

Національний університет “Львівська політехніка”

Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

**Гурей Володимир Ігорович**

УДК 620.3:621.787:620.178

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА  
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАШИН  
ФОРМУВАННЯМ ЗМІЦНЕНИХ НАНОКРИСТАЛІЧНИХ ШАРІВ**

05.02.08 – технологія машинобудування

Галузь знань 13 – механічна інженерія

131 – Прикладна механіка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

**В.І. Гурей**

Науковий консультант:

Кузьо Ігор Володимирович,

доктор технічних наук, професор,

Заслужений діяч науки і техніки України

Львів – 2021

## АНОТАЦІЯ

Гурей В.І. Науково-технологічні основи підвищення якості та експлуатаційних характеристик деталей машин формуванням зміцнених нанокристалічних шарів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування (131 – Прикладна механіка). – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2021.

У *першому* розділі проведений аналіз опублікованих наукових праць щодо методів і способів формування поверхневих шарів з мікро- та нанокристалічною структурою, параметрів якості оброблювальних поверхонь деталей машин. Проаналізовано фізико-хімічні і механічні умови формування нанокристалічних шарів з необхідною структурою та властивостями, вплив на їх формування термопружного стану та ударних навантажень. Розглянуто взаємозв'язки між несучою здатністю та станом поверхні і вплив якості поверхневого шару на довговічність.

У *другому* розділі подано методологію теоретичних та експериментальних досліджень. Представлено метод фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин, яка виконується на стандартному модернізованому обладнанні. За кінематикою процес фрикційного оброблення плоских і циліндричних поверхонь деталей подібний до шліфування (плоского і циліндричного).

Фрикційне оброблення відноситься до технологій поверхневого зміцнення висококонцентрованими потоками енергії. Під час фрикційного оброблення висококонцентрований потік енергії утворюється у зоні контакту інструмента та оброблюваної поверхні деталі за рахунок високошвидкісного (60-90 м/с) тертя металевого інструмента-диска по оброблюваній деталі. Залежно від оброблюваного матеріалу та необхідних властивостей, які необхідно сформувати у поверхневому шарі, а також габаритів деталі (продуктивності виконання операції зміцнення) використовуємо інструменти

з різною на периферії геометрією робочі поверхні. Швидкість нагрівання у зоні контакту досягає  $10^5$ - $10^6$  K/c. Поверхневі шари металу нагріваються до температур вище точки фазових перетворень ( $A_{c3}$ ). Після переміщення джерела теплоти нагрітий поверхневий шар охолоджується з великими швидкостями ( $10^4$ - $10^5$  K/c) за рахунок відведення теплоти у глибину металу деталі. При високошвидкісному охолодженні отримується стан, при якому із твердого розчину ще не встигають виділитися окремі фази або це виділення не встигло повністю завершитися. Також у зоні контакту відбувається одночасне швидкісне зсувне деформування оброблюваної поверхні. За рахунок високошвидкісного нагрівання і охолодження та інтенсивного зсувного деформування у поверхневому шарі деталей формуються зміцнений білий шар з нанокристалічною структурою.

Процес полягає у високошвидкісному терті інструмента (металевого диска) по оброблювальній поверхні та з подачею технологічного середовища у зону обробки методом поливу через систему подачі мастильно-охолоджуючої рідини верстата. Середовище у зоні оброблення розкладається на складові хімічні елементи, які переносяться (дифундують) у глибину оброблювального шару матеріалу. Для проведення фрикційного оброблення використовуються чотири конструкції інструмента, які відрізняються між собою за формою робочої поверхні: інструмент з поперечними пазами (патент на корисну модель №75804 «Інструмент для отримання наноструктурних поверхневих шарів деталей машин»); інструмент з різнонаправленими пазами (патент на корисну модель №134389 «Інструмент для формування наноструктурних зміцнених поверхневих шарів деталей машин»); інструмент з хвилеподібною робочою поверхнею (патент на корисну модель №146839 «Інструмент для поверхневої наноструктуризації плоских, торцевих і циліндричних поверхонь»); а також інструмент з гладкою робочою частиною (прототип для усіх інструментів). Інструменти запроектовано збірними для можливості змінювати лише кільця, у яких різна конструкція робочої поверхні на периферії.

Також запропоновано метод мікролегування поверхневих шарів деталей машин при високошвидкісному терті спеціального інструмента по оброблювальні поверхні деталі. При високошвидкісному обертанні інструмента навколо оброблювальної зони формується повітряна оболонка, яка не дає середовищу попасти у зону контакту. Середовище потрапляє лише за зоною обробки, а також навколо нього. Конструкція розробленого інструмента для легування передбачає подачу технологічного середовища через радіальні канали, які виходять у пази інструмента, безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь (патент на винахід № 123883 «Інструмент для легування поверхневих шарів деталей машин»). Запропонований тип конструкції інструмента використовується в роботі з чотирма типами робочої поверхні.

Як технологічне середовище використовували: мінеральну оливу, а також мінеральну оливу з полімервмісними добавками. Для деяких модельних досліджень використовували звичайну водопровідну воду.

Представлено методику визначення складових сили дії у зоні оброблення плоских і циліндричних поверхонь. Розроблений спеціальний динамометр для визначення складової  $P_y$  і  $P_z$  при обробленні циліндричних поверхонь деталей машин.

Запропонована методика визначення балансу жорсткості та коефіцієнта загасання для токарного та плоскошліфувального верстатів.

Для визначення температури за глибиною під час фрикційного оброблення плоских деталей розроблено збірний зразок, на одній частині якого виконано канавку вздовж зразка під кутом до оброблювальної поверхні у яку запаяні термомпари та подана методика вимірювання.

Приведено опис експериментальних досліджень зносотривкості на універсальні машині тертя типу УМТ-1 за схемою «кільце-кільце» та типу СМТ-1 за схемою «кільце-вкладка» при терті без мащення, граничному мащенні та терті у оливо-абразивному середовищі.

Представлено методику дослідження опору втомному руйнуванню під

час контактного навантаження, яке здійснювали на трироликовій установці.

Для проведення експериментальних досліджень використовують методи математичного планування експериментів, які дозволяють одночасно змінювати усі досліджувані фактори, і отримати математичні моделі процесу при неповному знанні досліджуваних фізичних явищ. На основі математичного планування експерименту отримано математичні залежності взаємозв'язку параметрів фрикційного оброблення з товщиною зміцненого шару, складових сили взаємодії у зоні контакту інструмент-деталь.

Представлена діаграми причинно-наслідкових зв'язків між факторами фрикційного оброблення на основі діаграм Ісікави.

У *третьому* розділі представлена математична модель, яка описує термопружний стан поверхневого шару металу зразка під час фрикційного оброблення використовуючи інструмент з пазами, який формує перервний тепловий потік.

