня твердого тіла, істотних змін стану та мікрогеометрії не зазнавала.

Питанням видалення забруднень присвячено ряд робіт О. Ф. Саленка [58, 101, 189], В. Б. Струтинського [83], І.В.Петка, А. С. Зенкіна [30, 87], О. Є. Проволоцького [76], однак найбільш систематизовані відомості подані у [102].

Дослідженнями авторів [14] доведено, що оптимальні режими різання можна установити, взявши до уваги міцність самої плівки, міцність адгезійного зчеплення з основою, фізико-механічні властивості основи.

Розглядаючи задачу взаємодії струменя з оброблюваною поверхнею, автор довів, що пружність основи матиме вплив на продуктивність та ефективність процесу.

В іншій роботі враховуються також і вторинні ефекти, наприклад, дія розтічного струменя при ударному натіканні струменя на поверхню.

У [82] запропоновано визначати діаметр плями очищення, яка зростає з плином часу для консистентних забруднень і залишається практично незмінною для еластичних та квазікрихких плівок за залежністю

$$R = f(t) = mp_b^n d_c^l h^k t^e. \quad (2.7)$$

За даними А. Зайченка [29], струмінь, що натікає на перепону, створює гідродинамічний тиск, який є функціями кількох параметрів: $p = f(p_b, l, d_c \dots)$, тобто $p = 0.5 r u_r^2 + r Q u_r$ і також визначається компактністю струменя, оскільки за [153] сила динамічного тиску на перепону визначається як

$$P_d = r \frac{\rho}{\rho} \left(\frac{s_1 l}{d_0} + \frac{s_2 l}{d_0} + s_e \frac{\ddot{Q}}{\ddot{\emptyset}} (u_i \ln(P) + u^2) \right). \quad (2.8)$$

Незруйнована перепона викликає виникнення поперечно розтічної хвилі [48], швидкість руху якої дорівнює $u_p = \sqrt{\frac{2p_c}{K_c r}}$. Остання виникає через час

$$t_d = \frac{2r_c K v_c}{C^2},$$

де r_c – радіус струменя рідини; K – коефіцієнт відміни головної частини струменя від циліндричної, $K=1\dots 4$; C – швидкість розповсюдження ударної хвилі в рідині, що приймається рівній швидкості звуку в рідині; K_c – коефіцієнт стиснення рідини; r – щільність рідини.

Поздовжня розтічна хвиля, утворена протягом часу t_d , здатна виконувати навантаження бічної поверхні, викликаючи напруження

$$s_z = P_c \frac{\alpha}{\epsilon} \left(1 + \frac{z^2}{(r^2 + z^2)^{1.5}} \frac{\ddot{\phi}}{\phi} \right),$$

$$s_r = s_Q = \frac{P_c \alpha}{2 \epsilon} (1 + 2m) + \frac{2(1+m)z}{(r_m^2 + z^2)^{0.5}} - \frac{z^3}{(r_m^2 + z^2)^{1.5}} \frac{\ddot{\phi}}{\phi}, \quad (2.9)$$

де s_z , s_r , s_Q – відповідно нормальні, радіальні та тангенціальні напруги.

Звідси стає очевидним, що пружне втиснення основи з одночасним деформуванням плівки у площині основи дозволяє поєднати два ефекти: збільшити величину деформацій плівки з торця та створити дотичні напруження на межі «шар забруднення-основа», які є найбільш дієвими для відшарування плівки.

Таким чином, очищення поверхні диску має відбуватися із максимальним досяжним рівнем тиску на обладнанні для реалізації струменевої обробних процесів.

У той же час струмінь не повинен пошкоджувати алмазовмісний шар. Зазначимо, що для матеріалу основи (сталі) $p_b \ll [s_{b0}]$, при тисках технологічної рідини в межах 100 ... 120 МПа зміни топографії поверхні не відбуватиметься.



Рис. 2.18. Оптичний мікроскоп із засобами обробки зображень типу DM 200-CMOS

Обраний для проведення вимірів та досліджень топографії поверхні мікроскоп PEM-106I (рис. 2.2) забезпечує:

- розгортку електронного зонду за великим та малим полями, можливість встановлення зонду в помічену маркером точку за допомогою прецизійного сервоприводу;
- обертання та електронне переміщення досліджуваного растру;
- поділ екрану;
- відображення символічної інформації про прискорюючу напругу, збільшення, величину робочого відрізка, відображення міральної мітки та її довжини;
- електронна індикація розмірів об'єкту;
- обробка зображення диференціюванням, γ -корекцією;
- зберігання збільшеного зображення при зміні прискорюючої напруги та робочої відстані;
- автоконтрастність та автоскравість за растровими точками електронної гармати;
- напівавтоматичне стигмування; напівавтоматичне юстирування.

Електронно-оптична система являє собою електронну гармату з термоємисійним вольфрамовим катодом з механічною та електромагнітною юстировкою, жорстко центровану дволінзову конденсорну систему, конструктивно виконану з об'єктивною лінзою, спеціальний привод для швидкої заміни та встановлення на електронно-оптичну вісь апертурної діафрагми, а також двоярусну растрову відхилюючу систему, восьмиполюсний стигматор та систему електромагнітного переміщення растру.

Механізм переміщення об'єктів являє собою герметизований хрестовий стіл з додатковими обертальною та кутовою координатами, а також мікроліфтом для попереднього встановлення об'єктів у фокальну площину електронної гармати. При цьому забезпечується установа зразка максимального розміру 35x50x40 мм; переміщення по координатами X та Y не менше за 25 мм, крок дискретності 0,5 мкм, дискретність позиціонування не гірша за 1,0 мкм, вертикальне переміщення (по координаті z) – 50 мм, обертання робочого столу на 360°, нахил у бік детектору від -20° до 60° .

В даному мікроскопі використовуються два детектори електронів - відбитих та вторинних, є можливість установа двох детекторів Еверхарта-Торнлі: детектор вторинних електронів типу сцинтилятор-світловод-фотоелектронний перетворювач, детектор відбитих електронів типу сцинтилятор-фотоелектронний перетворювач; матеріал сцинтилятора YAP:Ce. Використання таких детекторів дає змогу отримати задовільний контраст залежно від атомного номеру, залежно від рельєфу поверхні та дозволяє отримати роздільну здатність приладу на рівні 4 нм при низькій прискорюючій напрузі (30-40 кВ). Система керування приладом побудована на базі ПЕОМ.

Раніше дослідниками Позняковим П.Б, Саленком О.Ф. було проведено серію дослідів, направлених на виявлення закономірності зміни рівня інтенсивності сигналу розгортки залежно від рівня шорсткості поверхні. При цьому базувалися на принципі підсилення топографічного та

послаблення композиційного контрастів, визначеного двома детекторами Еверхарта-Торнлі. За основу приймали зразкові еталони шорсткості з параметрами Ra 1,6 мкм – 6,3 мкм, Rz 40-80 мкм, які установлювали на предметний столик мікроскопу (рис. 2.2) та кріпили до його опорної поверхні. Внаслідок того, що даний прилад є приладом відносного виміру, за еталон обрали зразок шорсткістю $Ra=6,3$ мкм. Розмах інтенсивності, отриманий на даному зразку, становив опорну величину F_0 . Відносно цієї величини визначали розмахи інших сигналів F_i , що знімалися зі сцинтилятора.

Базуючись на теоретичних посилках фізичних ефектів, що відбуваються на поверхні зразка при впливі електронного пучку, можна припустити, що

$$\frac{F_i}{F_0} = f(Rz) = k \frac{Rz_i}{Rz_0} = P_m. \quad (2.10)$$

Отже, визначення коефіцієнту k дозволяє зробити припущення щодо лінійності залежності (2.8). Параметр P_m досить просто визначити, скориставшись міральною лінійкою мікроскопу, що відображається на мікрофотографічному зображенні (рис. 2.18). Він повинен функціонально змінюватися при зміні рівня шорсткості поверхні.

Внаслідок того, що при зміні збільшення змінюється і відповідна яскравість растру, обумовлена потоком електронів, досліджували також і вплив даного чинника на точність визначення шорсткості. Інші параметри (наприклад, струм розжарювання I_n , прискорююча напруга U_0) залишалися без змін.

Далі виконували ряд вимірів інтенсивності сигналу ФЕП, яку реєстрували на мікрофотографії зразка за 5-ма характерними перетинами (0-4 на рис. 2.19).

Взявши за початкове припущення щодо лінійності підсилюючої та перетворюючої ланок у каналі яскравості, визначали показники F_{min} , F_{max} у відносних одиницях градації чорного та перевіряли обчислені ПЕОМ

величини за допомогою вимірів величини піків на мікрофотографіях, отриманих при постійній величині збільшення та постійному форматі друку.

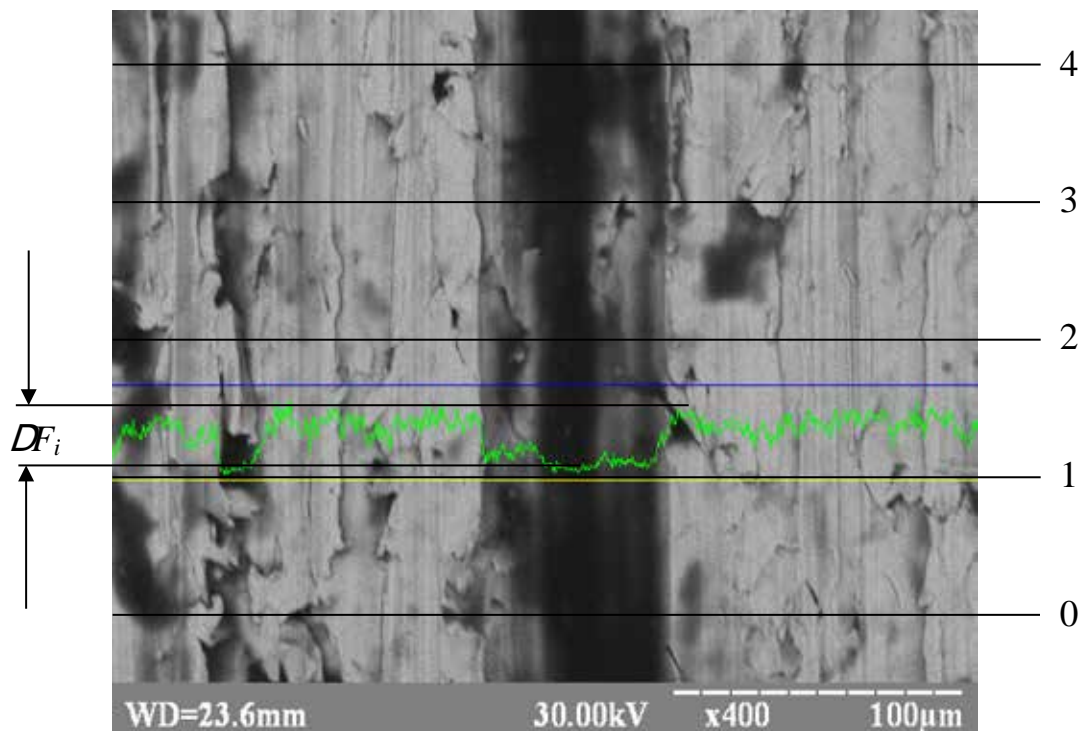


Рис. 2.19. Розгортка растру поля електронного зонду, зафіксована ПЕОМ

Відповідно до [84], шорсткість поверхні визначали такими параметрами (рис. 2.20):

- середнім арифметичним відхиленням профілю, мкм

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y_i| dx; \quad Ra = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i|, \quad (2.11)$$

- висотою нерівностей профілю за десятьма точками

$$Rz = \frac{\sum_{i=1}^5 h_i + \sum_{i=1}^5 h'_i}{10}. \quad (2.12)$$

Між собою ці два параметри пов'язані приблизно $Rz \gg 5Ra$.

Оцінивши ряд растрів, отриманих для еталонних зразків шорсткості поверхні, визначили оптимальний рівень збільшення. Цей рівень повинен бути таким, щоб для шорсткості за Rz 5 мкм та Rz 80 мкм кількість видимих штрихів була більшою за 50 (у цьому випадку можна досить точно визначити

як максимуми та мінімуми за 10-ма точками. Так і середнє відхилення профілю (для методики Ra). Таким виявилось збільшення $\times 150$.

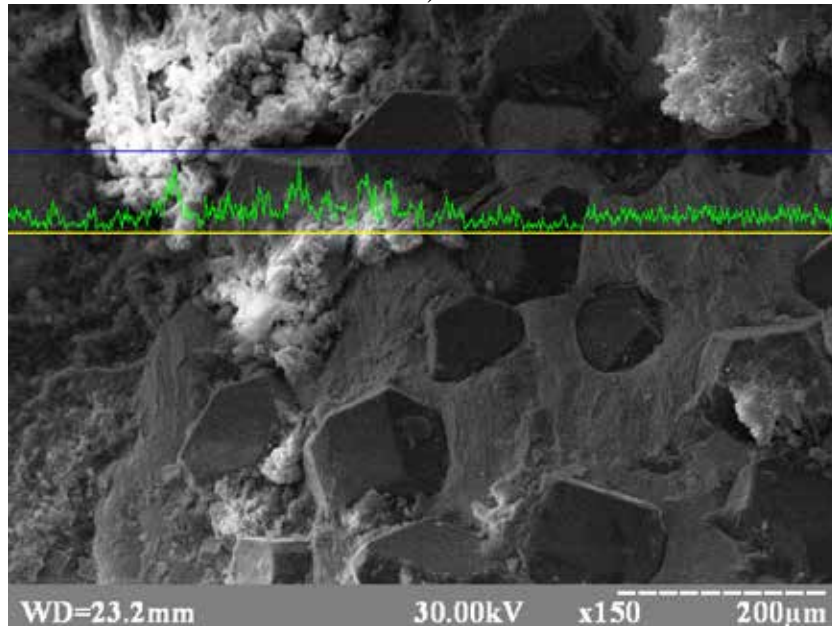
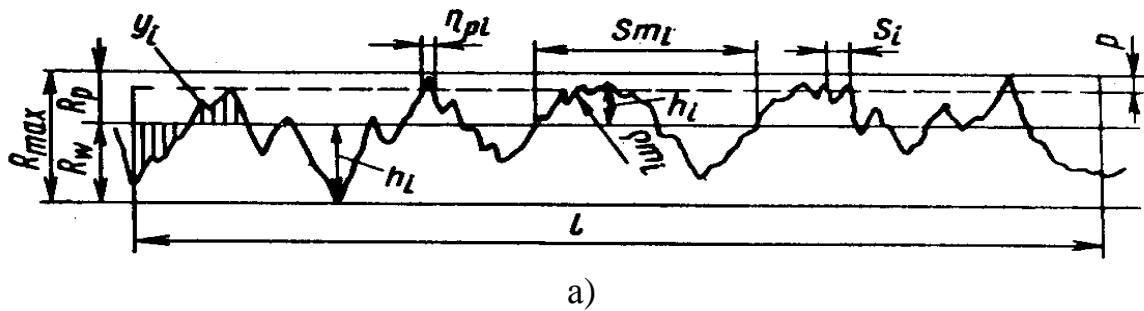


Рис. 2.20. До визначення параметрів рівня шорсткості поверхні: розрахункові величини (а) та отриманий растр зображення (б)

Після цього за методикою визначення параметру шорсткості Rz визначали даний показник. Встановлювали його середнє значення та перетворювали у показник Ra .

Постульована лінійна модель вигляду $y = b_0 + b_1x$, де незалежним параметром x було обрано величину Rz (вона обумовлювалася обраними для досліджень еталонними зразками). Статистична обробка даних довела, що коефіцієнт кореляції $R=0,885$, довірчій інтервал 77% та стандартна помилка визначення $S_0=4,09$.

Результати статистичної обробки отриманих даних показали, що лінійна залежність лише задовільно описує зв'язок, а саме положення. Що зі збільшенням рівня шорсткості топографічний контраст зростає, але з точки

зору практичного користування є достатньо приблизною. Подальший аналіз дозволив запропонувати більш точну нелінійну модель вигляду $y = b_0 + b_1 \ln(x)$.

Для даної моделі коефіцієнт кореляції становив $R=0,973$, довірчій інтервал 94,8% та стандартна помилка визначення $S_0=2,02$. Отже, така модель може використовуватися і для практичних розрахунків. Адже помилка визначення рівня розмаху сигналу становить біля 2 мм, і є значно більшою за помилки, які вносяться використанням інструментом.

Аналіз порівняних даних доводить, що помилка визначення значно зростає зі збільшенням рівня шорсткості; дослідження зразків з шорсткістю $Ra < 0,8$ мкм ускладнене внаслідок того, що розмах сигналу яскравості наближається до нуля. Відтоді, точне визначення контрольованого параметру ускладнене.

Отже, метод топографічного дослідження поверхневого шару за допомогою растрової електронної мікроскопії з детекторами Еверхарта-Торнлі на збільшеннях $\times 150$ (до $\times 250$) дозволяє задовільно визначити параметри шорсткості в діапазоні $Ra 1,6 - Rz 80$.

Для того, щоб за рівнем сигналу $D F$ (як незалежного параметру, встановленого з отриманого растру поверхні) визначити рівень шорсткості, нами постульовано залежність виду $y = e^{b_0 + b_1 x}$, де x – контрольований параметр $D F$. Отримано розрахункове рівняння

$$Rz = e^{0,78 + 0,14dF} \quad (2.13)$$

Статистична обробка даних довела, що коефіцієнт кореляції $R=0,976$, довірчій інтервал 94.56 % та стандартна помилка визначення $S_0=0,28$.

Однак похибка визначення параметру залежатиме і від кратності зображення.

Так, проведений регресійний аналіз доводить, що

$$s_0 = 1.46 + 2.4 \times 10^{-3} xR - 1.44 \times 10^{-6} xR^2 \quad (2.14)$$

при кореляції 0,96 та довірчому інтервалі 90%.

Визначення відповідних (2.12) рівнянь для інших рівнів шорсткості показав, що відповідні коефіцієнти регресійних рівнянь несуттєво відрізняються, отже, (2.12) може використовуватися для визначення помилки розрахунку величини R_z за рівнянням (2.13).

2.5. Висновки за розділом

1. Розроблено методику визначення ефективності обробки на основі інтенсивності тепловиділення у зоні механічного впливу. Детально наведено опис використовуваного устаткування, а також вимірювальних приладів та інструментального забезпечення. Виміри температури у зоні різання запропоновано виконувати за допомогою пірометра, під'єданого до АЦП із засобами автоматичного зняття даних (побудованих на базі ПЕОМ).

2. Оскільки у процесі обробки використовуваний інструмент (круг) зазнає деградації, для відтворюваності результатів вимірів запропоноване гідроструменеве очищення поверхневого абразивовмісного шару.

3. Приведено методику визначення параметрів шорсткості засобами електронної мікроскопії, удосконалено відомі рівняння для визначення параметрів шорсткості (застосовано відповідно до порожнистого матеріалу карбон-карбонової групи).

4. Наведено відомості щодо розробленої конструкції дослідного зразка верстата, його вузлів та компонентів, методів визначення характеристик жорсткості робочого органа.

3. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ АБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ КАРБОНОВИХ ВИРОБІВ НА ВЕРСТАТАХ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

3.1. Взаємодія алмазовмісного інструменту із нещільним напівпростором, теплові ефекти та явища у зоні контакту

Заготовки з карбон-карбонівих матеріалів характеризуються тим, що відповідно до технології їх отримання матеріал формується практично без прив'язування до форми готового виробу; переплетені між собою нитки на каркасі піддають хіміко-термічному обробленню, в результаті якого шари піролітичного вуглецю міцно зшивають окремі нитки та джгути між собою.

Як правило, заготовки мають порожнинну структуру, а густина і щільність залежать як від режимів обробки, так і від плетіння армувальних джгутів [56]. При цьому, незважаючи на ізотропність піровуглецю, анізотропія властивостей визначається особливостями плетіння.

Неоднорідність матеріалу вимагає уточнення підходу до визначення умов контактної взаємодії, оскільки останнє впливає на кількість теплоти, що виділяється у зоні різання (мікрорізання).

Нехай модель матеріалу буде відповідати приведеній на розрахунковій схемі рис. 3.1. Матеріал має регулярне плетіння, яке умовно можна вважати кубічним. Вважаємо, що обробка ведеться диском, який контактує з оброблюваною поверхнею на довжині контакту l . На цій ділянці шириною b знаходяться одночасно N частинок абразиву (алмазних зерен), які виступають з поверхні зв'язки на величину h . Взаємодія відбувається так, що зріз або руйнування волокна можливе тільки у випадку, коли контакт в напрямку дії сили різання відбувається на висоті u відносно поверхні, в іншому випадку відбувається пружне деформування із наступним відновленням волокна.

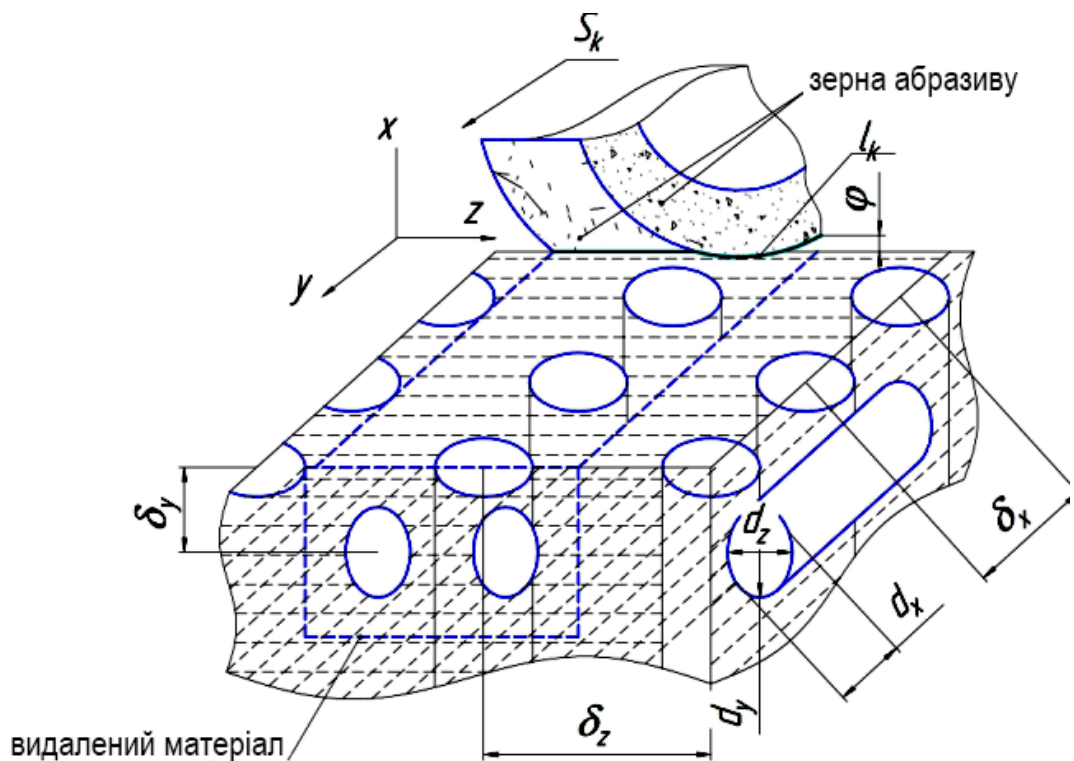


Рис. 3.1. Розрахункова схема взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом

Контакт по поверхні між зернами в момент пружного відновлення волокна призводить до виділення тепла Q , яке розподіляється в інструмент, оброблювану заготовку, частково розсіюється у довколишнє середовище.

Оскільки інструмент обертового типу, такий контакт відбувається циклічно, з постійним виносом шламу із зони різання.

При обробці інструмент контактує із заготовкою периферією, а також торцями. Таким чином, тепловий баланс можна уявити наступним чином:

$$Q_p + Q_{tr} + Q_{tl} = Q_k + Q_i + Q_a \quad (3.1)$$

Q_p – тепловиділення на периферії інструменту; Q_{tr} , Q_{tl} – тепловиділення на правому та лівому торцях відповідно; Q_k – теплопоглинання у матеріал; Q_i – теплопоглинання у інструмент; Q_a – втрата тепла навколишнє середовище та у шлам.

Вважаємо, що робота зовнішніх сил у зоні різання розподіляється на роботу руйнування та роботу сили тертя. Якщо взяти до уваги, що остання повністю перетворюється у теплоту, то інтенсивність тепловиділення на підставі [55] складе

$$q = fpv, \quad (3.2)$$

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 $s = \frac{mF^{1/3}E^{2/3}}{r^{2/3}}$,

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, $\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$. Оскільки при обробці

композиційного матеріалу пористої структури контакт зерен не є постійним, час контакту (і, відповідно, інтенсивність тепловиділення) визначатиметься щільністю плетення, щільністю шару, що містить абразив (алмази) та швидкістю відносного руху.

З геометричних міркувань та за умови, що зрізання частини волокна відбуватиметься лише при виступанні волокна над поверхнею на величину y , максимальна довжина контакту становитиме $l_k = 2\sqrt{r_2^2 - (r_2 - y)^2}$. Одночасно в зоні обробки буде відбуватися N контактів, отже, приведена довжина контакту складе $l_p = Nl_k$, м. Тоді час контактної взаємодії, що визначатиме виділення теплоти, дорівнюватиме

$$t = \frac{2N\sqrt{r_2^2 - (r_2 - y)^2}}{\rho D_k n}. \quad (3.3)$$

Частота виникнення зон тепловиділення визначиться співвідношенням $j = \frac{\rho D_k n}{l_k}$. Для малих зон тепловиділення, що отримують

теплоту від контактної взаємодії, задача визначення розподілу

температурних полів (а також визначення температури на поверхні нагріву) може бути зведена до задачі імпульсного нагрівання поверхні точковим джерелом, яку розглянуто у [17].

Умови контакту боковими поверхнями відрізняються від умов контакту периферією тим, що величина нормальної складової до поверхні інструменту залежить від пружних властивостей оброблюваного матеріалу. В загальному випадку, вважаючи, що контакт боковими поверхнями відбувається внаслідок пружного відновлення матеріалу, а також внаслідок незначної деформації металевого каркасу абразивного інструменту, контактний тиск p може бути встановлений з наступних міркувань.

При обробці виділене тепло передається не тільки в оброблюваний матеріал, а і поширюється в інструмент. При цьому нагрів відбувається не всього інструменту, а лише його частини, безпосередньо контактуючої з оброблюваною поверхнею. Вплив нерівномірного нагріву периферійної частини дискового інструменту радіусом R_1 можна встановити, записавши відповідні рівняння

$$\begin{cases} s_t - s_k - r \frac{ds_r}{dr} = 0; \\ e_r = e_t + r \frac{de_t}{dr}. \end{cases} \quad (3.4)$$

Для нерівномірного нагрівання закон Гука може бути поданим у такому вигляді [146]:

$$\begin{cases} e_r = \frac{1}{E}(s_r - \nu s_t) + \alpha T; \\ e_t = \frac{1}{E}(s_t - \nu s_r) + \alpha T. \end{cases}$$

де α – коефіцієнт температурного розширення.

Для системи рівнянь, отриманих з (3.4)

$$\begin{cases} s_t - s_r - r \frac{ds_r}{dr} = 0; \\ \frac{ds_t}{dr} - m \frac{ds_r}{dr} - aT \frac{dT}{dr} = \frac{1+m}{r} (s_r - s_t); \\ T = C_T r^2. \end{cases}$$

розв'язок набуде вигляду:

$$\begin{cases} s_r(r) = \frac{1}{4} aE(T_2 - T_1) \left(\frac{R_1^2}{R_2^2} - \frac{r^2}{R_2^2} - \frac{R_1^2}{r^2} \right) \\ s_t(r) = \frac{1}{4} aE(T_2 - T_1) \left(\frac{R_1^2}{R_2^2} - 3 \frac{r^2}{R_2^2} + \frac{R_1^2}{r^2} \right) \end{cases}$$

R_2 – радіус нагріву інструменту.

Виниклі на периферії напруження ведуть до появи радіальних та тангенціальних деформацій, причому останні визначаються як

$$e_t = \frac{1}{E} (s_t - m s_r) + aT, \text{ що за умови недостатньо нагрітого центра диску}$$

викличе його викривлення на сторону на величину

$$d = pr \sqrt{(1 + e_t)^2 - 1}.$$

Для прогину d зусилля F_b складе $\delta = \frac{F_b R_1^2}{16\pi D}$, тобто

$$F_b = \frac{16\pi D}{R_1^2} \delta.$$

Таким чином, тиск по бічній поверхні становитиме

$$p = \frac{2F_b}{R_1^2 (\alpha - \sin(\alpha))} = \frac{32\pi D \delta}{R_1^4 (\alpha - \sin(\alpha))}.$$

Тиск периферією визначатиметься так:

$$p = \frac{F}{bl}.$$

Рівняння, що описує одномірне температурне поле для постановки задачі відносно периферії інструменту може бути отримане на основі

розв'язку диференціального рівняння $q = q_0 A = -l_T \frac{\partial T}{\partial x}(0, t)$:

$$T(x,t) = \frac{2q\sqrt{a_T t}}{l_T} \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{2a_T t}} \quad (3.5)$$

Після припинення дії імпульсу теплового джерела тривалістю t на поверхню, що нагрівається, відбувається її остигання за рахунок перерозподілу підведеного тепла. Одномірне температурне поле за умови, що оброблюване тіло являє собою напівнескінченний простір, може бути встановлене так:

$$T(z,t) = \frac{2Aq_0\sqrt{a_T}}{l_T} \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{2a_T t}} - \sqrt{t-t} \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{2a_T(t-t)}} \quad (3.6)$$

При цьому температура поверхні складе $T_0(t) = \frac{2q\sqrt{a_T t}}{l_T}$.

Такі умови будуть зберігатися до моменту, коли умови контакту зміняться. Припинення процесу мікрорізання за умови незмінної лінійної подачі викличе значне зростання сили у зоні контакту, і, відповідно, тепловиділення на поверхнях. При цьому зростатиме і d , тобто ширина розрізу змінюватиметься.

3.2. Вплив динамічних властивостей верстатної системи на явища у зоні різання

Для визначення величини контактних тисків за силою різання в зоні обробки розглянемо пружні властивості технологічної системи [10, 103]. Умовно її можна уявити у вигляді спрощеної розрахункової схеми рис. 3.2.

Для такої двомасової системи рівняння рівноваги зосереджених мас, які приведено до заготовки m_k та до робочого органа – інструменту m_d – прийме вигляд:

$$m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2} + v_k \frac{dx_k}{dt} + c_1 x_k = m_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} + v_k \frac{dx_k}{dt} + c_2 x_k,$$

$$m_k \frac{d^2 y_k}{dt^2} - v_k \frac{dy_k}{dt} - c_3 y_k = m_d \frac{d^2 y_d}{dt^2} - v_k \frac{dy_k}{dt} - c_4 y_k. \quad (3.7)$$

При цьому $R_x = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} (x_k + x_d) = F$, $R_y = \frac{c_3 c_4}{c_3 + c_4} (y_k + y_d)$, а

величина фактичної глибини різання t_f внаслідок пружного відтиснення у зоні контакту на величину $(x_k + x_d)$ становитиме

$$t_f = t_z - (x_k + x_d). \quad (3.8)$$

Співвідношення (3.8) дозволяє експериментально визначити частку роботи, що приходить на різання матеріалу в сумарній витраченій роботі, а також ідентифікувати параметри динамічної системи.

Зміна умов контакту (наприклад, при засалюванні інструмента продуктами руйнування оброблюваного матеріалу) призводить до того, що контакт відбуватиметься поверхнею охоплення інструмента, а зусилля притиску визначиться подачею та пружними властивостями елементів технологічної системи [47].

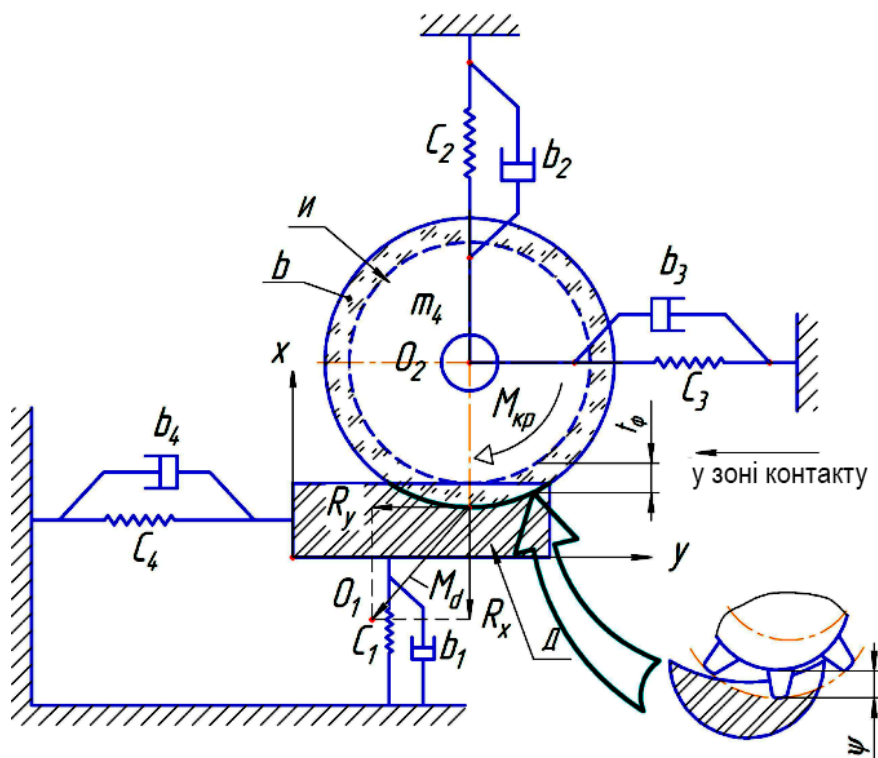


Рис. 3.2. Спрощена розрахункова схема технологічної системи

Застосування паралельного маніпулятора не дозволяє безпосередньо встановити жорсткість системи, отже, визначити параметри динамічної моделі на основі (3.8) досить важко. Для розв'язку цієї задачі виконано кінематичний аналіз паралельного маніпулятора із надлишковими кінематичними зв'язками.

3.3. Кінематичний аналіз паралельного маніпулятора з кінематичною надлишковістю

Для розробки багатокоординатного механізму паралельної структури з 5 ступенями вільності 2R3T (2 обертальних і 3 поступальних ступені вільності) з розширеними можливостями орієнтації внаслідок виключення особливих положень за рахунок використання надлишкових приводів слід розглянути можливі кінематичні структури такого механізму [43].

Якщо зобразити структуру механізму паралельної структури за надлишковістю приводів у вигляді діаграми, вона матиме вигляд (рис. 3.3).

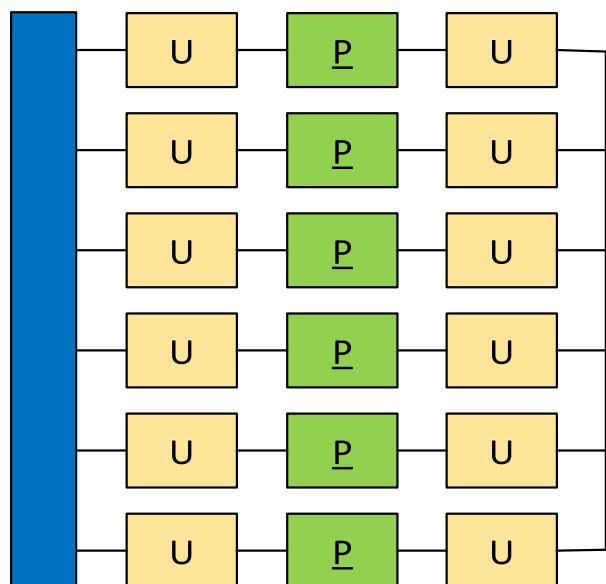


Рис. 3.3. Структура механізму з надлишковістю приводів (5 ступенів вільності, 6 приводів, 5 координат)

Відомо, що надлишкові механізми паралельної структури мають складності в керуванні, оскільки є статично невизначеними системами, у

яких внаслідок наявності геометричних похибок можуть виникати значні внутрішні напруження [172]. Це вимагає точної ідентифікації координат шарнірних опор основи і робочого органа прямим вимірюванням (наприклад, за допомогою координатно-вимірювальної машини) вже на етапі попереднього налаштування верстата для запобігання надлишкових деформацій внаслідок неузгодженості приводів штанг у статично невизначеному механізмі.

Тому позбавлення таких механізмів надлишковості без зміни внутрішньої сутності та принципу дії за рахунок введення побічної ступені вільності, яка усуває надлишковість, є перспективним напрямом створення технологічного обладнання [173, 174]. Таким чином відбувається перехід від надлишковості приводів до кінематичної надлишковості.

Якщо у механізмі (рис. 3.3) ввести додаткову лінійну ступінь вільності, яка утворюється переміщенням одного або групи шарнірів вздовж спільної осі шпинделя та шарнірних опор, можна ефективно позбавити його надлишковості приводів та перейти до кінематичної надлишковості, одночасно зберігаючи переваги у вигляді усунення особливих положень та розширення діапазону кутів орієнтації робочого органа [41].

Варіант такої структури показаний на рис. 3.4, де утворена група з трьох шарнірних опор яка може поступально рухатись вздовж спільної осі шарнірних опор, яка співпадає з віссю шпинделя. Таким чином, даний механізм має кінематичну надлишковість – 6 ступенів вільності, 6 приводів, 5 просторових координат і 1 додаткова побічна координата.

Структура на рис. 3.4. характеризується наявністю двох груп по 3 шарнірних опори на робочому органі, таким чином її можна охарактеризувати як 3-3. Варіанти структури механізмів, які відрізняються кількістю згрупованих шарнірних опор, які разом переміщуються вздовж спільної осі шарнірів та шпинделя, зображені на рис. 3.5.

Для використання принципу кінематичної надлишковості у багатокординатному обладнанні розроблено схему верстата паралельної

Привод переміщення вихідного органа верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур (рис. 3.6 а) містить станину, механізми подачі шести штанг, які пов'язані з вихідним органом. Три шарнірно закріплені на основі 1 штанги 2 приєднуються до передньої частини робочого органа 3 (рис. 4, б), яка містить шпиндель верстата, а інші три штанги 4 аналогічно приєднуються до задньої частини, яка має можливість переміщення вздовж спільної осі шарнірів та робочого органа. Механізм з такою конструкцією робочого органа має кінематичну надлишковість, яка виявляється у наявності додаткової координати s – взаємного переміщення частин робочого органа, яке не впливає на його просторове положення та орієнтацію, але дозволяє позбавитись від невизначеності та внутрішніх напружень у просторовій несучій системі приводів механізму.

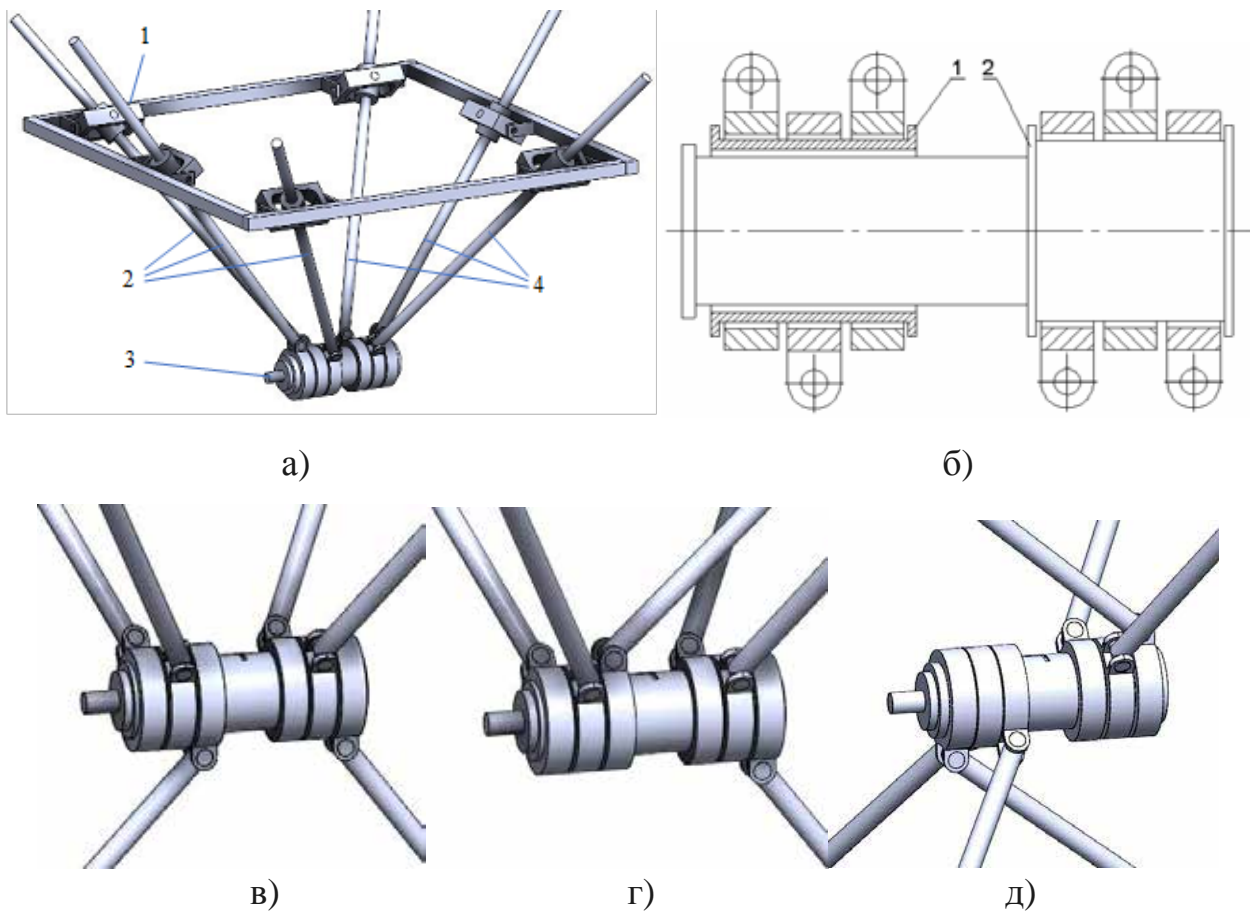


Рис. 3.6. Багатокоординатний верстат з надлишковим приводом: а) компоновка, б) робочий орган; в), г), д) варіанти розміщення штанг з шарнірами на робочому органі

Робочий орган складається з двох частин 1 та 2 (рис. 3.6, б), які мають можливість взаємного переміщення вздовж його осі [41]. При цьому три штанги приєднується до передньої частини робочого органа, які містить шпиндель верстата, а інші три штанги приєднуються до задньої частини робочого органа.