Під час фрикційного оброблення за рахунок високошвидкісного тертя інструмента з деталлю виникають високі температури у їх зоні контакту, які вищі за точки фазових переходів. Зона у якій відбуваються термомеханічні процеси можна розділити на три ділянки: перша – зона підвищеної температура перед джерелом теплової енергії; друга – зона дії інтенсивного потоку теплової енергії; третя – зона інтенсивного охолодження, яке відбувається після припинення дії потоку теплової енергії.

У даному розділі представлена модифікована теорія термопружності, так як основним недоліком класичної теорії термопружності є припущення про нескінченну швидкість поширення тепла в матеріалах. Для його подолання Грін та Ліндсей запропонували модифіковану теорію термопружності (GL-теорія), де рівняння теплопровідності стало гіперболічним із введенням двох так званих параметрів "часу релаксації". Отже, використовуючи GL-теорію записані рівняння та проведено чисельний розв'язок методом скінчених елементів. Представлені чисельні розв'язки для різної ширини паза інструмента.

На основі методики визначення температури за глибиною зразка, яка подана у другому розділі проведено експериментальні дослідження температури на трьох різних глибинах та при декількох проходах інструмента з поперечною подачею.

У *четвертому* розділі представлено динамічні моделі процесу фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин.

Подано тримасову модель плоскошліфувального верстата, який використовується для фрикційного оброблення плоских деталей, диференціальні рівняння якої записані на основі рівнянь Лагранжа другого роду. Сила притискання інструмента до деталі подано як вертикальне переміщення шпindelної бабки до деталі на певну величину, яка враховуючи сумарну жорсткість відповідає певній силі, а також віднімання переміщення, яке формується через наявність пазів на периферії інструмента. Чисельний розв'язок математичної моделі проведено у середовищі *MATLAB Simulink*. З аналізу чисельних розв'язків представлено, що найбільше значення амплітуди удару відбувається при збільшенні ширини паза та зменшенні кількості пазів. Побудована АЧХ тримасової коливальної системи верстата, визначено, що небезпечна кількість пазів становить 8-10, які можуть спричинити резонанс.

Подано тримасову модель токарно-гвинторізного верстата, на якому замість різцетримача встановлено спеціальний пристрій з автономним приводом інструмента для фрикційного оброблення циліндричних деталей машин, диференціальні рівняння якої записані на основі рівнянь Лагранжа другого роду. Силу притискання подано як переміщення супорта у горизонтальному напрямі до заготовки на певну величину з врахуванням сумарного коефіцієнта жорсткості системи, яка формує величину сили, а також при проходженні паза проходить розвантаження зони контакту і дана величина віднімається від попереднього переміщення супорта. Чисельний розв'язок математичної моделі проведено у середовищі *MATLAB Simulink*. Побудована АЧХ тримасової коливальної системи верстата, визначено, що небезпечна кількість пазів становить 9-12, які можуть спричинити резонанс.

Для визначення коефіцієнтів жорсткості відповідного вузла токарного та плоскошліфувального верстата відповідно до методики, яка подана у розділі другому, розставлено індикатори годинникового типу та встановлено баланс жорсткості вузлів обладнання для фрикційного оброблення.

За допомогою набору фірми *PCB* у який входить молоток на кінці якого з двох сторін встановлені п'єзоелектричні давачі і акселерометра та користуючись методикою, яка подана у другому розділі визначено коефіцієнт загасання відповідного вузла обладнання для фрикційного оброблення.

Систему шпindel-інструмент розглянуто як гіроскоп, який здійснює обертання на великих швидкостях. Так як для інструмента, який використовується для фрикційного оброблення проводимо лише статичне балансування, а сила притискання діє лише у одній площині, а у перпендикулярній площині сила тертя, то при високій частоті обертання шпінделя з інструментом проходить їх прецесійний рух та виникає гіроскопічне явище. Побудована математична модель прецесійного явища на основі рівнянь Лагранжа.

У *п'ятому* розділі представлено вплив параметрів фрикційної обробки на показники якості зміцнених поверхонь. Показана зміна структури, глибина, а також мікротвердість поверхневих шарів залежно від типу подачі технологічного середовища, форми робочої поверхні і типу інструмента. Відображено перерозподіл хімічних елементів за глибиною зміцненого шару. Подано фазові склади поверхневих шарів після зміцнення та легування, а також залишкові напруження у зміцнених поверхневих шарах. Після використання різних інструментів проскановані оброблені поверхні деталей, досліджена топографія, побудовані 3D-модель сканованої поверхні, профілі хвилястості та шорсткості у поздовжньому та поперечному напрямках, гістограми розподілу площ за виступами і западинами, гістограми площ точкових виступів і западин, параметри кривої несучої здатності поверхні з визначенням площ та об'ємів виступів та западин та спектрів повторюваності піків на сканованих поверхнях з визначенням величини, кроку та кутів нахилу

пиків виступів, параметрів ізотропії оброблюваних поверхонь та інше.

Представлено результати визначення складових сили, яка діє у зоні контакту інструмент-деталь, під час фрикційного оброблення плоских і циліндричних поверхонь. Визначено величини усадки металу на оброблюваних поверхнях після оброблення, тобто визначено величину зменшення розміру оброблюваних поверхонь деталей.

Досліджено розподіл залишкових напружень, які формуються у поверхневих шарах після фрикційного оброблення плоских і циліндричних поверхонь деталей машин.

Представлено побудовані на основі математичного планування експериментів математичні моделі з визначення складових сили, яка виникає у зоні контакту інструмент-деталь та товщини зміцненого шару під час оброблення інструментом з пазами на його робочій поверхні.

У шостому розділі представлено вплив поверхневого зміцнення та легування на експлуатаційні характеристики деталей машин.

Відповідно до методології, яка представлена у другому розділі проводилися дослідження зносотривкості пар тертя за схемою «кільце-кільце» та «кільце-вкладка» при терті без мащення, з граничним мащенням, а також в оливо-абразивному середовищі. Дослідження зносостійкості проводили для пар сталь – чавун, чавун – чавун, сталь – сталь

Представлені експериментальні дослідження контактної втомної міцності зміцнених шарів методом фрикційного оброблення.

Представлені розроблені і впроваджені технологічні процеси формування зміцнених поверхневих шарів з нанокристалічною структурою на масивних деталях. Розроблені технологічні процеси для зміцнення циліндричних поверхонь напрямних штампів прес-форм, робочих поверхонь кілець струмознімачів для роторних вентиляторів сушил цегельних заводів, плоских поверхонь напрямних спеціального обладнання для штампа обрубки смуги решіткового настилу, роликів накатних головок для формування профілю дроту решіткового настилу, а також робочих поверхонь рухомих



ножів соломоподрібнювача зернозбирального комбайна «CLAAS».

У кінці кожного розділу подано висновки. У кінці основного матеріалу подано загальні висновки щодо матеріалів дисертаційної роботи.

Ключові слова: нанокристалічна структура, переривне фрикційне оброблення, мікролегування, термонапружений стан, динамічні процеси, гіроскопічні ефекти, амплітудно-частотна характеристика, зносостійкість, якість поверхні.

## ANNOTATION

Gurey V.I. Scientific and technological bases of improving the quality and operational characteristics of machine parts by forming strengthened nanocrystalline layers. Manuscript copyright. Dissertation submitted for the degree of Doctor of technical sciences; field of research: 05.03.08 – manufacturing [mechanical] engineering (131 – Applied Mechanics). – Lviv Polytechnic National University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

The analysis of the published scientific works about methods and ways of surface layers' formation with micro- and nanocrystalline structure, the quality of the treated parts' surfaces parameters is carried out in the first chapter. Physical, chemical and mechanical conditions of nanocrystalline layers formation with the necessary structure and properties, the influence of thermoelastic state and shock loads into their formation are analysed. The relationship between bearing capacity and surface condition and the influence of surface layer quality on durability are considered.

The second section presents the methodology of theoretical and experimental research that used in the dissertation. The method of frictional treatment of machine parts' flat and cylindrical surfaces, which is performed on modernized machine-tool, is presented. Kinematically, the process of frictional treatment of the parts' flat and cylindrical surfaces is similar to grinding (flat and cylindrical).

Friction treatment refers to surface strengthening (hardening) technologies with highly concentrated energy flows. A highly concentrated energy flow is formed in the contact zone of the tool and the workpiece surface due to the high-speed (60-90 m/s) friction of the metal tool-disk on the workpiece during the friction treatment. The selection of tools with different geometry on the work surface' periphery depends on the processed material and the required properties that need to be formed in the surface layer and the dimensions of the part (productivity of the operation). The heating rate in the contact zone reaches  $10^5$ - $10^6$  K/s. The surface layers of the metal are heated to temperatures above the point of phase transformations ( $A_{c3}$ ). After the translation of the heat source, the heated surface layer is cooled at high speeds ( $10^4$ - $10^5$  K/s) by heat removal to the depth of the metal part. The state in which the individual phases do not have time to separate from the solid solution or this separation has not yet been fully completed is obtained at high-speed cooling. Also, in the contact zone there is a simultaneous high-speed shear deformation of the treated surface. In the surface layer of the parts due to high-speed heating and cooling and intensive shear deformation strengthened white layer with a nanocrystalline structure is formed.

The process consists of high-speed friction of the tool (metal disk) on a treatment surface and delivery of the technological media to the treatment zone by the machine-tool's using a cooling system. The medium in the treatment zone decomposes into constituent chemical elements, which are transferred (diffused) to the depth of the treatment layer of the material. For friction treatment the four tool designs are used, which differ in the shape of the working surface: the tool with transverse grooves (patent № 75804 "Tool for obtaining nanostructured surface layers of machine parts"); the tool with multidirectional grooves (patent № 134389 "Tool for forming nanostructured strengthened surface layers of machine parts"); the tool with a wavy work surface (patent № 146839 "Tool for surface nanostructuring of the flat, face and cylindrical surfaces"); the tool with a smooth working part (prototype for all tools). The tools have prefabricated design and are able to change only the rings, which have a different design of the work surface on the periphery.

Also, the microalloying method of surface layers of machine' parts at high-speed friction of the special tool on the part' treatment surface is presented. At high-speed rotation of the tool, around the processing zone, the air wall which does not allow the environment to get to a contact zone is formed. The technological medium falls only behind the treatment area, as well as around it. The design of the special tool for doping involves the delivery of the technological medium through the radial channels that go into the grooves of the tool, directly into the contact tool-part area (patent № 123883 "Tool for doping the surface layers of machine parts"). The proposed type of tool design is used to work with four types of the work surfaces.

As a technological medium used: mineral oil and mineral oil with active additives containing polymers. Ordinary tap water was used for some model studies.

The method of determining the force components in the treatment area of flat and cylindrical surfaces is presented. A special dynamometer to determine the  $P_y$  and  $P_z$  component when machining machine parts' cylindrical surfaces have been developed.

A method for determining the stiffness balance and damping coefficient for lathes and surface grinders is proposed.

To determine the temperature by depth during friction treatment of flat parts, a special sample was developed, on one part of which was made a groove along the full length of the sample at an angle to the treated surface into which thermocouples were soldered and a measurement technique was presented.

The description of experimental researches of wear resistance on universal friction machines of type UMT-1 according to the scheme "Ring-Ring" and type SMT-1 according to the scheme "Ring-Insert" at friction without lubrication, boundary lubrication and friction in the oil-abrasive medium is shown.

To conduct the experimental research using methods of mathematical planning of experiments, which allow to simultaneously change all the studied factors, and to obtain mathematical models of the process with incomplete knowledge of the studied physical phenomena. Based on the mathematical planning of the experiment, the mathematical dependences of the relationship between the

parameters of friction treatment with the thickness of the strengthened layer and the components of the interaction force in the contact zone of the «Tool-Part» are obtained.

Diagrams of causal relationships between friction treatment factors based on Ishikawa diagrams are presented.

The mathematical model that describes the thermoelastic state of the surface layer of the metal sample during friction treatment by using the tool with grooves, which forms a continuous heat flow is presented in the third part.

During friction treatment, due to the high-speed friction of the tool with the part, high temperatures occur in their contact zone, which is higher than the points of phase transitions. The zone in which thermomechanical processes take place can be divided into three sections: the first – the zone of increased temperature in front of the source of thermal energy; the second – the area of intense flow of thermal energy; the third – the zone of intensive cooling, which occurs after the cessation of the flow of thermal energy.

This chapter presents a modified theory of thermoelasticity, as the main disadvantage of the classical theory of thermoelasticity is the assumption of an infinite rate of heat distribution in materials. To overcome it, Green and Lindsay proposed a modified theory of thermoelasticity (GL-theory), where the equation of thermal conductivity became hyperbolic with the introduction of two parameters that so-called the "relaxation times". Therefore, using GL-theory, the equations are written and the numerical solution is made by the finite element method. Numerical solutions for different tool groove widths are presented.

Based on the method of determining the temperature by the depth of the sample, which is presented in the second chapter, experimental studies of the temperature at three different depths and at several passes of the tool with transverse feed.

The fourth chapter presents dynamic models of the frictional treatment' process of flat and cylindrical machine parts' surfaces.

The three-mass model of a surface grinding machine used for flat parts'

friction treatment is presented, the differential equations of which are written on the basis of the second kind Lagrange equations. The clamping (pressing) force of the tool to the part is given as the vertical movement of the spindle head to the treatment part by some value, where the total stiffness corresponds to some value of clamping force, as well as subtraction of movement, which is formed due to grooves on the periphery of the tool. The numerical solution of the mathematical model was performed in the MATLAB-Simulink software. The analysis of numerical solutions shows that the greatest value of the amplitude of the impact occurs when the width of the groove increases and the number of grooves decreases. The frequency response of the machine-tool' three-mass oscillating system is developed, it is determined that the dangerous number of grooves is 8-10, which can cause resonance.