Робочий орган верстата (рис. 3.6) з'єднується з основою шістьма ланками змінної довжини, причому шарніри робочого органа мають спільну вісь, яка співпадає з віссю шпинделя верстата [41]. Використання такого робочого органа дозволяє забезпечити надлишковість механізму паралельної структури вже при кількості приводів 6, тоді як для надлишкової платформи Гауфа-Стюарта необхідно хоча б 7 приводних ланок.

Розроблені варіанти розміщення штанг відносно робочого органа (рис. 3.6, б, в, г) з метою розширення діапазону повороту навколо одної з координатних осей та підвищення стабільності його просторового положення [39].

Варіант розміщення штанг (рис. 3.6, а) залишає одну з сторін вільною для зручності доступу до деталі, варіант (рис. 3.6, б, г) потенційно може забезпечити більшу жорсткість, а варіант (рис. 3.6, в) має широкі можливості орієнтації робочого органа.

Моделювання показує (рис. 3.7), що за рахунок кінематичної надлишковості приводів механізму та спеціального розміщення шарнірів основи і робочого органа орієнтація робочого органа у вертикальній площині можлива у діапазоні до 120° , а у горизонтальній площині – до 180° в залежності від розташування шарнірних опор [37, 40].

Нехай багатокординатний верстат на основі надлишкового механізму паралельної структури (рис. 3.3, а) виконаний за схемою, в якій шарніри робочого органа мають спільну вісь. Варіанти виконання робочого органа (рис. 3.6, б, в, г) дозволяють значно розширити діапазон повороту навколо одної з координатних осей та підвищити стабільність його просторового положення [2, 3,39–43], що важливо для виконання обробки абразивним

інструментом, обертання якого спряжено із великими лінійними та кутовими прискореннями. Даний механізм паралельної структури має 5 ступенів вільності $2R3T$ (2 обертальних і 3 поступальних ступені вільності) з розширеними можливостями орієнтації, що досягається виключенням особливих положень за рахунок використання надлишкових приводів і спеціальної конструкції робочого органа, для використання у верстатах паралельної структури [37]. Робочий простір верстата розглянуто у [38].

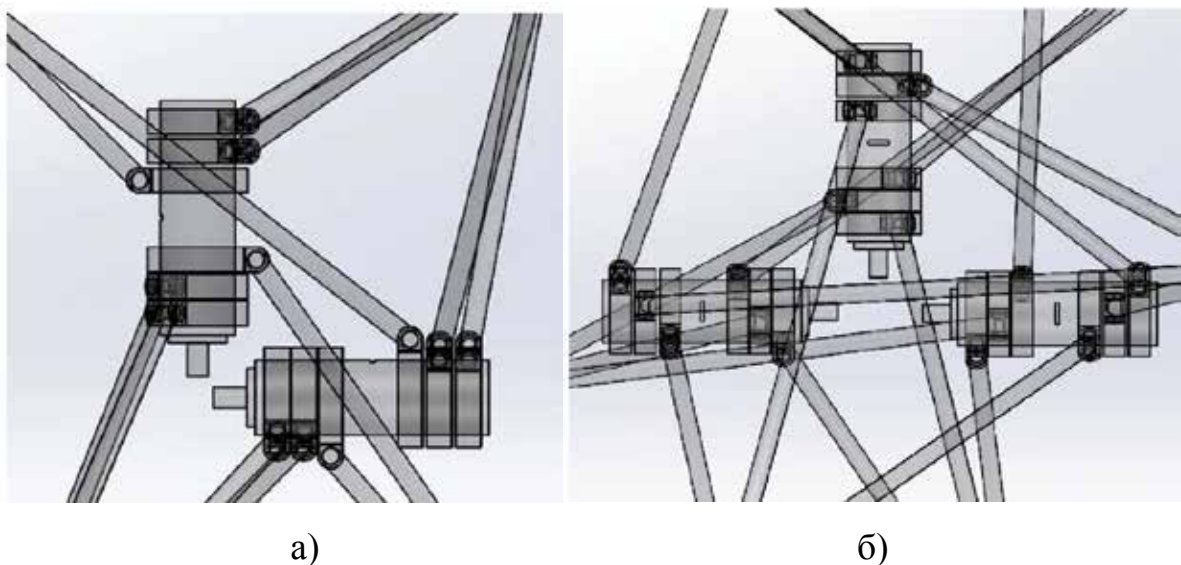


Рис. 3.7. Поворот робочого органа:
а) у вертикальній площині; б) у горизонтальній площині

Кінематичну спрощену схему приводу переміщення вихідного органа верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур подано на рис. 3.8.

Ступені рухомості вихідного органа позначені як x, y, z, γ, β , через літери А та В позначені шарніри, через q – узагальнені координати (довжини ланок).

Координати робочого органа представляють собою вектор узагальнених координат $\mathbf{X} = (x, y, z, \gamma, \beta)^T$, який задає просторове положення та кутову орієнтацію робочого органа, а координати приводів – вектор $\mathbf{Q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$, що містить положення кожного приводу (довжину штанг механізму).

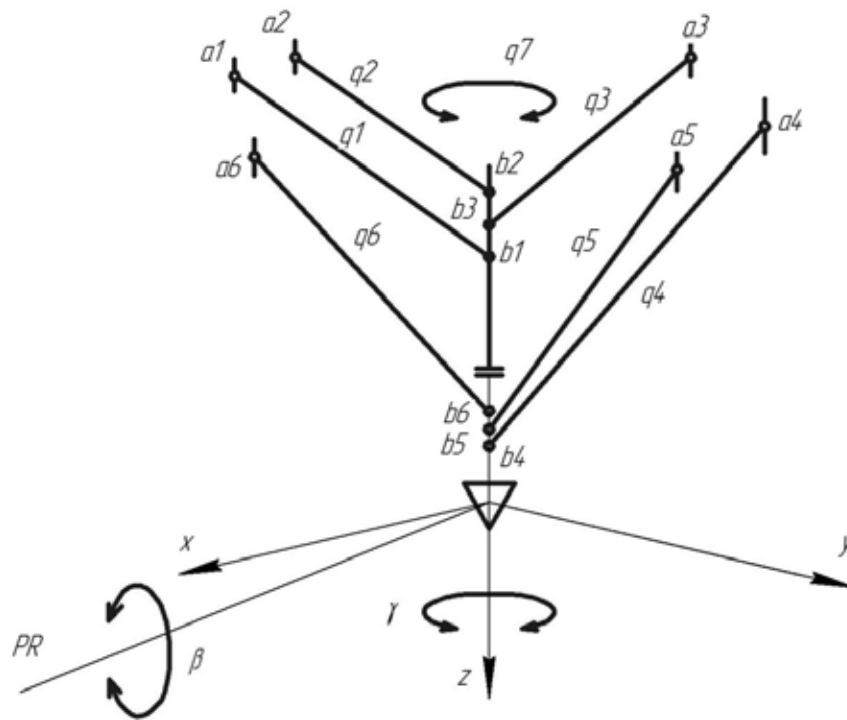


Рис. 3.8. Схематичне зображення приводу переміщення вихідного органа верстата паралельної структури з шістьма штангами

Координати шарнірів робочого органа у довільний момент часу розраховуються на основі його необхідного положення в просторі по відношенню до оброблюваної деталі, яке можна задати координатами робочого органа x_i , y_i , z_i в декартовій системі координат та кутами його орієнтації. У якості кутів орієнтації можна скористатися кутами Ейлера або Крилова. Як показано у [35, 95], для визначення просторової орієнтації робочих органів верстатних систем доцільно користуватися варіантом кутів Крилова, які відповідають послідовному повороту навколо координатних осей.

Розрахункова схема вихідного органа верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур зображена на рис. 3.9. З основою механізму пов'язана абсолютна система координат з початком координат у точці O , а з робочим органом – відносна рухома система координат з початком у точці O' .

Кінематичні залежності можна отримати подібно до [45, 112]. Достатньо розглянути одну i -у ланку – штангу змінної довжини, центр

нерухомого шарніру якої знаходиться у точці A_i , а центр рухомого шарніру на робочому органі – у точці B_i . Довжину штанг можна позначити як q_i .

Нерухома абсолютна система координат XYZ має початок у точці O , а рухома система координат $X'Y'Z'$, пов'язана з робочим органом – у точці O' .

Відповідна схема механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю, шарніри робочого органа якого мають спільну вісь, показана на рис. 3.9.

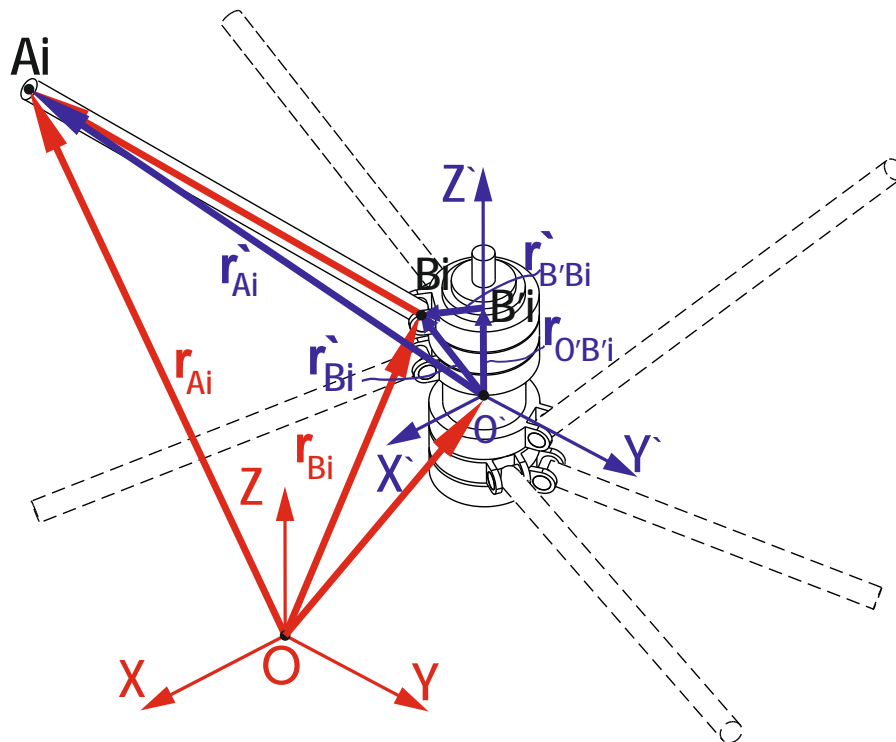


Рис. 3.9. Розрахункова схема механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю

Радіус-вектор початку координат рухомої системи у нерухомій системі координат

$$\mathbf{r}_0 = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Радіус-вектори центрів нерухомих шарнірів основи у абсолютній системі координат

$$\mathbf{r}_{O A_i} = \begin{pmatrix} x_{A_i} \\ y_{A_i} \\ z_{A_i} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Радіус-вектори центрів нерухомих шарнірів відносно центру рухомої системи координат

$$\mathbf{r}_{O' A_i} = \begin{pmatrix} x'_{A_i} \\ y'_{A_i} \\ z'_{A_i} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Радіус-вектори центрів шарнірів робочого органа у рухомій системі координат

$$\mathbf{r}_{B_i} = \begin{pmatrix} x_{B_i} \\ y_{B_i} \\ z_{B_i} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

Щоб визначити координати шарнірів робочого органа у рухомій системі координат, слід використати конструктивну схему робочого органа механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю 3-3 (рис. 3.10).

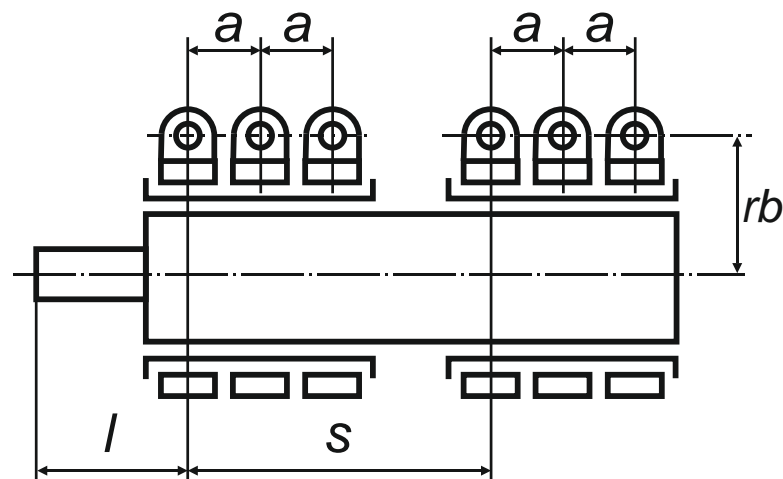


Рис. 3.10. Схема робочого органа механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю

Слід відмітити, що внаслідок переходу від надлишковості приводів до кінематичної надлишковості з'являється додаткова координата s , яка

визначає зсув другої групи шарнірних опор робочого органа відносно першої групи.

Для такої схеми, якщо початок системи координат робочого органа знаходиться на передньому кінці шпинделя, то координати його шарнірів вздовж осі шпинделя будуть дорівнювати відповідно

$$z'_{oi} = \begin{cases} l + a(i - 1), i \in 1 \dots 3 \\ l + s + a(i - 4), i \in 4 \dots 6 \end{cases} \quad (3.13)$$

Таким чином, вектор координат центрів шарнірів

$$r_{O'Bi} = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ l + a(i - 1), i \in 1 \dots 3 \\ l + s + a(i - 4), i \in 4 \dots 6 \end{cases} \quad (3.14)$$

Вектор осі робочого органа r'_s , направлений від переднього його кінця до заднього, можна задати таким чином

$$r'_s = \begin{cases} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{cases} \quad (3.15)$$

Кутам Крилова повороту робочого органа відповідає матриця повороту

$$R_K = \begin{pmatrix} \cos J \cos j & -\cos J \sin j & \sin J \\ \sin j + \sin y \cos j \sin J & \cos y \cos j - \sin y \sin j \sin J & -\sin y \cos J \\ \sin y \sin j - \cos y \cos j \sin J & \sin y \cos j + \cos y \sin j \sin J & \cos y \cos J \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Оскільки поворот навколо осі робочого органа j не є керованим і не впливає на розміщення центрів його шарнірних опор, то матриця повороту набуває вигляду

$$R_K = \begin{pmatrix} \cos J & 0 & \sin J \\ \sin y \sin J & \cos y & -\sin y \cos J \\ \cos y \sin J & \sin y & \cos y \cos J \end{pmatrix} \quad (3.17)$$

Далі розглянемо розміщення шарнірних опор нерухомої основи. Якщо кріплення штанг на основі утворюють шестикутник з радіусом описаного

кола Ra . Тоді, відповідно до наведеної схеми (рис. 3.14, а) радіус-вектори точок основи визначатимуться:

$$\begin{aligned}
 r_{a1} &= (0; Ra; -z_{a1}); \\
 r_{a2} &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} Ra; \frac{Ra}{2}; -z_{a2} \right); \\
 r_{a3} &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} Ra; -\frac{Ra}{2}; -z_{a3} \right); \\
 r_{a4} &= (0; -Ra; -z_{a4}); \\
 r_{a5} &= \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} Ra; -\frac{Ra}{2}; -z_{a5} \right); \\
 r_{a6} &= \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} Ra; \frac{Ra}{2}; -z_{a6} \right).
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

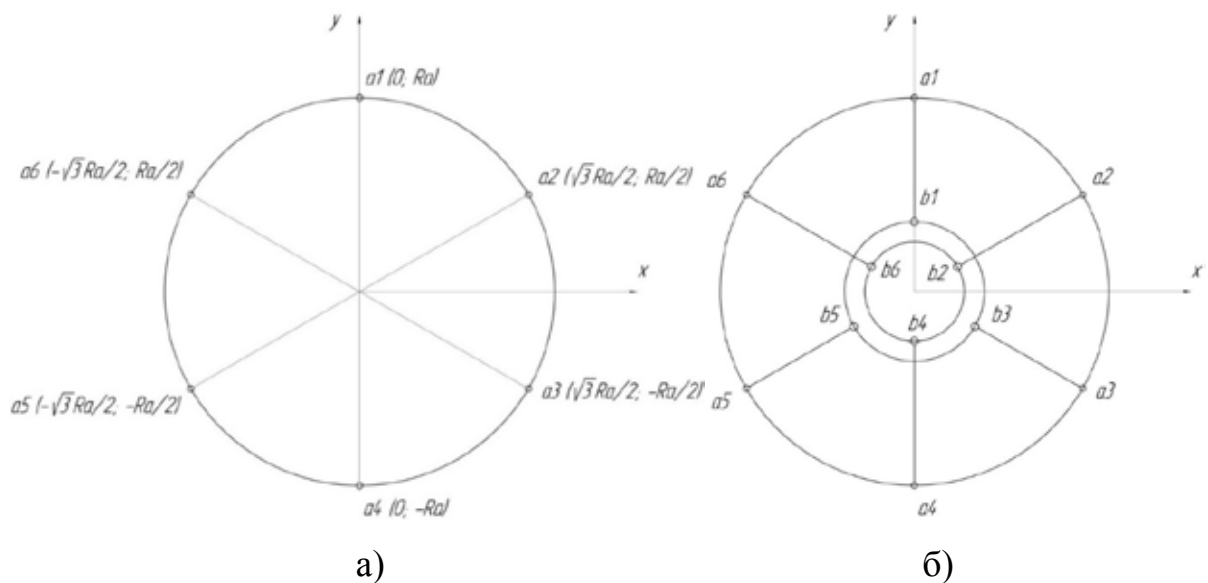


Рис. 3.14. Схема кріплення штанг до основи (а) та робочого органа (б)

Для випадку, коли точки кріплення штанг до основи a_i знаходяться в одній площині, координати z_{ai} можуть бути суміщені з початком координат, тоді значення радіус-векторів точок основи будуть дорівнювати 0.

При пересуванні точок кріплення штанг a_i на основі, їх координати будуть визначатись виключно зміною значень z_{ai} . Точки b_i в рухомій системі координат робочого органа будуть задаватись радіус-векторами. Відповідно

до рис. 3.14, б, непарні точки штанг будуть з'єднуватись з однією частиною робочого органа, що має радіус Rb , а парні – з іншою, що має радіус Rb' .

Тоді радіус-вектори точок b_i в рухомій системі координат робочого органа будуть мати наступні значення:

$$\begin{aligned}
 \rho_{b1} &= (0; Rb; -z_{b1}); \\
 \rho_{b2} &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} Rb'; \frac{Rb'}{2}; -z_{b2} \right); \\
 \rho_{b3} &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} Rb; -\frac{Rb}{2}; -z_{b3} \right); \\
 \rho_{b4} &= (0; -Rb'; -z_{b4}); \\
 \rho_{b5} &= \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} Rb; -\frac{Rb}{2}; -z_{b5} \right); \\
 \rho_{b6} &= \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} Rb'; \frac{Rb'}{2}; -z_{b6} \right).
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Виразимо радіус-вектори точок b_i в нерухомій системі координат основи через узагальнені координати за формулою:

$$r_{bi} = r_0 + R\rho_{bi}. \tag{3.20}$$

В початковий момент, коли рухома система координат робочого органа в площині XOY паралельна нерухомій системі координат основи в цій же площині, то узагальнені координати точок штанг b_i будуть дорівнювати з урахуванням радіус-вектора $r_0 = 0$:

$$\begin{aligned}
 r_{b1} &= (0; Rb; -z_{b1}); \\
 r_{b2} &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} Rb'; \frac{Rb'}{2}; -z_{b2} \right); \\
 r_{b3} &= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} Rb; -\frac{Rb}{2}; -z_{b3} \right); \\
 r_{b4} &= (0; -Rb'; -z_{b4}); \\
 r_{b5} &= \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} Rb; -\frac{Rb}{2}; -z_{b5} \right);
 \end{aligned}$$

$$r_{b6} = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} Rb'; \frac{Rb'}{2}; -z_{b6} \right). \quad (3.21)$$

Аналітична геометрія у просторі [20] описує довжину довільного відрізка АВ наступним рівнянням:

$$L = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2}, \quad (3.31)$$

де x_a, y_a, z_a – координати точки А відрізка АВ;

x_b, y_b, z_b – координати точки В відрізка АВ.

Відповідно до цього узагальнені координати у вільний момент часу описуються наступною системою:

$$\begin{cases} q_1 = \sqrt{(x_{b1} - x_{a1})^2 + (y_{b1} - y_{a1})^2 + (z_{b1} - z_{a1})^2}; \\ q_2 = \sqrt{(x_{b2} - x_{a2})^2 + (y_{b2} - y_{a2})^2 + (z_{b2} - z_{a2})^2}; \\ q_3 = \sqrt{(x_{b3} - x_{a3})^2 + (y_{b3} - y_{a3})^2 + (z_{b3} - z_{a3})^2}; \\ q_4 = \sqrt{(x_{b4} - x_{a4})^2 + (y_{b4} - y_{a4})^2 + (z_{b4} - z_{a4})^2}; \\ q_5 = \sqrt{(x_{b5} - x_{a5})^2 + (y_{b5} - y_{a5})^2 + (z_{b5} - z_{a5})^2}; \\ q_6 = \sqrt{(x_{b6} - x_{a6})^2 + (y_{b6} - y_{a6})^2 + (z_{b6} - z_{a6})^2}; \end{cases} \quad (3.32)$$

Результати визначення узагальнених координат опубліковані у [3].

Щоб знайти довжину штанги механізму паралельної структури, необхідно визначити відстань AB_i між центрами шарнірів робочого органа та нерухомого шарніру основи. Ця відстань визначається вектором, розміщеним у площині, яка одночасно містить вісь робочого органа та центр нерухомого шарніру основи.

Для знаходження вектору ланки AB_i можна скласти векторне рівняння

$$r_{AB_i} = r_{O'A_i} - r_{O'B_i} - r_{B_iV_i}. \quad (3.18)$$

Вектор $r_{O'A_i}$ можна знайти наступним чином

$$r_{O'A_i} = r_{OA_i} - r_{OO'}. \quad (3.19)$$

Вектор $r_{O'B_i}$ можна знайти з врахування повороту системи координат робочого органа

$$r_{O'B'i} = R_K \times r_{O'Bi}. \quad (3.20)$$

Отже, невідомим залишається вектор $r_{B'Bi}$, довжина якого відома з конструкції робочого органа, але необхідно визначити його орієнтацію у площині, яка одночасно містить вісь робочого органа та центр нерухомого шарніру основи.

Скориставшись властивостями векторного добутку, можна отримати вектор $r_{O'B'i} \wedge r_{O'Bi}$, перпендикулярний площині, яка одночасно містить вісь робочого органа та центр нерухомого шарніру основи.

Тоді напрям вектора $r_{B'Bi}$ буде визначатись напрямом вектора $(r_{O'B'i} \wedge r_{O'Bi}) \wedge r_{O'Bi}$.

Знаючи радіус розміщення шарніру робочого органа rb_i , вектор $r_{B'Bi}$ можна визначити наступним чином

$$r_{B'Bi} = \frac{(r_{O'B'i} \wedge r_{O'Bi}) \wedge r_{O'Bi}}{|(r_{O'B'i} \wedge r_{O'Bi}) \wedge r_{O'Bi}|} \times rb_i. \quad (3.21)$$

Підставляючи у (3.18) та (3.19), отримаємо вираз для визначення вектора штанги змінної довжини

$$r_{ABi} = (r_{O'Bi} - r_{OO'}) - R \times r_{O'Bi} - \frac{[(R \times r_{O'Bi}) \wedge (r_{O'Bi} - r_{OO'})] \wedge (R \times r_{O'Bi})}{|[(R \times r_{O'Bi}) \wedge (r_{O'Bi} - r_{OO'})] \wedge (R \times r_{O'Bi})|} \times rb. \quad (3.22)$$

Довжина штанги визначається як абсолютна величина вектора

$$r_i = \left| (r_{O'Bi} - r_{OO'}) - R \times r_{O'Bi} - \frac{[(R \times r_{O'Bi}) \wedge (r_{O'Bi} - r_{OO'})] \wedge (R \times r_{O'Bi})}{|[(R \times r_{O'Bi}) \wedge (r_{O'Bi} - r_{OO'})] \wedge (R \times r_{O'Bi})|} \times rb \right|. \quad (3.23)$$

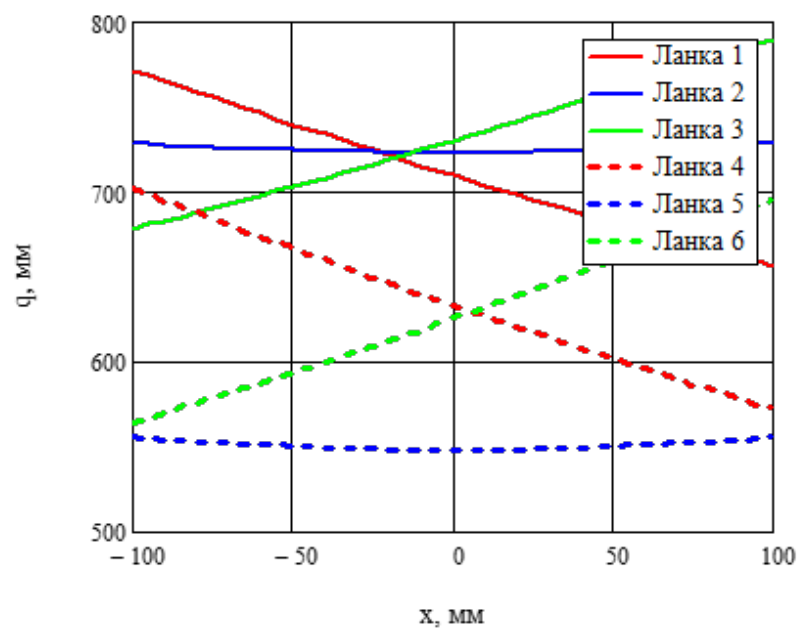
Одиничний вектор штанги дорівнює

$$\mathbf{n}_i = \frac{(r_{O'Bi} - r_{OO'}) - R \times r_{O'Bi} - \frac{[(R \times r_{O'Bi}) \wedge (r_{O'Bi} - r_{OO'})] \wedge (R \times r_{O'Bi})}{|[(R \times r_{O'Bi}) \wedge (r_{O'Bi} - r_{OO'})] \wedge (R \times r_{O'Bi})|} \times rb}{\left| (r_{O'Bi} - r_{OO'}) - R \times r_{O'Bi} - \frac{[(R \times r_{O'Bi}) \wedge (r_{O'Bi} - r_{OO'})] \wedge (R \times r_{O'Bi})}{|[(R \times r_{O'Bi}) \wedge (r_{O'Bi} - r_{OO'})] \wedge (R \times r_{O'Bi})|} \times rb \right|}. \quad (3.24)$$

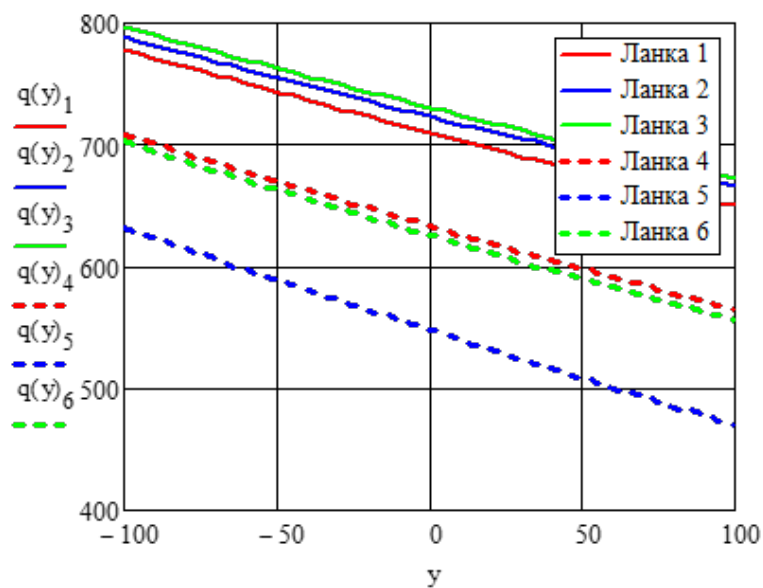
Таким чином, (3.23) представляє собою рівняння зворотної кінематичної залежності довжини ланок від положення та орієнтації робочого органа [62, 63].

Чисельна реалізація зворотної кінематичної залежності наведена у додатку А.

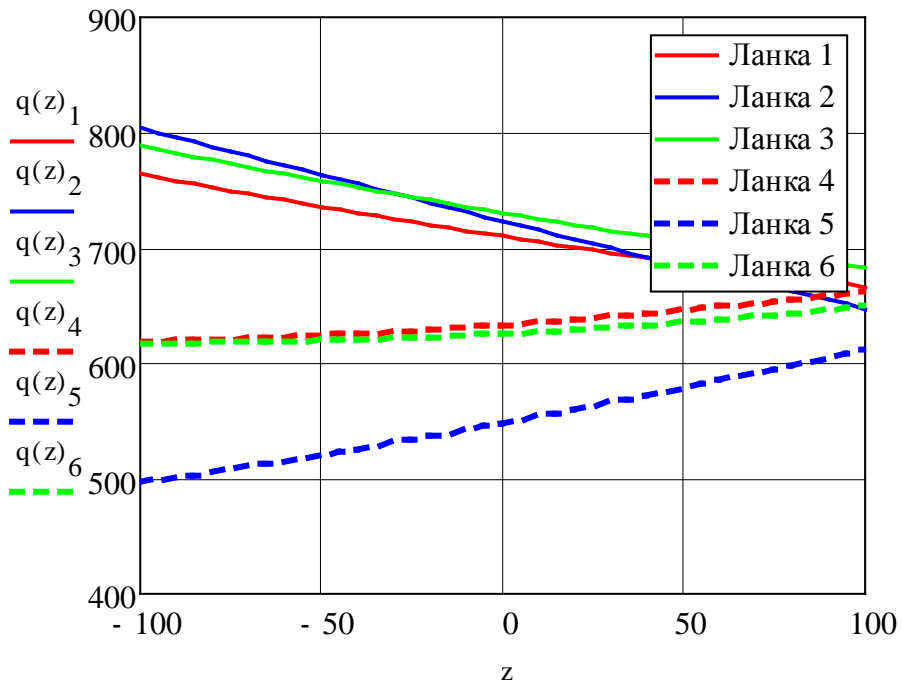
Результати розв'язку зворотної кінематики отримані у вигляді залежностей довжини ланок (штанг змінної довжини) від положення робочого органа по координатам X , Y , Z та додаткової координати s (рис. 3.11), а також залежностей довжини ланок від орієнтації робочого органа – кутів повороту θ та ψ , які відповідають координатам A та B у системі управління верстата (рис. 3.12).



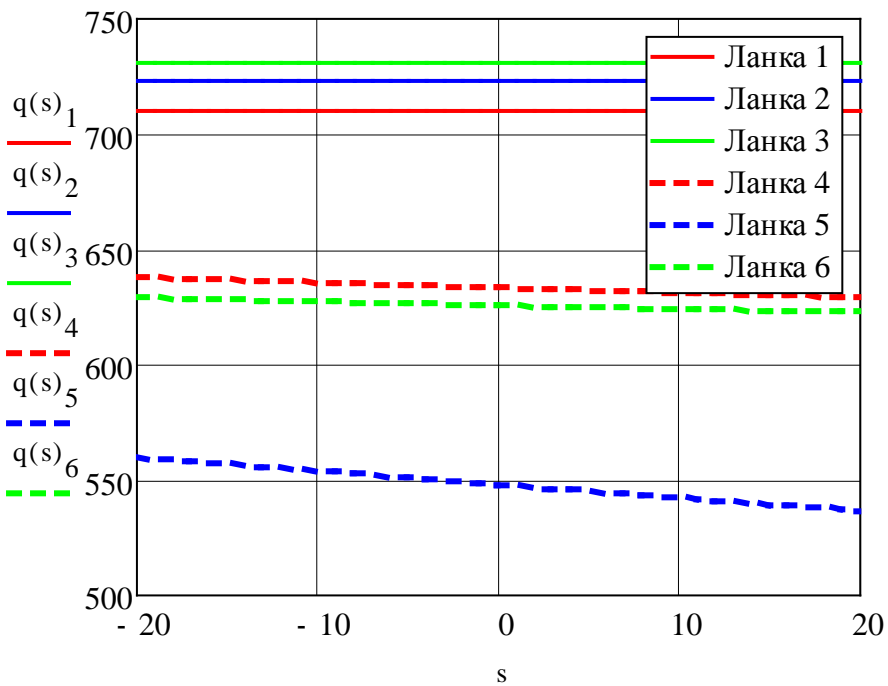
а)



б)

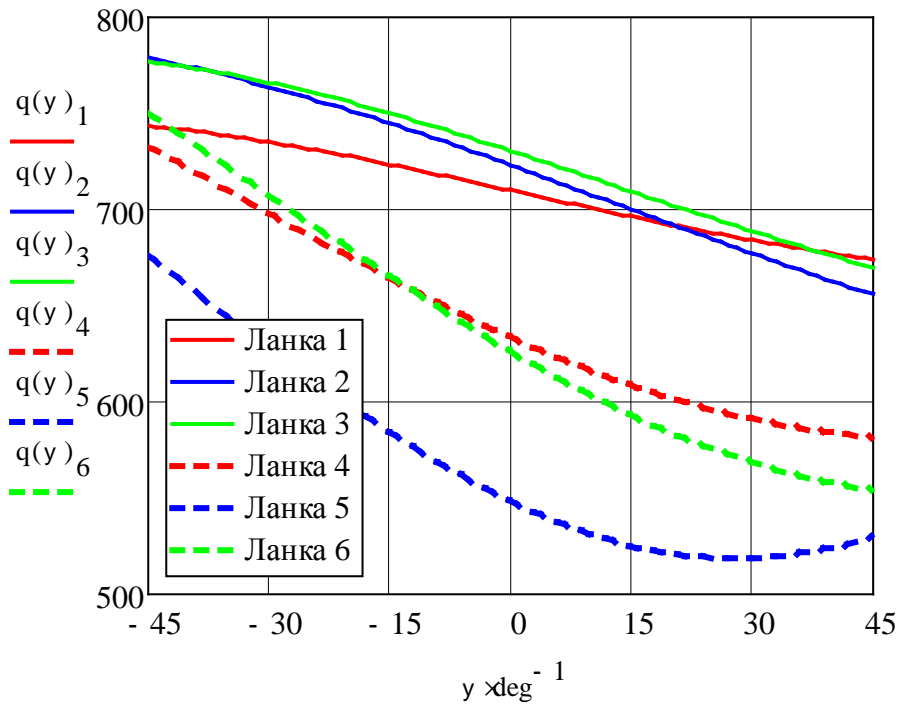


в)

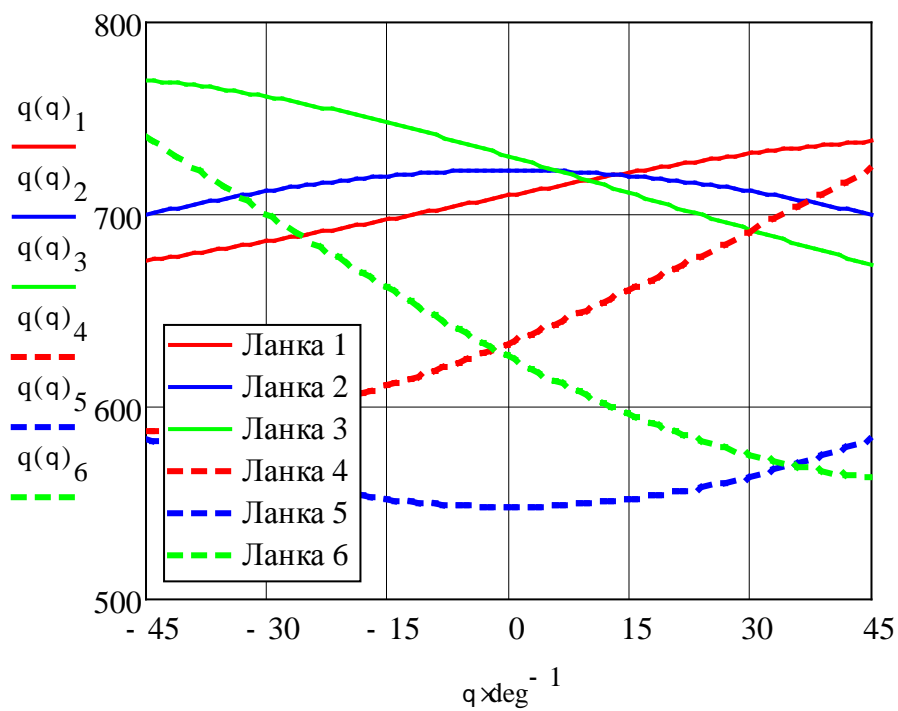


г)

Рис. 3.11. Залежності довжини ланок від положення робочого органа по координатам x (а), y (б), z (в) та додаткової координати s (г)



а)



б)

Рис. 3.12. Залежності довжини ланок від орієнтації робочого органа – кутів повороту θ (а) та ψ (б)

Залежності (рис. 3.11) показують, що при переміщенні робочого органа по осі X на 200 мм максимальна зміна довжин штанг складає приблизно 120 мм, при переміщенні на 200 м у напрямку осі Y – приблизно

160 мм, а при переміщенні робочого органа по осі Z на 200 мм – приблизно 150 мм. Таким чином, у робочій зоні механізму зміна довжини штанг менше, ніж відповідне переміщення робочого органа вздовж координатних осей.

Із графіків залежностей (рис. 3.12) можна бачити, що поворот робочого органа на кут 90° викликає максимальну зміну довжини ланок на 200 мм. Таким чином, зміна орієнтації робочого органа потребує значної зміни довжини ланок.

Розв'язок прямої кінематичної залежності, яка встановлює координати робочого органа виходячи з наявних координат приводів, у подібних механізмах звичайно виконується чисельним методом ітерацій, наприклад за допомогою метода Ньютона-Рафсона [17, 167].

Якщо Q – вектор координат приводів; $G(X)$ – функція зворотної кінематичної залежності, то кожне наступне наближення X_{k+1} вектору узагальнених координат робочого органа обчислюється як

$$X_{k+1} = X_k + J(X_k)(Q - G(X_k)), \quad (3.25)$$

де J^{-1} – яacobіан кінематичної залежності; X_k – поточне наближення вектору узагальнених координат робочого органа.

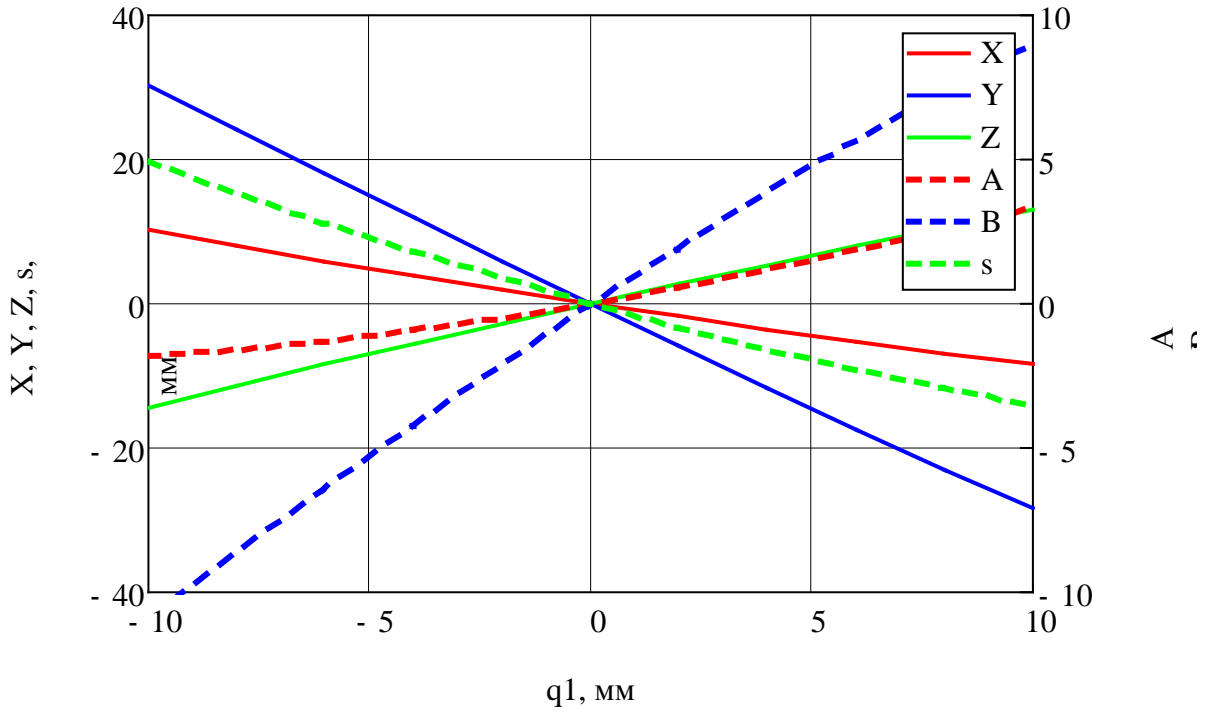
Обчислення припиняються за умови

$$|Q - G(X_k)| < \epsilon, \quad (3.26)$$

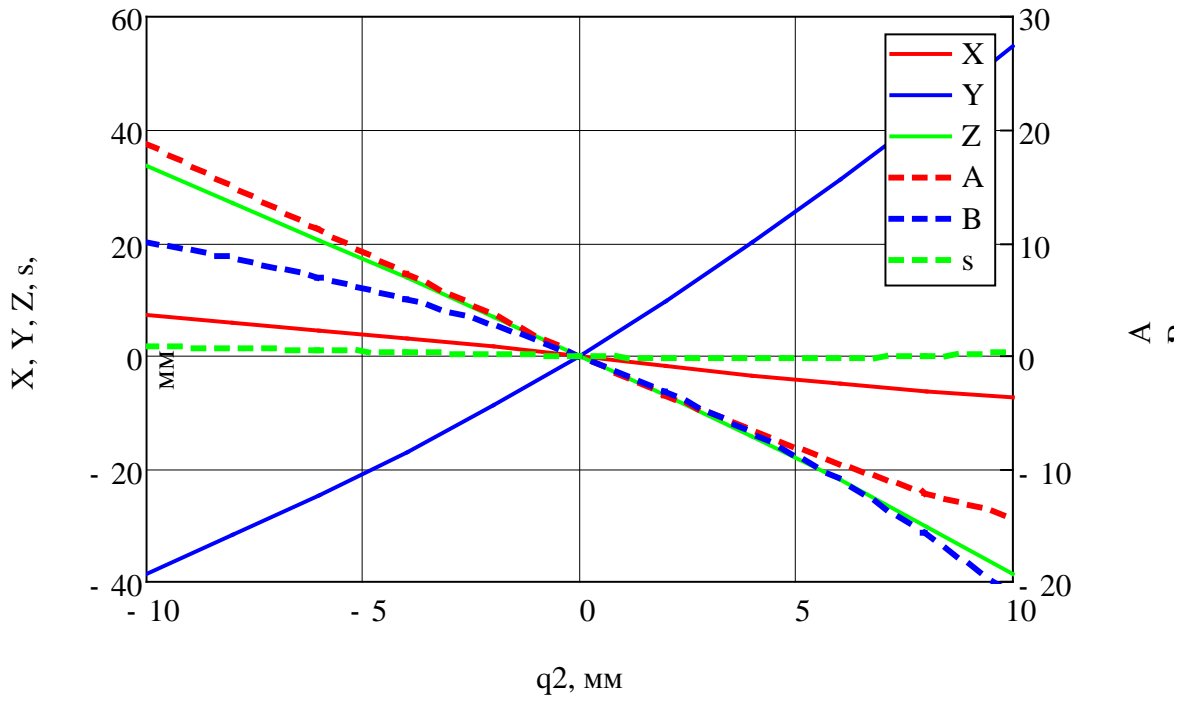
де ϵ – наперед задана похибка обчислень.