A three-mass model of a lathe machine is presented, on which instead of a tool-post a special device with an autonomous tool drive for frictional treatment of cylindrical machine parts is installed, the differential equations of which are written on the basis of the second kind Lagrange equations. The clamping force is given as the movement of the carriage in the horizontal direction to the workpiece by some value, where the total stiffness corresponds to some value of clamping force, as well as subtraction of movement, which is formed due to grooves on the periphery of the tool. The numerical solution of the mathematical model was performed in the MATLAB-Simulink software. The frequency response of the machine' three-mass oscillating system is developed, it is determined that the dangerous number of grooves is 9-12, which can cause resonance.

To determine the stiffness coefficients of the respective unit of the lathe and surface grinding machine in accordance with the procedure presented in the second section, the clock-type indicators are placed and the stiffness balance of the equipment' units for friction machining is set.

Using the PCB kit that includes the hammer at the end of which has two piezoelectric sensors and an accelerometer, and using the method given in the second chapter, the damping coefficient of the corresponding unit of friction treatment

equipment is determined.

The spindle-tool system is considered as a gyroscope that rotates at high speeds. The tool used for friction treatment had only static balancing, and the clamping force acts only in one plane, and in the perpendicular plane acts the friction force, then at high speed, the spindle with the tool undergoes their precessional movement and a gyroscopic phenomenon. The mathematical model of the precession phenomenon is design on the basis of Lagrange equations.

The fifth section presents the influence of friction treatment parameters on the quality indicators of strengthened surfaces. The change of structure, depth, and also microhardness of surface layers depending on the feed' type of the technological medium and its structure and type of the tool' periphery is shown. The redistribution of chemical elements by the depth of the strengthened layer is shown. The phase composition of the surface layers after strengthening and alloying, as well as residual stresses in the strengthened surface layers, are presented. After using various tools, the parts' surfaces were scanned and then the 3D view of the scanned surfaces, the topography, profiles of waviness and roughness in the longitudinal and transverse directions, peaks count distribution, volumes of the holes or the peaks, textures directions, averaged power spectrum density, textures isotropy, Abbott-Firestone curves, Sk parameters, etc. are investigated.

The results of determining the components of the force acting in the contact «tool-part» area during the frictional treatment of flat and cylindrical surfaces are presented. The values of metal shrinkage on the treated surfaces after treatment are determined, i.e., the magnitude of the reduction in the size of the parts' treated surfaces is determined.

The distribution of residual stresses that are formed in the surface layers after friction treatment of flat and cylindrical surfaces of machine parts is investigated.

Mathematical models based on the mathematical planning of experiments to determine the components of the force that occurs in the contact «tool-part» area and the thickness of the strengthened layer during treatment by the tool with grooves on its working surface are presented.

The sixth chapter presents the effect of surface strengthening and alloying on the performance of machine parts.

The studies of the friction pairs' wear resistance according to the "ring-ring" and "ring-insert" schemes of wearing without lubrication, with maximum lubrication, as well as in an oil-abrasive medium were showed. Wear resistance studies were performed for pairs of steel – cast iron, cast iron – cast iron, steel – steel.

Experimental studies of the contact strength of the strengthened layers after friction treatment were performed by using the special equipment where a test-sample is mounted, which is run-in by three spring-loaded rollers. The friction treatment technology and microalloying have been tested and new improved results of increased wear resistance of friction pairs after this friction treatment have been obtained. Technological processes for strengthening of cylindrical surfaces of moulds' guide, working surfaces of current collectors' rings for rotary dryers' fans of brick factories, flat surfaces of guides of special equipment for stamping of a floor' lattice strip, rollers of rolling heads for the formation of the wire of the floor' lattice profile, and as well as the working surfaces of the movable knives of the straw chopper of the combine harvester «CLAAS».

Conclusions are presented at the end of each chapter. At the end of the main material there are general conclusions of the dissertation materials.

Keywords: nanocrystalline structure, intermittent friction treatment, microalloying, thermal stress state, dynamic processes, gyroscopic effects, amplitude-frequency characteristic, wear resistance, surface quality.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Статті в наукометричній базі даних Scopus**

1. Hurey I. Wear resistance of hardened nanocrystalline structures in the course of friction of steel-grey cast iron pair in oil-abrasive medium / I. Hurey, T. Hurey, V. Gurey. // Lecture notes in mechanical engineering. Advances in design,

simulation and manufacturing II. – 2019. Vol. 1. – P. 572–580. ([https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_57](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_57))

2. Gurey V. The effect of the hardened nanocrystalline surface layer on durability of guideways / V. Gurey, I. Hurey. // Lecture Notes in mechanical engineering. advanced manufacturing processes. Selected papers from the Grabchenko's international conference on advanced manufacturing processes (InterPartner-2019). – 2019. Vol. 1. – P. 63–72. ([https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_7))

3. Gurey V. Influence of surface hardened nanocrystalline layers on the resistance of contact fatigue destruction / V. Gurey, I. Hurey. // Lecture notes in mechanical engineering. Advances in design, simulation and manufacturing III. – 2020. – Vol. 1. – P. 483–491. ([https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7\\_47](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_47))

4. Maksymiv O.V. Influence of the surface nanostructuring of 65G steel on the wear resistance of the disks of furrow openers of seeding machines / O.V. Maksymiv, V.I. Kyryliv, V.P. Chaikovskiy, B.R. Tsizh, A.M. Kostruba, V.I. Hurei. // Materials Science. – 2021. – Vol. 56. – P. 523–529 (<https://doi.org/10.1007/s11003-021-00459-9>)

#### **Статті у наукових виданнях інших держав**

5. Hurey I. The research in to components of friction force tool part during friction hardening of plate steel faces / I. Hurey, V. Gurey, P. Dmyterko, B. Robert. // Advances in manufacturing science and technology. – 2014. – N. 3. – P. 56–64. (*наукометрична база EBSCO, Ulrich's periodicals, Index Copernicus*)

6. Hurey I. Wpływ szlifowania ściernicą z diamentu i CBN na trwałość stali 1H12N2MVFBA / I. Hurey, V. Gurey. // Mechanik. – 2015. – N. 8-9. – S. 132–134. (*наукометрична база BazTech, ICI Journals Master List, Index Copernicus*)

7. Hurey I. The effect of nanocrystalline layers on the wear resistance of grey cast iron during friction in an oil-abrasive medium / I. Hurey, T. Hurey, V. Gurey. // Tribologia. – 2018. – 282 (6). – P. 37–42 (*наукометрична база Index Copernicus*)

8. Gurey V. Mathematical model of the thermoelasticity of the surface layer of parts during discontinuous friction treatment / V. Gurey, H. Shynkarenko, I. Kuzio. // Lecture notes in mechanical engineering. Advanced in Design, Simulation and Manufacturing IV. – 2021. – Vol. 2. – P. 12–22 ([https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_2))

#### **Розділ монографії**

9. Гурей И. Формирование нанокристаллического поверхностного слоя в процессе фрикционного упрочнения / И. Гурей, В. Гурей, Т. Гурей, Я. Бурек. // Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografia. Gorzów Wlkp.-Poznań. – 2014. –



S. 190–200. (наукометрична база *Index Copernicus*) ISBN 978-83-64249-17-4

### Статті у наукових фахових виданнях України

10. Гурей І.В. Формування нанокристалічного зміцненого шару деталей машин під час фрикційного зміцнення / І.В. Гурей, В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко. // Прогресивні технології і системи машинобудування. Міжнародний збірник наукових праць. – 2013. – Вип. 1,2 (46). – С. 98–106.

11. Гурей І.В. Моделювання гіроскопічних процесів під час фрикційного зміцнення деталей машин / І.В. Гурей, В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко // Вісник НУ «ЛП» Серія “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні”. – 2013. – Вип. 760. – С. 14–18.

12. Hurey I. Simulation model of dynamic processes during friction hardening of the flat surfaces / I. Hurey, V. Gurey, P. Dmyterko. // Вісник НУ «ЛП» Серія “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні”. – 2013. – Вип. 772. – С. 80–85.

13. Гурей І.В. Вплив нанокристалічного зміцненого шару на зносостійкість сірого чавуну при терті з граничним мащенням / І.В. Гурей, В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко. // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2014. – Вип. 9. – С. 23–32 (наукометрична база *Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)*)

14. Gurey V. Mathematical model of dynamic processes during frictional hardening of flat surfaces / V. Gurey, V. Korendiy, P. Dmyterko. // Вісник НУ «ЛП» Серія “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”. – 2014. – Вип. 788. – С. 79–85.

15. Гурей І.В. Теоретичне визначення термонапруженого стану під час фрикційного зміцнення / І.В. Гурей, В.І. Гурей // Сучасні технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць. – Харків НТУ «ХП». – 2016. – Вип. 11. – С. 42–48. (наукометрична база *Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)*)

16. Gurey V. Wear resistance of strengthened layers with nanocrystalline structure in friction with boundary lubrication / V. Gurey. // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. – 2020. – Vol. 6, No. 1. – P. 83–90. (наукометрична база *Index Copernicus*) (<https://doi.org/10.23939/ujmems2020.01.083>)

17. Гурей В.І. Моделювання амплітудно-частотної характеристики процесу фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей машин / В.І. Гурей. // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Динаміка і міцність машин. – Харків НТУ «ХП». – 2020. – Вип. № 2. – С. 30–35 (наукометрична база *Index Copernicus*) (<https://doi.org/10.20998/2078-9130.2020.2.219636>)

18. Gurey V. Simulation modelling of dynamic processes due discontinuous frictional treatment of the flat surfaces / V. Gurey. // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. 2020. – Vol. 6, No. 2 – P. 23–33. (наукометрична база *Index Copernicus*)

19. Гурей В.І. Моделювання амплітудно-частотної характеристики фрикційного зміцнення циліндричних поверхонь деталей машин / В.І. Гурей. // Наукові нотатки. Луцький національний університет. 2020. – № 70. – С. 82–89. (наукометрична база *Index Copernicus*)

20. Gurey V. Mathematical model of dynamic processes during frictional hardening of the cylindrical surfaces of parts / V. Gurey; I. Kuzio. // Scientific Journal of TNTU. – Ternopil: TNTU, 2020. – Vol. 100, No. 4. – P. 29–39. (наукометрична база *Index Copernicus*).

21. Gurey V. Topography of the strengthened cylindrical surface after frictional continuous treatment / V. Gurey. // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. – 2020. – Vol. 6, No. 3. – P. 9–19. (наукометрична база *Index Copernicus*).

22. Гурей В.І. Дослідження складових сил під час фрикційного зміцнення циліндричних поверхонь деталей машин / В.І. Гурей. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2020. – №2(49). – С. 81–90.

### **Патенти України**

23. Інструмент для отримання наноструктурних зміцнених поверхневих шарів деталей машин: пат. 134389 Україна, МПК (2019.01) B24B 7/00, B82Y 30/00 / Гурей І.В., Гурей В.І., Гурей Т.А., Кирилів В.І. – № u201812892; заявл. 26.12.18; опубл. 10.05.19, Бюл. 9.

24. Інструмент для поверхневої наноструктуризації плоских, торцевих і циліндричних поверхонь: пат. 146839 Україна, МПК (2021.01) B24B 39/00, B82Y 30/00 / Кирилів В.І., Чайковський Б.П., Максимів О.В., Ціж Б.Р., Гурей В.І. – № u202006884; заявл. 27.10.20; опубл. 24.03.21, Бюл. 12/2021.

25. Інструмент для легування поверхневих шарів деталей машин: пат. 123883 Україна, МПК (2021.01) B39B 39/00 B24B 39/04 (2006.01) B12H 5/00 B23H 5/14 (2006.01) / Гурей І.В., Гурей В.І., Кирилів В.І. – № a201907693; заявл. 08.07.19; опубл. 16.06.21, Бюл. 24.

### **Інші наукові видання**

26. Hurey I. Wear resistance of gray cast iron pair after friction hardening / I. Hurey, V. Gurey, T. Hurey, P. Dmyterko. // International scientific conference “Cluster-Casting-Future”. – 2014. – P. 95–98.

### Публікації у матеріалах наукових конференцій

27. Гурей І.В. Імітаційна модель динамічних процесів під час фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей / І.В. Гурей, В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко. // Збірник наукових праць II-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції, Львів. – 2014. – С. 25.
28. Gurey V. Simulation model of dynamic processer during friction hardening of the flat surfaces / V. Gurey, P. Dmyterko. // Litteris et Artibus : V Міжнародний молодіжний науковий форум : матеріали, 26–28 листопада 2015 р., Львів, Україна. – 2015. – С. 322–326.
29. Гурей І.В. Математичне моделювання точності поверхонь тіл обертання під час їх оброблення / І.В. Гурей, В.І. Гурей. // Збірник наукових праць V-ої науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», Львів. – 2016. – С. 36–38.
30. Гурей І.В. Дослідження якості вторинних структур в зоні тертя зміцнених поверхонь / В.І. Гурей, Т.А. Гурей, Гурей І.В. // Матеріали всеукр. наук.-практ. конф. «Обладнання і технології сучасного машинобудування», Тернопіль.– 2017. –С. 68–69.
31. Гурей В.І. Моделювання траєкторії руху точки контакту інструмент-деталь під час зміцнення диском з гладкою робочою частиною / В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко. // Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції, Львів–Звенів (Карпати).– 2017. – С. 35–36.
32. Dmyterko P. Impact of processing modes and parameters of the working part of the instrument on the surface quality of flat parts during high-speed friction hardening / P. Dmyterko, Y. Novitskyu, V. Gurey. // Матеріали конференції: Litteris et Artibus, Lviv. – 2017. – P. 250–251.
33. Гурей Т.А., Гурей В.І., Гурей І.В. Дослідження адсорбційного ефекту під час зношування зміцнених поверхонь / Т.А. Гурей, В.І. Гурей, І.В. Гурей. // Збірник наукових праць III-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції «Новітні шляхи створення, експлуатації і сервісу автомобілів» 12-15 вересня 2017 р, Миколаїв-Коблево. – 2017. – С. 18–20.
34. Гурей І.В. Зміна вмісту хімічних елементів у поверхневому шарі під час фрикційного зміцнення деталей машин / І.В. Гурей, Т.А. Гурей, Гурей І.В. // Збірник наукових праць VII-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», Львів. – 2018. – С. 38–40.
35. Гурей І.В. Дослідження малоциклової втомної міцності поверхневих шарів сталевих зразків після фрикційного зміцнення / І.В. Гурей, Т.А. Гурей, В.І. Гурей. // Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», Краматорськ, 2018. – С. 41–44.