Чисельну реалізацію прямої кінематики наведено у додатку Б. Результати обчислення зворотної кінематики для кількох варіантів положення робочого органа (наборів довжин штанг) свідчать, що для досягнення необхідної точності розрахунку потрібно 5-7 ітерацій. Результати обчислень дозволили встановити залежності узагальнених координат робочого органа від зміни координат приводів штанг змінної довжини (рис. 3.13).

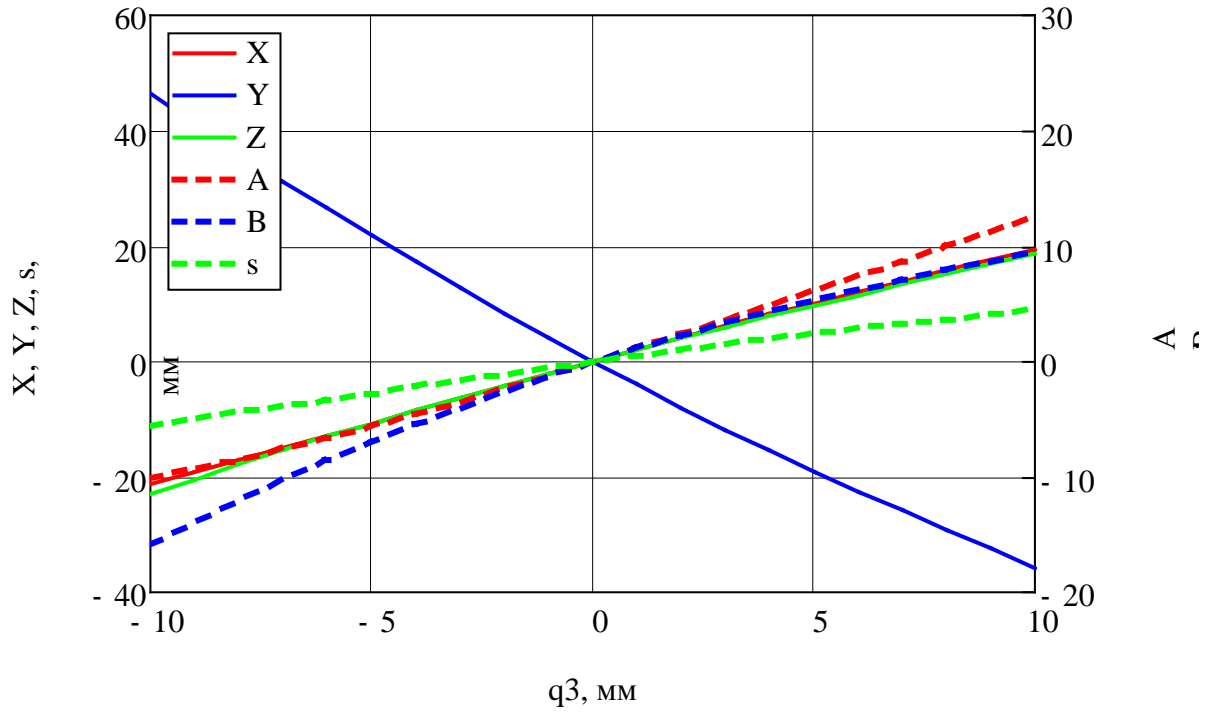
Зміна довжини штанг призводить до зміни як координат робочого органа, так і його просторової орієнтації.



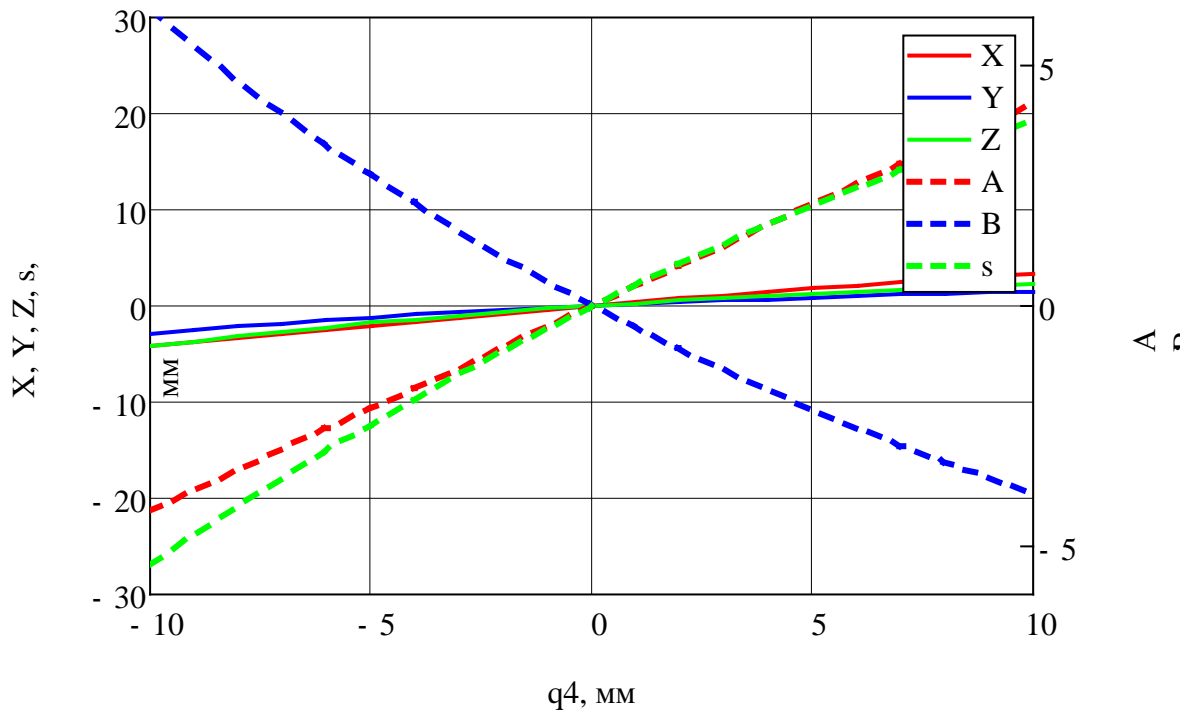
a)



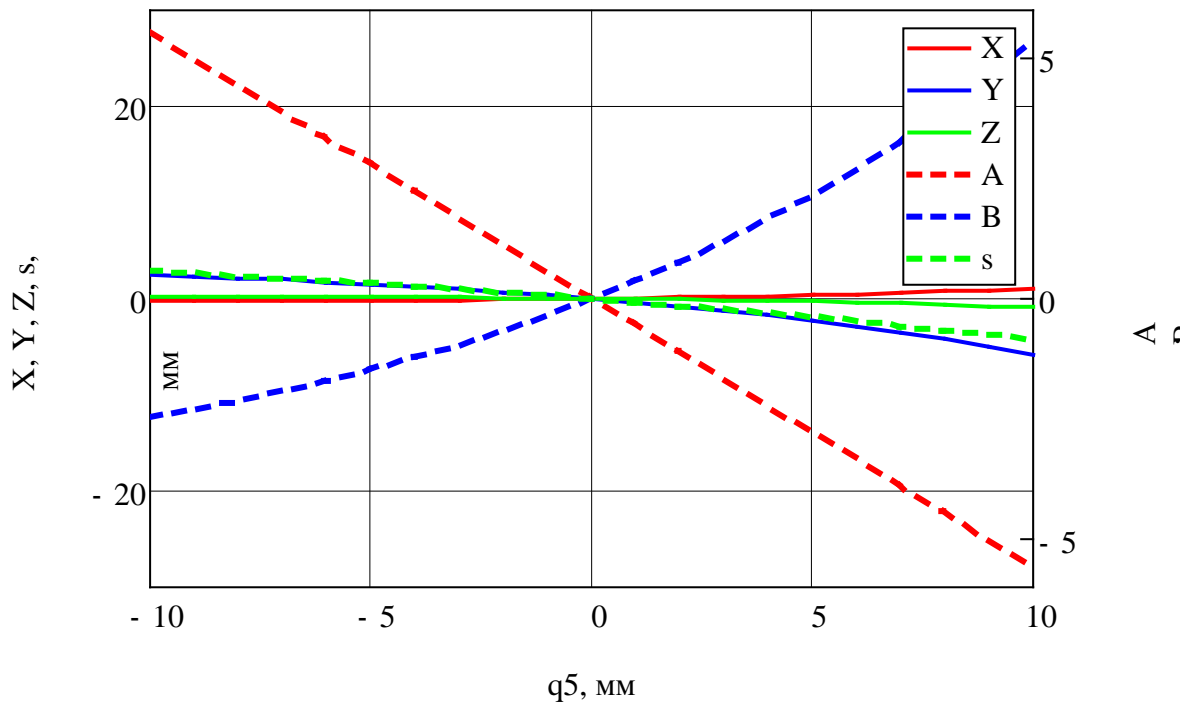
б)



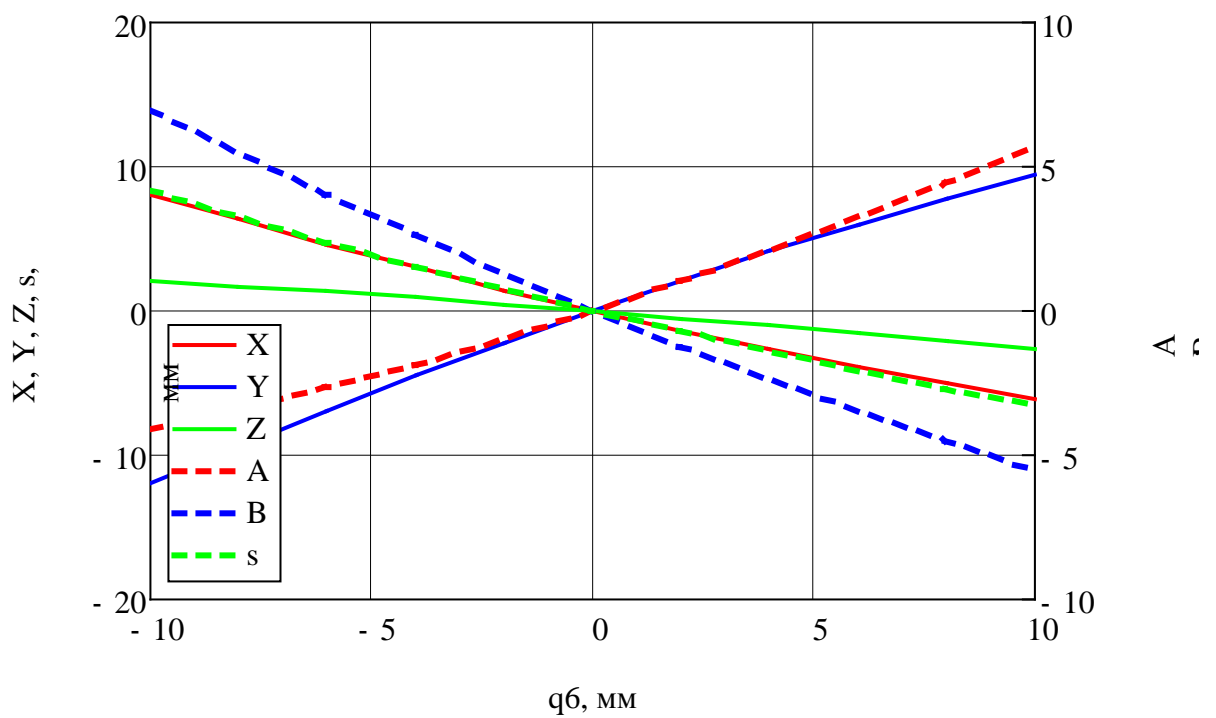
B)



Г)



д)



е)

Рис. 3.13. Залежності узагальнених координат робочого органа від зміни довжини приводів ланок: а) приводу 1, б) приводу 2, в) приводу 3, г) приводу 4, д) приводу 5, е) приводу 6

3.4. Аналіз просторової жорсткості механізму паралельної структури

Для визначення параметрів просторової жорсткості скористаємося розрахунковою схемою рис. 3.14.

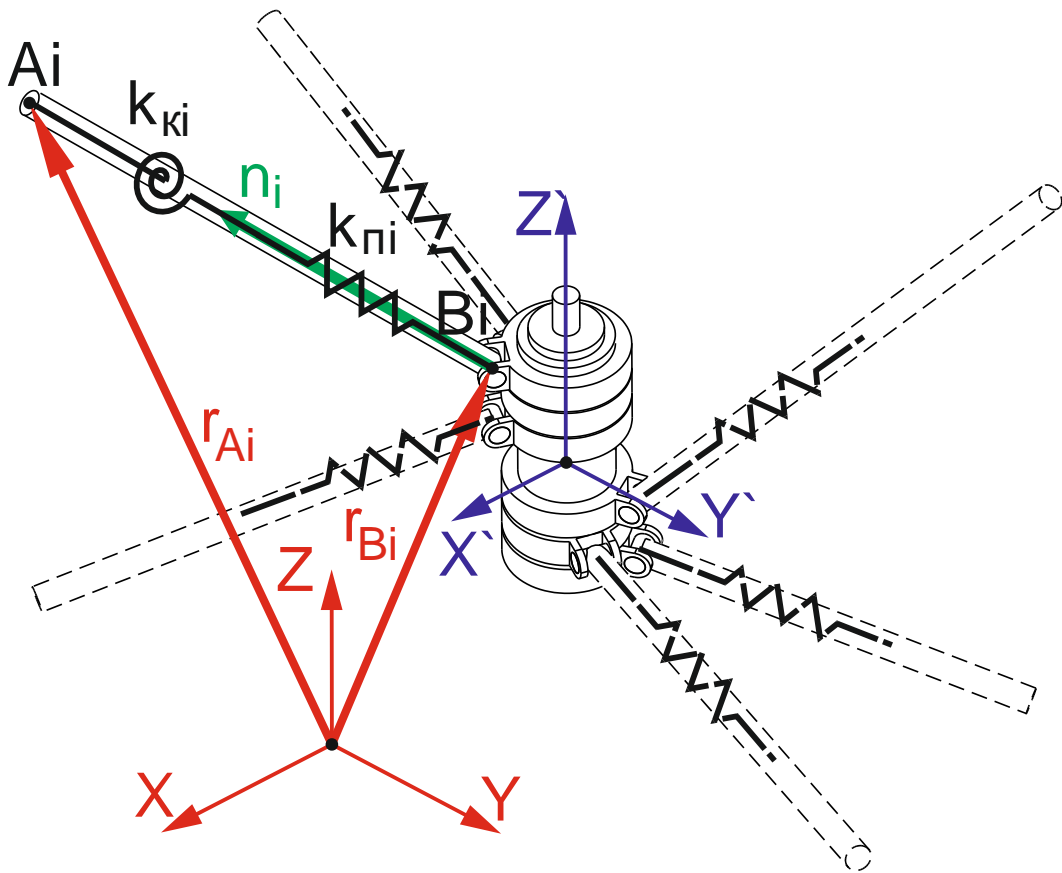


Рис. 3.14. Схема до визначення матриці жорсткості механізму

Кожна ланка змінної довжини з шарнірними опорами представляє собою лінійну пружину, а відповідно конструкції робочого органа одна з ланок, яка не має можливості обертання навколо осі шпинделя – додатково розглядається як крутильна пружина [34, 35].

Таким чином, матриця жорсткості надлишкового механізму паралельної структури, який має робочий орган із спільною віссю шарнірів, згідно визначається як сума матриць жорсткості шести ланок, що розглядаються як лінійні пружини, та однієї ланки, що розглядається як крутильна пружина [37]:

$$K = \sum_{i=6}^n k_n \times \begin{pmatrix} \hat{e}_i & \mathbf{n}_i \\ \hat{e}_i & \mathbf{n}_i \end{pmatrix} + k_k \times \begin{pmatrix} \hat{e}_0 & \mathbf{n}_0 \\ \hat{e}_0 & \mathbf{n}_0 \end{pmatrix}, \quad (3.27)$$

де $k_{\pi i}$ – поступальна жорсткість ланки; $k_{\pi i}$ – поступальна жорсткість ланки; \mathbf{n}_i – одиничний вектор осі штанги змінної довжини, який визначається згідно формули (3.24).

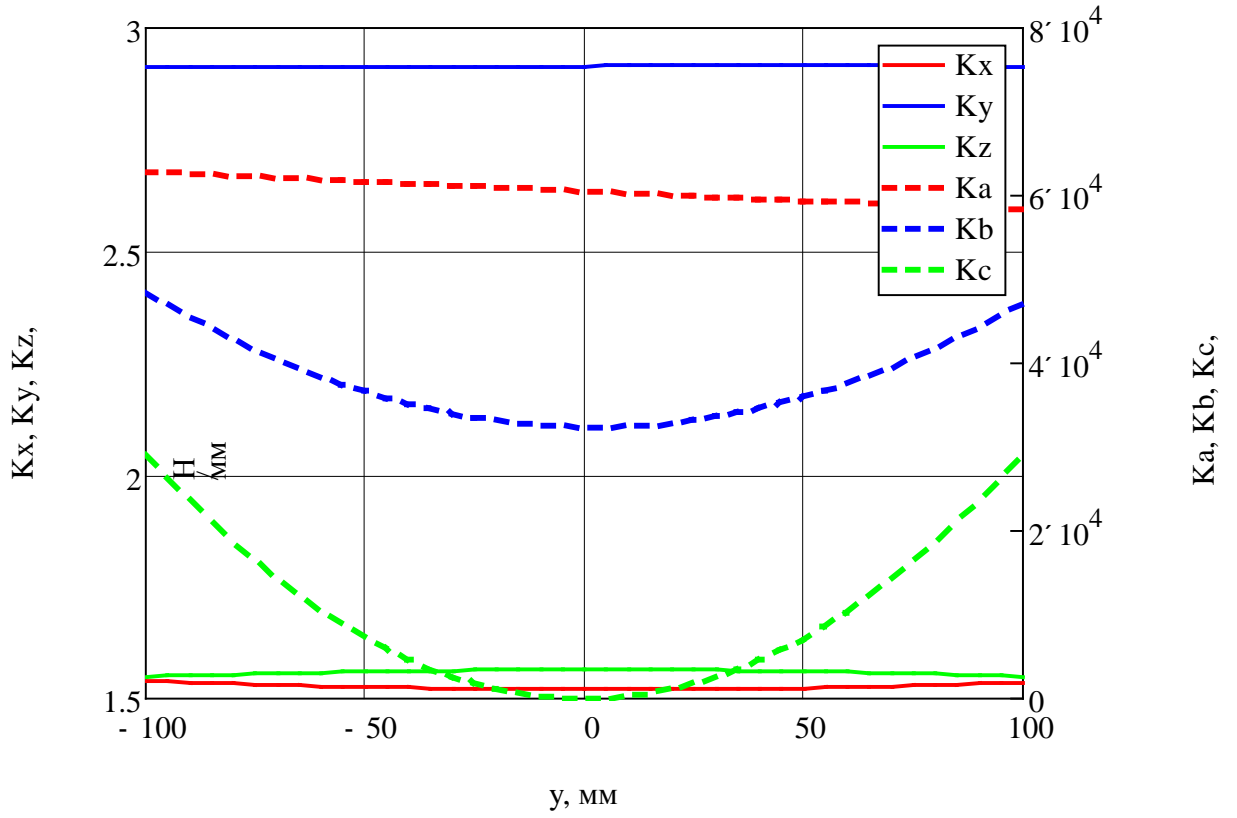
Виконаємо оціночні розрахунки жорсткості просторової системи механізму паралельної структури. Для встановлення жорсткості верстата з шістьма штангами кінематичних структур з діаметрами кіл розміщення шарнірів штанг основи, які складають 1 м, кути які обмежують повороти верхніх шарнірів складають 60° і 90° , а діапазон зміни довжини штанг складає 0,6 м.

Приклад розрахунку матриці просторової жорсткості наведено у додатку В.

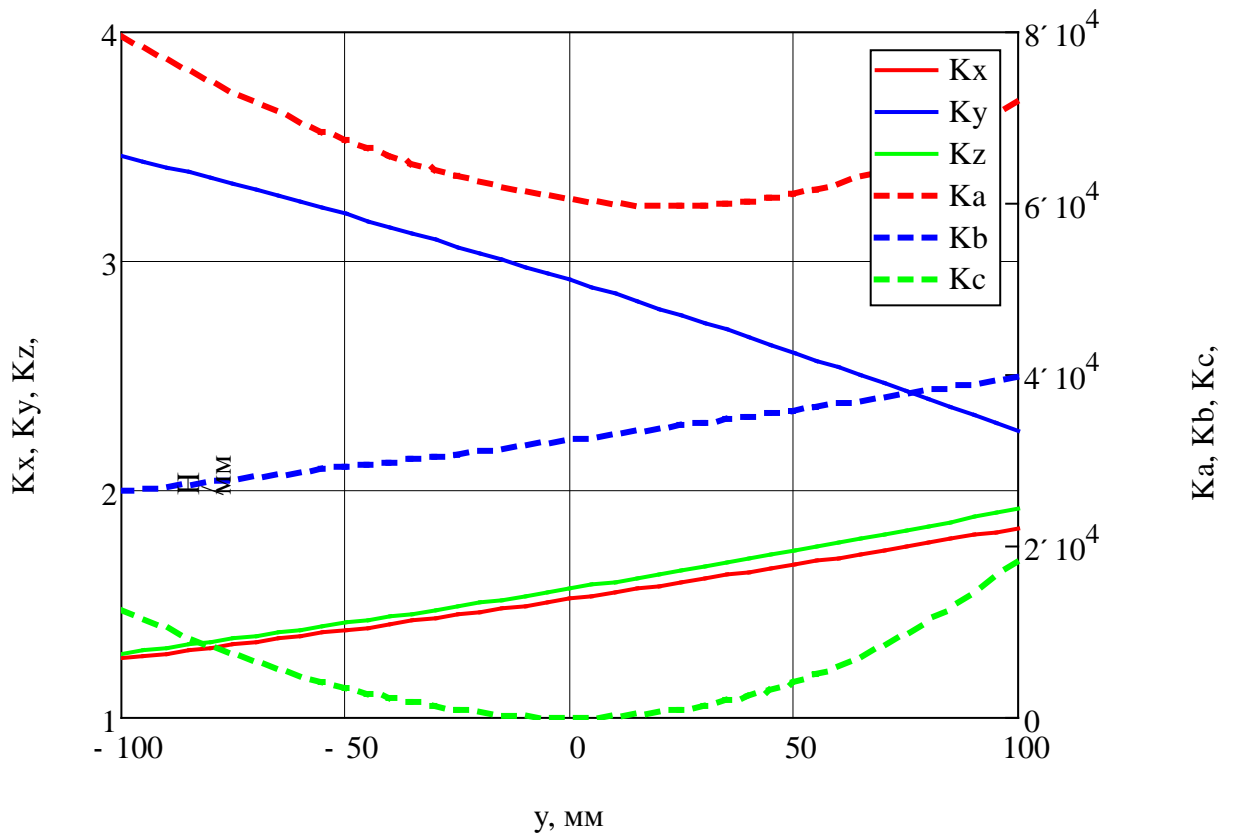
Матриця жорсткості у вихідному положенні дорівнює

$$K(M0) = \begin{pmatrix} 2.049 & 0.533 & 0.665 & 100.562 & 904.965 & -1.08 \cdot 10^3 \\ 0.533 & 0.299 & 0.809 & 321.766 & 136.598 & -223.6 \\ 0.665 & 0.809 & 3.652 & 1.773 \cdot 10^3 & 252.089 & -237.16 \\ 100.562 & 321.766 & 1.773 \cdot 10^3 & 9.065 \cdot 10^5 & 7.763 \cdot 10^4 & -1.844 \cdot 10^4 \\ 904.965 & 136.598 & 252.089 & 7.763 \cdot 10^4 & 6.628 \cdot 10^5 & -5.684 \cdot 10^5 \\ -1.08 \cdot 10^3 & -223.6 & -237.16 & -1.844 \cdot 10^4 & -5.684 \cdot 10^5 & 6.076 \cdot 10^5 \end{pmatrix} \cdot 10^6$$

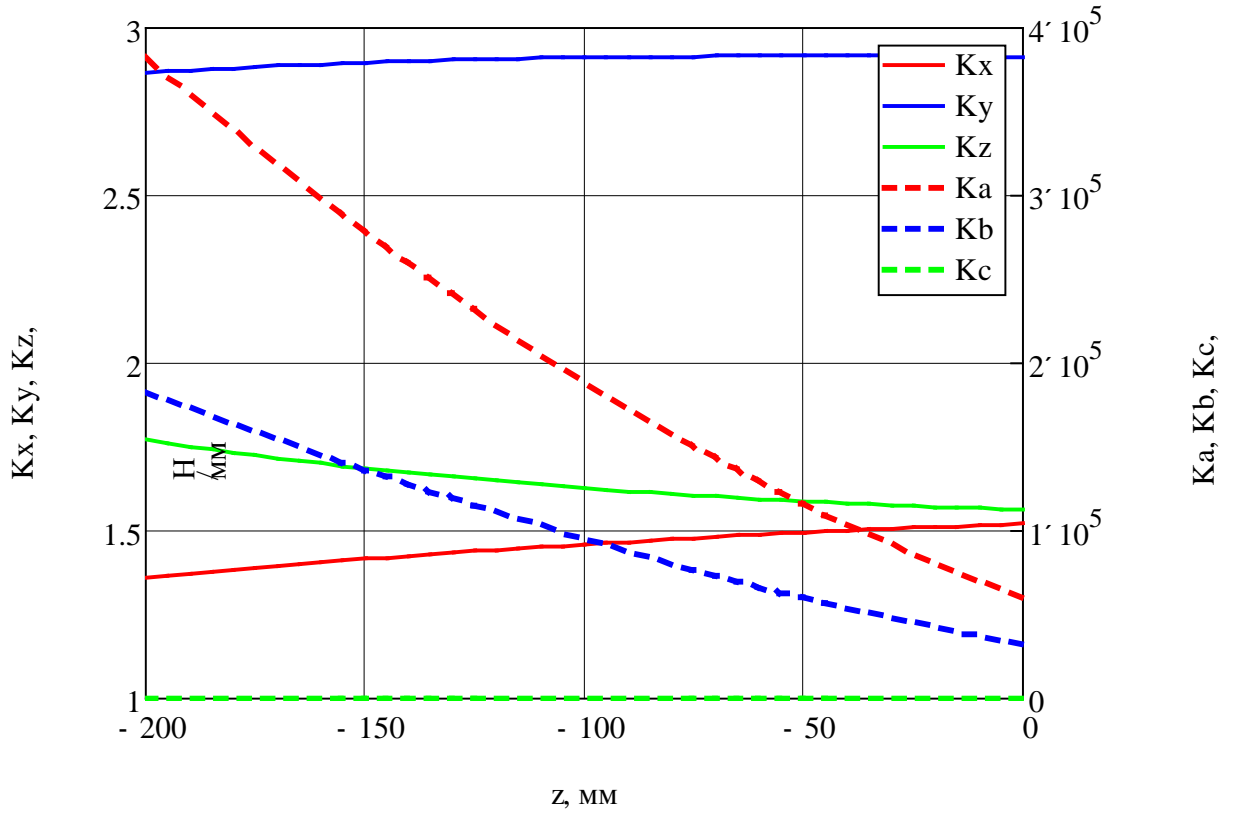
Координатна просторова жорсткість механізму верстата, отримана за допомогою розрахунку матриці жорсткості, зображена на рис. 3.15 у формі залежностей від координат робочого органа та його орієнтації.



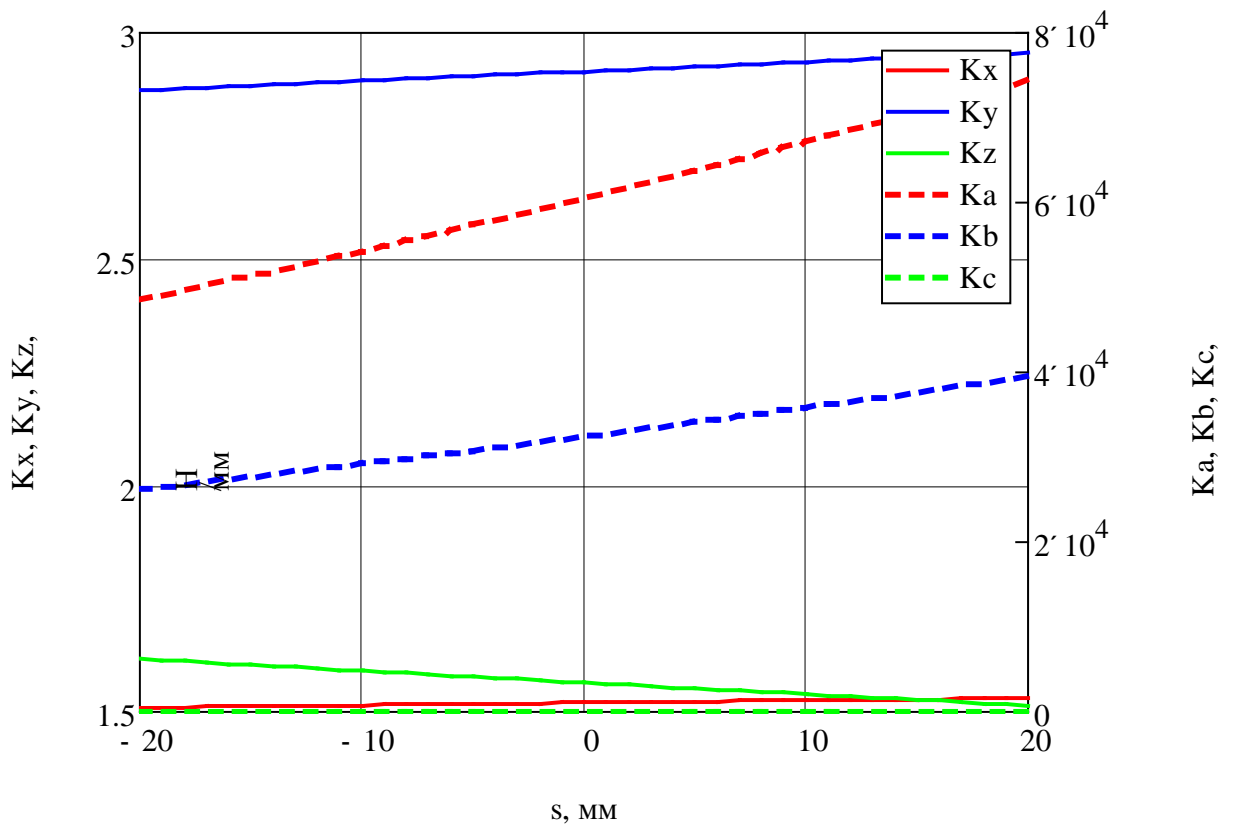
a)



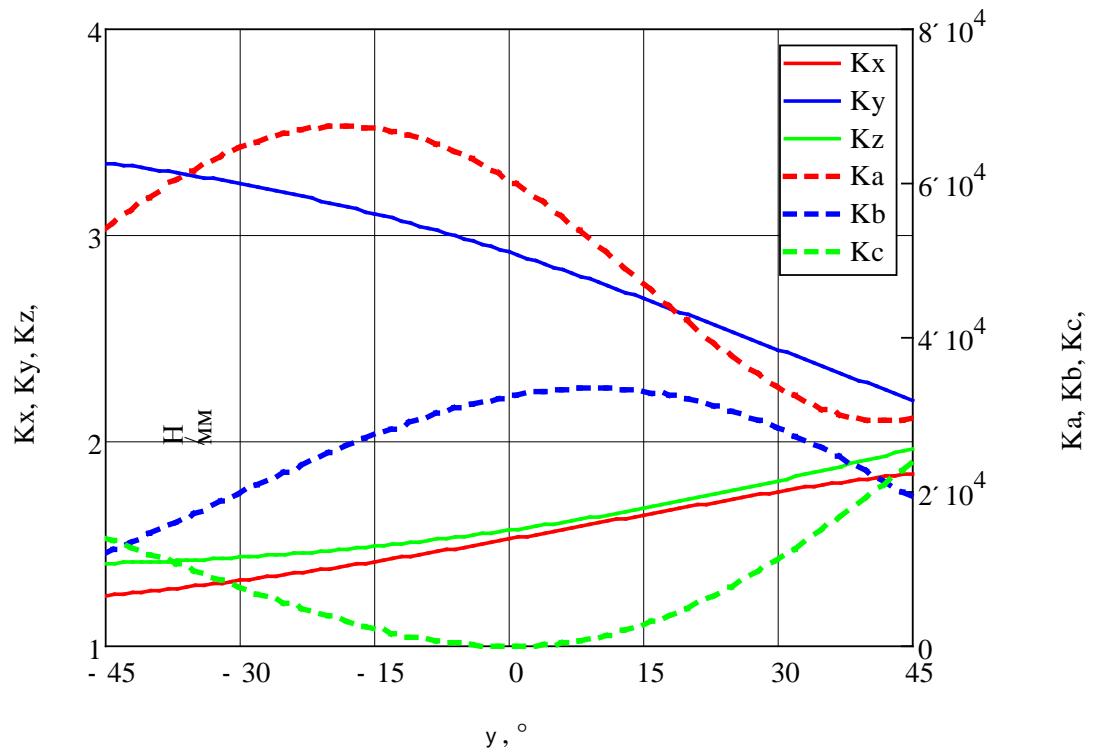
б)



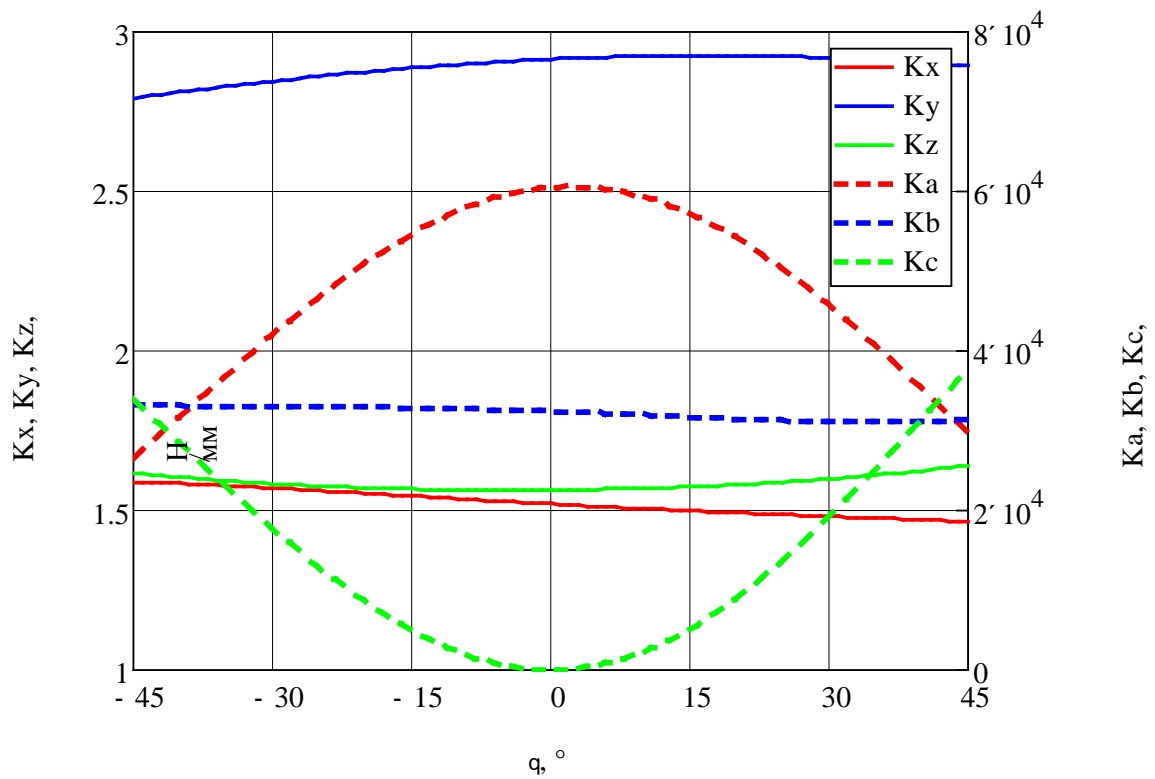
B)



Г)



д)



е)

Рис. 3.15. Залежність лінійної та кутової жорсткості за осями координат від координатам x (а) , y (б) , z (в) та додаткової координати s (г) орієнтації робочого органа – кутів повороту θ (д) та ψ (е)

Жорсткість на кінці робочого органа може бути визначена, якщо використовувати для розрахунку жорсткості ланок-пружин вектори центрів шарнірів \mathbf{r}'_{Bi} у системі координат, початок якої співпадає з переднім кінцем робочого органа (рис. 3.16).

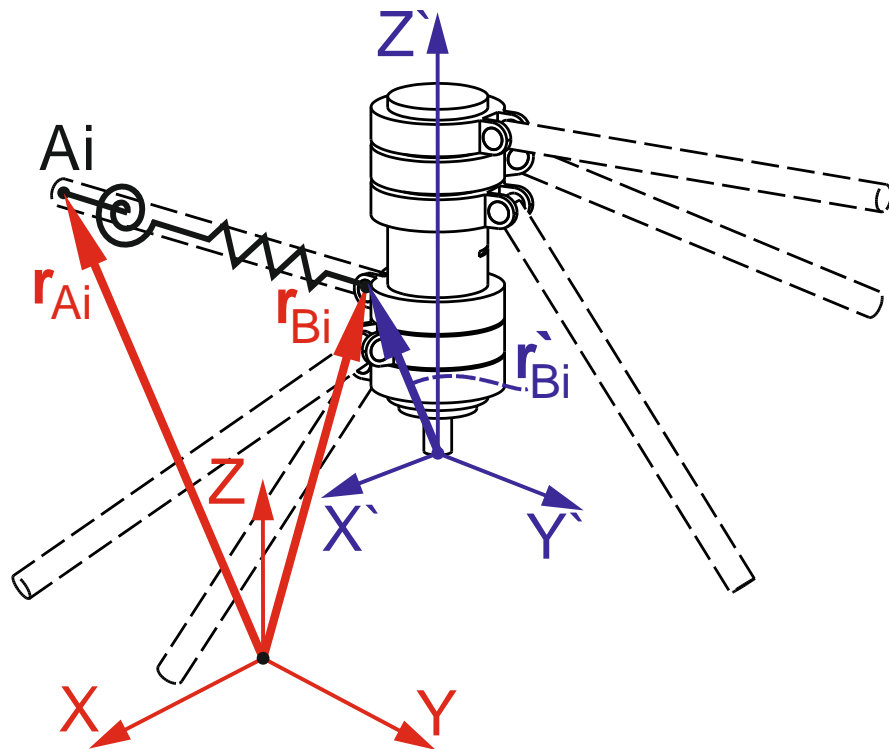


Рис. 3.16. Схема визначення жорсткості на передньому кінці робочого органа

Тоді визначена матриця жорсткості нестиме інформацію про безпосередню просторову жорсткість при прикладенні узагальненого навантаження до переднього кінця робочого органа, де розміщено інструмент, яким оброблюється деталь.

За допомогою отриманих залежностей було проведено розрахунок просторової жорсткості верстата у робочій зоні розміром 200x200x200мм (додаток Г).

Отримані результати розрахунків показників жорсткості верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур приведені в табл. 2.1.

Табл. 2.1 – Результати розрахунків жорсткості верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю

№ з/п	Параметр		Значення
1	Робоча зона X×Y×Z, мм		200×200×200
2	Ранг матриці жорсткості		6
3	Визначник матриці жорсткості, ×10 ¹⁵		7,562
4	Відношення середньої жорсткості до жорсткості одної штанги	X	1,471
		Y	2,883
		Z	1,646
5	Відношення загальної середньої жорсткості до жорсткості одної штанги		2,000

Можна відзначити, що у робочому просторі верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю в залежності від змінної довжини штанг характеристики жорсткості визначаються жорсткістю штанги на розтяг-стискання. Зокрема, середня жорсткість у напрямках координатних осей перевищує жорсткість штанги від 1,4 до 2,8 разів. Максимальна жорсткість у напрямку осі Y, мінімальна – у напрямку осі X.

З табл. 2.1 видно, що використання верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур надає можливість отримати достатню середню жорсткість, на рівні подвійної жорсткості штанги.

Отримані результати свідчать про більшу жорсткість механізму з кінематичною надлишковістю порівняно з звичайним механізмом паралельної структури із співвісними шарнірами робочого органа [46], що пояснюється більшою кількістю штанг, які сприймають навантаження на робочий орган. Для порівняння, у верстата паралельної структури на основі платформи Стюарта розрахункова середня жорсткість складає близько 1,45 жорсткості штанги, а середня жорсткість по осям X та Y приблизно 0,7 жорсткості штанги [36], що вдвічі менше, ніж у запропонованого механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю.

3.5. Зміна температури в зоні контакту та динамічні явища у момент контакту із оброблюваним тілом

З урахуванням викладеного та наведених у п.2.1. рівнянь теплового балансу, а також рівнянь, що описують взаємодію інструменту з нещільним середовищем нами виконано оцінку температур у точці контакту при різних умовах роботи інструменту – як із повністю відкритими зернами, так і у випадку, коли поверхня вкривається продуктами руйнування.

За часом контактної взаємодії розраховано температурні поля та виконано оцінку температури у зоні контакту, а також встановлено зміну умов взаємодії та вплив на зазначену температуру. Показано, що при обробці в міру зносу круга та формування щільної поверхневої карбонової плівки починає різко зростати вертикальна складова сили різання та температура в зоні взаємодії (рис. 3.17).