36. Hurey I. Wpływ Utwardzonych Warstw Nanokrystalicznych na odporność na zużycie żeliwa podczas Tarcia w Środku Olejowo – Sciernym / I. Hurey, T. Hurey, V. Gurey. // Problematyka funkcjonowania i rozwoju branży metalowej w Polsce. Innowacje technologiczne : streszczenia wystąpień : V Ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna, 5–6 lipca 2018 r - Jedlina : Radomska Rada Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych NOT. – S. 11.

37. Hurey I. Wear resistance of hardened nanocrystalline structures in the course of friction of steel-grey cast iron pair in oil-abrasive medium / I. Hurey, T. Hurey, V. Gurey. // Advances in design, simulation and manufacturing: The innovation exchange : proceedings of the 2nd International conference, Lutsk, Ukraine, June 11–14, 2019. – Sumy : Sumy University Book. – P. 117.

38. Gurey V. The effect of the hardened nanocrystalline surface layer on durability of guideways / V. Gurey, I. Hurey. // Grabchenko's international conference on advanced manufacturing processes (InterPartner-2019), September 10–13, 2019. Odessa : International Association for technological development and innovation. – P. 41.

39. Gurey V. Influence of surface hardened nanocrystalline layers on the resistance of contact fatigue destruction / V. Gurey, I. Hurey. // Proceedings of the 3rd international conference on design, simulation, manufacturing: The innovation exchange, DSMIE-2020, June 9-12, 2020, Kharkiv. – 2020. – P. 104

40. Гурей В.І. Імітаційне моделювання переміщення осі швидкообертаючого шпинделя верстата під дією гіроскопічних сил / В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко, І.В. Кузьо. // Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць ІХ Міжнародної науково-практичної конференції, Львів–Плай (Карпати), 3–7 лютого, 2020 року. – 2020. – С. 66–70.

41. Гурей В.І. Моделювання динамічних процесів під час фрикційної обробки циліндричних поверхонь / В.І. Гурей, І.В. Кузьо // II Міжнародна науково-технічна конференція “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2021”, Вінниця. – 2021.

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	2
ANNOTATION .....	9
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	15
ЗМІСТ .....	21
ВСТУП .....	24
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН .....	36
1.1. Стан поверхні та несуча здатність поверхневого шару деталей машин	36
1.2. Технологічні методи зміцнення поверхневих шарів та легування деталей.....	38
1.3. Фізико-хімічні та механічні умови формування зміцненого шару .....	48
1.4. Вплив динамічних процесів та утворення і легування зміцненого шару .....	56
1.5. Вплив якості поверхневого шару на довговічність деталей.....	61
1.6. Мета і основні задачі дослідження.....	64
РОЗДІЛ 2 ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ДОСЛІДЖУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ .....	65
2.1. Досліджувані матеріали та їх характеристики.....	65
2.2 Технологія фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей машин .....	67
2.3 Технологія фрикційного оброблення циліндричних поверхонь деталей машин .....	71
2.4 Конструкція інструментів для фрикційного оброблення .....	73
2.5 Методики визначення складових сил дії інструмент-деталь у зоні їх контакту.....	79
2.6. Методика проведення дослідження зносотривкості .....	87
2.7 Методика визначення логарифмічного декременту.....	92
2.8 Досліджень балансу жорсткості складових верстата.....	98

2.9	Визначення температури за глибиною під час змінення плоских поверхонь .....	102
2.10	Математичне моделювання технологічних параметрів фрикційного оброблення.....	104
2.11	Діаграма причинно-наслідкових зв'язків між факторами фрикційного оброблення.....	110
<b>РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ФРИКЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ .....</b>		<b>115</b>
3.1.	Термопружні процеси у поверхневих шарах металу .....	115
3.2	Математичне моделювання термонапруженого стану у поверхневому шарі під зоною контакту .....	117
3.3	Дослідження процесів термопружності у поверхневих шарах .....	124
3.4	Експериментальне визначення розподілу температури за глибиною ..	142
<b>РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ФРИКЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕСУ ОБРОБЛЕННЯ .....</b>		<b>148</b>
4.1.	Математична модель динамічних процесів під час фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей машин .....	148
4.2.	Імітаційна модель динамічних процесів під час фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей машин.....	160
4.3.	Амплітудно-частотна характеристика процесу фрикційного зміцнення плоских деталей машин.....	183
4.4.	Математична модель динамічних процесів під час фрикційного зміцнення круглих поверхонь деталей машин.....	187
4.5.	Імітаційна модель динамічних процесів під час фрикційного зміцнення круглих поверхонь деталей машин .....	194
4.6.	Амплітудно-частотна характеристика процесу фрикційного зміцнення плоских деталей машин.....	213
4.7.	Експериментальні дослідження балансу жорсткості верстата.....	216
4.8.	Коефіцієнт в'язкого опору .....	219
4.9.	Гіроскопічні явища при фрикційному обробленні.....	222

Висновки до розділу 4 .....	234
<b>РОЗДІЛ 5 ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ФРИКЦІЙНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЗМІЦНЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ.....</b>	<b>235</b>
5.1 Структура, глибина і мікротвердість зміцнених поверхневих шарів...	235
5.2. Перерозподіл хімічних елементів за глибиною зміцненого шару.....	255
5.3. Фазовий склад поверхневих шарів після зміцнення і легування.....	265
5.4. Залишкові напруження у зміцнених поверхневих шарах.....	278
5.5. Термодинамічний стан металу поверхневих зміцнених шарів.....	282
5.6 Топографія та шорсткість оброблених поверхонь .....	284
5.7 Дослідження складових сили дії у зоні контакту інструмент-деталей	303
5.8 Точність поверхонь після фрикційного оброблення.....	315
5.9 Побудова математичної моделі процесу фрикційного оброблення .....	318
<b>РОЗДІЛ 6 ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ТА ЛЕГУВАННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ .....</b>	<b>326</b>
6.1. Зносотривкість при терті ковзання без мащення.....	327
6.2. Зносотривкість при терті ковзання з граничним мащення.....	338
6.3. Зносотривкість при терті ковзання в оливо-абразивному середовищі	343
6.4 Дослідження зносотривкості під час абразивного тертя .....	355
6.5. Контактна втомна міцність зміцнених шарів.....	359
6.6 Опір малоцикловому втомному руйнуванню .....	366
6.7 Технологія фрикційного оброблення технологічного оснащення та деталей машин.....	369
<b>ОСНОВНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>377</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>381</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>419</b>

## ВСТУП

На сучасному етапі розвитку техніки основним завданням машинобудування є забезпечення довговічності, точності і надійності деталей машин. Довговічність визначається, головним чином, зносостійкістю поверхневих шарів деталей машин. У даній проблематиці основне місце займають питання тертя, мащення і зношування поверхонь деталей. Для збільшення експлуатаційних властивостей деталей все більше застосовують методи поверхневого зміцнення з використанням висококонцентрованих джерел енергії, а також комбіновані методи обробки.