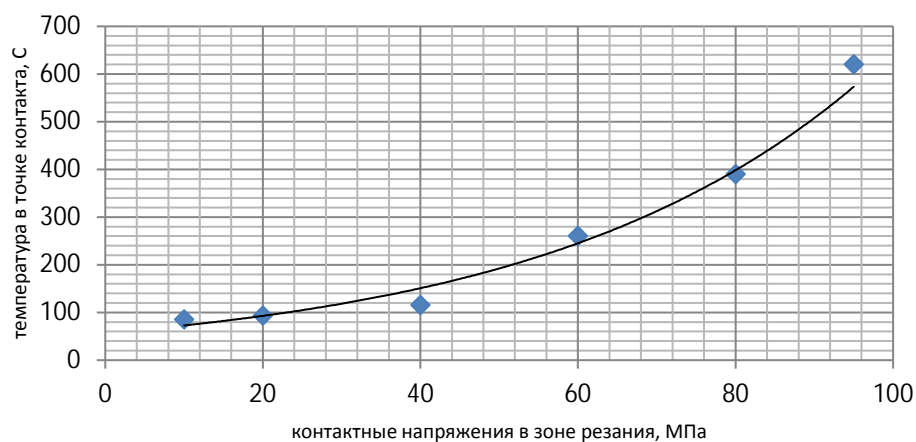


Рис. 3.17. Очікуване підвищення температури T в зоні різання залежно від контактних напружень d

Дослідженнями встановлено, що різання інструментом із відкритими абразивними зернами та без забруднення продуктами руйнування карбонової матриці формує початкові джерела тепловиділення, які протягом малого проміжку часу утворюють практично однорідне температурне поле (рис. 3.18), величина і градієнт якого різко зростають при погіршенні різальних властивостей інструмента.

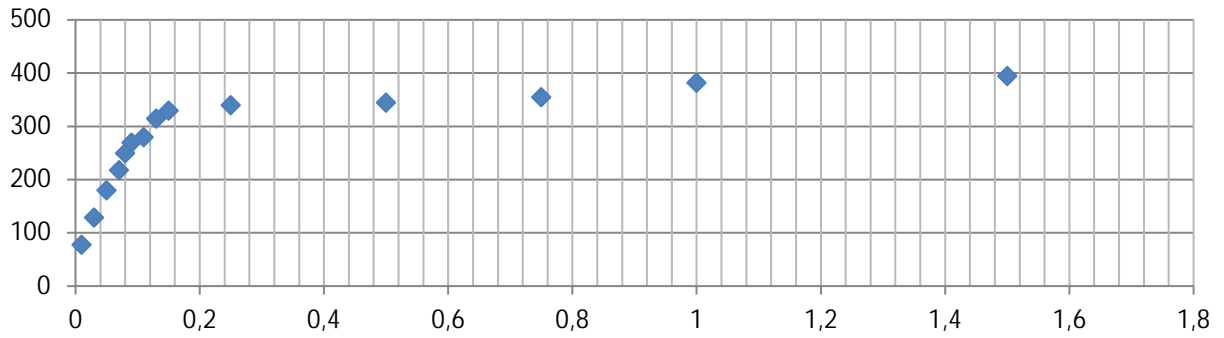


Рис. 3.18. Зміна температури на поверхні ($^{\circ}\text{C}$) з плином часу (хв) залежно від умов контакту

Справді, якщо при абразивному мікрорізанні поверхневого шару, яке відбувається як сукупність контактів одиничного зерна із матеріалом, площа безпосереднього контакту визначається на основі пружної взаємодії елементів технологічної системи, то в міру зниження продуктивності обробки (визначається обсягом зйому матеріалу за одиницю часу W_r , причому $W_r = t_f b s_r$, s_r – швидкість робочої подачі, b – ширина круга) при попередніх режимах обробки невидалений матеріал збільшує контактний тиск та площу контакту. Розглянемо окреме абразивне зерно. Нехай останнє, рухаючись в масиві матеріалу, здійснює роботу руйнування на довжині контакту l_p . При цьому вважаємо, що форма штриху відповідає формі частини зерна, яка виступає над поверхнею, и яку можна уявити у вигляді півсфери висотою y .

Тоді об'ємний зйом матеріалу складе:

$$W_r = \frac{\rho y^2}{2} l_p n, \quad (3.28)$$

а різниця в обсязі зменшить t_f в рівнянні (3.7) із одночасним зростанням пружних деформацій (і, відповідно, сили F у місці контакту). Таким чином,

$$R_x = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} (x_k + x_d) = F, \text{ що дозволяє за величиною фактично знятого шару}$$

визначити умови контакту в зоні різання.

Отже, зменшення динамічних навантажень плями контакту інструмента із оброблюваною поверхнею можливе за умови, що режими абразивної обробки встановлено так, що механічна робота руху різального шару максимально витрачаються на роботу мікрорізання [47]. При цьому шлам і мікростружка надійно видаляються із зони різання і не сприяють зменшенню фактичної глибини різання із одночасним різким зростанням температури.

3.6. Висновки за розділом

1. В результаті аналізу процесів і явищ у зоні обробки запропоновано фізичну модель деформаційно-фрикційно-контактної взаємодії окремих зв'язаних абразивних зерен із нещільними середовищем, яке моделює оброблюваний карбон-карбонівий матеріал типу КИМФ. Розглянуто задачу виділення тепла на поверхні контакту (по периферійній і бічним поверхням інструменту) встановлено функціональні взаємозв'язки між плямою динамічного контакту інструмента із поверхнею та термосиловим навантаженням.

2. Встановлено, що надлишок тепла викликатиме різке зростанням температури на периферії інструменту та відповідно вестиме до його деформацій, внаслідок чого якість обробки поверхонь погіршиться, а ширина різку зросте. Зроблено припущення, що погіршення якості оброблюваної поверхні обумовлюється зростанням температури в зоні різання, і безпосередньо визначається забрудненням різального шару; при цьому провідну роль у силовому навантаженні зони обробки відіграє маніпуляційна система верстата. Забезпечення раціонального теплового режиму можливе лише при відповідній зміні режимів ведення обробки, шляхом зміни швидкості переміщень інструменту відносно оброблюваної поверхні. При

цьому найбільш ефективними з точки зору керованості є маніпуляційні системи із паралельними кінематичними ланцюгами.

3. Виходячи із даного припущення, запропоноване нове технічне рішення верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю, проведений аналіз кінематичних залежностей та показана доцільність його застосування для маніпулювання шпинделем із абразивним інструментом. Отримано систему рівнянь, яка пов'язує узагальнені координати робочого органа (координатні положення та орієнтацію) робочого органа з довжиною приводів штанг змінної довжини.

4. За допомогою встановлення одиничних векторів ліній штанг змінної довжини отримано залежності для визначення матриці жорсткості робочого органа 6×6 та проаналізовано зміну жорсткості у заданій робочій зоні верстата. Зроблено висновок про більшу жорсткість механізму з кінематичною надлишковістю порівняно із повнопаралельними механізмами паралельної структури із співвісними шарнірами робочого органа та платформою Стюарта.

5. Встановлено, що зменшення динамічних навантажень плями контакту інструмента із оброблюваною поверхнею можливе за умови, що режими абразивної обробки встановлено так, що механічна робота руху різального шару максимально витрачаються на роботу мікрорізання. При цьому шлам і мікростружка надійно видаляються із зони різання і не сприяють зменшенню фактичної глибини різання із одночасним різким зростанням температури.

4. ІДЕНТИФІКАЦІЯ МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ІЗ НЕЩІЛЬНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОПОНОВАНОГО ВЕРСТАТА ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

4.1. Дослідження температури в зоні різання та її зв'язку із силовим навантаженням

Для встановлення закономірності зміни температури залежно від стану поверхні диску, напрямку укладки армувальних волокон, а також силового навантаження зони різання, тобто визначення $T_i = f(F_p, \tau, A)$ проведено визначення параметрів сили та температури T_i в автоматичному режимі. Використовувалися зразки, орієнтовані у площині X-Y ($A=1$) та Z-X ($A=2$), що дало змогу отримати кілька діаграм нагрівання диску. Обробку виконували так, щоб забезпечити різання як чистими (незабрудненими) дисками, так і дисками із забрудненням.

Перед випробуваннями диски (8 шт) піддали метрологічному контролю, визначивши їх геометричні параметри шляхом вимірювання плинного радіусу r_j^i та ширини h_j^i при встановленні на оправку шпинделя відрізного верстата мод. FDB Maschinen GYQ400B/220, побудували кругові діаграми та встановили висоту вильоту абразивних зерен відносно поверхні круга d_j^i . Також визначено кількість зерен n та встановлено масу дисків m_k^p . Відповідні дані зведені до таблиці 4.1, в якій відображено результати перевірки 4 дисків.

Аналіз отриманих результатів засвідчив, що практично усі круги можуть бути використані для обробки, розкид параметрів вимірів товщини і діаметру кругів порівняний із похибкою контролю.

Таблиця 4.1 – Параметри використуваних пильних дисків (4 зразки)

№	$r_j^i, \text{мм}$	$h_j^i, \text{мм}$	Кругова діаграма	$m_k^p, \text{г}$	$\bar{m}_k^p, \text{г}$	$d, \text{мм}$	n
1	57,52	1,95		42,342	42,3773	0,52	118
	57,47	2,02		42,389			
	57,51	2,05		42,401			
2	57,55	2,03		43,875	43,814	0,55	123
	57,58	2,02		43,870			
	57,49	2,01		43,698			
3	57,48	2,05		44,273	44,529	0,53	122
	57,44	2,04		44,299			
	57,51	2,01		45,017			
	57,41	2,03		42,190	42,2016	0,49	128
	57,44	2,01		42,210			
	57,51	2,05		42,205			

Такий висновок зроблено на основі проведення дисперсійного аналізу за постульованою лінійною моделлю виду $y_{ij} = m + a_i + e_{ij}$, де $m = E(y_{ij})$ – математичне очікування результатів спостережень за усією сукупністю; a_i – ефекти i -того рівня фактору A ; e_{ij} – незалежні та нормально розподілені помилки спостережень; n_i – обсяг вибірки для i -того рівня фактору A .

Визначені $SS = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$ – сума квадратів відхилень усієї кількості N

спостережень від їх загального середнього значення; $SS_A = \sum_{i=1}^p n_i (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2$ –

сума квадратів відхилень середніх значень по рядкам від загального

середнього значення; $SS_E = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$ – сума квадратів відхилень

результатів дослідів від середнього значення відповідного спостереження,

або остаточної сума квадратів; ступені свободи $f = N - 1 = \sum_{i=1}^p n_i - 1$ для SS ,

$f_a = p - 1$ для SS_A та $f_e = N - p = \sum_{i=1}^p n_i - p$ для SS_E , дозволили отримати три

незміщені оцінки дисперсії s^2 : загальну оцінку дисперсії $s^2 = SS/f$; оцінку

дисперсії за факторами $s^2_A = SS_A/f_a$; остаточної дисперсію $s^2_e = SS_e/f_e$, а

перевіривши співвідношення s^2_A / s^2_e за допомогою F -критерію Фішера,

отримали належність усіх вимірів одній генеральній сукупності. Отже,

результати дослідів різними кругами можна вважати тотожними і такими, що

адекватно будуть відображати усі контрольовані процеси.

Силове навантаження та температуру в зоні різання знімали в автоматичному режимі, отримуючи відповідні осцилограми. Приклад знятої осцилограми подано на рис. 4.1, а усереднені значення температур – на рис. 4.2.

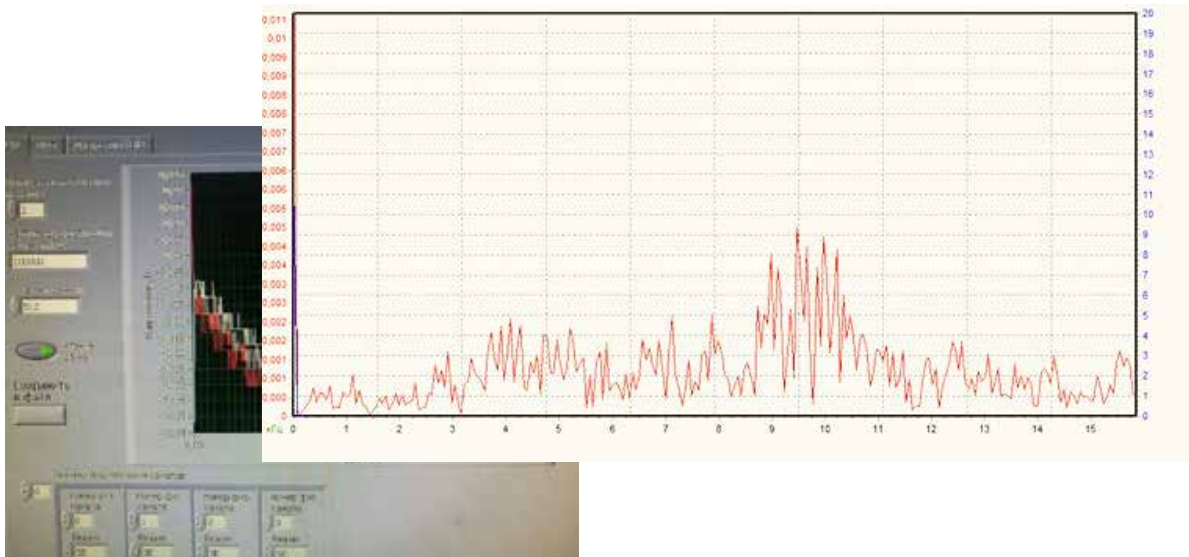
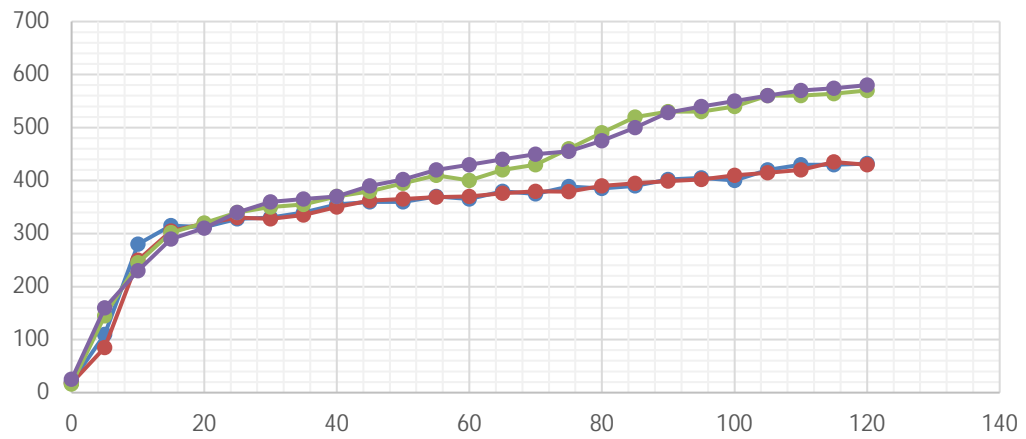
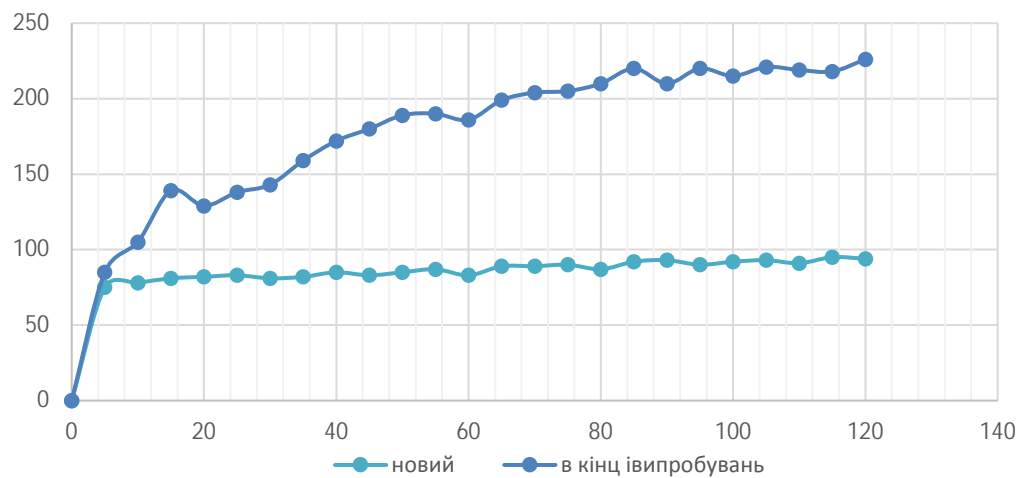


Рис. 4.1. Приклад зафіксованої осцилограми навантажень та температур у зоні різання



а)



б)

Рис. 4.2. Зміна температури T_i ($^{\circ}\text{C}$) в зоні різання (а) та навантаження F_p (Н) (б) при використанні нового та забрудненого кругів

Обробку виконували з лінійною подачею 20,0 мм/с, частота обертання диску – 5000 хв⁻¹, що відповідає лінійній швидкості різання 30,0 м/с. Глибина різання склала 15,0 мм.

З приведених діаграм стає зрозумілим, що зростання зусилля різання F_p супроводжує зростання температури T_i ; при цьому для нових дисків (без забруднення поверхневого шару) спостерігається певна стабілізація температурного режиму; зі збільшенням бруду на поверхні і з відповідним зниженням різальної здатності при постійній подачі спостерігає поступове зростання температури. Критичне забруднення веде до стрімкого зростання як сили (практично припиняється процес мікрорізання і спостерігається явище термосилового втиснення диску з його деформуванням практично до повної втрати стійкості (рис. 4.3)), так і температури в точці контакту, яка може сягати 700-900 °С.

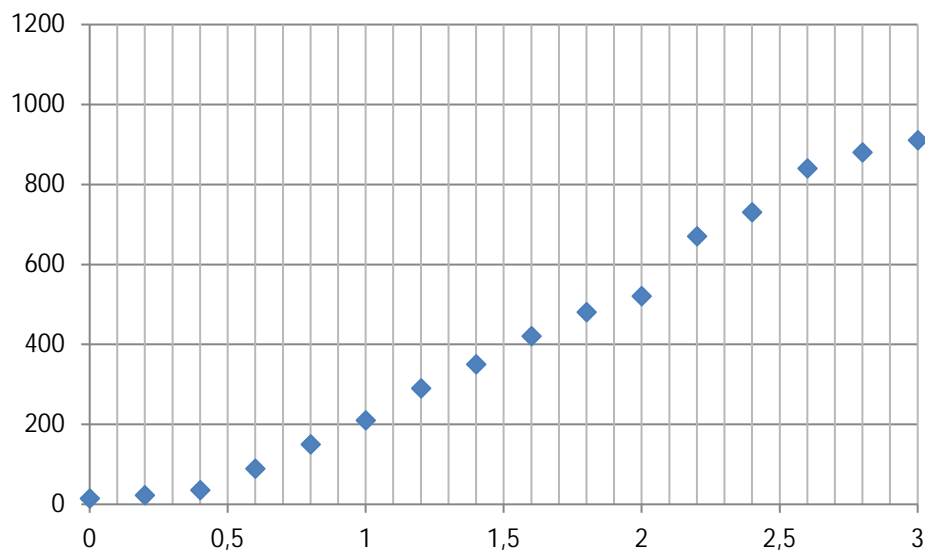


Рис. 4.3. Стрімке зростання температури T_i , °C, в зоні різання при утворенні на поверхні круга забруднення (час у с)

За рівнянням (3.4) та на основі отриманих даних визначено площу контакту для диску із нещільним середовищем.

При цьому значення температури і сили фіксували, з очікуванням 2,0 с після початку процесу різання.

Результати зведені до табл. 4.2. Порівнюючи встановлену експериментально площу контакту із розрахованою теоретичною s_t для випадку різання із поступальною подачею за (2.5), отримали щільність забруднення поверхні круга $y_k, y_k = s_t / \hat{s}$.

Таблиця 4.2 – Розрахунок площі контакту s_i за встановленими параметрами F_p та T_i

№	Параметри процесу		s_i	\hat{s}	s_t	y_k
	$F_p, Н$	$T_i, К$				
Новий круг t=5 хв роботи						
1	82	610	96,2	92,23	186,0	0,495
2	84	599	89,3			
3	75	570	92,6			
4	79	575	90,8			
Круг після t=15 хв роботи						
1	101	670	104,2	103,87	186,0	0,558
2	98	660	102,8			
3	95	675	105,3			
4	97	665	103,2			
Круг після t=30 хв роботи						
1	110	702	110,4	110,42	186,0	0,593
2	108	690	108,1			
3	118	700	112,3			
4	121	685	110,9			
Круг після t=45 хв роботи						
1	149	750	116,7	118,8	186,0	0,643
2	146	730	118,5			
3	153	745	119,2			
4	164	732	120,8			

Виміри контрольованих величин і розрахунок параметру y_k дозволили побудувати залежність останнього у функції часу (рис. 4.4). Видно, що дана

залежність задовільно описується лінійною регресійною моделлю виду $y=b_0+b_1x$:

$$y=0,4894+0,0035t . \quad (4.1)$$

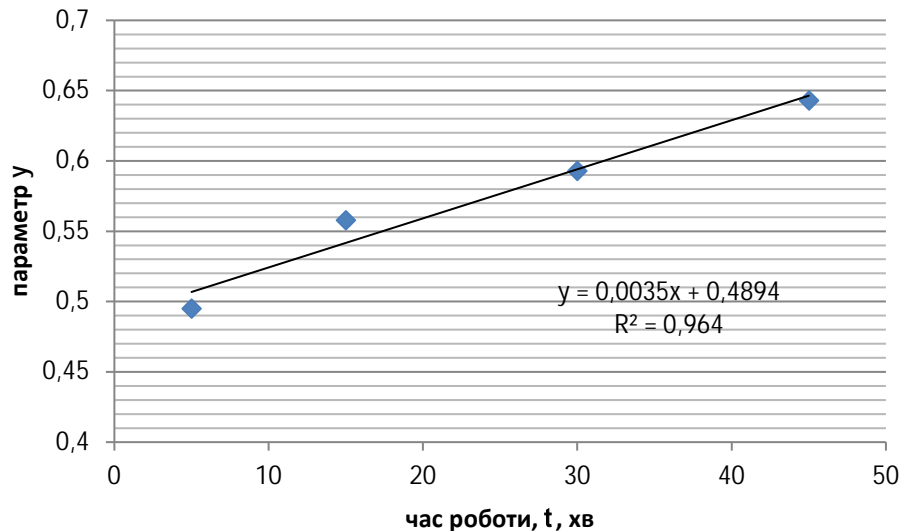


Рис. 4.4. Зміна ступеня забруднення поверхневого шару продуктами руйнування при обробці матеріалу КИМФ (параметра y) з плином часу

Таким чином, вперше встановлено закономірність зміни щільності поверхневого забруднення і показано, що параметр відносного забруднення (що дорівнює відношенню площі контакту нового інструменту до площі контакту інструменту, який відпрацював певний час) практично лінійно зростає у функції часу. Як зазначалося раніше, ріст забруднення веде до підвищення температури та силового навантаження плями контакту, що за певних умов може викликати пошкодження як інструменту, так і оброблюваної деталі.

Таким чином, для якісного оброблення нещільних матеріалів (карбонів типу КИМФ) інструмент має постійно очищуватися.

Оскільки при випробуваннях інструменту забезпечували також і ресурсні умови (тобто до повного пошкодження), проаналізовані виникаючі дефекти інструменту.

Для аналізу пошкодження кругів використовувалася растрова електронна мікроскопія, оптична мікроскопія, мірильні інструменти за ДСТУ

3215-95 (штангенциркуль цифровий тип Digital Caliper 0-150 mm, мікрометрична головка тип Micrometer Caliper 0-25 mm). При проведенні контролю перевіряли:

- наявність пошкодження алмазовмісного шару та відносну площу ділянок викришування зерен:

$$k_{oa} = \frac{N_a}{N_{cep}}; \quad (4.2)$$

- наявність ділянок пошкодження підложки;
- засалювання;
- наявність порушення адгезійного зчеплення підложки із основою;
- відхилення геометричних розмірів корпусу інструменту;
- деформація та псування корпусів інструменту.

Результати виявлених дефектів зведені у табл.4.3. аналізу піддавали круги, які пройшли додаткове струменеве очищення (рис. 4.5).

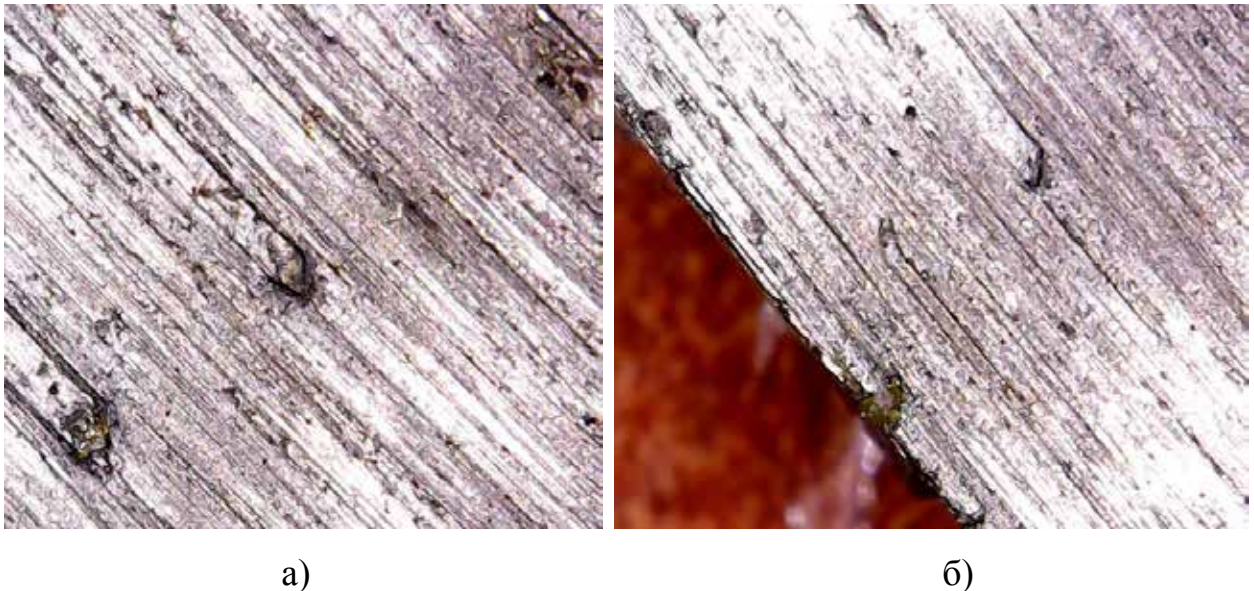


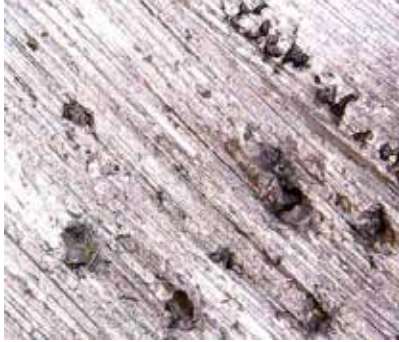


Рис. 4.5. Мікрофотографії очищеного гідроабразивним методом інструменту з малим вмістом алмазних частинок звичайної конструкції після однократного чищення (а), $t=80$ хв; після трикратного очищення підвищеним вмістом алмазних частинок звичайної конструкції (б) $t=160$ хв

З приведених даних стає очевидним, що найбільшого виходу з ладу мають круги, які знизили різальну здатність за рахунок засалювання (дефект №2 табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Типові дефекти кругів

№	Тип дефекту	Приклад	Контрольований параметр	Примітка
1	наявність пошкодження алмазовмісного шару та відносна площа ділянок викришування зерен		$N_{сер}=7$ шт При $N_a=21$ шт, $k_{oa} = \frac{N_a}{N_{сер}} =$ $\frac{7}{21} = 0,33$	
			$N_{сер}=4$ шт При $N_a=21$ шт, $k_{oa} = \frac{N_a}{N_{сер}} =$ $\frac{4}{21} = 0,19$	
2	засалювання		$k_{sb} = \frac{S_b}{S_o} =$ $\frac{161}{227} = 0,71$	
3	наявність порушення адгезійного зчеплення підложки із основою	Не виявлено		
4	відхилення геометричних розмірів корпусу інструменту	Не виявлено		

Побудовано залежність величини об'ємного зйому матеріалу та температури в зоні різання у функції глибини занурення круга. З діаграми 4.6. стає очевидним, що залежно від кількості одночасно працюючих у зоні контакту зерен температура змінюється нерівномірно.

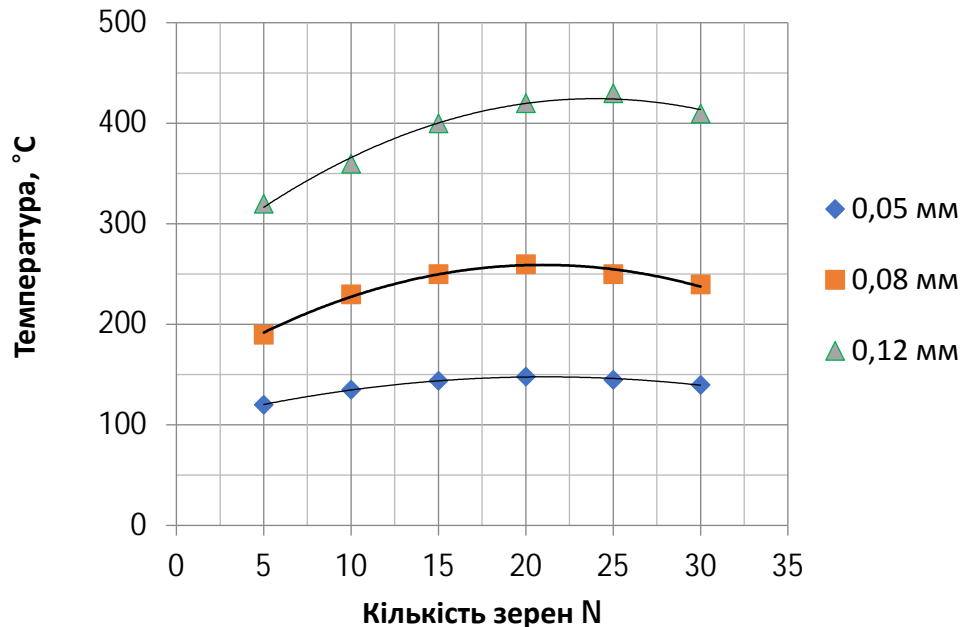


Рис. 4.6. Зміна температури у зоні контакту залежно від кількості одночасно працюючих зерен, що рухаються з однаковою швидкістю для різної глибини різання матеріалу

Порівняння результатів, отриманих для кругів різної щільності (із різною кількістю абразивних зерен на поверхні круга) показує, що існує певне значення N , для якого максимальна температура внаслідок засалювання поверхні буде найбільшою.

Це явище можна пояснити тим, що засалювання міжзереного простору вуглецевим пилом відбувається нерівномірно: в одному випадку утворюються сталі конгломерати, які практично не видаляються дією на них волокон матеріалу; в іншому випадку відбувається більш інтенсивне очищення поверхні за рахунок пружного відновлення вугільних волокон, які ще певний час знаходяться в контакті з поверхнею круга [47].

4.2. Вплив умов обробки на показники якості сформованого поверхневого шару

Оскільки явища у зоні контакту інструменту з оброблюваним матеріалом обумовлюються умовами термосилового навантаження, можна припустити, що зміна плями контакту впливатиме також і на показники якості обробки.

З цією метою після закінчення обробки перевіряли:

- якість поверхневого шару на предмет відсутності розшарувань та спучень, що характеризується відношенням товщини утворених дефектів до товщини оброблюваного матеріалу

$$R = \frac{d_n}{h}; \quad (4.3)$$

- шорсткість поверхні, оцінену за параметром Ra ;

Додатково визначали зусилля різання P , H при $S=\text{const}$, які відбивали умови роботи інструменту; порівнювали також і обсягу зйому матеріалу w_m , отриманому при стабільному зусиллі різання $P=\text{const}$. Виміри здійснювали на основі профілограм поверхні, отриманих електронними засобами на РЕМ-106-И. Випробуванням піддавали нові круги та гідроструменево очищені, з відновленим профілем поверхні.

Результати досліджень представлені на рис. 4.7, 4.8. Оскільки нами було показано, що істотну роль у термосиловому навантаженні поверхні відіграє глибина різку h_p , на приведених діаграмах по осі абсцис зазначено саме цей параметр.

Встановлено, що параметр R незначно нелінійно зростає зі зростанням h , з уповільненням зростання при перевищенні товщини понад 10-12 мм. Залежність може бути визначена поліномом виду $y=b_0+b_1x+ b_1x^2$. При цьому розбіжність між результатами обробки матеріалу новим кругом та очищеним неістотна; інша картина спостерігається при аналізі шорсткості поверхні.

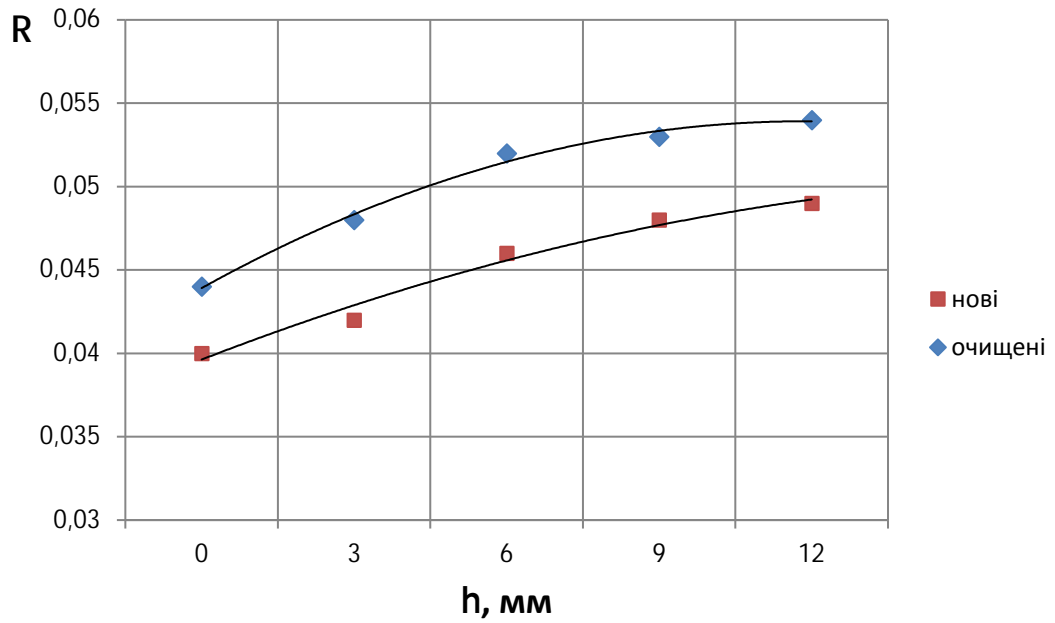


Рис. 4.7. Зміна якості поверхневого шару залежно від глибини різання

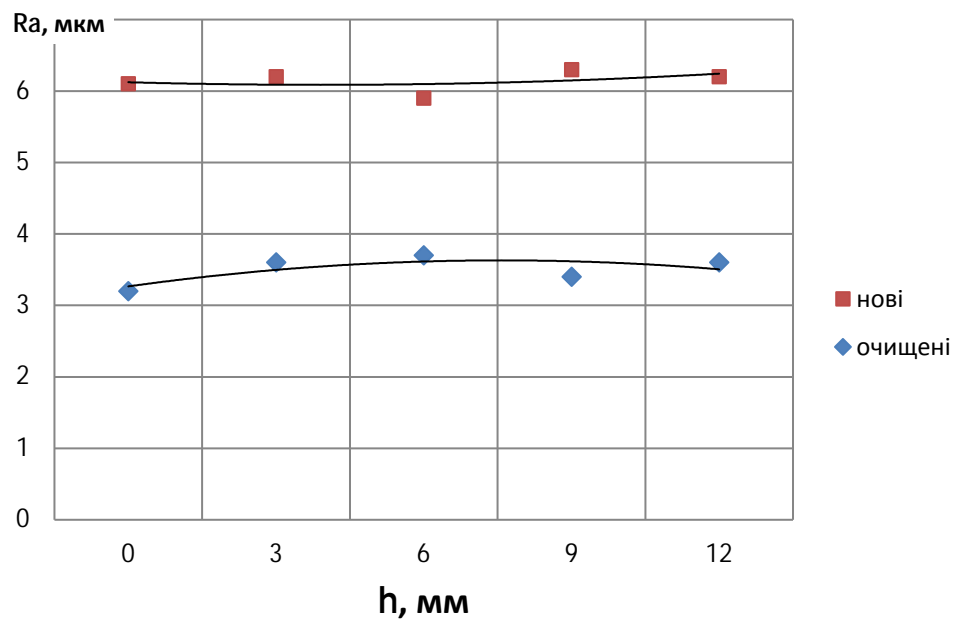


Рис. 4.8. Результати досліджень шорсткості поверхневого шару при зміні глибини h

Так, встановлено, що застосування кругів із малою кількістю алмазних зерен дозволяє отримати шорсткість поверхні на рівні 6,3–3,2 мкм за параметром Ra ; більший рівень шорсткості відповідає новим кругам. Дану особливість можна пояснити тим, що круги, бувши у вжитку, мають профіль

із меншим вильотом частинок абразиву; більша пляма контакту забезпечуватиме меншу шорсткість за рахунок ефекту вигладжування.

При цьому параметр Ra практично не залежить від глибини різання.

Перевірка рівня зусиль при постійній подачі $S=\text{const}$ показала (рис. 4.9), що існує істотна відмінність у силі різання кругів нового та такого, що попрацював певний час, що вимагає обов'язкового врахування ефекту зростання сили різання який більше проявляється при обробці матеріалів із суттєвими глибинами різання h .

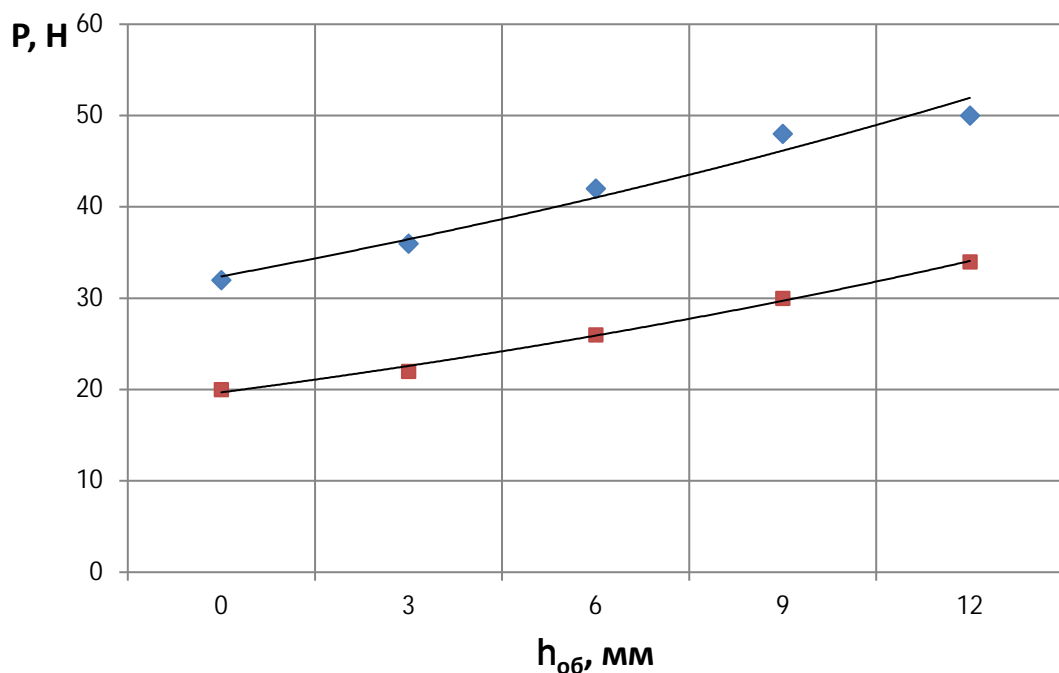


Рис. 4.9. Результати досліджень зусилля різання при постійній подачі для нового круга (а) та круга, що відпрацював 80 хв (б)

Також визначено і обсяг матеріалу, який видаляється під час обробки. Порівнянню піддавали круги різної конструкції, а сам обсяг визначали за зменшенням ваги частин матеріалу, на які розрізали початкову заготовку. Порівняльна діаграма подана на рис.4.10, а розрахунок відповідних обсягів приведений у табл. 4.4.

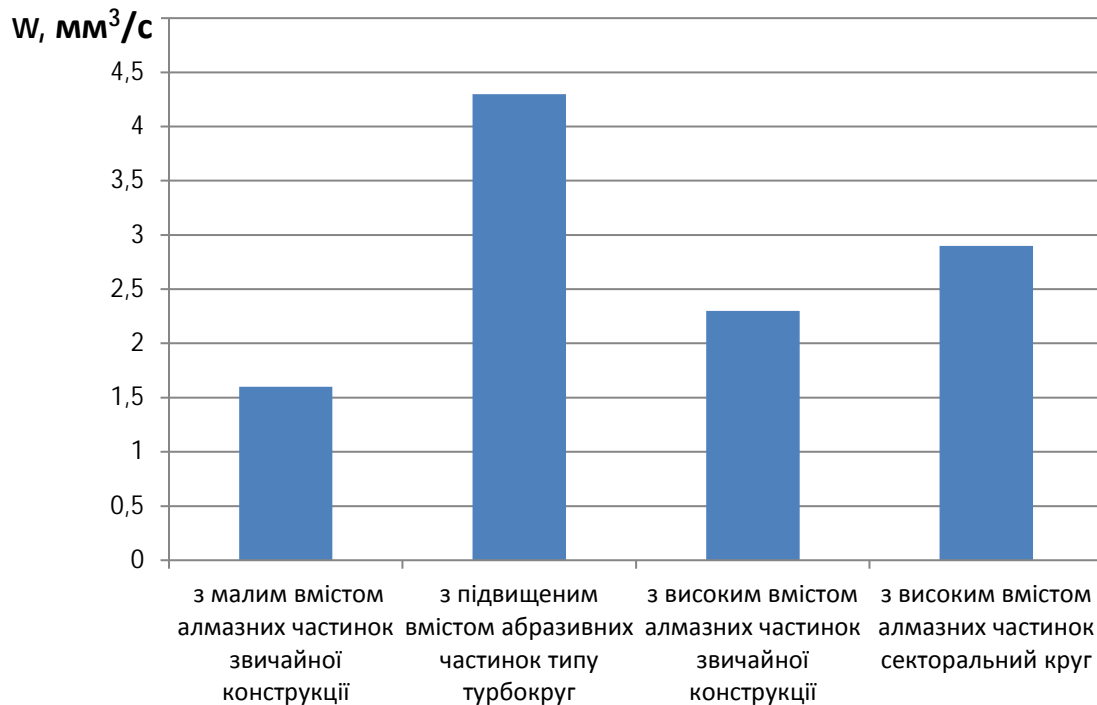


Рис. 4.10. Порівняння обсягу зйому матеріалів при зусиллі різання 18 Н

Таблиця 4.4 – Обсяги шламу при різанні заготовки та встановлення щільності залипання шламу на поверхні круга

№	Час роботи t	Обсяг видаленої речовини, мм ³	Зміна маси круга m_i , г	Розрахований обсяг, мм ³	Максимальний обсяг, мм ³	Щільність залипання шламу
1	10	4628,5	0,6916	411,65	1083,3	0,38
2	30	4345,2	0,8188	487,4		0,45
3	60	4299,8	0,9641	573,9		0,53
4	120	4253,5	1,169	963,9		0,89

З приведених результатів стає очевидним, що із збільшенням часу роботи кругом щільність залипання продуктів різання на поверхні круга зростає, а обсяг видалення речовини при різанні – зменшується. Дане зменшення обумовлене пружними відтисненнями у верстатній системі, які зростають при зростанні сил різання. Отже, зміна профілю різального круга

веде до зменшення продуктивності процесу, зростання пружних деформувань, зміни параметрів якості оброблених заготовок.

Для подолання зазначених негативних явищ необхідно підвищувати жорсткість системи, забезпечуючи її раціональне значення при зміні стану робочого інструменту.

4.3. Вивчення дисперсності шламу

Для більш точного уявлення щодо механізмів руйнування нещільного матеріалу виконаний аналіз дисперсності та виду отриманого при абразивній обробці шламу.

Після обробки заготовок були підготовлені препарати для мікроелектронного дослідження як отримані поверхневі, так і шламу матеріалу (мікростружки) після обробки. Зразки були наклеєні на струмопровідну фольгу (рис. 4.11) і витримані при температурі $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 12 годин. Після цього були зроблені мікрофотографії на РЕМ-106-И, які дозволили зробити наступні висновки.



1 – фрагмент матеріалу; 2 – шлам після обробки

Рис. 4.11. Підготовлені зразки для мікроелектронного дослідження

Шлам від абразивної обробки складається з дрібних частинок як армувальних волокон, так і піролітичного вуглецю (рис. 4.12); розміри

частинок шламу порівняні із розмірами абразивних зерен (дисперсність абразивних частинок) і приблизно дорівнюють величині пружного відновлення матеріалу після зняття зусиль від інструменту.

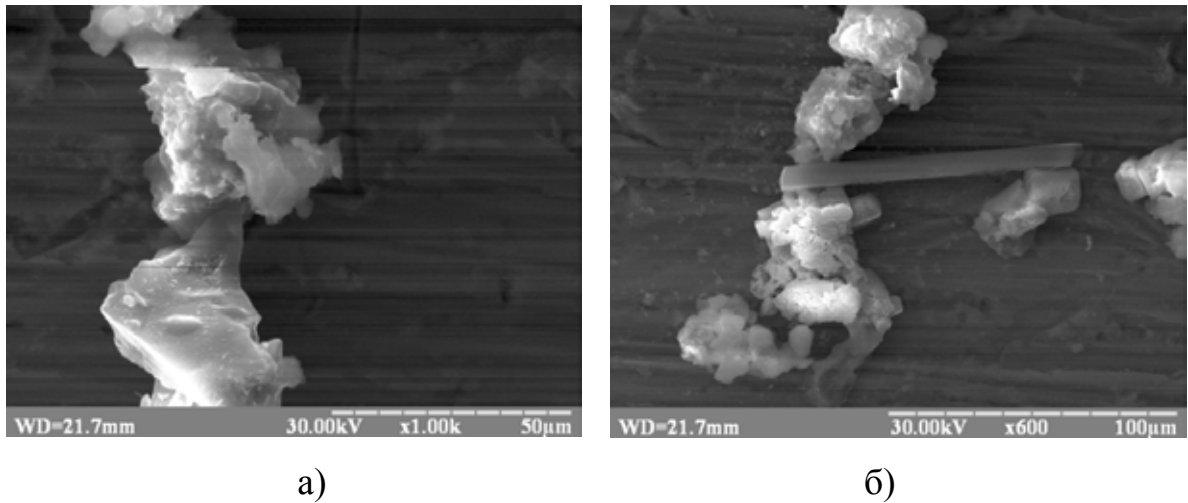


Рис. 4.12. Шлам, утворений при обробці карбон-карбонівих заготовок: а) частинки піролітичного вуглецю; б) фрагменти карбонівих волокон

Це дозволяє зробити висновок про те, що пружне відновлення поверхневого шару після зняття навантаження від дії інструменту призводить не тільки до зростання контактних тисків, і, відповідно, до зростання температури T , а і обмежує продуктивність процесу. Спроба збільшити подачу або глибину різання матеріалу без зміни швидкості руху алмазоносного шару не призводить до суттєвого зростання продуктивності, однак істотно збільшує температуру в зоні різання, що негативно відображається на якості поверхневого шару і веде до появи мікро- і макротріщин в матеріалі (рис. 4.13).

При цьому зйому матеріалу практично не відбувається. Отже, можна очікувати більш інтенсивне викришування зерен, а також більш активне засалювання поверхневого шару інструменту.

Таким чином, погіршення якості поверхневого шару при обробці карбон-карбонівих нещільних матеріалів пов'язане перш за все зі зростанням температури в зоні різання. При цьому зернистість круга та його щільність однозначно визначають розміри частинок шламу, а також формують

структуру поверхні (рис. 4.14). Отже, для забезпечення високої якості поверхневого шару оброблюваних заготовок слід використовувати круги, в яких застосовуються більш дрібні алмазні зерна.

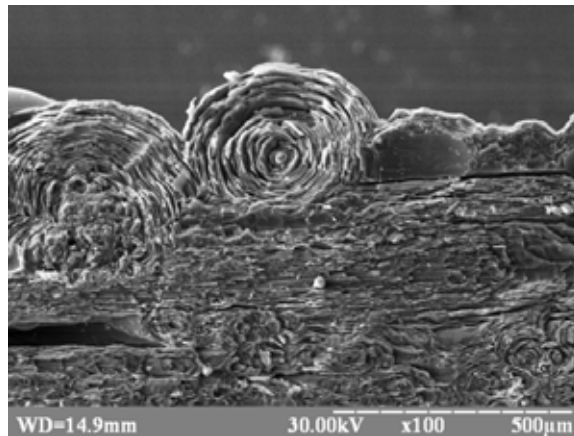


Рис. 4.13. Мікротріщини, що зародилися в матеріалі при його силовому навантаженні абразивним інструментом

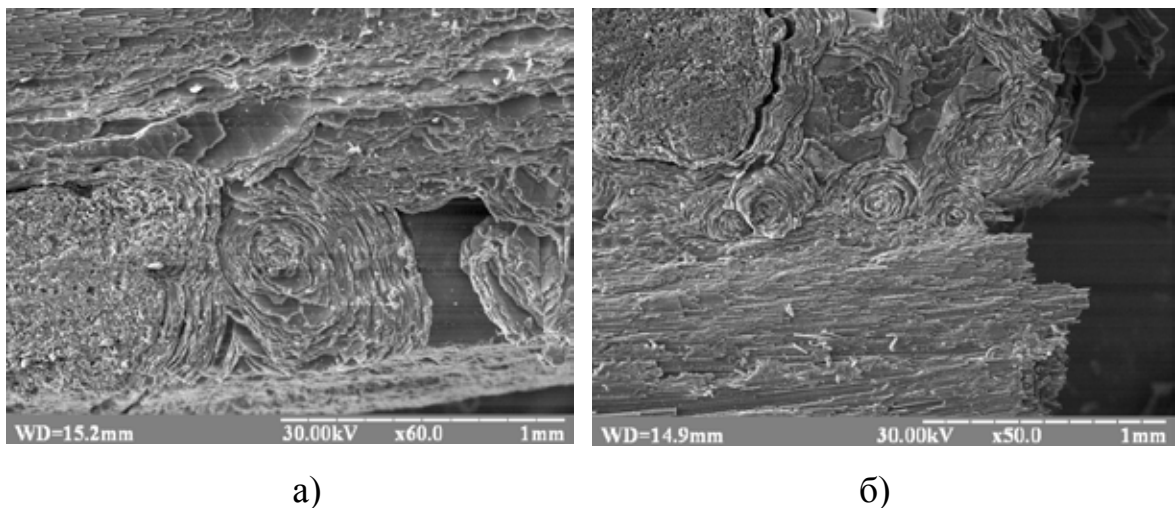


Рис. 4.14. Структура поверхневого шару: а) при обробці інструментом із точковим контактом з поверхнею; б) при обробці інструментом із підвищеною площею контакту (спостерігаються розшарування та поверхневі дефекти)

Також доцільне застосування засобів очищення поверхні інструменту під час або перед найбільш відповідальною обробкою, застосування спеціального інструменту, що має визначену кількість різальних зерен на поверхні.

Зміна схеми силової взаємодії при забрудненні інструменту викликає необхідність застосування спеціальних засобів підвищення жорсткості

маніпулювання робочим органом верстата, що для машин с паралельними кінематичними ланцюгами вбачається у застосуванні додаткових приводів.

Таким чином, підтверджено доцільність використання подібних машин для абразивної обробки нещільних матеріалів типу КИМФ [47].

4.4. Динамічні характеристики запропонованого механізму паралельної структури

За допомогою системи Simscape Multibody [12, 194] було створено динамічну обчислювальну модель механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю.

Для цього спершу виконано імпорт 3D моделі механізму із середовища SolidWorks за допомогою розширення SimMechanics Link у формат XML, який за допомогою команди *smimport* імпортовано до середовища Simscape Multibody, де одночасно з візуалізацією механічної системи (рис. 4.15) .

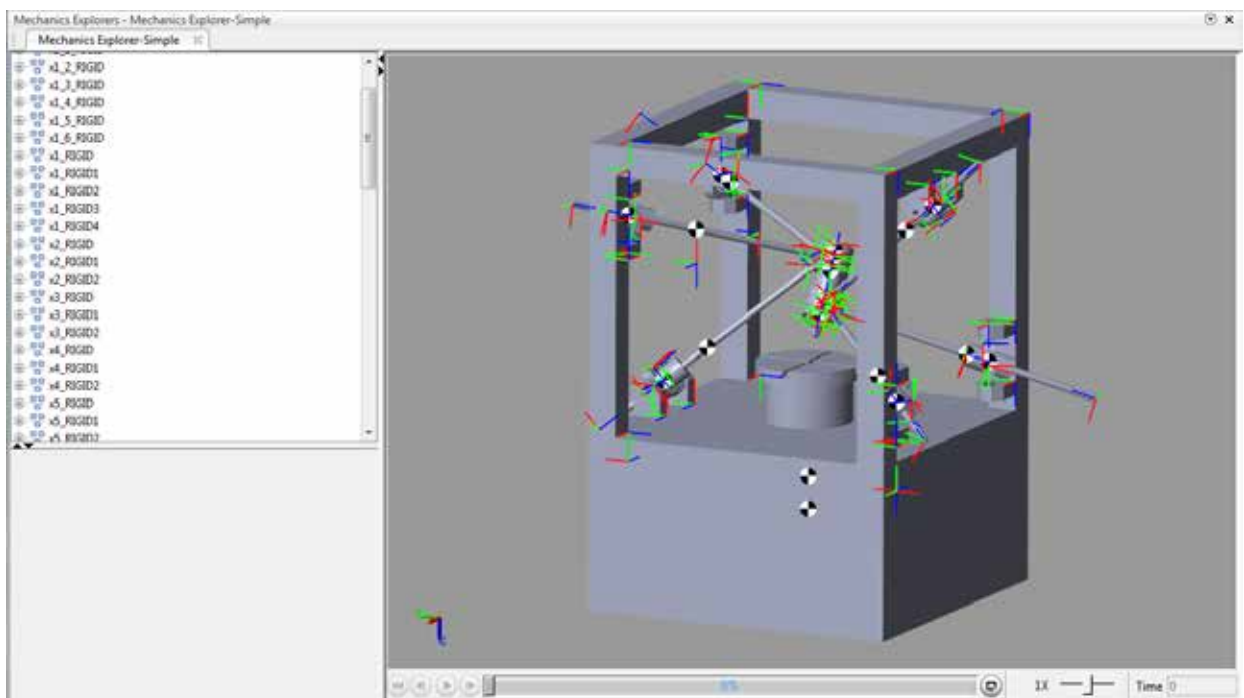


Рис. 4.15. Модель Simscape Multibody

Далі отримано відповідну модель MATLAB Simulink (рис. 4.16) з елементами SimMechanics у вигляді моделей тіл з відповідними характеристиками маси та інерції, а також шарнірів, які з'єднують їх між собою.

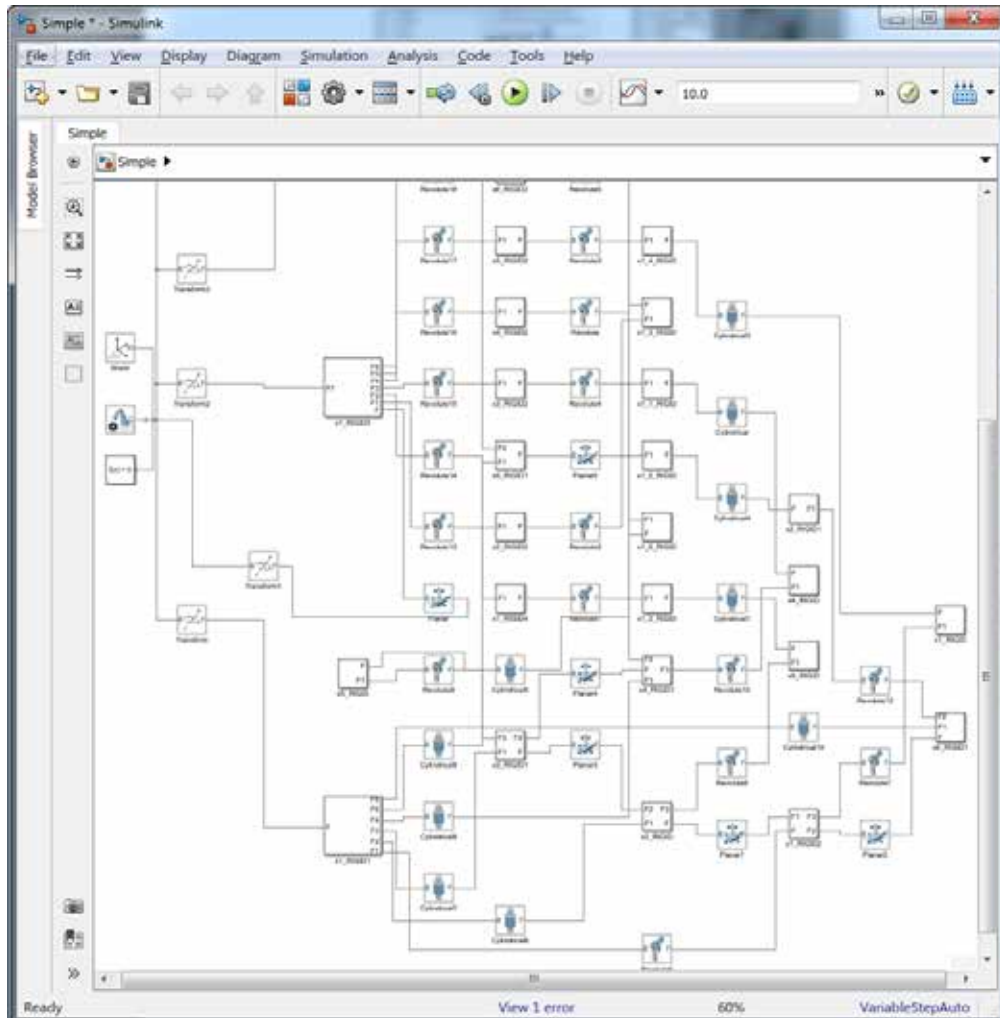
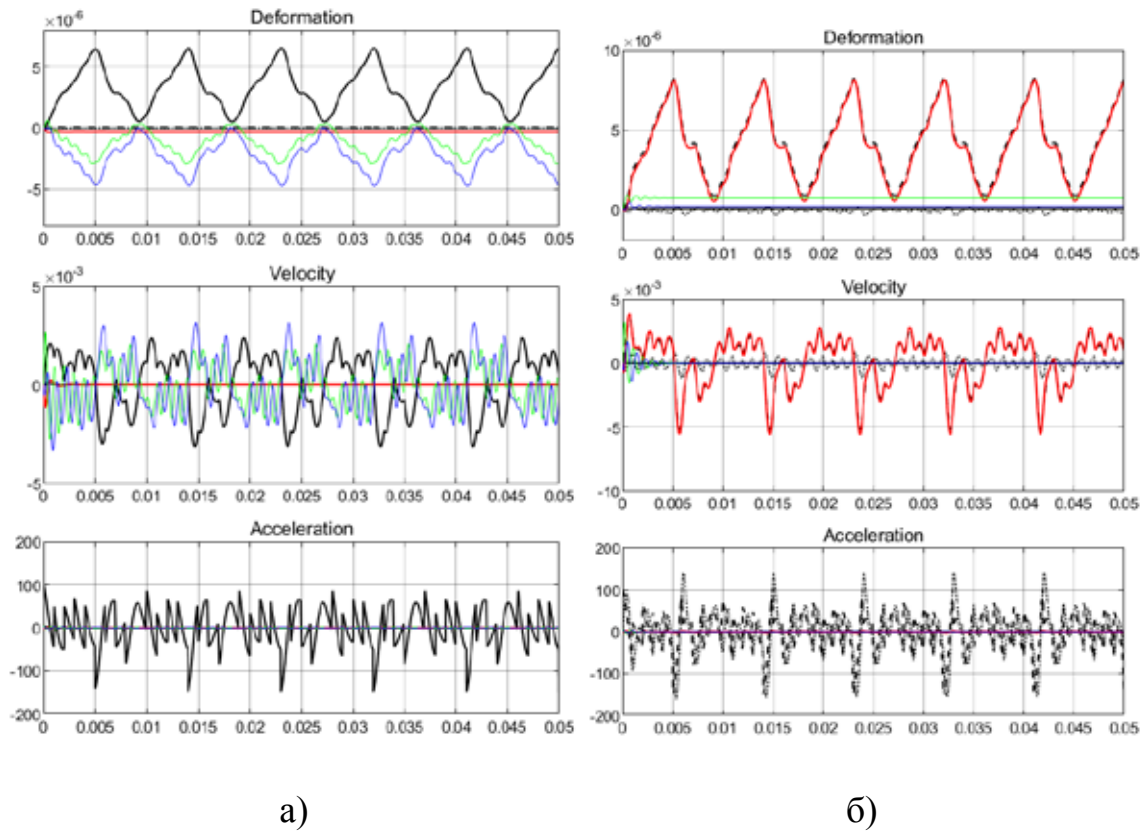


Рис. 4.16. Модель MATLAB Simulink

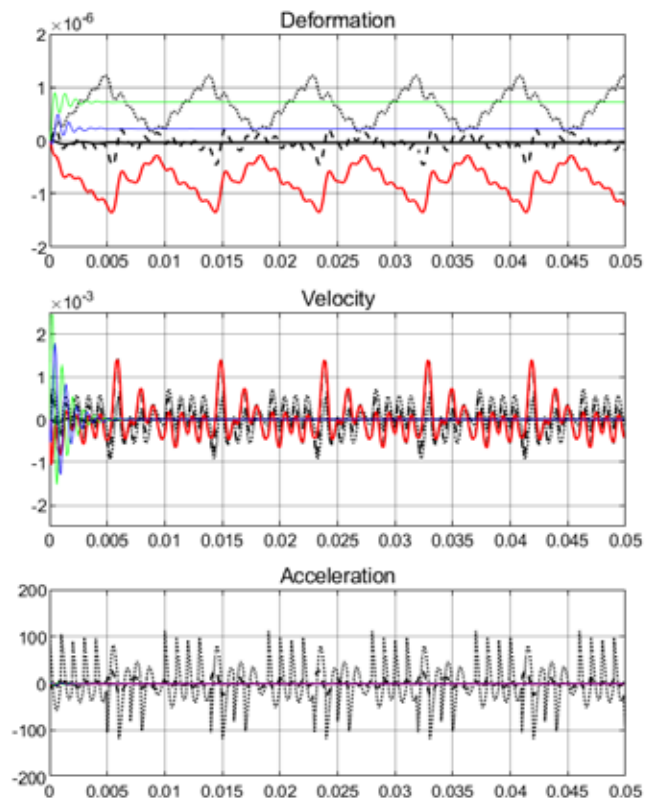
Виконано моделювання динамічної системи під дією ступінчастого зусилля, результати чого показані на рис. 4.17.

За допомогою динамічних моделей досліджено вплив зміни жорсткості верстатної системи на динамічні характеристики процесу мікрорізання. Встановлено, що із зменшенням жорсткості спостерігається зростання динамічних складових за амплітудою на 50–120% та зростання тривалості перехідного процесу до 0,3–1,2 с (рис. 4.18).



а)

б)



в)

Рис. 4.17. Переміщення, швидкість та прискорення механічної системи під дією ступінчастого зусилля у напрямку осей: а) X; б) Y; в) Z

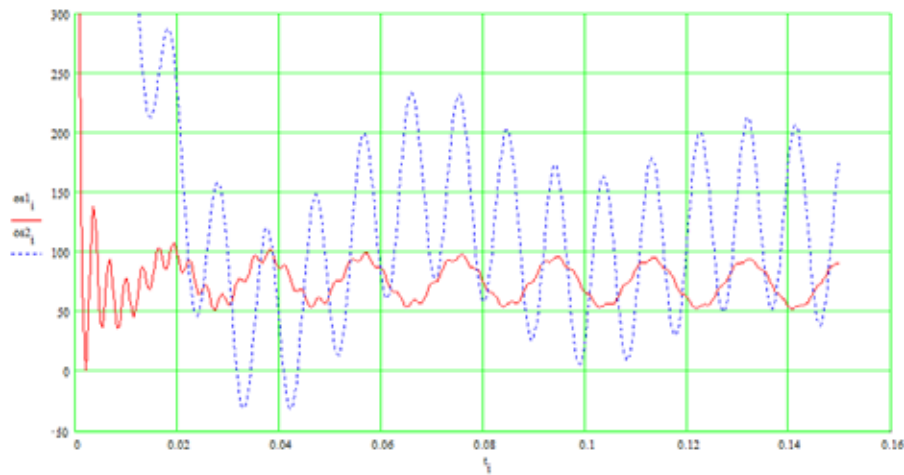


Рис. 4.18. Порівняння перехідних процесів несучої системи з підвищеною (а) та нормальною жорсткістю (б)

Таким чином, для запропонованого нового технічного рішення маніпуляційної важільної системи верстата паралельної структури із кінематичною надлишковістю, визначено динамічні параметри системи для моделювання явищ у зоні різання нещільного матеріалу абразивним інструментом із сполученим абразивом, зокрема, алмазним абразивним кругом.

Встановлено, що підвищення характеристик жорсткості технологічної системи дозволяє не лише покращити точність різання, але й зменшити пляму контакту і тепловиділення в зоні різання.

4.5. Результати вимірювання жорсткості просторової пружної системи верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю

За допомогою описаного у п. 2.1 обладнання проведено вимірювання характеристик жорсткості робочого органа верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю. Вимірювання проводились при осьовому та радіальному навантаженні у напрямку осей X, Y та Z величиною 100 Н на робочий орган, яке здійснювалось через цифровий динамометр. Вимірювання проводились тричі, отримані значення осереднювалися. Жорсткість

розраховувалась як відношення сили до пружного переміщення у напрямку навантаження.

Для порівняння жорсткості робочого органа верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю із традиційним верстатом з аналогічним робочим органом із співвісними осями шарнірів додатково проведено вимірювання моделі робочого органа за схемою «пентапод» у тому самому положенні, для чого від робочого органа було від'єднано одну штангу змінної довжини.

Результати вимірювання наведені у табл. 4.5 та на рис. 4.19.

Таблиця 4.5 – Результати вимірювання жорсткості

Верстат	Жорсткість, Н/мкм		
	По осі X	По осі Y	По осі Z
Пентапод	1,7	3,2	1,9
Надлишковий	2,1	4,1	2,2
Різниця, %	24	28	16

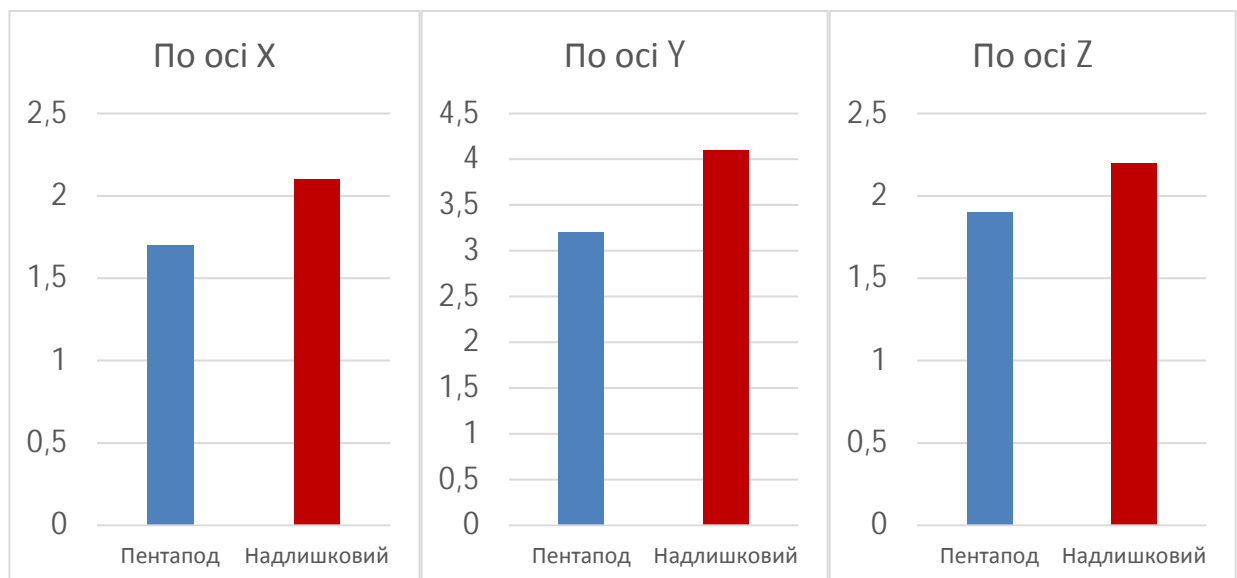


Рис. 4.19. Порівняння жорсткості схем верстатів

Результати вимірювання показали, що величина жорсткості надлишкового механізму на 16 – 28% більша, ніж звичайного механізму

«пентапод». Це пояснюється більшою кількістю ланок, які сприймають навантаження, а також більш раціональною схемою розміщення шарнірів та кінематичною надлишковістю.

Окремо вимірювалась жорсткість штанги з шарнірами при навантаженні до 100 Н. Отриманий графік пружних переміщень наведено на рис. 4.20.

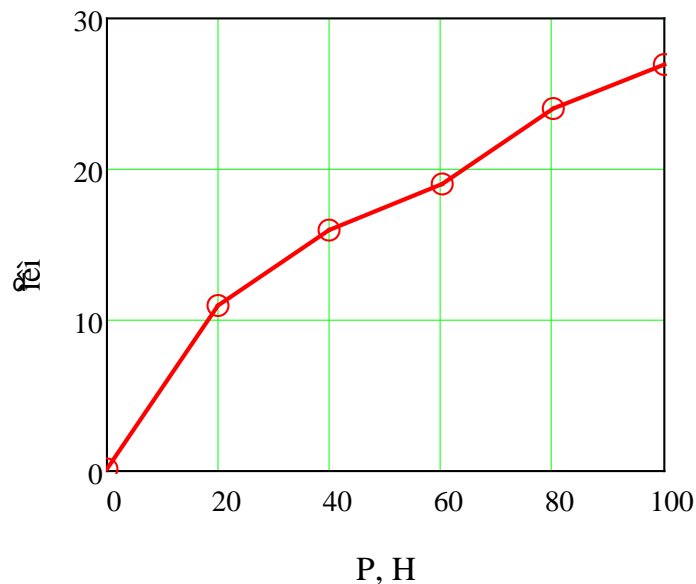


Рис. 4.20. Пружні переміщення штанги з шарнірами під осьовим навантаженням

Середня виміряна жорсткість штанги складає 3,1 Н/мм, причому величина жорсткості зростає із збільшенням навантаження.

Теоретичними розрахунками (п. 3.4) встановлено, що розрахункова жорсткість запропонованого механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю перевищує жорсткість штанги у 1,5-3 рази. Проте отримані експериментально величини жорсткості по осям X та Z не перевищують значення жорсткості штанги, а по осі Y перевищує її лише незначно. Це можна пояснити значним впливом податливості станини моделі верстата.

4.6. Висновки за розділом

1. Наведені результати досліджень температури у зоні різання, що дозволило ідентифікувати моделі для визначення розподілу температур в процесів оброблення. Мікроелектронне дослідження поверхні різання та шламу, що утворюється при обробці довело, що погіршення якості поверхневого шару при обробці карбон-карбонівих нещільних матеріалів пов'язане перш за все зі зростанням температури в зоні різання. При цьому зернистість круга та його щільність однозначно визначають розміри частинок шламу, а також формують структуру поверхні. Отже, для забезпечення високої якості поверхневого шару оброблюваних заготовок слід використовувати круги, в яких застосовуються більш дрібні алмазні зерна.

2. Виконано детальний аналіз деградації та пошкодження кругів і показано, що для забезпечення надійності процесу різання круги мають очищатися, зокрема, гідроабразивним методом. Це дозволяє стабілізувати умови взаємодії абразивовмісного інструменту із нещільним напівпростором, отримати високі показники якості.

3. Показано, що існує певне значення кількості частинок, які взаємодіють із оброблюваним матеріалом, для якої максимальна температура внаслідок засалювання поверхні буде найбільшою. Це явище можна пояснити тим, що засалювання міжзереного простору вуглецевим пилом відбувається нерівномірно: в одному випадку утворюються сталі конгломерати, які практично не видаляються дією на них волокон матеріалу; в іншому випадку відбувається більш інтенсивне очищення поверхні за рахунок пружного відновлення вугільних волокон, які ще певний час знаходяться в контакті з поверхнею круга.

4. Встановлено, що зі збільшенням часу роботи кругом щільність залипання продуктів різання на поверхні круга зростає, а обсяг видалення речовини при різанні – зменшується. Дане зменшення обумовлене пружними відтисненнями у верстатній системі, які зростають при зростанні сил різання.

Отже, зміна профілю різального круга веде до зменшення продуктивності процесу, зростання пружних деформацій, зміни параметрів якості оброблених заготовок.

5. Дослідженням впливу зміни жорсткості верстатної системи на динамічні характеристики процесу мікрорізання встановлено, що із зменшенням жорсткості спостерігається зростання динамічних складових за амплітудою на 50–120% та зростання тривалості перехідного процесу до 0,3–1,2 с. Таким чином, підвищення характеристик жорсткості технологічної системи дозволяє не лише покращити точність різання, але й зменшити пляму контакту і тепловиділення в зоні різання.

6. Вимірюванням жорсткості виготовленої моделі верстата при навантаженні у напрямку осей X, Y та Z встановлено, що величина жорсткості надлишкового механізму на 16 – 28% більша у порівнянні із механізмом «пентапод», за рахунок більшої кількості ланок та кінематичної надлишковості. Середня виміряна жорсткість штанги складає 3,1 Н/мкм, причому величина жорсткості зростає із збільшенням навантаження.

5. ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ВСТАНОВЛЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ УМОВ АБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ НЕЩІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОПОНОВАНИХ НОВИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

5.1. Нові компоновки та прогнозування параметрів верстатів паралельної структури для розрізання карбонових композитів

З використанням принципу кінематичної надлишковості у обладнанні для розрізання карбонових виробів розроблено схему багатокординатного верстата паралельної структури з 5 керованими координатами і 6 приводами штанг змінної довжини, який має спеціальний робочий орган з спільною віссю шарнірних опор.

Розроблена на основі виготовленого дослідного зразка компоновка та конструкція багатокординатного верстата для розрізання карбонових виробів на основі надлишкового механізму паралельної структури зображена на рис. 5.1. Верстат складається з станини 1 рамної конструкції, верхня частина якої несе шість шарнірних опор карданного типу 2 для штанг змінної довжини 6 з приводами від сервомоторів 3. На станині верстата встановлений стіл 7 із закріпленим затискним пристосуванням для затиснення оброблюваних карбонових виробів.

У нижній частині станини 1 розміщені драйвери сервоприводів, блок живлення, регулятор частоти обертання шпинделя, електронна апаратура управління.

Верстат оснащений системою управління за допомогою ПК, екран якого 8 та пристрої вводу інформації шарнірно закріплені до станини. В якості системи управління може бути використана система ЧПУ з вільним програмним кодом LinuxCNC [155] з відповідними програмними модулями, які здійснюють необхідні кінематичні перетворення для управління приводами штанг змінної довжини.

Верстат має 5 ступенів вільності (2 обертальних і 3 поступальних ступені вільності) з розширеними можливостями орієнтації, що досягається виключенням особливих положень за рахунок використання надлишкових приводів і спеціальної конструкції робочого органа, для використання у верстатах паралельної структури.

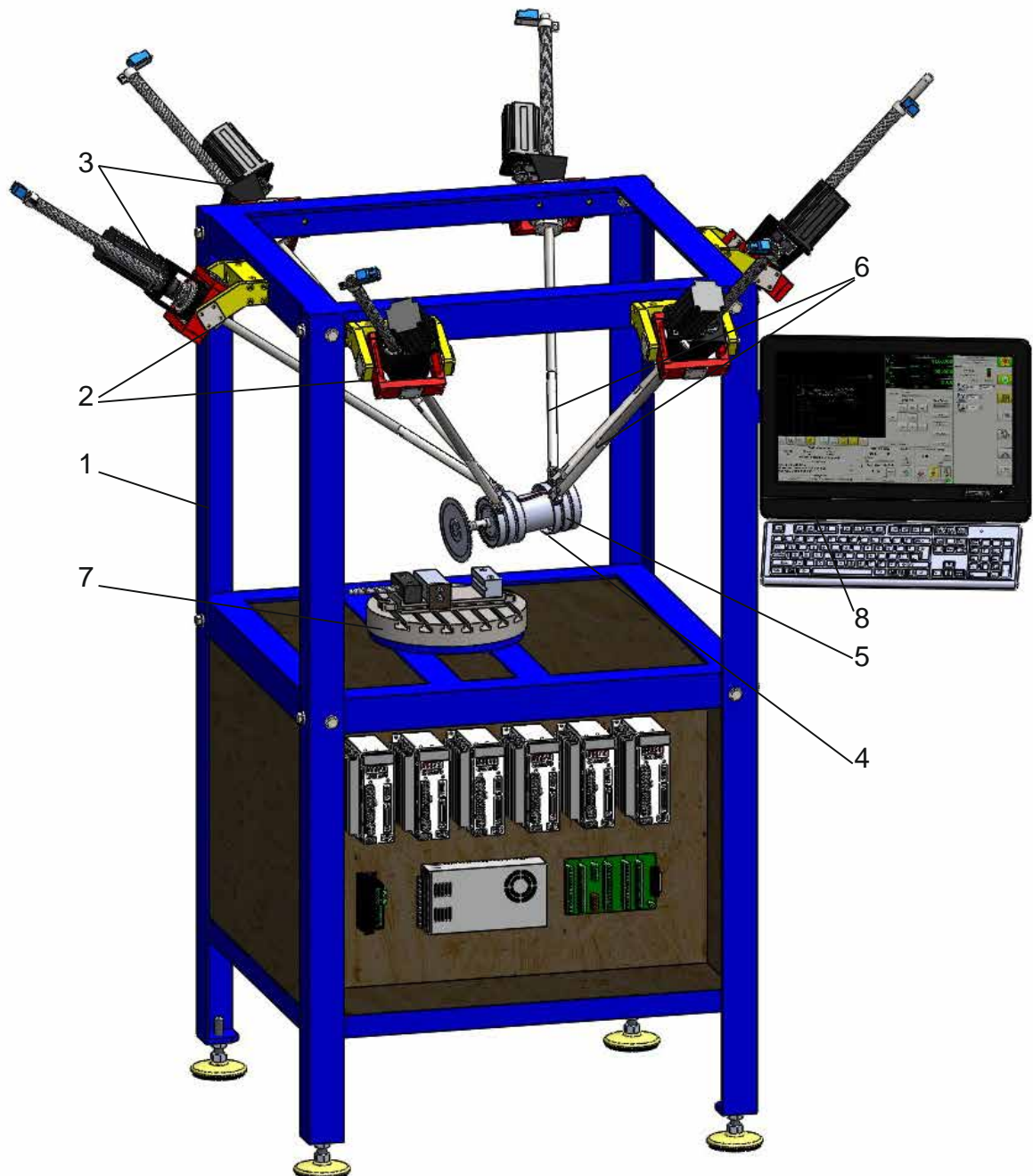


Рис. 5.1. Проект легкого багатокординатного верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю для розрізання карбовоних виробів абразивним диском

Робочий орган верстата з'єднується з основою шістьма ланками змінної довжини, причому шарніри робочого органа мають спільну вісь, яка співпадає з віссю шпинделя верстата.

Привід переміщення робочого органа верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур містить станину, механізми подачі шести штанг, які пов'язані з вихідним органом. Робочий орган (рис. 5.2) складається з двох частин, поєднаних між собою шарніром з лінійним ступенем вільності, направленим вздовж спільної осі робочого органа і його шарнірів. При цьому три штанги шарнірно приєднуються до однієї частини робочого органа і мають конструкцію, що забезпечує переміщення цієї частини робочого органа по лінійній координаті без зміни кутової орієнтації відносно станини, а інші три штанги приєднуються до іншої частини робочого органа, яка має можливість рухатись вздовж спільної осі робочого органа.

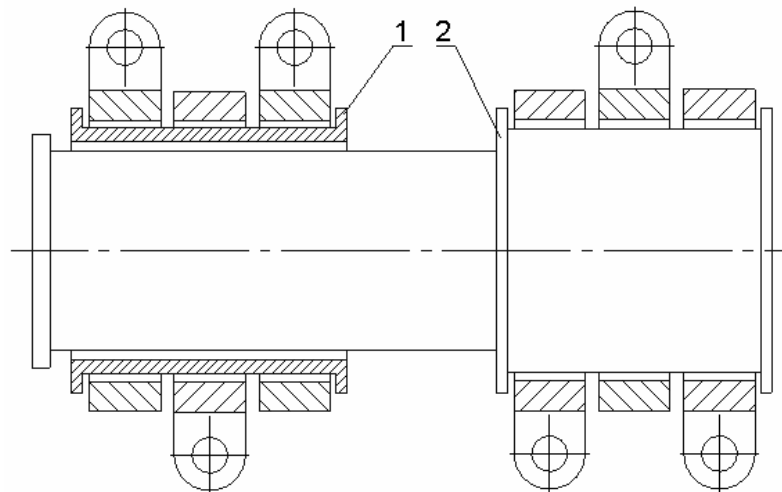
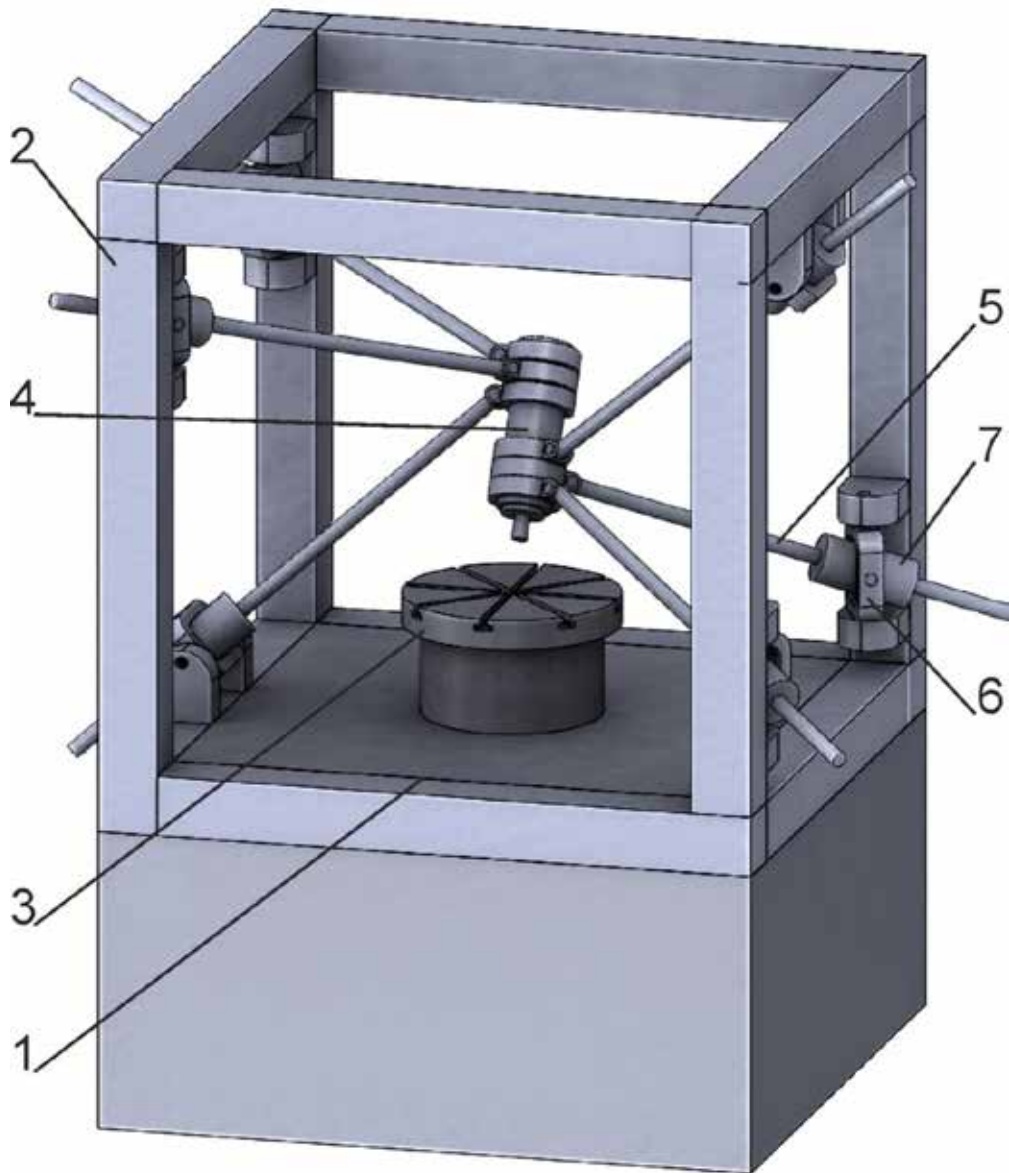


Рис. 5.2. Конструкція робочого органа багатокординатного верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю

Інша перспективна компоновка багатокординатного верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю показана на рис. 5.3.