Одним із основних резервів підвищення експлуатаційних характеристик поверхневого шару є створення в них нанокристалічних структур. Нанокристалічні структури є такими, які містять структурні елементи, геометричні розміри яких хоча би в одному вимірі не перевищують 100 нм, і володіють якісно новими експлуатаційними і функціональними властивостями. Зростання міцності і твердості відбувається із зменшенням розміру зерен, оскільки зменшення розміру обумовлене введенням додаткових границь зерен, які є перешкодою для руху дислокацій.

Одним із відомих способів формування нанокристалічної структури в поверхневих шарах є нанесення покриттів методиками *PVD* і *CVD*. Альтернативним методом створення нанокристалічного шару є подрібнення зерен в поверхневому шарі деталей машин до нанометричного розміру за допомогою інтенсивної пластичної деформації. Завдяки можливості керуванням розмірів кристалів поверхневих шарів можна отримати матеріали з високим рівнем якості поверхні.



## **Загальна характеристика роботи.**

### **Актуальність теми.**

Характерною особливістю сучасної технології виготовлення виробів є те, що вона повинна забезпечити не тільки високу точність, продуктивність, технологічність, але й потрібну довговічність оброблюваних деталей в експлуатації. Підвищення надійності та довговічності деталей машин – одне з найважливіших завдань сучасного машинобудування, від рішення якого залежить рівень технічного прогресу. Збільшення терміну служби виробів рівносильне збільшенню випуску їх на тих же виробничих площах, не говорячи вже про скорочення кількості матеріалів на їх виготовлення, витрати на експлуатацію, ремонт та інші непродуктивні витрати.

Стан поверхневого шару є важливим фактором, який визначає експлуатаційні характеристики виробу, адже руйнування матеріалу починається з його поверхні. Це, в свою чергу, призводить до зниження умов працездатності і виходу деталей із ладу, внаслідок процесів, які відбуваються у поверхневих шарах деталей машин при експлуатації – тертя і зношування, пластичне деформування, розвиток мікротріщин, перерозподіл залишкових напружень і інше. Надійність роботи деталей безпосередньо пов'язана з якістю поверхневого шару і характеризується геометричними та фізико-механічними властивостями. Геометричні параметри визначаються шорсткістю та хвилястістю поверхні і залежать від якості обробки поверхонь. Властивості матеріалів залежать від хімічного складу і структури матеріалів. Зв'язок характеристик якості поверхневого шару з експлуатаційними властивостями деталей показує, що оброблена поверхня повинна мати високу твердість, залишкові напруження стиску, дрібнодисперсну структуру і інші.

На даному етапі виробництва необхідно забезпечити оптимальні показники стереометрії поверхні та якості поверхневого шару. У промисловості для підвищення якості поверхневого шару деталей машин при

збереженні внутрішньої структури використовується велика кількість методів поверхневого зміцнення, а саме: термічний, хімічний, електролітичний і механічний методи. Такі методи зміцнення дають змогу керувати показниками якості формування поверхні деталей, а саме: мікротвердістю, мікро- та макровідхиленнями, глибиною і знаком залишкових напружень. Технології поверхневого зміцнення значно відрізняються один від одного фізико-хімічною природою зміцнюючої дії, технічними показниками, ефективністю та сферою застосування.

При поверхневому зміцненні модифікується лише поверхневий шар в деталях, або ж наносяться нові, більш міцніші шари. Саме вони відповідають за експлуатаційні характеристики деталей машин, в той час як серцевина деталей залишається з первинною структурою. Окрім того, поверхнєве зміцнення зазвичай є менш трудомістким та ресурсозатратним, ніж повне об'ємне зміцнення.

Кожен із цих методів не дає суттєвих результатів підвищення втомної міцності деталей, оскільки вони дають низькі залишкові напруження поверхневих шарів виробу.

На сьогодні великий інтерес представляють нові технології обробки металевих поверхонь, які полягають у створенні нанокристалічної структури у поверхневих шарах. Створення такої структури шляхом керованої зміни розмірів зерен у нанометричному діапазоні (менше 100 нм) є ефективним засобом конструювання нових функціональних матеріалів з унікальними властивостями і експлуатаційними характеристиками. Дослідження нанокристалічних матеріалів показали, що багато їх властивостей (вища границя міцності та текучості, більший опір зношуванню та втомному руйнуванню і інші) суттєво відрізняються від властивостей відповідних великокристалічних матеріалів, що обумовлено їх специфічною мікроструктурою. Створення масивних нанокристалічних матеріалів пов'язане зі значними технологічними труднощами.

Великий внесок у вивчення питань формування параметрів поверхневого шару оброблюваної деталі, які будуть забезпечувати вимоги поставлені до якості поверхні і експлуатаційні властивості деталей машин з використанням різних методів поверхневого зміцнення зробили такі вчені як Н.А. Азаренков, П.Г. Алексєєв, Б.М. Аскіназі, Ю.І. Бабей, Б.С. Балакшин, Р.З. Валиєв, В.М. Голубець, А.І. Гусєв, І.В. Гурей, Б.Д. Грозін, В.Д. Євдокимов, В.В. Кальченко, Г.В. Карпенко, В.І. Кирилів, В.С. Коваленко, Б.І. Костецький, В.С. Корсаков, А.А. Маталін, Ю.В. Петраков, В.Н. Подураєв, С.Н. Полевой, В.І. Похмурський, Е.В. Рижов, Л.Я. Роп'як, Е.О. Сатель, А.Г. Суслов, О.П. Соколовський, А.В. Якимов, К.А. Ющенко та інші.

Процес фрикційного оброблення належить до методів механічного зміцнення з використанням висококонцентрованих джерел енергії. Суть даних методів полягає у тому, що на відносно малі об'єми металу діють з великими швидкостями концентровані потоки енергії високої інтенсивності з наступним його швидкісним охолодженням. Отриманий зміцнений нанокристалічний шар має відмінний структурно-напружений стан металу, інші властивості як після звичайного гартування. Підвищується твердість, міцність та одночасно в'язкість сталей.