1 – основа; 2 – просторова рама; 3 – поворотний стіл;
4 – робочий орган; 5 – штанга; 6 – шарнір; 7 – привід

Рис. 5.3. Перспективна компоновка багатокординатного верстата для розрізання карбонових виробів з розміщенням шарнірних опор з протилежних боків станини

Верстат складається з основи 1, на якій встановлено просторову раму 2 та поворотний стіл 4 для закріплення заготовок. Робочий орган 4 з'єднаний штангами 5 з шарнірними опорами 6 основи. Зміна довжини штанг здійснюється за допомогою приводів 7.

Верстат такої компоновки має діапазон орієнтації робочого органа 180° відносно горизонтальної осі X та 90° відносно осі Y. Додатково забезпечується нескінченне обертання столу відносно вертикальної осі Z.

Передбачувані технічні характеристики верстата наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Передбачувані технічні характеристики верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю

№	Показник	Одиниця виміру	Значення
1	Робоча зона по осям X	мм	500
	Y	мм	500
	Z	мм	300
2	Діапазон кутів орієнтації робочого органа по осям A	градусів	180
	B	градусів	90
3	Швидкість переміщення по осям X,Y,Z	мм/с	30000
4	Дискретність по осям X,Y, Z	мм	0,001
5	Дискретність по осям X,Y, Z	градусів	0,01
6	Швидкість кутових переміщень робочого органа по осям A, B	град/с	120
7	Потужність приводів подачі	кВт	1
8	Максимальна частота обертання шпинделя	хв ⁻¹	25000
9	Потужність приводу головного руху	кВт	15
10	Система ЧПУ	–	LinuxCNC

Запропоновані за результатами досліджень компоновки та конструкції багатокоординатних маніпуляторів паралельної структури наведені на рис. 5.4. Для підвищення рухомості вихідного органа верстатів на основі паралельних кінематичних структур запропоновано розділення штанг на функціональні групи.

Схема приводу переміщення вихідного органа верстата на основі паралельних кінематичних структур приведена на рис. 5.4, а. На станині 1 розміщено три приводи подач 2 штанг 3 та один привод подачі 4 штанги 5. Всі штанги пов'язані шарнірно з вихідним органом, що складається з двох частин 6 і 7, поєднаних між собою шарніром 8 з однією ступенню свободи, причому штанги 3 пов'язані з однією частиною 6 вихідного органа, а штанга 5 – з іншою частиною 7 вихідного органа. Конструкція штанг 3 та їхніх шарнірів така, що забезпечує переміщення частини 6 вихідного органу по трьом лінійним координатам без зміни кутової орієнтації відносно станини. Переміщення штанги 5 визначатиме взаємне кутове положення частин 6 і 7 вихідного органа. Наявність шарніру 8 дозволяє здійснювати необхідний поворот частини 7 вихідного органа без зміни просторового положення його частини 6. Таким чином досягається функціональне розділення штанг на групи: штанги 3 визначають положення вихідного органа по лінійним координатам, а штанга 5 – по кутовій координаті [74].

Схема приводу переміщення вихідного органа верстата на основі паралельних кінематичних структур з 5 штагами приведена на рис. 5.4, б. На станині 1 розміщено три приводи подач 2 штанг 3 та два приводи подач 4 штанг 5. Всі штанги пов'язані шарнірно з вихідним органом, що складається з двох частин 6 і 7, поєднаних між собою шарніром 8 з двома ступенями свободи, причому штанги 3 пов'язані з однією частиною 6 вихідного органа, а штанги 5 – з іншою частиною 7 вихідного органа.

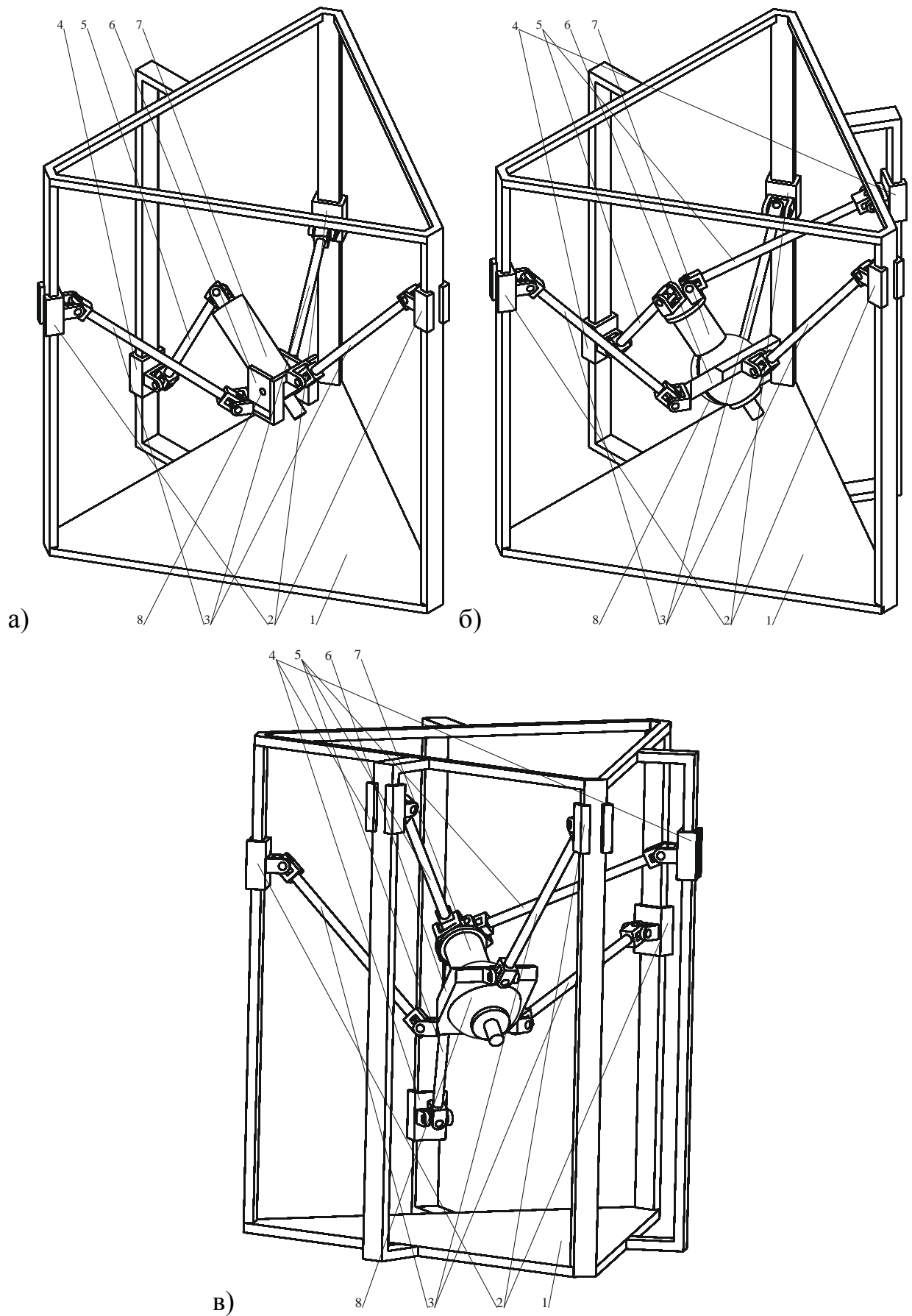


Рис. 5.4. Схеми верстатів з механізмами паралельної структури:
 а) з 4 штангами; б) з 5 штангами; в) з 6 штангами

Конструкція штанг 3 та їхніх шарнірів така, що забезпечує переміщення частини 6 вихідного органу по трьом лінійним координатам без зміни кутової орієнтації відносно станини. Переміщення штанг 5 визначатиме взаємне кутове положення частин 6 і 7 вихідного органу. Наявність шарніру 8 дозволяє здійснювати необхідний поворот частини 7 вихідного органу без зміни просторового положення його частини 6. Таким чином досягається функціональне розділення штанг на групи: штанги 3 визначають положення вихідного органу по лінійним координатам, а штанги 5 – по кутовим координатам [73].

Схема приводу переміщення вихідного органу верстата на основі паралельних кінематичних структур з 6 штангами приведена на рис. 5.4, в. На станині 1 розміщено три приводи подач 2 штанг 3 та три приводи подач 4 штанг 5. Всі штанги пов'язані шарнірно з вихідним органом, що складається з двох частин 6 і 7, поєднаних між собою шарніром 8 з трьома степенями свободи, причому штанги 3 пов'язані з однією частиною 6 вихідного органу, а штанги 5 – з іншою частиною 7 вихідного органу. Конструкція штанг 3 та їхніх шарнірів така, що забезпечує переміщення частини 6 вихідного органу по трьом лінійним координатам без зміни кутової орієнтації відносно станини. Переміщення штанг 5 визначатиме взаємне кутове положення частин 6 і 7 вихідного органу. Наявність шарніру 8 дозволяє здійснювати необхідний поворот частини 7 вихідного органу без зміни просторового положення його частини 6. Таким чином досягається функціональне розділення штанг на групи: штанги 3 визначають положення вихідного органу по лінійним координатам, а штанги 5 – по кутовим координатам [75].

5.2. Визначення функціональної обумовленості швидкості контурної подачі параметрами інструменту та схемою технологічного налагодження на верстатах паралельної структури

Проведеними раніше дослідженнями показано, що різання нещільних карбонових матеріалів (типу КИМФ) супроводжується значним тепловиділенням у зоні контакту, який у свою чергу визначається силовими навантаженням зони різання; диспергацією компонентів матеріалу з утворенням пилобрудових частинок, активність яких веде до засалювання поверхні інструменту та зміни як температури і стану поверхневого шару матеріалу, так і якості формованих поверхонь.

Пошкодженень зазнає і сам інструмент, а надлишкове тепловиділення призводить до втрати його стійкості, особливо коли мова йде про різання тонкими відрізними кругами.

Зазвичай при призначенні режимів обробки матеріалу головну увагу зосереджують на встановленні допустимої швидкості об'ємного зйому матеріалу W , яка безпосередньо визначається маркою застосовуваного абразивного круга, його товщиною b та густиною абразивних частинок на периферії n , висотою виступу частинки над поверхнею d , потужністю двигуна головного приводу N , глибиною пазу h (або товщиною матеріалу, що обробляється), а також швидкістю робочої подачі s . Як правило, потужність приводу N є лише обмежуючим параметром, у той час як швидкість подачі задається. Отже, можна вважати, що саме s має функціонально визначатися іншими прийнятими до уваги факторами:

- Глибина різання, або товщина оброблюваного матеріалу h ;
- Товщина круга b ;
- Марка круга, яка відображає густину абразивних частинок n ;
- Виступ частинок над поверхнею d ;
- Жорсткість важільної системи c ;

- Швидкість різання v_p , яка залежить від діаметра круга D_k та частоти обертання шпинделя;
- Параметр матеріалу K .

Узагальнюючим параметром виступатиме швидкість подачі s .

Межі зміни зазначених параметрів, одиниці виміру приведені в табл.5.2.

Таблиця 5.2 – Фактори та рівні їх варіювання

Фактор	Позначення	Од.виміру	Тип	Min (-1)	Max (+1)
F_1	h	мм	кількісний	5	25
F_2	b	мм		1,5	3,0
F_3	n	шт		20	50
F_4	d	мм		0,1	0,8
F_5	c	Н/мкм		5	25
F_6	K	-	якісний	1-площина X-Y	2-площина X-Z

Швидкість різання прийнята відповідно до рекомендацій виробника кругів за [104], $v_p = 50 \dots 60$ м/с.

Із прийнятих до уваги факторів параметр K визначає напрям різання матеріалу відносно головних осей плетіння, а жорсткість важільної системи c визначатиметься як напрямком дії результуючої сили різання відносно осей жорсткості верстата, так положенням диску (опосередковано жорсткістю самого диску, як зазначалося у [1]).

Виступ частинок d до уваги прийнятий не випадково, оскільки він обумовлюється не тільки використовуваним інструментом, як було показано нами в п.4.2, а і є змінним із плином часу t .

Так, зміна d відбуватиметься у міру засалювання диску продуктами руйнування.

Таким чином, до уваги прийнято 6 факторів, для яких проведемо випробування за ненасиченими планами багатфакторного аналізу з метою отримання регресійних рівнянь виду

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_1x_2 + \dots \quad (5.1)$$

Для проведення досліджень використано програмне середовище Statgraphics Centurion, який дозволяє виконувати усі статистичні процедури із планування дослідження та із обробки результатів натурних експериментів.

Планування експерименту виконане для 5 факторів із дублюванням досліджень для різних значень параметру K .

Планування здійснене для факторного аналізу у двох блоках 2^3 із загальною кількістю дослідів (спостережень) 32. Згенерована таблиця подана нижче (табл.5.3).

За встановленими рівнями факторів F_1-F_5 проведені дубльовані спостереження для змінної K (різання здійснювали заготовки як в площині X-Y так і X-Z. При цьому s підбирали так, щоб температура у зоні різання не перевищувала 220-230 °C. Останню контролювали пірометром, а значення s – заносили до табл.5.3.

Попереднє статистичне оброблення даних довело, що спостерігається чітка функціональна обумовленість залежної змінної прийнятими до уваги факторами. Однак сила дії кожного із них та напрям дії є різним.

Так, зведена статистична таблиця (табл. 5.5) доводить, що найбільш точно визначеною за силою вплив є фактори b та n , оскільки коефіцієнт варіації для них є найменшим. Однак модель (5.1) може бути отримана у разі, коли промахи (рис. 5.5) будуть усунуті.

Таблиця 5.3 – Рівні факторів у натуральному виразі та значення s

№	Фактори						Незалежна змінна
	block	H	b	n	δ	c	
1	1	25	3	50	0,8	5	3
2	1	5	1,5	50	0,1	25	12
3	1	5	3	50	0,1	5	10
4	1	25	3	20	0,8	25	5
5	1	25	3	50	0,1	25	4
6	1	25	3	20	0,1	5	2
7	1	5	3	20	0,8	5	16
8	1	5	1,5	20	0,1	5	17
9	1	25	1,5	20	0,8	5	7
10	1	5	3	20	0,1	25	14
11	1	5	3	50	0,8	25	16
12	1	5	1,5	50	0,8	5	19
13	1	25	1,5	50	0,8	25	6
14	1	25	1,5	50	0,1	5	4
15	1	5	1,5	20	0,8	25	15
16	1	25	1,5	20	0,1	25	5
17	2	25	1,5	20	0,1	5	13
18	2	25	3	20	0,1	25	3
19	2	5	3	50	0,8	5	16
20	2	5	3	50	0,1	25	11
21	2	5	1,5	50	0,1	5	12
22	2	25	1,5	20	0,8	25	15
23	2	25	3	50	0,1	5	13
24	2	25	1,5	50	0,1	25	11
25	2	5	1,5	50	0,8	25	19
26	2	5	3	20	0,8	25	14
27	2	25	1,5	50	0,8	5	5
28	2	25	3	20	0,8	5	4
29	2	5	1,5	20	0,1	25	15
30	2	5	3	20	0,1	5	12
31	2	25	3	50	0,8	25	3
32	2	5	1,5	20	0,8	5	17

Таблиця 5.4 – Загальна статистика

	<i>B</i>	<i>c</i>	<i>delta</i>	<i>h</i>	<i>n</i>
Count	32	32	32	32	32
Average	2,25	15,0	0,45	15,0	35,0
Standard deviation	0,762001	10,16	0,3556	10,16	15,24
Coeff. of variation	33,8667%	67,7334%	79,0223%	67,7334%	43,5429%
Minimum	1,5	5,0	0,1	5,0	20,0
Maximum	3,0	25,0	0,8	25,0	50,0
Range	1,5	20,0	0,7	20,0	30,0
Std. skewness	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Std. kurtosis	-2,46867	-2,46867	-2,46867	-2,46867	-2,46867

Проведений у подальшому регресійний багатofакторний аналіз дозволив отримати регресійне рівняння, рівень значимості якого складає 88,67%:

$$s = 21,0015 - 1,91667b - 0,00625c + 1,96429\delta - 0,4125h - 0,0208333n .$$

Додаткова статистична інформація подана в табл. 5.5 та 5.6 відповідно.

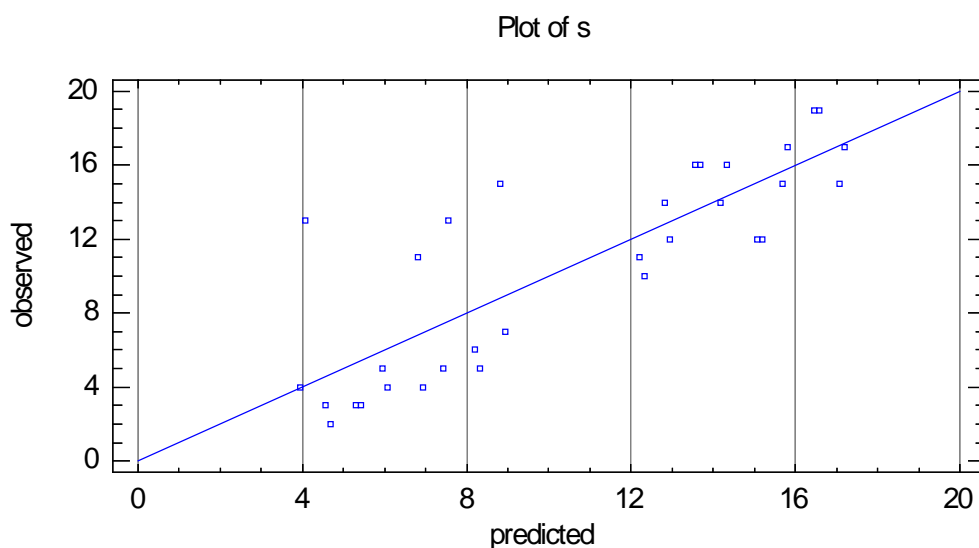


Рис. 5.5. Прогнозованість функціональної обумовленості за результатами спостережень

Таблиця 5.5 – Розраховані коефіцієнти лінійної моделі

		<i>Standard</i>	<i>T</i>	
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Error</i>	<i>Statistic</i>	<i>P-Value</i>
CONSTANT	21,0015	2,72889	7,69597	0,0000
B	-1,91667	0,782931	-2,44807	0,0214
C	-0,00625	0,0587198	-0,106438	0,9161
Delta	1,96429	1,67771	1,17081	0,2523
H	-0,4125	0,0587198	-7,02489	0,0000
N	-0,0208333	0,0391465	-0,532188	0,5991

Таблиця 5.6 – Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	629,0	5	125,8	11,40	0,0000
Residual	286,875	26	11,0337		
Total (Corr.)	915,875	31			

R-squared = 88,6775 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 82,6539 percent

Standard Error of Est. = 3,32169

Mean absolute error = 2,41406

Durbin-Watson statistic = 1,27211 (P=0,0183)

Головні ефекти дії кожного фактору подані на рис. 5.6, а порівняння ступеня впливу на результативний параметр s – на рис. 5.7.

Таким чином, отримана регресійна залежність дозволяє встановлювати значення контурної лінійної подачі робочого інструменту залежно від схеми технологічного налагодження для певного інструменту, який здійснює обробку зі швидкостями різання 50-60 м/с.

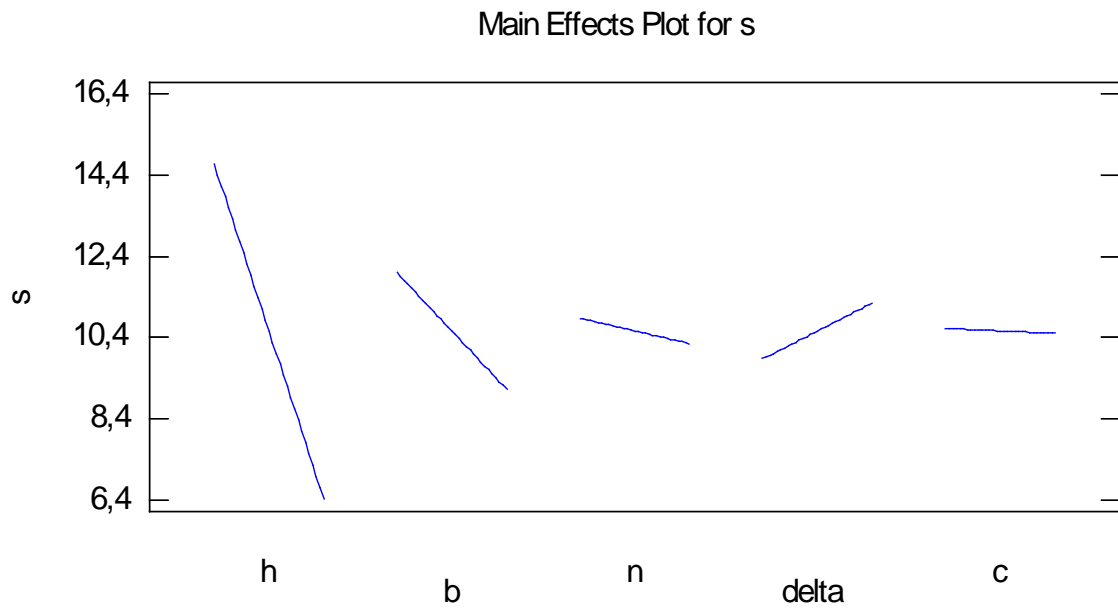
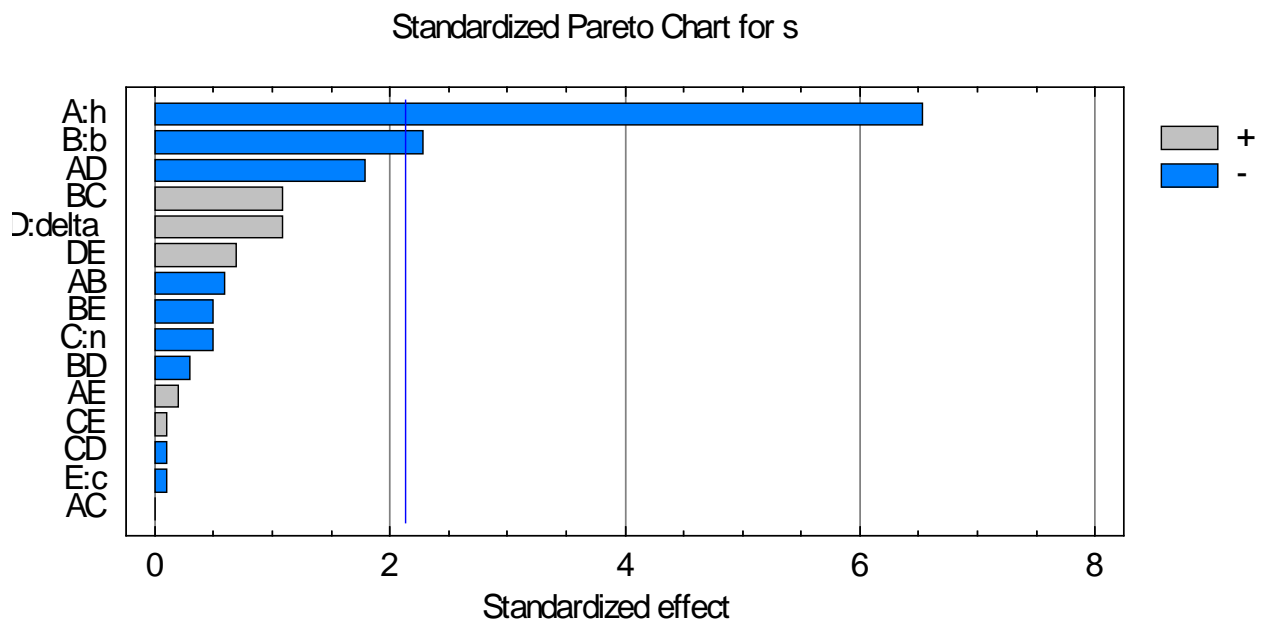


Рис. 5.6. Головні ефекти дії факторів

Рис. 5.7. Порівняння ступеня дії факторів на результативний параметр s

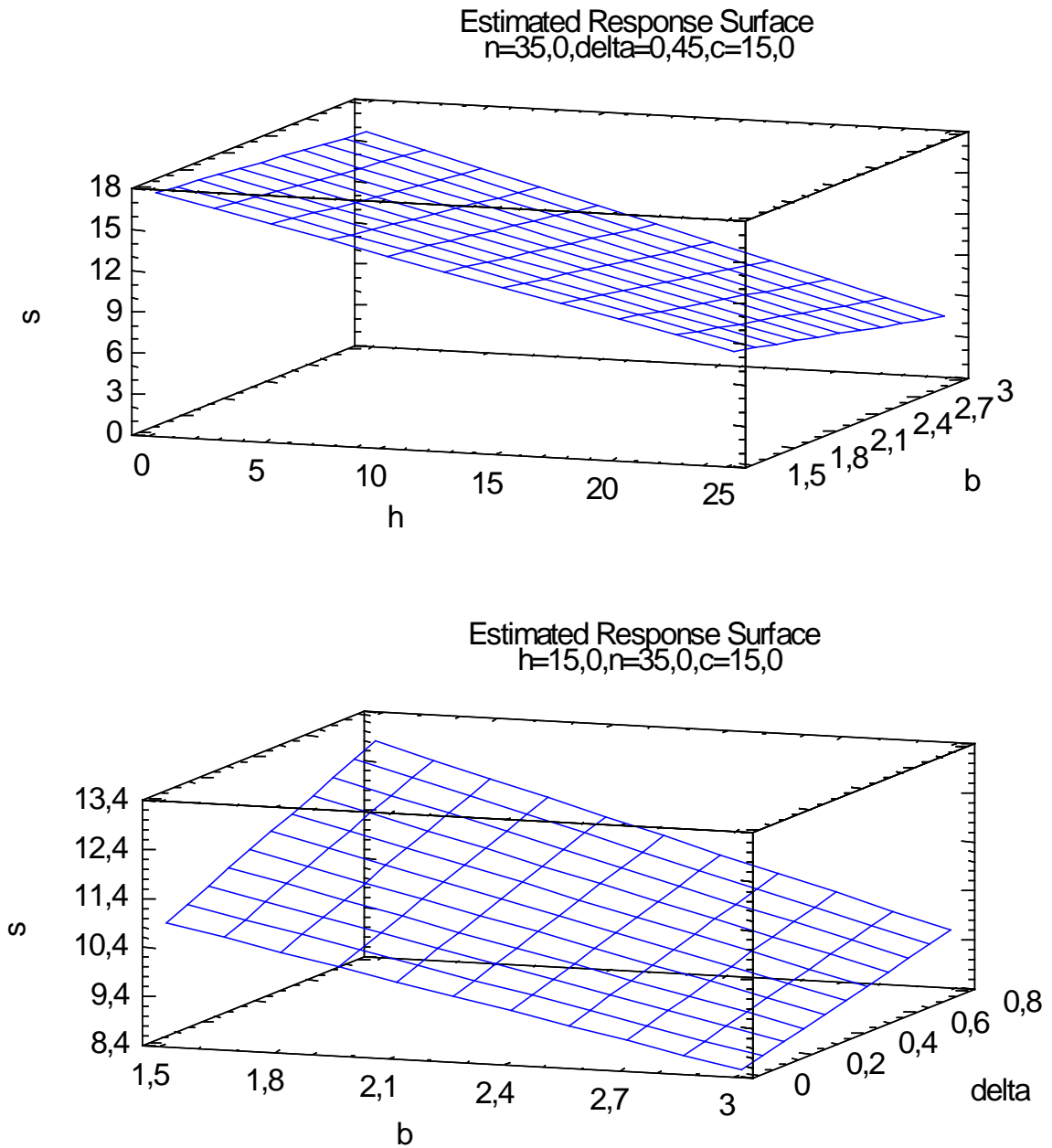


Рис. 5.8. Поверхня відгуку для результативного параметра s від дії найбільш значимих факторів.

Послідовність розрахунків буде наступною:

1. Опрацювання схеми технологічного налагодження при різанні матеріалу типу КИМФ, встановлення раціональних рухів силової головки.
2. Вибір різального круга відповідно до рекомендацій [104].
3. Визначення глибини різання.
4. Розрахунок s .
5. Уточнення часу обробки, оцінка зміни ступеня забруднення.

6. Перерахунок температури у зоні різання, яка може виникнути при обробці;
7. Встановлення показників якості поверхневого шару, перевірка умови $T < T_{kr}$.
8. У випадку, коли параметри шорсткості і точності задовольняють технічним вимогам, прийняття встановленого рівня подачі.
9. Якщо шорсткість або точність буде гіршою за вимоги, проводять коригування швидкості подачі, зменшуючи її та перевіряючи за відповідними рівняннями.
10. Здійснюють кінцевий розрахунок часу обробки та величини температури у зоні різання.

5.3. Економічне обґрунтування пропонованих нових технічних рішень

Обробку заготовок із композиційних матеріалів, зважаючи на усі складнощі, пов'язані із структурою матеріалу, пилом і брудом, що виділяється при обробленні, можна вести у кілька способів.

Перший спосіб – використання універсального обладнання, у тому числі, ручного із спеціальним інструментальним забезпеченням, а також засобами аспірації. Другий спосіб – використання традиційних маніпуляторів із встановленими шпиндельними пристроями, оснащеними алмазовмісним інструментом, та третій – використання пропонованого технічного рішення.

Особливості виконання обробки кожного із альтернативних способів подані у табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Оброблення заготовок різними способами

Переходи		Способи			Точність, мм	Шорсткість	Продукт.	Бал. Вартість, тис. грн..
		I	II	III				
1	Відрізання бруску	Pedrazolli SUPER BROWN 350/45		Маніпулятор 580,00 грн. Пропонований варіант 630,00 грн.	0,25/0,25/0,25	80 мкм	50 мм ³ /с	240,00
2	Шліфування	JET DDS-225			0,15/0,15/0,1	6,3 мкм	5...10 мм ³ /с 50 мм ³ /с	189,00
3	Відрізання пластин	pedrazolli SUPER BROWN 350/45	Маніпулятор 580,00 грн.		0,25/0,25/0,1	40 мкм	50 мм ³ /с	240,00*
4	Шліфування	PROMA PBP-400A			0,25/0,25/0,1	6,3	5...10 мм ³ /с 50 мм ³ /с	1 200,00
5	Контурна обробка	Quantec Carven			0,2/0,15/0,1	12,5	0,5...2 мм ³ /с 2..3 мм ³ /с 3..4 мм ³ /с	280,00
6	Виконання отворів				0,3/0,3/0,3	40 мкм	0,5...2 мм ³ /с	

Для визначення економічної ефективності розглядаємо 3 варіанта: виконання обробки у традиційний спосіб, із використанням відомих маніпуляційних систем та пропонованої системи.

Методику економічних розрахунків наведено у додатку Д, за наведеною методикою обчислено кошторис витрат партії виробів, результати якого наведені у табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Елементи кошторису витрат виготовлення фланця

Показники	Одиниця виміру	1 спосіб	2 спосіб	3 спосіб
1	2	3	4	5
Балансова вартість обладнання для способів обробки	грн			
JET DDS-225		189 000		-
Pedrazolli Super Brown 350/45		240 000	240 000	-
PROMA PBP-400A		1 200 000	1 200 000	-
Quantec Carven		280 000		-
Маніпулятор		-	580 000	-
Пропоноване технічне рішення		-	-	630 000
Кількість верстато-годин	год.	9,6	7,3	5,7
Пряма вартість обробки		9 163 грн.	7 373 грн	1 795 грн.
Спирт етиловий	грн	550	350	300
Фільтр		1200	1200	1200
Інструмент варт.		4800	2950	1600
Рідина очищ		350	350	350
Змаш.речовина		870	870	870
Коефіцієнт використання інструменту		0,45	0,35	0,35
Разом		5 130 грн.	3 802 грн.	3 280 грн.
Витрати електроенергії				
JET DDS-225	кВт	5,0	5,0	-
Pedrazolli Super Brown 350/45		7,2	7,2	-
PROMA PBP-400A		5,3	-	-
Quantec Carven		2,9	-	-
Маніпулятор		-	1,5	1,2
Пропоноване технічне рішення		-		
Кількість верстато-годин		9,6	7,3	5,7
Спожита потужність	кВт*год	65,3	8,8	6,9
Загальні витрати на електроенергію	грн.	104,5 грн.	14,8 грн.	11,2 грн.

1	2	3	4	5
Трудомісткість виконання підготовки виробництва	год.			
Розробка моделі виробу		8	32	32
Розробка технології оброблення		-	48	96
Розробка спецустаткування		-	80	240
Випуск конструкторсько-технологічної документації		-	32	64
Введення керуючих програм та відладка обладнання		4	16	32
Разом		12	208	464
Основна заробітна плата	грн.	10800	10800	10800
Додаткова заробітна плата	грн.	3240	3240	3240
Відрахування на соціальні витрати 22 %	грн.	3088,80	3088,80	3088,80
Вартість 1 людино-години		101,96	101,96	101,96
Загальна кількість людино-годин з урахуванням роботи обладнання		2 192,1	21 982,6	47 697
Адміністративні витрати, 20% від ФОП	грн	438,2	4 396	9 539,5
Собівартість виготовлення	грн	14 835	15 591	11 628

Таким чином, очевидно є економічна доцільність застосування пропонованого пристрою для виготовлення зразків із матеріалу типу КИМФ саме із використанням пропонованого нового технічного рішення. Така конструкція верстата, маючи незначні відмінності у порівнянні із відомими маніпуляторами, володіє більшою універсальністю, а підвищена жорсткість системи дозволяє ліквідувати ряд технологічних операцій щодо забезпечення форми пластинок заготовок.

5.4. Висновки за розділом

1. Запропоноване нове технічне рішення верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю, який має більш широкі можливості орієнтації робочого органа та більшу жорсткість у порівнянні з відомими верстатами із спільною віссю шарнірів робочого органа. Наведено його конструктивне виконання та передбачувані технічні характеристики. Запропоновано ряд перспективних схем багатокоординатних верстатів паралельної структури.

2. Розроблено інженерну методику визначення швидкості робочої подачі (як залежного фактору) від умов виконання обробки, використовуваного круга, схеми технологічного налагодження. Реалізований багатофакторний експеримент дозволив отримати прості регресійні рівняння, на основі яких запропонована послідовність інженерних розрахунків контрольованих параметрів процесу.

3. До уваги прийнято наступні фактори: глибина різання, або товщина оброблюваного матеріалу h ; товщина круга b ; марка круга, яка відображає густину абразивних частинок n ; виступ частинок над поверхнею d ; жорсткість важільної системи c ; швидкість різання v_p , яка залежить від діаметра круга D_k та частоти обертання шпинделя; параметр матеріалу K .

4. Приведене економічне обґрунтування прийнятих технічних рішень та показано, що використання розробок дозволяє скоротити витрати на обробку на 25–30%.

5. Запропоновані методики, математичні моделі і технічні рішення впроваджено на ТОВ «Таксі-комфорт», м. Кременчук, а також використано у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» і «Теорія різання».

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведене вирішення науково-прикладної задачі підвищення якості розрізання карбон-карбонових композиційних виробів на основі встановлення закономірностей формування поверхневого шару при впливі абразивним інструментом за рахунок забезпечення раціональних умов різання маніпуляційною системою верстата паралельної структури.

1. Розроблено фізичну модель взаємодії та запропоновано математичний опис теплових явищ у зоні різання, при яких інструмент отримує деформування. У якості інструменту розглянуто алмазовмісний відрізний круг малої щільності. Показано, що нерівномірне тепловиділення, яке може призвести до локального нагріву інструменту до температур 1050-1250 К, пов'язане зі зміною динамічної плями контакту поверхні інструменту, забрудненої частинками видаленого матеріалу (шламом), та поверхні обробки і обумовлене динамічними властивостями верстата, веде до зміни продуктивності обробки та до зростання деструкції поверхневого шару за рахунок зміни термосилового навантаження.

2. Запропоноване нове технічне рішення верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю, який має робочий орган із спільною віссю шарнірних опор, розділений на дві частини, які можуть рухатись відносно спільної осі шпинделя та шарнірних опор. Показана доцільність його застосування для маніпулювання шпинделем із відрізним кругом на верстаті для обробки карбонних композиційних виробів. На основі встановлених кінематичних залежностей визначено матрицю просторової жорсткості 6×6 , яка характеризує жорсткість ТОС.

3. Встановлено, що запропонованому механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю властива підвищена жорсткість у порівнянні з повнопаралельними багатокординатними механізмами, в тому числі із спільною віссю шарнірів робочого органа. Експериментальними вимірюванням на розробленій та виготовленій моделі верстата паралельної

структури з кінематичною надлишковістю підтверджено, що величина жорсткості надлишкового механізму на 16 – 28% більша у порівнянні з схемою «пентапод».

4. Дослідженням впливу зміни жорсткості верстатної системи на динамічні характеристики процесу мікрорізання встановлено, що із зменшенням жорсткості спостерігається зростання динамічних складових за амплітудою на 50–120% та зростання тривалості перехідного процесу до 0,3–1,2 с. Таким чином, підвищення характеристик жорсткості технологічної системи дозволяє не лише покращити точність різання, але й зменшити пляму контакту і тепловиділення в зоні різання.

5. На основі ідентифікації моделі взаємодії інструменту із композиційним карбоновим матеріалом отримано ряд регресійних залежностей для встановлення раціональних умов обробки, розроблено інженерну методику прогнозування якості отриманого поверхневого шару. Наведено конструктивне виконання та передбачувані технічні характеристики верстата паралельної структури для обробки карбонових композитних виробів.

6. Запропоновані методики, математичні моделі і технічні рішення впроваджено на ТОВ «Таксі-комфорт», м. Кременчук, а також використано у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» і «Теорія різання».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрашкевич Ю. Д., Пелевін Л. Е., Човнюк О. В. Визначення силових параметрів процесу різання абразивними армованими кругами. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини* : Всеукраїнський збірник наукових праць. Київ, 2012. Вип. 79. С. 53–56.
2. Аль Ібрахімі Метак М. А. Возможности повышения продуктивности обработки деталей за счет использования станков параллельной структуры с избыточными приводами и специальным рабочим органом. *Modern Science — Moderní věda*. Praha. Česká republika, Nemoros. 2018. № 4. С. 160–167.
3. Аль Ібрахімі Метак М. А. Математична модель узагальнених координат робочого органа багатокординатного верстату паралельної структури з надлишковим приводом. *Наукові доповіді НУБІП України*. Електронне видання. Вип. 4(74), вересень 2018. ISSN 2223-1609. Дата доступу: 1 грудня 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2018.04.020>.
4. Аль Ібрахімі Метак М. А. Возможности расширения ориентационных возможностей многокомпонентных верстатов. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк: ЛНУ, 2018. Вип. № 63. С. 8–13.
5. Альван Х. М. Динамика и управление движением робототехнических систем с избыточными входами : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.18 / Альван Хассан М. СПб., 2003. 18 с.
6. Андреев А. Г. Разработка компоновок многокоординатных станков для обработки сложнопрофильных деталей осесимметричным инструментом. Дис. на соиск. учен. степ. к.т.н.: спец. 05.03.01 ;. М.: РГБ, 2004.
7. Андреева А. В. Основы физико-химии и технологии композитов. М.: ИПРЖР. 2001. 192 с.

8. Афонин В. Л., Подзоров П. В., Слепцов В. В. Обрабатывающие оборудование на основе механизмов параллельной структуры : уч. пос. / общ. ред. В. Л. Афолина. М.: Изд-во МГТУ СТАНКИН; К. : Янус, 2006. 452 с.
9. Батаев А. А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.
10. Биркгоф Дж. Д. Динамические системы. М. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. 405 с.
11. Богданович В. И. Теоретические основы обеспечения надежности летательных аппаратов на стадии их производства. Самара: Из-во Самарского гос. аэрокосм. ун-та. 2007. 90 с.
12. Борисевич А. В. Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB. 2011. URL: https://e4bc493d-a-62cb3a1a-s-sites.googlegroups.com/site/akpc806a/home/ControlTheoryTextbook_0.pdf
13. Булаев А. В., Прокофьев А.Н. Проблемы механической обработки материала SIGRABOND. *Известия ТУЛГУ. Технические науки.* – 2017. Вып. 8, ч. 2. С. 235–242.
14. Бурнашов М. А., Прежбилов А.Н., Василенко Ю.В. Моделирование процесса разрушения покрытия водоледяной струей при очистке деталей машин. *Вестник ЮурГУ. Серия «Машиностроение».* 2017. т.17, №2. С. 67–73.
15. Бушуев В. В., Хольшев И. Г. Механизмы параллельной структуры в машиностроении. *СТИН.* 2001. №1. С. 3–8.
16. Бушуев В. В., Подзоров П. В. Особенности проектирования оборудования с параллельной кинематикой. *СТИН.* 2004. № 4. С. 3–10.
17. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / под ред. Конова В.И. – М. : Физматлит. 2008. 321 с.

18. Везуб Н. В. Научные основы высокоэффективных процессов механической обработки полимерных композитов: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук : 05.03.01/ Н. В. Везуб. ХНИИТМ. Х., 1995. 43 с.
19. Везуб Н. В., Хавин Г. Л., Тарасюк А. П. Энергетические аспекты разрушения полимерных композитов при резании. *Резание и инструмент в технологических системах* : междунар. науч.-техн. сб. НТУ «ХПИ». Харьков, 2001. Вып. 59. С. 28–34.
20. Гриньов Б. В., Кириченко І. К. Аналітична геометрія : підруч. для студ. вищ. техн. навч. закл. Х., 2008. 340 с.
21. Гурин И. В. и др. Получение ламинатных углерод-углеродных материалов и исследование их физико-механических свойств. *Вопросы атомной науки и техники*. Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт». Х, 2016. №1. С.74–78.
22. Диментберг Ф. М. Об особенных положениях пространственных механизмов. *Машиноведение*. 1977. № 5. С. 53–58.
23. Дмитриев Д. А., Кузнецов Ю. Н. Кинематика, компоновка и формообразующие движения токарных многоцелевых станков с механизмами параллельной структуры. *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*. 2008. Вип. 2 (49). Ч. 2. С. 66–76.
24. Дмитрієв Д. О., Кузнецов Ю. М., Подольський М. І. Експериментальне дослідження токарного верстата з механізмами паралельної структури. *Технологічні комплекси*. 2011. №4. С. 68–74.
25. Дмитрієв Д. О. Компонетика верстатів з механізмами паралельної структури. *Технологічні комплекси*. 2011. № 3. С. 37–48.
26. Дрожжин В. И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс. Автореф. дис...докт.техн.наук. К., 1983. 39 с.
27. Дрожжин В. И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс: дис. ... доктора техн. наук. Х, 1982. 388 с.

28. Заблонский К. И., Монашко Н. Т., Щекин Б. М. Оптимальный синтез схем манипуляторов промышленных роботов. К: Техника, 1989. 148 с.
29. Зайченко В. Н. Слободянюк И. А. Поверхностные явления на электролитических газовых пузырьках и МГД-эффект при электролизе воды в магнитном поле. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2016. Т. 7, № 1. С.35–43.
30. Зенкін А. С., Прищеп А.В., Зенкіна С.М., Мащенко О.В. Контролінг якості – інструмент забезпечення конкурентоспроможності продукції. *Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте* : Материалы 16-го Международного научно-технического семинара, 22–26 февраля 2016 г., г. Свалява. К : АТМ Украины, 2016. 300 с.
31. Ивахненко А. Г. Автоматизация проектных работ на стадии структурного синтеза металлорежущих систем *Проектирование технологических машин* : сб. науч. трудов. Вып. 4 / Под ред. А.В. Пуша. М : МГТУ "СТАНКИН", 1997. С. 9–14.
32. Карпачев А.Ю. Устойчивость круглых пластин при неравномерном нагреве. *Сб. научн. статей, посвященный 125-летию кафедры теоретической механики ИМТУ-МГТУ им. Н.Э. Баумана*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. С. 121–123.
33. Кириченко А. М. Динаміка рухомої платформи верстата паралельної структури з незамкненими гвинтовими приводами зміни довжини штанг. *Технологічні комплекси*. Луцьк : ЛНТУ, 2013. №1(7). С.146–150.
34. Кириченко А. М. Матриця жорсткості просторових механізмів паралельної структури з пружними ланками. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин* : Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кіровоград: КНТУ, 2010. Вип. 40, ч. I. С. 256–262.

35. Кириченко А. М. Наукові основи створення мехатронних систем просторового переміщення шпинделя багатокоординатних верстатів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / Кириченко Андрій Миколайович ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". К., 2012. 380 с.

36. Кириченко А. М. Показники жорсткості верстатного обладнання з паралельною кінематикою. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2009. Вип. 22. С. 272–282. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2009_22_44.

37. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак. Багатокоординатний верстат з надлишковим механізмом паралельної структури та спеціальним робочим органом. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація,* 2017, Вип. 30. С. 57–64.

38. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак М. А. Робочий простір та особливості 5-осьового паралельного верстата з надлишковими приводами. *Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво»*, Луцьк, 2018. Вип. 30–31. С. 196–200.

39. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак М.А. Верстат паралельної структури з надлишковими приводами та спеціальним робочим органом. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2017)* : матеріали тез доповідей VII міжнародної науково-практичної конференції (24–27 квіт. 2017 р.) : у 2-х т. Чернігів : ЧНТУ, 2017. Т. 1. С. 136–137.

40. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак М.А. Компоновка верстата паралельної структури із спеціальним робочим органом. Обладнання і технології сучасного машинобудування : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції пам'яті Нагорняка С. Г., 11–12 травня 2017 р. Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2017. С. 85.

41. Кириченко А. М., Аль-Ібрахімі Метак М. Нова конструкція робочого органа надлишкового верстата паралельної структури. *Сучасні*

технології промислового комплексу: базові процесні інновації – 2018 : матеріали IV-ої Міжнародної науково-практичної конференції, вип. 4. Херсон: ХНТУ, 2018. С. 99.

42. Кириченко А. М., Аль-Ібрахімі Метак. Збільшення діапазону кутів орієнтації робочого органа багатокоординатного верстата паралельної структури. *Сучасні технології промислового комплексу – 2017* : матеріали III-ої Міжнародної науково-практичної конференції (Херсон, 12 – 17 вересня, 2017 р.). Херсон : ХНТУ, 2017. С. 143–144.

43. Кириченко А. М., Гречка А. І., Аль-Ібрахімі Метак М. А. Визначення ефективної схеми верстата комбінованої структури. *Сучасні технології промислового комплексу* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, вип. 2. Херсон: ХНТУ, 2016. С. 57–60.

44. Кириченко А. М., Струтинський В. Б. Геометрична побудова робочого простору обладнання з механізмами паралельної структури. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Кіровоград : КНТУ, 2011. Вип. 24. С. 216–222.

45. Кириченко А. М., Шелепко О. В., Сапон С. П. Кінематика п'ятикоординатного верстата з паралельною структурою. *Вісник ЧДТУ. Серія «Технічні науки»*. Чернігів : ЧДТУ, 2013. № 3 (67). С. 100–104.

46. Кириченко А. М., Шелепко О. В., Черновол М. І. Просторова жорсткість верстата з механізмом паралельної структури «пентапод». *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин* : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград: КНТУ, 2012. Вип. 42, ч. 2. С. 187–190.

47. Кириченко А. Н., Метак Аль Ібрахими, Щетинин В. Т., Ченчевая О. А. Повышение качества абразивной резки карбон-карбоновых композитов за счет обеспечения рациональных условий динамического контакта. *Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського*. Кременчук : КрНУ, 2018. Вип. 5 (112). С. 94–102.

48. Киселев С. П., Киселев В. П., Зайковский В. Н. О механизме автоколебаний при натекании сверхзвуковой струи на преграду. *Прикладная механика и техническая физика*. 2014. Т. 55, №4. С. 50–59.
49. Кобринский А. А., Кобринский А. Е. Манипуляционные системы роботов. М.: Наука, 1985.
50. Козлов В.В., Макарычев В. П., Тимофеев А. В. Динамика управления роботами. М., 1984.
51. Коваленко А. В. Контроль деталей, обработанных на металлорежущих станках. М.: Машиностроение, 1980. 167 с.
52. Кузнецов Ю. Н. Генетико-морфологический принцип создания станков нового поколения. *Вісник СевНТУ*. Вип. 110: Механіка, енергетика, екологія. Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. С. 3–12.
53. Кузнецов Ю. М. Дмитрієв Д. О., Діневич Г. Ю. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури / під ред. Ю.М. Кузнецова. Херсон : ПП Вишемирський В.С., 2009. 456 с.
54. Кузнецов Ю. М. Концепція створення технологічних систем нового покоління на модульному принципі. *Технологічні комплекси*. 2010. № 2. С. 8–14.
55. Лобанов И. Е. Аналитическое решение нелинейной обратной задачи теплопроводности для тела с низким коэффициентом теплопроводности одномерной геометрии. *Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках*: программа XII школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева. М.: МЭИ, 1999. С. 10.
56. 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.
57. Лупкин Б. В., Мамлюк О. В. Механическая обработка композиционных материалов. *Труды Международной ежегодной научно-*

практической конференции «Композиционные материалы в промышленности» (Славполикком). Ялта, 2001. С. 70–79.

58. Мана О. М. та ін. Отримання тестових різів у виробках з надміцних матеріалів «холодними» та «гарячими» методами. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2014. Вип. 6/2014(89). Ч. 1. С. 86–95.

59. Манаенков И. В. Повышение эффективности многокоординатной обработки путем управления объемной точностью формообразующей станочной системы при проектировании. Дис. на соиск... к.т.н.: спец. 05.02.07. М.: РГБ, 2017. 214 с.

60. Манипуляционные системы роботов / под ред. А. П. Корендясева. М.: Машиностроение, 1989. 466 с.

61. Мелешко А. И., Половников С.П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. М.: Сайнс-пресс, 2007. 194 с.

62. Метак Мохамед Аль Ібрахімі, Кириченко А. М. Вдосконалення багатокординатних верстатів паралельної структури введенням надлишкових приводів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)*: матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції (26–29 квітня 2016 р). Чернігів: ЧНТУ, 2016. С. 126.

63. Метак Мохамед Аль Ібрахімі, Кириченко А. М. Особливості кінематики багатокординатних верстатів паралельної структури з надлишковими приводами. *Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів* : збірник наукових праць IV Міжнародної науково-технічної конференції ТК–2016, 26–28 трав. 2016 р. Луцьк : ЛНТУ, 2016. С. 55–57.

64. Механическая обработка волокнистых полимерных композитов / Н. В. Вerezуб, А. П. Хавин, А. А. Гетманов, А. П. Тарасюк. Харьков: ХНАДУ (ХАДИ), 2001. 180 с.

65. Новіков М., Струтинський В., Кириченко А. Розроблення верстата-гексапода з шестикординатною системою ЧПК і результати його дослідницького застосування. *Машинознавство*. Львів : ТзОВ «КІНПАТРИ ЛТД», 2011. № 5–6 (167–168). С. 3–10.

66. Оборський Г. О., Гутиря С. С., Яглінський В. П. Надійність верстатів-роботів і промислових платформ на основі механізмів паралельної структури. *Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла*. 2011. № 12. С. 246–254.
67. Павленко І. І., Валявський І. А., Гнатюк А. О. Інтегральний робочий простір верстатів-гексаподів. *Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Кіровоград: КНТУ, 2010. Вип. 23. С. 102–108.
68. Павленко І. І., Валявський І. А. Оцінка рухових можливостей гексапода у напрямку, перпендикулярному до осі його симетрії. *Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Кіровоград: КНТУ, 2009. Вип. 22. С. 3–10.
69. Пашкевич А. П. Критерии оценки кинематических свойств манипуляторов. *Автоматика и вычислительная техника*, №18, 1989.
70. Пейсах Э. Е. Кинематический анализ рычажных механизмов. Гл. 2 в части II книги: *Машиностроение. Энциклопедия (в сорока томах)*, т. 1–3, кн. 2. М.: Машиностроение, 1995.
71. Потапов В. А. Станки с параллельной кинематикой: следующий этап. *Машиностроитель*. 1999. № 10. С. 53–58.
72. Потапов В. А. Станки с параллельной кинематикой на выставке ЕМО-2001: концепции, реальность и перспективы. *Приводная техника*. 2002. № 2. С. 50–57.
73. Привід переміщення вихідного органа верстата з п'ятьма штангами: Пат. 114304 Україна : МПК В23Q 5/00. № 201607831; заявл. 15.07.16; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5. 4 с.
74. Привід переміщення вихідного органа верстата з чотирма штангами: Пат. 114306 Україна: МПК В23G 5/02. № 201607833; заявл. 15.07.16; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5. 4 с.

75. Привід переміщення вихідного органа верстата з шістьма штангами: Пат. 112828 Україна: МПК В23Q 5/00. № 201607885; заявл. 15.07.16; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. 4 с.
76. Проволоцкий А. Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. К.: Техника, 1989. 177 с.
77. Пястолов С. М. Экономический анализ деятельности предприятия. М.: Академический проект, 2002. 572 с.
78. Рогов В. А., Шкарупа М.И., Велис А.К. Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении/*Вестник РУДН, Серия Инженерные исследования*. 2012. №2. С. 41–49.
79. Рогов В. А. Конструкционные и функциональные материалы современного машиностроения. М.: Масштаб, 2006. 240 с.
80. Романенко А. В., Сидоров П. А. Углеродные материалы и их физико-химические свойства / под ред. А.С. Носкова. М.: Калвис, 2007. 116 с.
81. Саленко О., Лашко Є. Про можливості абразивно-водокрижаного різання важкооброблюваних матеріалів. *Гідроаводокеромеханіка в інженерній практиці* : XVIII Міжнародна науково-технічна конференція. К: НТУУ «КПІ», 2013.
82. Саленко О. Ф., Троцько О.В. Видалення твердих поверхневих шарів при гідроструменевому впливі. *Проблеми создания новых машин и технологий* : Научные труды КГПУ. Вып. 9. 2000. С. 428–430.
83. Саленко О. Ф., Струтинський В.Б., Загірняк М.В. Ефективне гідрорізання : монографія. Кременчук: КДПУ, 2005. 488 с.
84. Саленко О. Ф. Ефективність струминних роторних пристроїв, використовуваних для очищення поверхні тіл. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. Кременчук : КДПУ, 2004. Вип. 6/2004 (29). С. 75–82.
85. Саленко О. Ф., Фомовська О. В. Топографування поверхні для 3-Д моделей за допомогою растрового електронного мікроскопу. *Вісник*

Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. Кременчук: КДПУ, 2008. Вип. 5/2008 (52), Ч. 2. С. 25-40.

86. Скворцова А. Н., Лычева К. А., Возняковский А. А., Кольцова Т. С. Композиционные материалы на основе алюминия, упроченного нановолокнами. *Научные ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. №3 (226). 2015. С.78–84.

87. Слітюк О. О., Колосніченко М. В., Кліменко В. М., Зенкін А. С. Розробка математичної моделі оцінки якості форменого одягу за естетичними показниками. *Технологія і техніка друкарства: зб. наук. пр. ВПІ НТУУ «КПІ»*. 2006. № 3(13). С. 38–43.

88. Сороченко В. Г., Шепелев А. А. К вопросу о контактном взаимодействии в процессах алмазно-абразивной обработки полимерных композиционных материалов. *Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*. *Машиностроение*. К.: НТУУ «КПИ». 2008. 54. С.175–184.

89. Сороченко В. Г. Теплообразование и температура резания при алмазноабразивном шлифовании полимерных композиционных материалов. *Прогресивні технології і системи машинобудування*. 2009. Т. 38. С. 214–224.

90. Степанов А. А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1987. 176 с.

91. Струтинський В. Б., Кириченко А. М. Ідентифікація геометричних параметрів механізмів паралельної структури з ланками змінної довжини. *Технологічні комплекси*. Луцьк: Вид-во ЛНТУ, 2011. № 2(4). С. 62–67.

92. Струтинський В. Б., Кириченко А. М. Математичний апарат векторів шостого порядку для розрахунків жорсткості просторових механізмів паралельної структури. *Вісник Сумського державного університету. Серія «Технічні науки»*. Суми: СумДУ, 2010. № 2. С. 142–154.

93. Струтинський В. Б. Спеціальні математичні моделі для оцінки динамічної точності механізмів паралельної кінематики / В.Б. Струтинський, О. М.Кравець, Самі (Мох'д Амін) Мох'д Іхміш // *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин»*. Кіровоград: КНТУ, 2005. № 35. С. 273–279.

94. Струтинський В. Б. Тензорні математичні моделі процесів та систем: Підручник. Ж.: ЖДТУ, 2005. 635 с.

95. Струтинський В. Б., Кириченко А. М. Теоретичний аналіз жорсткості шестикоординатного механізму паралельної структури. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Машинобудування». К.: НТУУ «КПІ», 2009. № 57. С. 198–207.

96. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів і систем механіки : підручник. Житомир. Вид-во ЖІТІ, 2001. 612 с.

97. Тарасюк А. П. Проблемы исследования поверхностного слоя детали из волокнистых полимерных композитов, обработанных резанием. *Високі технології в машинобудуванні* : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «ХПІ». Х., 2001. №1. С. 259–262.

98. Тарасюк А. П. Расширение функциональных возможностей волокнистых полимерных композитов за счет разработки эффективных процессов механической обработки: дис.... д-ра техн. наук / А.П. Тарасюк. Харьков. 2011. 567 с.

99. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою : навчальний посібник для ВНЗ / В. А. Крижанівський та ін.; під ред. Ю.М. Кузнецова. Кіровоград, 2004. 449 с.

100. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В 10 т. Т.4. «Теория абразивной и алмазноабразивной обработки материалов». Одесса: ОНПУ, 2002. 802 с.

101. Фомовська О., Мана О. Саленко О. Розробка засобів автоматичного коригування швидкості робочої подачі гідроабразивної головки при різанні різнотовщинних матеріалів. *Вісник СевНТУ: Машинобудування та транспорт* : зб. наук. пр. Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. Вип. 107. С. 203–208.

102. Цыгановский А. Б. О влиянии геометрических характеристик струйных аппаратов на производительность гидроабразивной обработки затопленными струями. *Вопросы вибрационной технологии*. Ростов-на-Дону, ДГТУ. 2003. С.109 –112.

103. Шевченко О. В, Яшник А. В. Підвищення вібростійкості процесу розточування при обробці консольним інструментальним оснащенням. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. Вип. 10. Житомир, 2011. С. 354–363.

104. Шепелев А. А., Сороченко В. Г. и др. Алмазно-абразивный инструмент для обработки композиционных материалов. *Оборудование и инструмент для профессионалов*. №2. 2013. С. 30–35.

105. Шепелев А. А., Сороченко В. Г. Закономерности износа однослойных алмазно-абразивных кругов и их стойкость при механической обработке полимерных композиционных материалов. *Прогресивні технології і системи машинобудування*. 2009. Т. 38. С. 214–224.

106. 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.

107. Шепелев А. А., Сороченко В.Г., Дрожжин В.И. Температура при алмазно-абразивном разрезании полимерных композиционных материалов. *Наука і освіта* : зб. Наук. праць (до 40-річчя співпраці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» та Мішкольцького університету). Харків: НТУ «ХПІ», 2004. 45 с.

108. Эффективные станки для обработки композитных материалов от METROM Mechatronische Maschinen. *Молодой ученый*. 2017. №49. URL : <https://moluch.ru/archive/183/50684/> Дата звернення : 30.01.2018.
109. Ягліньський В. П. Узагальнена динамічна модель промислового робота. *Машинознавство*. 2009. №3 (141). С.22–27.
110. Ягліньський В. П., Гутиря С. С. Моделювання кінематики промислових платформ шліфувальних роботів-верстатів. *Вестник СевГТУ*. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. Вып. 110 : Механика, энергетика, экология. С. 13-19.
111. Aref M. M., Taghirad H. D. Geometrical workspace analysis of a cable-driven redundant parallel manipulator: KNTU CDRPM. *2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Nice. 2008. P. 1958–1963.
112. Bar G. F., Weiß G. Kinematic Analysis of a Pentapod Robot. *J. Geom. Gr.* 2002. Vol. 10(2). P. 173–182.
113. Behi F. Kinematic Analysis for a Six-Degree-of-Freedom 3-PRPS Parallel Mechanism. *IEEE J. Rob. Autom.* 1988. Vol. 4(5). P. 561–565.
114. Bhatnagar N., Ramakrishnan N., Naik N. K., Komanduri R. On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates. *Int. J. Of Machine tools & Manufacture*. 1995. Vol. 35. P. 701–716.
115. Bhattacharya D., Horrigan D. P. A Study of Hole Drilling in Kevlar Composites. *Composites Science and Technology*. 1998. Vol. 58, № 2. P. 267–283.
116. Bindu madhavi B., Suresh S. Structural Analysis Of Delamination Of Composite Materials Using Vertical Milling Machine (GFRP). *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*. July 2013. Vol. 4(7). P. 2306–2310.
117. Bonev I. A., Ryu J. A geometrical method for computing the constant-orientation workspace of 6-PRRS parallel manipulators. *Mech. Mach. Theory*. Vol. 36 (1), 2001. P. 1–13.

118. Bonev I. A., Zlatanov D., Gosselin C. Singularity analysis of 3-DOF planar parallel mechanisms via screw theory. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2003, Vol. 125, pp. 573–581.
119. Bonev I. A., Ryu J. A new approach to orientation workspace analysis of 6-DOF parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*. 2001. Vol. 36(1). P. 15–28.
120. Bonev I. A. The true origins of parallel robots : electronic data. January 24, 2003. URL : <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007.html>.
121. Borrás J., Thomas F., Torras C. Architectural singularities of a class of pentapods. *Mechanism and Machine Theory*, 46 (8), 2011. P. 1107–1120.
122. Borrás J., Thomas F., Torras C. Singularity-invariant families of line-plane 5-SPU platforms. *IEEE Transactions on Robotics*. 2011. Vol. 27, No. 5. P. 837–848.
123. Cao Y., Zhou H., Li B., Long S., Liu M. Singularity Elimination of Stewart Parallel Manipulator Based on Redundant Actuation. *Advanced Materials Research*. 2011. Vols. 143-144. P. 308–312.
124. Chakarov D. Analysis and Synthesis of the Stiffness of a Hybrid Manipulator with Redundant Actuation. *Proc. of the 5th Magdeburg Days of Mechanical Engineering*, 19-20. Sept., 2001. Magdeburg. P.119–127.
125. Chakarov D. Approaches of Stiffness Control of Parallel Manipulators with Actuation Redundancy. *Proc. of the International Scientific Conference PRACTRO'03, Yune 10-13*. Varna, 2003. P. 199–206.
126. Chakarov D. Optimization synthesis of parallel manipulators with desired stiffness : electronic data. Sofia, 2007. URL : <http://www.mech.bas.bg/imbm/LMS/Chakarov/TPM98.pdf>.
127. Composites and Their Properties / edited by Ning Hu. Intechopen.com, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/2816>.
128. De Jalon G., Bayo E. Kinematic and Dynamic Simulation of Multibody Systems. Springer Verlag, 1993. 440 p.

129. Dearnley P. A., Grearson A.N. Evolution of Principal Wear Mechanisms of Cemented carbides and Ceramics Used In Machining Titanium Alloys IMI 318. *Journal of Material Science and Technology*. 1986. No 2. P.47–58.
130. Dharan C. K. H., Won M.S. Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. No. 40. 2000. P.415–426.
131. Durão L. M., De_Moura M. F., Marques A. T. Numerical prediction of delamination onset in carbon/epoxy composites drilling. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008. Vol. 75. P. 2767–2778.
132. Durão L. M., De_Moura M. F., Marques A. T. Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates. *Composites*. 2006. № 37. P. 1325–1333.
133. Exechon / Welcome to Exechon : Electronic data. Sweden, 2017. URL : <http://exechon.com>.
134. Fang N., Jawahir I. S. Analytical Predication of the Chip Back-Flow Angle in Machining with Restricted Grooved Tools. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2003. 125. P. 210–219.
135. Fang N. Slip-Line Modeling of Machining with a Rounded-Edge Tool. Part I: New Model and Theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2003. 51. P. 715–742.
136. Fraunhofer IWS : Pentapod Multifunctional System. Fraunhofer-Gesellschaft, Dresden, Germany, 2018. URL : http://www.iws.fraunhofer.de/en/business_fields/joining/special_joining_technologies/equipment/pentapod_multifunctional_system.html
137. Gosselin C. Determination of the workspace of 6-dof parallel manipulators. *ASME J. of Mechanical Design*. 1990. Vol. 112(3). P. 331–336.
138. Gosselin C., Angeles J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1990. Vol. 6. P. 281–290.

139. Gosselin C. Stiffness mapping for parallel manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1990. Vol. 6(3). P. 377–382.
140. Haddad M., Zitoune R., Bougherara H. Study of trimming damages of CFRP structures in function of the machining processes and their impact on the mechanical behavior. *Composites*. 2014. Vol. 57. P.136–143.
141. Hexapod Robots in Laser Microsurgery Research. – URL : <https://www.pi-usa.us/en/tech-blog/hexapod-robots-in-laser-microsurgery-research/>
142. Hocheng H., Tsao C. C. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 140. P. 335–339.
143. Homsup W., Anderson J.N. Performance evaluation of robotic mechanisms. *American Control Conference*, Vol. 1, Seattle, WA, June 18-20, P. 130–136.
144. Isaksson M., Gosselin C., Marlow K. An introduction to utilising the redundancy of a kinematically redundant parallel manipulator to operate a gripper. *Mechanism and machine theory*. 2016. Vol. 101. P. 50–59. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2016.03.006.
145. Ji Z. Dynamic decomposition for Stewart platforms. *ASME J. of Mechanical Design*. 1994. Vol. 116(1). P. 67–69.
146. Jones R. M. *Mechanics of Composite materials*. 2nd prints by Taylor and Francis Inc. 1999. 360 p.
147. Kaneeda T., Masayuki T. CFRP cutting mechanism (1st report): surface generation mechanism in very low speed . *Journal of Japan Society of precision engineering*. 1989. P. 1456–1461.
148. Kim J., Cho K. S., Hwang J., Iurascu C., Park F. C. Eclipse-RP: A new RP machine based on deposition and machining. *J. Multi-body Dyn*. 2002. Vol. 216. P. 13–20.
149. Kong X., Gosselin Clément M. *Type Synthesis of Parallel Mechanisms*. Springer, 2007. 272 p.

150. Koplev A. Cutting of CFRP with single edged tools. *3rd International Conference on Composite Materials*, Paris, 1980. P. 1597–1605.
151. Koplev A., Lystrup A, Vorm T. Cutting process, chips and cutting forces in machining CFRP. *Composites*. 1983. 14(4). P. 371–376.
152. Krut S., Company O., Rangri S., Pierrot F. EUREKA: A New 5-Degree-of-Freedom Redundant Parallel Mechanism. *Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2003. P. 3575–3580.
153. Kunaporn S., Ramulu M., Hashish M. Mathematical modeling of ultra-high-pressure waterjet peening. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 2005. 127(2). P. 186–191.
154. 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.
155. Kyrychenko A. Open source CNC control for parallel kinematic machine tool. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Кіровоград: КНТУ, 2013. Вип. 26. С. 63–66.
156. Li H., Gosselin C., Richard M., St-Onge B. Analytic form of the six-dimensional singularity locus of the general Gough-Stewart platform. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2006. Vol. 128. P. 279–288.
157. Li Qing, Ren Y., Zhang J. Dynamic Analysis of Redundant Parallel Manipulator. *3rd International Conference on Mechatronics and Information Technology*, January 2016. DOI: 10.2991/icmit-16.2016.64
158. Lokesh K. S., Pinto Thomas, Ramachandra C.G. Effect of Tool Wear Machinability Studies on Polymer Composites. *International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)*. 2017. Vol. 1, Issue 5, July. P. 71–77.

159. Luces M., Mills J. K., Benhabib B.A Review of Redundant Parallel Kinematic Mechanisms. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. May 2017. Vol. 86, Issue 2. P. 175–198.
160. Machining of Ceramics and Composites. Marcel Dekker Inc. 1998. 300 p.
161. Mahdi M., Zhang L. A.A finite element model for the orthogonal cutting of fiber-reinforced composite materials. *Jornal of Materials Processing Technology*. 2001. Vol. 113. P. 373–377.
162. Marquet F., Krut S., Company O., Pierrot F. ARCHI, a redundant mechanism for machining with unlimited rotation capacities. *Proc. of IEEE ICAR*. 2001. P. 683–689.
163. Masory O., Wang J.Workspace Evaluation of Stewart Platforms. *Proceedings of the ASME 22nd Biennial Mechanism Conference*, Scottsdale, Arizona. 1992. Vol. 45. P. 337–346.
164. Merlet J.-P. Determination of 6d workspaces of Gough-type parallel manipulator and comparison between different geometries. *Int. J. of Robotics Research*. 1999. Vol.18(9). P. 902–916.
165. Merlet J.-P. Determination of the Orientation Workspace of Parallel Manipulators. *J. Intell. Rob. Syst.* 1995. Vol. 13. P. 143–160.
166. Merlet J.-P. Jacobian, manipulability, condition number and accuracy of parallel robots. *ISRR*, Oct 2005, San Francisco, 2005. P. 199–206.
167. Merlet J.-P. Parallel Robots. Springer-Verlag New York Inc., 2006. 394 p.
168. Merlet J.-P. Redundant parallel manipulators. *J. of Laboratory Robotic and Automation*. 1996. Vol. 8(1). P. 17–24.
169. Merlet J.-P. Singular configurations of parallel manipulators and grassmann geometry / J-P. Merlet // The International Journal of Robotics Research. – 1989. – Vol. 8. – P. 45–56.
170. Metrom mechatronische maschinen. URL : www.metrom.com.
171. Mikrolar. URL : <http://mikrolar.com>.

172. Müller A. Consequences of geometric imperfections for the control of redundantly actuated parallel manipulators. *IEEE Trans. Robot.* 2010. Vol. 26 (1). P. 21–31.
173. Müller A. On the terminology and geometric aspects of redundant parallel manipulators. *Robotica*. 2013. Vol. 31(1). P. 137–147.
174. Muller A. Redundant Actuation of Parallel Manipulators. *Parallel Manipulators, Towards New Applications*. Vienna, Austria, 2008. P. 87–108.
175. Nayak D., Bhatnagar N., Mahajan P., Larsi L. Machining studies of UD-FRP composites. Part 2: Finite element analysis. *Machining Science and Technology*. 2005. Vol. 9. P. 503–528.
176. Neugebauer R. et al. New Approaches to Machine Structures to Overcome the Limits of Classical Parallel Structures. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2002. Vol. 51(1). P. 293–296.
177. Nunes J., Silva J., Novo P., Marques A. Technological development to produce low cost thermoplastics reinforced composites. *7th European Conf. Of Advanced materials and processes*. 2001.
178. Pandilov Z., Dukovski V. Comparison of the characteristics between serial and parallel robots. *Acta Technica Corviniensis – Bull. Eng.* 2014. Vol. 7(1).
179. Park F., Kim J. Singularity analysis of closed kinematic chains. *ASME Journal of Mechanical Design*. 1999. Vol. 121. P. 32–38.
180. Pramanik A., Zhang L. C., Arsecularatne J. A. An FEM investigation into the behavior of metal matrix composites: Tool–particle interaction during orthogonal cutting. *Int. J. Of Machine tools & Manufacture*. 2007. Vol. 47. P. 1497–1506.
181. Rahman M., Ramakrishna S., Prakash J.R.S., Tan D.C.G. Machinability study of carbon fiber reinforced composite. *Journal of Materials Processing Technology*. 1999. No. 89-90. P. 292–297.
182. Rao G. V., Mahajan P., Bhatnagar N. Machining of UD-GFRP composites chip formation mechanism. *Composites Science and Technology*. 2007. Vol. 67, № 11. P. 2271–2281.

183. Rohini Devi G., Rama Rao K. Carbon-Carbon Composites – An Overview. *Define Science Journal*, V.43, #4. 1993. P.369–383.
184. Ryu S.J., Kim J.W., Hwang J.C., Park C., Ho H.S., Lee K., Lee Y., Cornel U., Park F.C., Kim J. ECLIPSE: An Overactuated Parallel Mechanism for Rapid Machining. *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Vol. 8, USA, 1998, P. 681–689.
185. Salenko A.F., Shchetinin V.T., Gabuzyan G.V., Nikitin V.A., Novikov N.V., Klimenko S.A. Cutting of polycrystalline superhard materials by jet methods. *Journal of Superhard Materials*. September 2016, Volume 38, Issue 5. P. 351–362. DOI: 10.3103/S1063457616050063
186. Salenko A. F., Lashko E., Chencheva O., Shchetynin V., Klimenko S., Samusenko A., Potapov A., Gusarova I. Forming a defective surface layer when cutting parts made from carbon-carbon and carbon-polymeric composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv : PC «TECHNOLOGY CENTER», 2018. Vol. 4/1 (94). P. 61–72. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139556
187. Salenko A. F., Shchetinin V.T., Gabuzian G.V., Nikitin V.A., Klymenko S.A., Potapov A.M., Tanovic L. Functional Approach to Development of Hybrid Technology of Cutting Diamond Carbides. *Materials Science : materials Review*. Volume 2, Issue 1, 2018, Whioce Publishing Pte Ltd, Republic of Singapore, 2018. ISSN: 2529–7791 (Online). DOI: 10.18063/msmr.v2i1.349
188. Sartori Natal G., Chemori A., Pierrot F. Dual-space adaptive control of redundantly actuated parallel manipulators for extremely fast operations with load changes. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, Saint Paul, MN, USA, 2012. P. 253–258.
189. Schetynin V., Khorolska M., Salenko O. Increase of compactness of hydroabrasive jet and reliability of cutting process while using functional coatings on jet elements. *Gabrovo, Journal of the Technical University of Gabrovo*. 2013. Vol. 46. P. 36–43.

190. Shang W., Cong S., Li Z., Jiang S. Augmented nonlinear PD controller for a redundantly actuated parallel manipulator. *Advanced Robotics*. Vol. 23 (12-13). P. 1725–1742.
191. Sheikh-Ahmad J., Paulo Davim J. Cutting and Machining of polymer Composites. *Wiley Encyclopedia of Composites*. 2012. DOI: 10.1002/9781118097298.weoc061
192. Shin K., Yi B.-J., Kim, W. Parallel singularity-free design with actuation redundancy: A case study of three different types of 3-degree-of-freedom parallel mechanisms with redundant actuation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, 228(11), 2018–2035. <https://doi.org/10.1177/0954406213512246>.
193. Simaan N., Shoham M. Stiffness Synthesis of a Variable Geometry Six Degrees-of-Freedom Parallel Robot. *The International Journal of Robotics Research*. 2003. Vol. 22, No. 9. P. 757–775.
194. Simscape Multibody. Model and simulate multibody mechanical systems. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sm/index.html>
195. Singh I., Dvivedi A. Joining of natural fiber reinforced thermoplastic composites. *Biomass-Based Biocomposites*. Smithers Rapra Publisher. 2013. P.145–164.
196. Stewart D. A Platform with Six Degrees of Freedom. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering*. 1965. Vol. 180, part 1, No. 15. P. 371–386.
197. Sugimoto K. Computational scheme for dynamic analysis of parallel manipulators. *Trans. ASME. J. Mech., Trans., and Automat. Design*. 1989. N 1. P. 29–33.
198. Tahmasebi F., Tsai L.-W. On the Stiffness of a Novel Six-Degree-of-Freedom Parallel Manipulator. *J. Rob. Syst.* 1995. 12(12). P. 845–856.
199. Wang D., Arola D., Ramulu M. Orthogonal cutting mechanism of graphite/epoxy composite. Part II: multi-directional laminate. *International Journal of Machine tools and manufacture*. 1995. No 35. P. 1639–1648.

200. Wang D., Ramulu M., Arola D. Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part I: Unidirectional laminate. *Int. J. Of Machine tools & Manufacture*. 1995. Vol. 35. P. 1623–1638.
201. Wang H., Sun J. and et. Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*. Vol. 85. P.9–12.
202. Weck M., Staimer D. Parallel Kinematic Machine Tools-Current State and Future Potentials. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2002. Vol. 51(2). P. 671-683.
203. Wong¹ F. R., Sharif S., Kamdani K., Rahim E.A. The Effect of Drill Point Geometry and Drilling Technique on Tool Life when Drilling Titanium Alloy, Ti-6Al-4V. *Proceedings of International Conference on Mechanical & Manufacturing Engineering (ICME2008)*, 21–23 May 2008, Johor Bahru, Malaysia. © Faculty of Mechanical & Manufacturing Engineering, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia (UTHM), Malaysia. ISBN: 97–98 –2963–59–2.
204. Yoshikawa T. Analysis and design of Articulated robot arms from the viewpoint of dynamic manipulability. *III International Symposium on Robotics Research*, Gouvieux, France, Oct. 7–11,1985, pp. 273–279.
205. Yoshikawa T. Dynamic manipulability of articulated robot arms. *Proposals of 15th International Symposium on Industrial Robots*, Tokyo, 1985. P. 879–886.
206. Zhang T., Minami M., Yasukura O., Song, W. Reconfiguration Manipulability Analysis for Redundant Robots. *ASME J. Mech. Rob.*, 2013, 5(4), p. 1–16.
207. Zitoune R. Drilling of composite materials and aluminium stack. *Composite structure*, Vol.92, 2010. P.1246–1255.
208. Zlatanov D., Benhabib B., Fenton R. Analysis of the instantaneous kinematics and singular configurations of hybrid-chain manipulators. *Proceedings of the ASME 23rd Biennial Mechanisms Conference*. 1994. Vol. 72. P. 467–476.

209. Zlatanov D., Benhabib B., Fenton R. Identification and classification of the singular configurations of mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 33, pp. 743–760, 1998.

210. Zlatanov D., Fenton R., Benhabib B. Singularity analysis of mechanisms and robots via a motion-space model of the instantaneous kinematics. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. IEEE, 1994. P. 980–985.

ДОДАТКИ

Зворотна кінематична залежність

Радіус зовнішнього шарніру робочого органа

$$rB := 55 \quad i := 1..6$$

Координати кільцевих шарнірів робочого органа

$$zB := (-50 \ -70 \ -90 \ -160 \ -180 \ -200)^T$$

Координати центрів нерухомих шарнірів основи

$$MA := \begin{pmatrix} 450 & 0 & -450 & 450 & 0 & -450 \\ 500 & 500 & 500 & 500 & 500 & 500 \\ 300 & 500 & 300 & -300 & -500 & -300 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} xa_i \\ ya_i \\ za_i \end{pmatrix} := MA^{(i)}$$

Функція зворотної кінематики

$$\rho(x0, y0, z0, \psi, \varphi, \theta, s) := \left. \begin{array}{l} R \leftarrow \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ \sin(\psi) \cdot \sin(\theta) & \cos(\psi) & -\sin(\psi) \cdot \cos(\theta) \\ \cos(\psi) \cdot \sin(\theta) & \sin(\psi) & \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) \end{pmatrix} \\ \text{for } i \in 1..6 \\ \quad \begin{array}{l} ra_i \leftarrow \begin{pmatrix} xa_i \\ ya_i \\ za_i \end{pmatrix}, r0 \leftarrow \begin{pmatrix} x0 \\ y0 \\ z0 \end{pmatrix}, r_s \leftarrow R \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \\ rzB_i \leftarrow R \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ zB_i - s \cdot \begin{cases} 0 & \text{if } i \leq 3 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \end{pmatrix} \\ r0A_i \leftarrow ra_i - r0 \\ V1_i \leftarrow r_s \times r0A_i \\ V2_i \leftarrow V1_i \times r_s \\ r0B_i \leftarrow \frac{V2_i}{|V2_i|} \cdot rB \\ AB_i \leftarrow r0A_i - rzB_i - r0B_i \\ \rho_i \leftarrow |AB_i| \end{array} \end{array} \right\}$$

Результат розрахунку у середньому положенні

$$\rho(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) = \begin{pmatrix} 709.951 \\ 723.136 \\ 730.5 \\ 633.348 \\ 548.11 \\ 625.724 \end{pmatrix}$$

Пряма кінематична залежність

Початкові координати робочого органа

$$\underline{x0} := 0 \quad \underline{y0} := 0 \quad \underline{z0} := -100$$

Зворотна кінематична функція

$$\underline{G}(M) := \left(\begin{array}{l} (x0 \ y0 \ z0 \ \psi \ \theta \ s) \leftarrow M^T, \varphi \leftarrow 0 \\ R \leftarrow \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ \sin(\psi) \cdot \sin(\theta) & \cos(\psi) & -\sin(\psi) \cdot \cos(\theta) \\ \cos(\psi) \cdot \sin(\theta) & \sin(\psi) & \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) \end{pmatrix} \\ \text{for } i \in 1..6 \\ \left. \begin{array}{l} \underline{ra}_i \leftarrow \begin{pmatrix} \underline{xa}_i \\ \underline{ya}_i \\ \underline{za}_i \end{pmatrix}, \underline{r0} \leftarrow \begin{pmatrix} x0 \\ y0 \\ z0 \end{pmatrix}, \underline{r_s} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -100 \end{pmatrix} \\ \underline{rzB}_i \leftarrow R \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ zB_i - s \cdot \begin{cases} 0 & \text{if } i \leq 3 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \end{pmatrix} \\ \underline{r0A}_i \leftarrow \underline{ra}_i - \underline{r0} \\ \underline{V1}_i \leftarrow \underline{r_s} \times \underline{r0A}_i \\ \underline{V2}_i \leftarrow \underline{V1}_i \times \underline{r_s} \\ \underline{r0B}_i \leftarrow \frac{\underline{V2}_i}{|\underline{V2}_i|} \cdot \underline{rB} \\ \underline{AB}_i \leftarrow \underline{r0A}_i - \underline{rzB}_i - \underline{r0B}_i \\ \rho_i \leftarrow |\underline{AB}_i| \end{array} \right. \\ \rho \end{array} \right.$$

Вектор взагальнених координат

$$M := (x0 \ y0 \ z0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$$

Результати розрахунку зворотної кінематики у початковому положенні

$$M0 := G(M) = \begin{pmatrix} 764.2186 \\ 804.3165 \\ 788.4352 \\ 618.975 \\ 496.4121 \\ 617.6812 \end{pmatrix}$$

Функція якобіана

$$\text{Jac}(M) := \begin{array}{l} \text{IK} \leftarrow G(M) \\ \text{for } i \in 1..6 \\ \quad \left| \begin{array}{l} M_i \leftarrow M_i + 0.001 \\ \text{Jac}^{(i)} \leftarrow (G(M) - \text{IK}) \cdot 1000 \\ M_i \leftarrow M_i - 0.001 \end{array} \right. \\ \text{Jac} \end{array}$$

Функція прямої кінематики

$$X'(\Theta) := \begin{array}{l} X \leftarrow (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T, k \leftarrow 0 \\ \text{while } |\Theta - G(X)| > 10^{-5} \\ \quad \left| \begin{array}{l} X \leftarrow X + \text{Jac}(X)^{-1} \cdot (\Theta - G(X)) \\ k \leftarrow k + 1 \end{array} \right. \\ X \end{array}$$

Результат тестового розрахунку при збільшенні довжини першої штанги на 5мм

$$X' \begin{bmatrix} M0 + \\ \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -4.385 \\ -17.832 \\ -93.043 \\ 0.1 \\ -0.036 \\ 6.554 \end{pmatrix}$$

Ітерації і похибка обчислення

$$X_1 := (0 \ 0 \ -100 \ 0 \ 0 \ 0)^T, \quad k := 1..10 \quad \Theta := M0 + \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$X_{k+1} := X_k + \text{Jac}(X_k)^{-1} \cdot (\Theta - G(X_k))$$

$$X_1^T = (0 \ 0 \ -100 \ 0 \ 0 \ 0) \quad |\Theta - G(X_1)| = 7.071$$

$$X_2^T = (-2.4 \ -18.848 \ -91.4 \ 0.084 \ -9.312 \times 10^{-4} \ 16.039) \quad |\Theta - G(X_2)| = 1.549$$

$$X_3^T = (-2.504 \ -17.888 \ -91.49 \ 0.073 \ -1.943 \times 10^{-5} \ 16.509) \quad |\Theta - G(X_3)| = 0.017$$

$$X_4^T = (-2.5 \ -17.893 \ -91.494 \ 0.073 \ -2.536 \times 10^{-6} \ 16.519) \quad |\Theta - G(X_4)| = 4.866 \times 10^{-7}$$

$$X_5^T = (-2.5 \ -17.893 \ -91.494 \ 0.073 \ -2.537 \times 10^{-6} \ 16.519) \quad |\Theta - G(X_5)| = 1.137 \times 10^{-13}$$

$$X_6^T = (-2.5 \ -17.893 \ -91.494 \ 0.073 \ -2.537 \times 10^{-6} \ 16.519) \quad |\Theta - G(X_5)| = 1.137 \times 10^{-13}$$

$$X_6^T = (-2.5 \ -17.893 \ -91.494 \ 0.073 \ -2.537 \times 10^{-6} \ 16.519) \quad |\Theta - G(X_6)| = 0$$

$$X_7^T = (-2.5 \ -17.893 \ -91.494 \ 0.073 \ -2.537 \times 10^{-6} \ 16.519) \quad |\Theta - G(X_7)| = 0$$

$$X_8^T = (-2.5 \ -17.893 \ -91.494 \ 0.073 \ -2.537 \times 10^{-6} \ 16.519) \quad |\Theta - G(X_8)| = 0$$

$$X_9^T = (-2.5 \ -17.893 \ -91.494 \ 0.073 \ -2.537 \times 10^{-6} \ 16.519) \quad |\Theta - G(X_9)| = 0$$

$$X_{10}^T = (-2.5 \ -17.893 \ -91.494 \ 0.073 \ -2.537 \times 10^{-6} \ 16.519) \quad |\Theta - G(X_{10})| = 0$$

$$X_{11}^T = (-2.5 \ -17.893 \ -91.494 \ 0.073 \ -2.537 \times 10^{-6} \ 16.519) \quad |\Theta - G(X_{11})| = 0$$

Розрахунок матриці просторової жорсткості

Коефіцієнти жорсткості ланок

$$k_{\Pi} := 1 \cdot 10^6 \quad k_k := 10^4$$

Функція для обчислення матриці жорсткості 6x6

$$\begin{aligned} \underline{K}(M) := & \left(x_0 \ y_0 \ z_0 \ \psi \ \theta \ s \right) \leftarrow M^T, \varphi \leftarrow 0 \\ & R \leftarrow \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ \sin(\psi) \cdot \sin(\theta) & \cos(\psi) & -\sin(\psi) \cdot \cos(\theta) \\ \cos(\psi) \cdot \sin(\theta) & \sin(\psi) & \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) \end{pmatrix} \\ & \text{for } i \in 1..6 \\ & \left| \begin{array}{l} \mathbf{ra}_i \leftarrow \begin{pmatrix} x_{a_i} \\ y_{a_i} \\ z_{a_i} \end{pmatrix}, \mathbf{r0} \leftarrow \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}, \mathbf{r_s} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{rzB}_i \leftarrow R \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ z_{B_i} - s \cdot \begin{cases} 0 & \text{if } i \leq 3 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \end{pmatrix} \\ \mathbf{r0A}_i \leftarrow \mathbf{ra}_i - \mathbf{r0} \\ \mathbf{V1}_i \leftarrow \mathbf{r_s} \times \mathbf{r0A}_i \\ \mathbf{V2}_i \leftarrow \mathbf{V1}_i \times \mathbf{r_s} \\ \mathbf{r0B}_i \leftarrow \frac{\mathbf{V2}_i}{|\mathbf{V2}_i|} \cdot \mathbf{rB} \\ \mathbf{AB}_i \leftarrow \mathbf{r0A}_i - \mathbf{rzB}_i - \mathbf{r0B}_i \\ \mathbf{n}_i \leftarrow \frac{\mathbf{AB}_i}{|\mathbf{AB}_i|} \\ \mathbf{np}_i \leftarrow \text{stack}(\mathbf{n}_i, \mathbf{ra}_i \times \mathbf{n}_i) \\ \mathbf{nk}_i \leftarrow \text{stack} \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{ra}_i \times \mathbf{n}_i \right] \end{array} \right. \\ & k_k \cdot \mathbf{nk}_1 \cdot \mathbf{nk}_1^T + \sum_{i=1}^6 \left(k_{\Pi} \cdot \mathbf{np}_i \cdot \mathbf{np}_i^T \right) \end{aligned}$$

Вектор узагальнених координат робочого органа

$$X1 := (10 \ 20 \ -100 \ 0 \ 0 \ 0)^T$$

Матриця жорсткості 6x6

$$\underline{K1} := K(X1) = \begin{pmatrix} 1.516 & -0.012 & -0.059 & -39.932 & -383.492 & -30.434 \\ -0.012 & 2.8 & 0.702 & 721.506 & 31.733 & 28.251 \\ -0.059 & 0.702 & 1.684 & 184.942 & 11.899 & 8.198 \\ -39.932 & 721.506 & 184.942 & 1.882 \times 10^5 & 1.742 \times 10^4 & 8.008 \times 10^3 \\ -383.492 & 31.733 & 11.899 & 1.742 \times 10^4 & 9.932 \times 10^4 & 7.993 \times 10^3 \\ -30.434 & 28.251 & 8.198 & 8.008 \times 10^3 & 7.993 \times 10^3 & 891.43 \end{pmatrix} 10^6$$

Визначний матриці жорсткості

$$|K1| = 3.427 \times 10^{42}$$

Власні значення матриці жорсткості

$$\text{eigenvals}(K1) = \begin{pmatrix} 1.919 \times 10^{11} \\ 9.645 \times 10^{10} \\ 1.248 \times 10^7 \\ 392.068 \\ 2.598 \times 10^4 \\ 1.456 \times 10^6 \end{pmatrix}$$

Розрахунок середньої жорсткості у робочій зоні

$$\underline{i} := 1..21 \quad \underline{j} := 1..21 \quad \underline{m} := 1..21$$

$$\text{KK} := \left(\begin{array}{l} \text{for } i \in 1..21 \\ \quad \text{for } j \in 1..21 \\ \quad \quad \text{for } m \in 1..21 \\ \quad \quad \quad \text{KM} \leftarrow \text{K} \left[\begin{array}{cccccc} 10 \cdot (i - 11) & 10 \cdot (j - 11) & 10 \cdot (m - 21) & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]^T \\ \quad \quad \quad \text{KXM}_m \leftarrow \text{KM}_{1,1} \\ \quad \quad \quad \text{KYM}_m \leftarrow \text{KM}_{2,2} \\ \quad \quad \quad \text{KZM}_m \leftarrow \text{KM}_{3,3} \\ \quad \quad \text{KX}_{i,j} \leftarrow \text{KXM} \\ \quad \quad \text{KY}_{i,j} \leftarrow \text{KYM} \\ \quad \quad \text{KZ}_{i,j} \leftarrow \text{KZM} \\ \quad \left(\begin{array}{c} \text{KX} \\ \text{KY} \\ \text{KZ} \end{array} \right) \end{array} \right)$$

$$\text{KXM} := \frac{\sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{21} \sum_{m=1}^{21} [(\text{KK}_1)_{i,j}]_m}{21^3 \cdot k_{\Pi}} = 1.471$$

$$\text{KYM} := \frac{\sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{21} \sum_{m=1}^{21} [(\text{KK}_2)_{i,j}]_m}{21^3 \cdot k_{\Pi}} = 2.883$$

$$\text{KZM} := \frac{\sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{21} \sum_{m=1}^{21} [(\text{KK}_3)_{i,j}]_m}{21^3 \cdot k_{\Pi}} = 1.646$$

$$\text{KM} := \frac{\sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{21} \sum_{m=1}^{21} \left[[(\text{KK}_1)_{i,j}]_m + [(\text{KK}_2)_{i,j}]_m + [(\text{KK}_3)_{i,j}]_m \right]}{3 \cdot 21^3 \cdot k_{\Pi}} = 2.000$$

$$\left| \text{K} \left[\begin{array}{cccccc} 0 & 0 & -100 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]^T \right| = 7.562 \times 10^{15}$$

Методика економічних розрахунків

У загальному випадку, витрати при виробництві визначатимуться за формулою:

$$C = N_{cm} + E_m + A_m + Z_o + Z_d, \quad (5.30)$$

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:

$$N_{cm} = \sum_{i=1}^n N_{\epsilon} \times C_m \times K_{mp} - Q_{\epsilon} \times C_{\epsilon}, \quad (5.31)$$

де n – кількість матеріалів, що використовується;

N_{ϵ} – норма витрат матеріалів;

C_m – ціна матеріалу;

K_{mp} – коефіцієнт, який враховує транспортно-заготівельні витрати,

Q_{ϵ} – кількість відходів матеріалу, яка реалізовується;

C_{ϵ} – ціна реалізації відходів матеріалу.

Змінні витрати визначаються так

$$C_{zm} = M_{\epsilon} + Z_o + Z_{vid} + E_l + A_m + Z_{rem}, \quad (5.32)$$

де M_{ϵ} – затрати на матеріали;

Z_o – заробітна плата основна;

Z_d – заробітна плата додаткова;

E_l – витрати на електроенергію;

A_m – сума амортизаційних відрахувань;

$Z_{від}$ – відрахування до соціальних фондів;

$Z_{рем}$ – затрати на ремонт обладнання.

Оскільки виготовлені фланці ремонту не підлягають, то значення $Z_{рем}$ не враховуємо.

Основна заробітна плата становитиме:

$$Z_o = \sum t_{n(i)} \times Z_{год}, \quad (5.33)$$

де $t_{n(i)}$ – норма часу на виконання i -ої операції;

$Z_{год}$ – тарифна ставка робочих на i -ій операції.

Додаткова заробітна плата може бути визначена так:

$$Z_d = K_d \times Z_o, \quad (5.34)$$

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:

$$Z_{відр} = \frac{K_c}{100} \times (Z_o + Z_d), \quad (5.35)$$

де K_c – відсоток відрахувань у соціальні фонди, $K_c = 22\%$;

Розрахунок вартості технологічної електроенергії виконували за рівнянням

$$E_m = \frac{N_{\epsilon} \times K_d \times K_N \times K_W \times t_M}{h} \times C_e, \quad (5.36)$$

де N_{ϵ} – 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;

h – ККД установки, $h = 0,85$;

C_e – вартість одного кВт·год електроенергії, $C_e = 1,68$ грн/кВт·год.

Амортизаційні відрахування становитимуть:

$$A_M = \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_{\text{бал}(i)} \times t_{n(i)} \times n}{F_\partial \times h_3 \times 100}, \quad (5.37)$$

де $\Phi_{\text{бал}(i)}$ – балансова вартість обладнання i -ої операції;

$t_{n(i)}$ – норма часу на i -ту операцію;

n – норма амортизації;

F_∂ – дійсний фонд робочого часу;

h_3 – коефіцієнт завантаження, $h_3 = 0,9$.

Акт впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Прокопчук О.К.



А К Т

впровадження результатів наукових досліджень
асп. АЛЬ-ІБРАХІМІ МЕТАК М. А.
із розробки

Комісія у складі представників підприємства ТОВ «Таксі «Комфорт» Прокопчук Олександр Костянтинович, та представника Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький) аспіранта Метак Аль-Ібрахімі М.А. склали дійсний акт про передачу результатів наукових досліджень для впровадження на підприємство ТОВ «Таксі «Комфорт» рекомендацій та нових технічних рішень із обробки неметалевих композитів, армованих вуглецевими волокнами.

Автором наукових досліджень, аспірантом Метак Аль-Ібрахімі М.А., запропоновано оригінальну методику розрахунку режимів різання матеріалів абразивними кругами (DistarDecorSlim 1A1R 125x1,2x8x22,23), яка базується на забезпеченні раціональних умов взаємодії круга із оброблюваним матеріалом шляхом обмеження температури в зоні різання за рахунок лінійної подачі круга.

Так, при обробці карбоновмісних композиційних матеріалів за рахунок встановлення раціональної швидкості робочої подачі (яка для випадку виробництва становила 12,0-14,0 мм/с вдалося знизити локальні пошкодження поверхневого шару виробу до величини 0,15...0,5 мм, а також забезпечити стабільну роботу круга до 80 хв (у той час як без зазначених рекомендації круги потребували заміни після 25-30 хв експлуатації).

Застосування технології миття кругів водяними розчинами дозволило знизити річне споживання інструменту в 35 до 19 шт.

Використання нового технічного рішення – пристрою для забезпечення стабільної робочої подачі механізмом із використання паралельних кінематичних структур із надлишковими приводами дало змогу поліпшити умови праці, знизити обсяг виправного браку та стабілізувати технологічний процес розкроювання матеріалу.

Очікується, що економічний ефект від впровадження рекомендацій становитиме 52 тис. грн.

Окупність капітальних вкладень в обсязі 127 тис.грн. від впровадження пропонованого маніпуляційного пристрою із паралельними кінематичними ланцюгами становитиме 2,1 рік, що в цілому підтверджує високу ефективність розробок автора

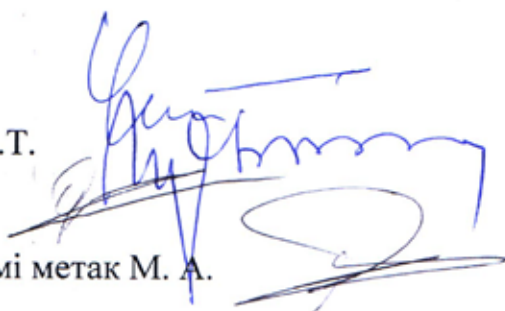
Підписи:

Чесак Р.О.

Щетинін В.Т.

Орел В.М.

Аль-ібрахімі метак М. А.



Акт впровадження у навчальний процес

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Проректор
 з наукової роботи ЦНТУ
 О. М. Левченко
 «4» 09 2018 р.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Перший
 проректор ЦНТУ
 В. М. Кропивний
 «09» 09 2018 р.

АКТ

про використання у навчальному процесі результатів дисертаційної роботи

Аль-Ібрахімі Метак М. А.

на тему: «Забезпечення раціональних умов абразивного різання композиційних карбонових виробів на верстатах паралельної структури»

Акт складений у тому, що результати, отримані в дисертаційній роботі Аль-Ібрахімі Метак М. А., використовуються в навчальному процесі на підставі рішення кафедри металорізальних верстатів та систем (протокол №1 від 28 серпня 2018 року).

Результати дисертаційної роботи використовуються при викладанні дисципліни «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» (освітній рівень «магістр») та дисципліни «Теорія різання» (освітній рівень «бакалавр») для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка» та 133 «Галузеве машинобудування».

Начальник
 навчального відділу



Л. І. Кондратець

Завідувач кафедри
 «Металорізальні верстати
 та системи»



А. І. Гречка



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **112828** (13) **U**
 (51) МПК (2016.01)
B23Q 5/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

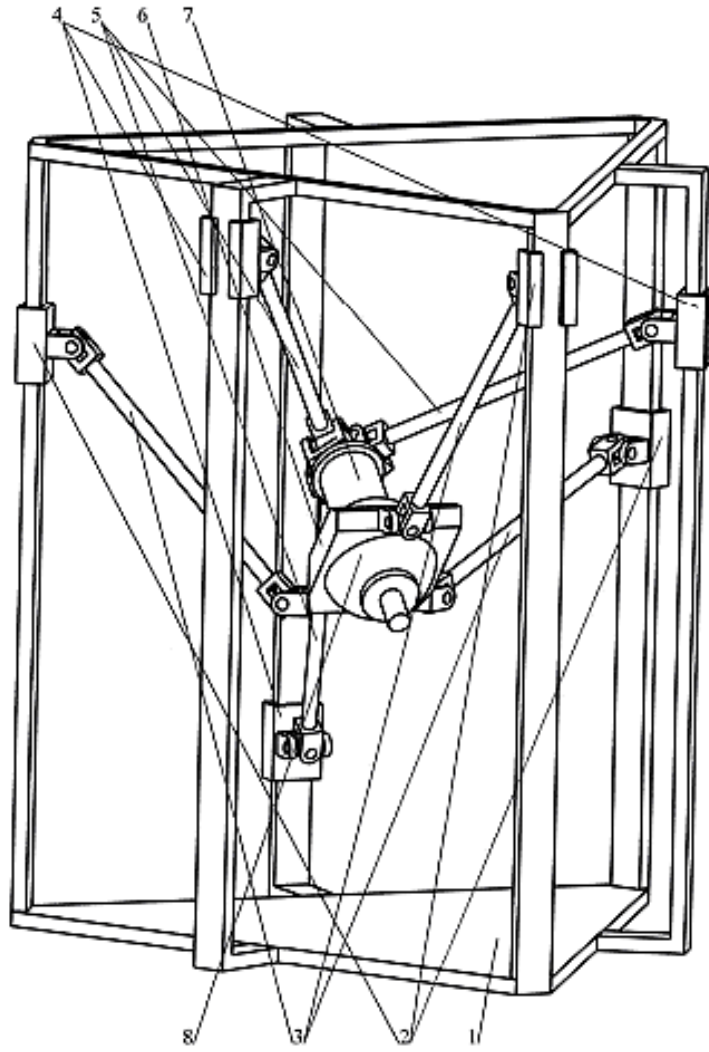
(21) Номер заявки: u 2016 07855	(72) Винахідник(и): Гречка Андрій Іванович (UA), Кириченко Андрій Миколайович (UA), Аль-Ібрахімі Метак М.А. (UA)
(22) Дата подання заявки: 15.07.2016	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 26.12.2016	(73) Власник(и): КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, 25030 (UA)
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 26.12.2016, Бюл.№ 24	

(54) ПРИВІД ПЕРЕМІЩЕННЯ ВИХІДНОГО ОРГАНА ВЕРСТАТА З ШІСТЬМА ШТАНГАМИ

(57) Реферат:

Привід переміщення вихідного органа верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур містить станину, механізми подачі шести штанг, які пов'язані з вихідним органом. Вихідний орган складається з двох частин, поєднаних між собою шарніром з трьома степенями вільності. При цьому три штанги приєднуються до однієї частини вихідного органа і мають конструкцію, що забезпечує переміщення цієї частини вихідного органа по трьох лінійних координатах без зміни куткової орієнтації відносно станини, а інші три штанги приєднуються до іншої частини вихідного органа.

UA 112828 U



Привід переміщення вихідного органа верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур належить до верстатобудування.

Відомий привід переміщення вихідного органа верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур, який забезпечує рух даного органа по трьох лінійних і трьох кутових координатах [1].

У відомому приводі переміщення рух по будь-якій з координат вимагає руху подачі кожної штанги, що зменшує рухомість вихідного органа.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищити рухомість вихідного органа верстата на основі паралельних кінематичних структур з шістьма штангами шляхом розділення штанг на функціональні групи.

Поставлена задача вирішується тим, що у пропонованому рішенні вихідний орган складається з двох частин, поєднаних між собою шарніром з трьома степенями вільності, причому три штанги приєднується до однієї частини вихідного органа і мають конструкцію, що забезпечує переміщення цієї частини вихідного органа по трьох лінійних координатах без зміни куткової орієнтації відносно станини, а інші три штанги приєднуються до іншої частини вихідного органа.

Схема приводу переміщення вихідного органа верстата на основі паралельних кінематичних структур наведена на кресленні.

На станині 1 розміщено три приводи подач 2 штанг 3 та три приводи подач 4 штанг 5. Всі штанги пов'язані шарнірно з вихідним органом, що складається з двох частин 6 і 7, поєднаних між собою шарніром 8 з трьома степенями вільності, причому штанги 3 пов'язані з однією частиною 6 вихідного органа, а штанги 5 - з іншою частиною 7 вихідного органа. Конструкція штанг 3 та їхніх шарнірів така, що забезпечує переміщення частини 6 вихідного органа по трьох лінійних координатах без зміни куткової орієнтації відносно станини.

Переміщення штанг 5 визначатиме взаємне кутове положення частин 6 і 7 вихідного органа. Наявність шарніра 8 дозволяє здійснювати необхідний поворот частини 7 вихідного органа без зміни просторового положення його частини 6. Таким чином досягається функціональне розділення штанг на групи: штанги 3 визначають положення вихідного органа по лінійних координатах, а штанги 5 - по кутових координатах.

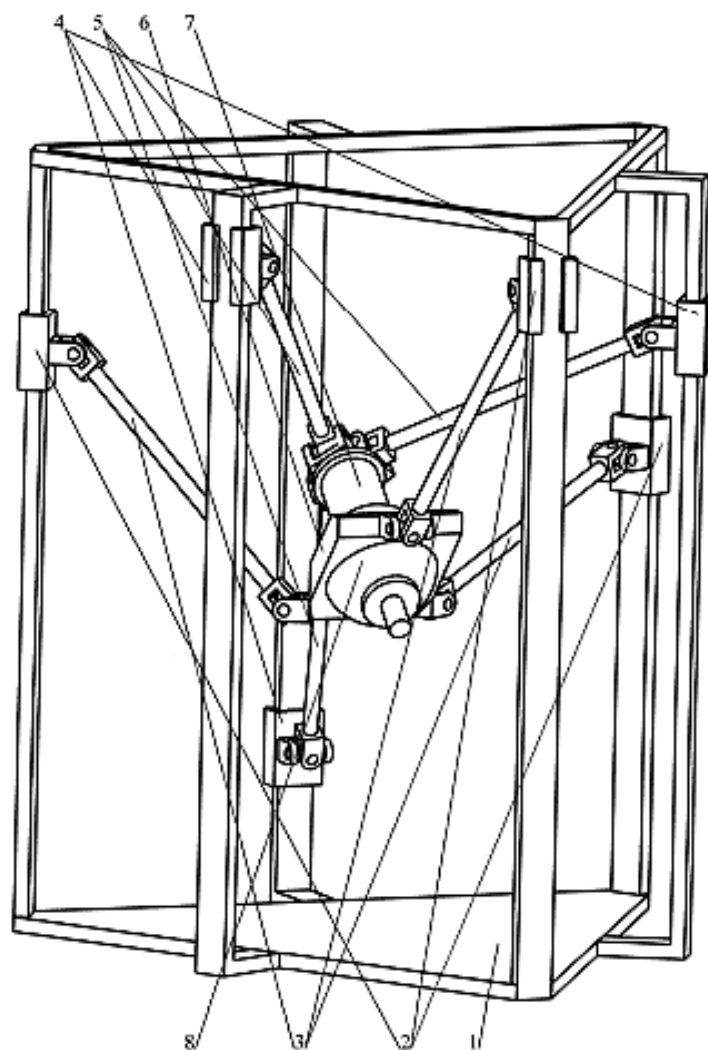
Економічна ефективність пропонованого рішення забезпечується за рахунок підвищення рухомості вихідного органа, зменшення габаритів верстата та внаслідок функціонального розділення штанг на групи спрощує систему керування приводами подачі штанг.

Джерело інформації:

1. Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. / Під. ред. Ю.М. Кузнєцова. - Кіровоград. - 2004. - 449 с.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Привід переміщення вихідного органа верстата з шістьма штангами на основі паралельних кінематичних структур, що містить станину, механізми подачі шести штанг, які пов'язані з вихідним органом, який **відрізняється** тим, що вихідний орган складається з двох частин, поєднаних між собою шарніром з трьома степенями вільності, причому три штанги приєднується до однієї частини вихідного органа і мають конструкцію, що забезпечує переміщення цієї частини вихідного органа по трьох лінійних координатах без зміни куткової орієнтації відносно станини, а інші три штанги приєднуються до іншої частини вихідного органа.



Комп'ютерна верстка О. Гергіє

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **114304** (13) **U**
(51) МПК (2017.01)
B23Q 5/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

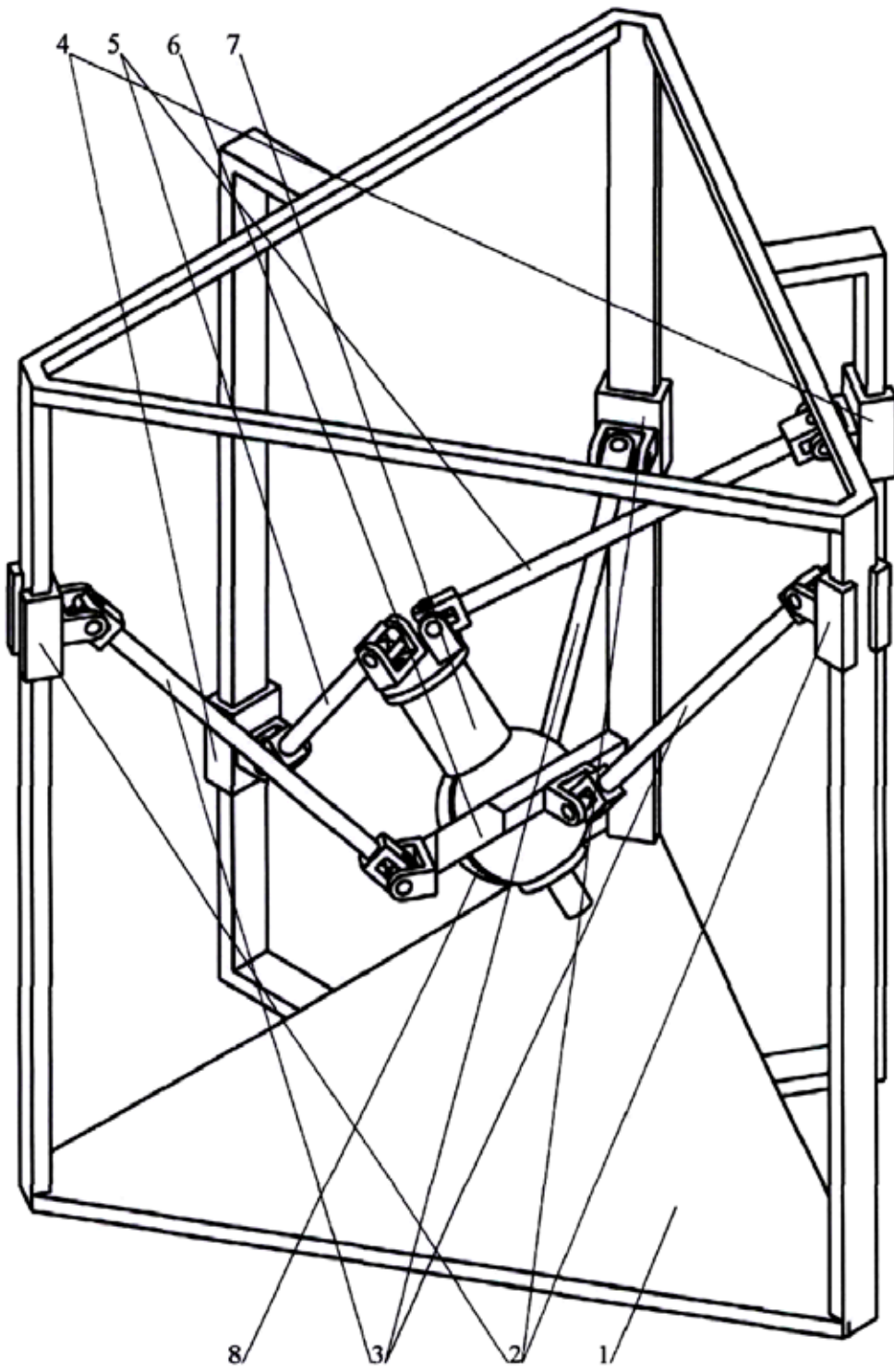
<p>(21) Номер заявки: u 2016 07831</p> <p>(22) Дата подання заявки: 15.07.2016</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.03.2017</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.03.2017, Бюл.№ 5</p>	<p>(72) Винахідник(и): Гречка Андрій Іванович (UA), Кириченко Андрій Миколайович (UA), Аль-Ібрахімі Метак М.А. (UA)</p> <p>(73) Власник(и): КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, 25030 (UA)</p>
---	--

(54) ПРИВОД ПЕРЕМІЩЕННЯ ВИХІДНОГО ОРГАНА ВЕРСТАТА З П'ЯТЬМА ШТАНГАМИ

(57) Реферат:

Привод переміщення вихідного органа верстата з п'ятьма штангами на основі паралельних кінематичних структур містить станину, механізми подачі п'яти штанг, які пов'язані з вихідним органом. Вихідний орган складається з двох частин, поєднаних між собою шарніром з двома ступенями свободи. При цьому три штанги приєднуються до однієї частини вихідного органа і мають конструкцію, що забезпечує переміщення цієї частини вихідного органа по трьох лінійних координатах без зміни кутової орієнтації відносно станини, а інші дві штанги приєднуються до іншої частини вихідного органа.

UA 114304 U



Корисна модель належить до верстатобудування.

Відомий привод переміщення вихідного органа верстата з п'ятьма штангами на основі паралельних кінематичних структур, який забезпечує рух даного органа по трьох лінійних і двох кутових координатах [1].

5 У відомому приводі переміщення рух по будь-якій з координат вимагає руху подачі кожної штанги, що зменшує рухомість вихідного органа.

Задачею корисної моделі є підвищення рухомості вихідного органа верстата на основі паралельних кінематичних структур з п'ятьма штангами шляхом розділення штанг на функціональні групи.

10 Поставлена задача вирішується тим, привод переміщення вихідного органа верстата з п'ятьма штангами на основі паралельних кінематичних структур, що містить станину, механізми подачі п'яти штанг, які пов'язані з вихідним органом, згідно з корисною моделлю, вихідний орган складається з двох частин, поєднаних між собою шарніром з двома ступенями свободи, причому три штанги приєднуються до однієї частини вихідного органа і мають конструкцію, що
15 забезпечує переміщення цієї частини вихідного органа по трьох лінійних координатах без зміни кутової орієнтації відносно станини, а інші дві штанги приєднуються до іншої частини вихідного органа.

Схема приводу переміщення вихідного органа верстата на основі паралельних кінематичних структур наведена на кресленні.

20 На станині 1 розміщено три приводи подач 2 штанг 3 та два приводи подач 4 штанг 5. Всі штанги пов'язані шарнірно з вихідним органом, що складається з двох частин 6 і 7, поєднаних між собою шарніром 8 з двома ступенями свободи, причому штанги 3 пов'язані з однією частиною 6 вихідного органа, а штанги 5 - з іншою частиною 7 вихідного органа. Конструкція штанг 3 та їхніх шарнірів така, що забезпечує переміщення частини 6 вихідного органа по трьох
25 лінійних координатах без зміни кутової орієнтації відносно станини.

Переміщення штанг 5 визначатиме взаємне кутове положення частин 6 і 7 вихідного органа. Наявність шарніра 8 дозволяє здійснювати необхідний поворот частини 7 вихідного органа без зміни просторового положення його частини 6. Таким чином досягається функціональне розділення штанг на групи: штанги 3 визначають положення вихідного органа по лінійних
30 координатах, а штанги 5 - по кутових координатах.

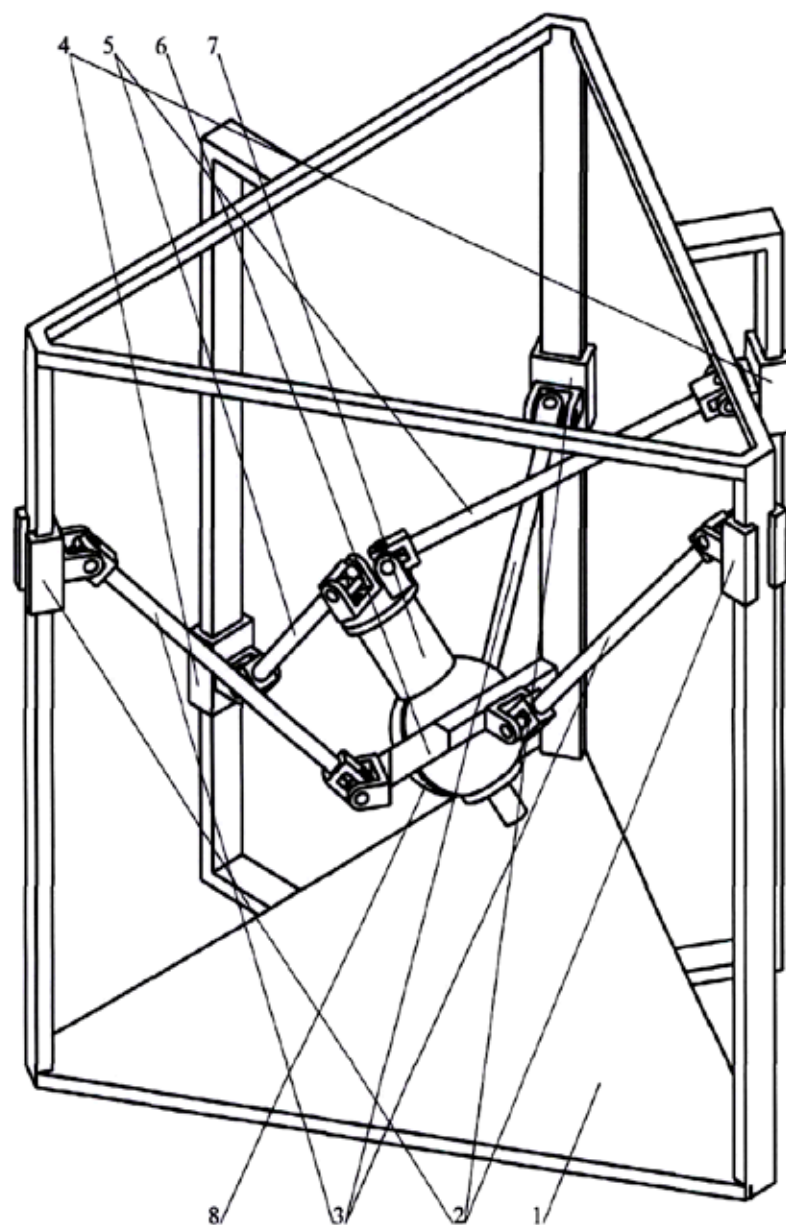
Економічна ефективність пропонованого рішення забезпечується за рахунок підвищення рухомості вихідного органа, зменшення габаритів верстата та внаслідок функціонального розділення штанг на групи спрощує систему керування приводами подачі штанг.

35 Джерела інформації:

1. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. /Під. ред. Ю.М. Кузнецова. - Кіровоград, 2004. - 449 с.

40 **ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ**

Привод переміщення вихідного органа верстата з п'ятьма штангами на основі паралельних кінематичних структур, що містить станину, механізми подачі п'яти штанг, які пов'язані з вихідним органом, який **відрізняється** тим, що вихідний орган складається з двох частин,
45 поєднаних між собою шарніром з двома ступенями свободи, причому три штанги приєднуються до однієї частини вихідного органа і мають конструкцію, що забезпечує переміщення цієї частини вихідного органа по трьох лінійних координатах без зміни кутової орієнтації відносно станини, а інші дві штанги приєднуються до іншої частини вихідного органа.



Комп'ютерна верстка М. Мацело

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **114306** (13) **U**
(51) МПК
B23G 5/02 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

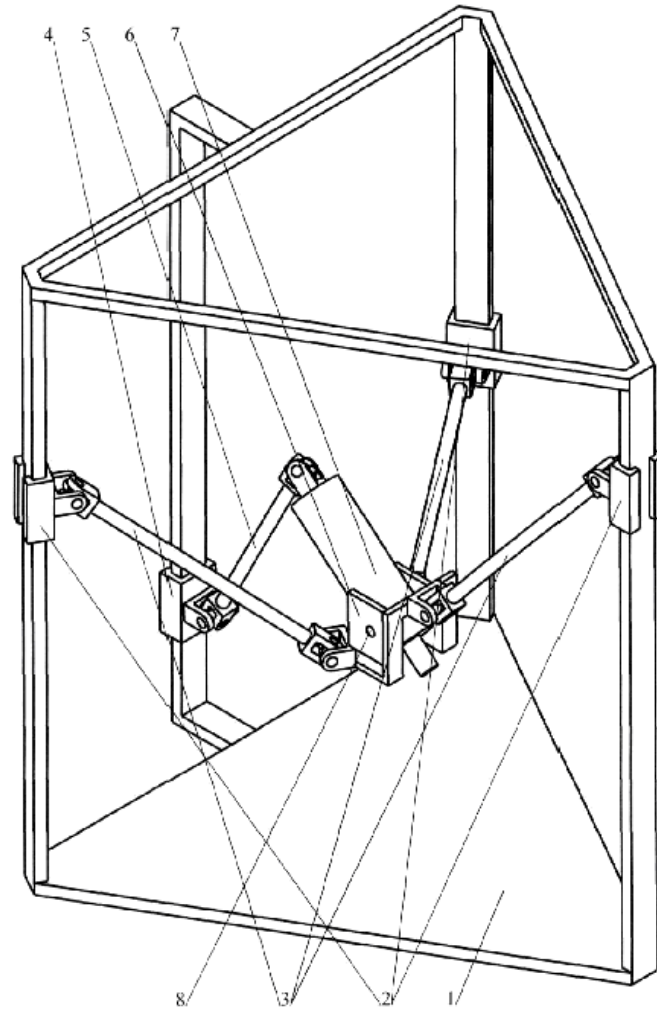
<p>(21) Номер заявки: u 2016 07833</p> <p>(22) Дата подання заявки: 15.07.2016</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 10.03.2017</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.03.2017, Бюл.№ 5</p>	<p>(72) Винахідник(и): Гречка Андрій Іванович (UA), Кириченко Андрій Миколайович (UA), Аль-Ібрахімі Метак М.А. (UA)</p> <p>(73) Власник(и): КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, 25030 (UA)</p>
---	--

(54) ПРИВОД ПЕРЕМІЩЕННЯ ВИХІДНОГО ОРГАНА ВЕРСТАТА З ЧОТИРМА ШТАНГАМИ

(57) Реферат:

Привод переміщення вихідного органа верстата з чотирма штангами на основі паралельних кінематичних структур, що містить станину, механізми подачі чотирьох штанг, які пов'язані з вихідним органом. Вихідний орган складається з двох частин, поєднаних між собою шарніром з одним ступенем свободи. Три штанги приєднують до однієї частини вихідного органа і мають конструкцію, що забезпечує переміщення цієї частини вихідного органа по трьох лінійних координатах без зміни кутової орієнтації відносно станини, а інша одна штанга приєднана до іншої частини вихідного органа.

UA 114306 U



Корисна модель належить до верстатобудування.

Відомим аналогом є привод переміщення вихідного органа верстата з чотирма штангами на основі паралельних кінематичних структур, який забезпечує рух даного органа по трьох лінійних і одній кутовій координатах [1].

5 Недоліком аналога є: рух по будь-якій з координат вимагає руху подачі кожної штанги, що зменшує рухомість вихідного органа.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення рухомості вихідного органа верстата на основі паралельних кінематичних структур з чотирма штангами шляхом розділення штанг на функціональні групи.

10 Поставлена задача вирішується тим, що привод переміщення вихідного органа складається з двох частин, поєднаних між собою шарніром з одним ступенем свободи, причому три штанги приєднуються до однієї частини вихідного органа і мають конструкцію, що забезпечує переміщення цієї частини вихідного органа по трьох лінійних координатах без зміни кутової орієнтації відносно станини, а інша одна штанга приєднана до іншої частини вихідного органа.

15 Корисна модель пояснюється кресленням, де зображений привод переміщення вихідного органа верстата на основі паралельних кінематичних структур.

На станині 1 розміщено три приводи подачі 2 штанг 3 та один привод подачі 4 штанги 5. Всі штанги пов'язані шарнірно з вихідним органом, що складається з двох частин 6 і 7, поєднаних між собою шарніром 8 з одним ступенем свободи, причому штанги 3 пов'язані з однією частиною 6 вихідного органа, а штанга 5 - з іншою частиною 7 вихідного органа. Конструкція 20 штанг 3 та їхніх шарнірів така, що забезпечує переміщення частини 6 вихідного органа по трьох лінійних координатах без зміни кутової орієнтації відносно станини.

Переміщення штанги 5 визначатиме взаємне кутове положення частин 6 і 7 вихідного органа. Наявність шарніра 8 дозволяє здійснювати необхідний поворот частини 7 вихідного 25 органа без зміни просторового положення його частини 6. Таким чином досягається функціональне розділення штанг на групи: штанги 3 визначають положення вихідного органа по лінійних координатах, а штанга 5 - по кутовій координаті.

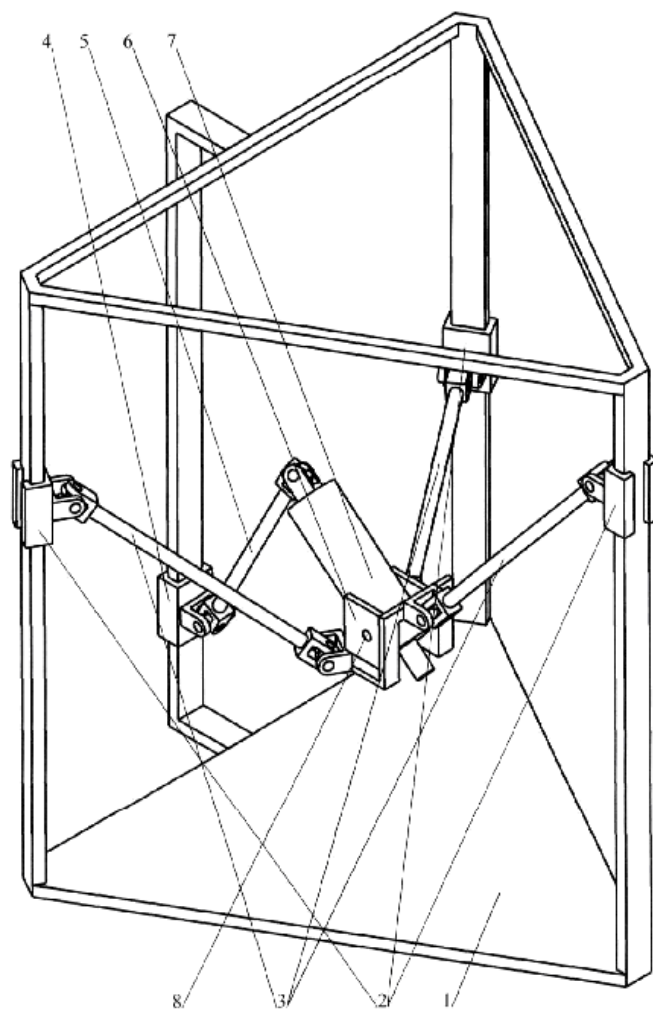
Економічна ефективність корисної моделі забезпечується за рахунок підвищення рухомості вихідного органа, зменшення габаритів верстата та внаслідок функціонального розділення 30 штанг на групи спрощує систему керування приводами подачі штанг.

Джерело інформації:

1. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. /Під. ред. Ю.М. Кузнецова - Кіровоград, 2004. - 449 с.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

40 Привод переміщення вихідного органа верстата з чотирма штангами на основі паралельних кінематичних структур, що містить станину, механізми подачі чотирьох штанг, які пов'язані з вихідним органом, який **відрізняється** тим, що вихідний орган складається з двох частин, поєднаних між собою шарніром з одним ступенем свободи, причому три штанги приєднують до однієї частини вихідного органа і мають конструкцію, що забезпечує переміщення цієї частини вихідного органа по трьох лінійних координатах без зміни кутової орієнтації відносно станини, а 45 інша одна штанга приєднана до іншої частини вихідного органа.



Комп'ютерна верстка О. Гергіль

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601