При фрикційному поверхневому зміцненні немає чітко встановлених взаємозв'язків між параметрами якості шару, механізмами його формування і режимами зміцнення. Встановлення цих закономірностей дозволить вибирати режими обробки для забезпечення необхідних характеристик поверхневого шару. Також потрібно розглянути питання умов формування нанокристалічних зміцнених поверхневих шарів і їх вплив на працездатність та довговічність деталей машин. Визначити напружений стан у зоні контакту інструмент-деталь при переривчастому фрикційному зміцненні деталей машин і дослідити динамічну деформацію пружної системи верстатів при фрикційному обробленні плоских та циліндричних поверхонь деталей машин інструментом з перервною формою робочої поверхні.

## **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота пов'язана з виконанням плану науково-дослідної роботи викладачів Національного університету «Львівська політехніка» згідно координаційного плану Комітету з питань науки і техніки України, розділ «Машинобудування» (позиція 43) «Високоєфективні технологічні процеси в машинобудуванні» на 2015-2020 рр., а також на основі держбюджетної науково-дослідної теми. Дисертаційна робота виконана на кафедрі технології машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» у рамках завдання фундаментальної держбюджетної НДР МОН України «Прогресивні методи і технології поверхневого зміцнення деталей машин» (ДР №0167U006234), «Прогресивні методи і технології поверхневого зміцнення деталей машин» (ДР №0113U006268) та робота за міжнародною НДКР (договір № NA/16/2015/0500), договір на створення науково-технічної продукції № 646 «Поверхнєве зміцнення робочих поверхонь струмозміначів», де здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Метою роботи** є розроблення науково-технологічних основ фрикційного зміцнення робочих поверхонь деталей машин задля підвищення експлуатаційної надійності керування параметрами якості оброблених поверхонь та поверхневого нанокристалічного шару.

### **Задачі дослідження:**

- провести аналіз методів формування нанокристалічних зміцнених поверхневих шарів на масивних деталях і їх вплив на довговічність деталей машин під час експлуатації;
- визначити термонапружений стан у поверхневому шарі зони контакту інструмент-деталь під час фрикційного оброблення деталей машин інструментом з перервною робочою частиною;
- розробити математичні та імітаційні моделі динамічних процесів під

час фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей, побудувати амплітудно-частотні характеристики процесу зміцнення;

– дослідити вплив форми робочих поверхонь інструментів під час фрикційного оброблення на структурний і фазовий склади зміцнених шарів;

– встановити вплив параметрів процесу фрикційного оброблення та легування на формування показників якості оброблених поверхонь та зміцнених нанокристалічних шарів;

– дослідити вплив зміцнених нанокристалічних поверхневих шарів на довговічність деталей машин;

– розробити практичні рекомендації по зміцненню робочих поверхонь деталей машин.

**Об'єкт дослідження:** технологічний процес фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин інструментами з перервною робочою частиною.

**Предмет дослідження:** умови формування параметрів якості зміцнених поверхонь та поверхневих нанокристалічних шарів під час фрикційного оброблення деталей машин інструментами з перервною робочою частиною.

### **Методи дослідження**

В основу теоретичних досліджень покладені наукові підходи і принципи фундаментальних положень технології машинобудування, термопружності і теорії коливань, методи математичного планування експериментів та математичної статистики. Результати експериментальних досліджень одержано за допомогою стандартного і спеціального обладнання та оснащення з використанням комп'ютерних засобів і програм. Обробка отриманих результатів проводилась за допомогою оригінального та прикладного програмного забезпечення і програмних пакетів *MathCAD*, *MatLAB*, *Mathematica*, *MS Excel*, *Origin*, *Mountins Map Universal*.

Обґрунтованість встановлених закономірностей підтверджується проведенням низки комплексних експериментів, теоретичними положеннями, математичних методів планування експерименту, використанням нових методик, відповідності результатів лабораторних, стендових і виробничих досліджень.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

У дисертаційній роботі на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішена важлива і актуальна науково-прикладна проблема підвищення ефективності процесу фрикційної обробки за рахунок цілеспрямованої зміни форми робочої поверхні інструмента, подачі технологічного середовища безпосередньо у зону обробки та обґрунтованого призначення режимів обробки, що забезпечило формуванню зміцнених шарів з нанокристалічною структурою, істотне покращання точності і якості оброблених поверхонь деталей машин і підвищення експлуатаційних властивостей. При цьому:

1. Вперше розроблено технологічний метод поверхневого фрикційного оброблення плоских і циліндричних поверхонь деталей машин у яких формується зміцнений шар з нанокристалічною структурою при поєднанні дії висококонцентрованого джерела енергії і інтенсивного пластичного деформування зони контакту інструмент-деталь.

2. Вперше розроблено математичну і динамічну моделі фрикційного оброблення циліндричних поверхонь інструментом з перервною робочою поверхнею для визначення динамічних характеристик процесу оброблення.

3. Розвинуто математичну і імітаційну моделі динамічних процесів фрикційного оброблення плоских поверхонь, які розглядають пружну систему верстата як тримасову.

4. Удосконалено математичну модель параметрів термопружності при формуванні зміцнених шарів під час фрикційного оброблення інструментом з

перервною робочою поверхнею, яка базується на твердженні про скінчену швидкість теплового потоку.

5. Розроблено технологію поверхневого легування зміцнених шарів з використанням інструментів з перервною робочою поверхнею інструмента і внутрішньою подачею технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь.

6. Встановлені закономірності впливу параметрів оброблення та форми робочої поверхні інструментів на формування параметрів якості обробленої поверхні і характеристик зміцненого нанокристалічного шару та точності оброблених поверхонь.

7. Експериментально обґрунтовано вплив параметрів оброблення та інструмента з перервною робочою поверхнею під час фрикційного оброблення на експлуатаційні властивості зміцнених шарів з нанокристалічною структурою.

### **Практичне значення одержаних результатів**

На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень, дослідно-промислових випробувань розроблено і впроваджено технологічні процеси формування зміцнених поверхневих шарів з нанокристалічною структурою на масивних деталях. Розроблені технологічні процеси для зміцнення циліндричних поверхонь напрямних штампів прес-форм показали підвищення міжремонтного ресурсу роботи прес-форм у 1,4-1,6 разів у порівнянні з заводською технологією. Зміцнення робочих поверхонь кілець струмознімачів для роторних вентиляторів сушил цегельних заводів, які працюють в умовах підвищених температур (90-130°C) показали підвищення довговічності обладнання у 1,3-1,5 разів. Зміцнення плоских поверхонь напрямних спеціального обладнання для штампа обрубки смуги решіткового настилу показали підвищення довговічності у 1,4-1,6 разів. Зміцнення роликів

накатних головок для формування профілю дроту решіткового настилу показали підвищення довговічності обладнання у 1,5-1,7 разів. Розроблено технологічний процес та обладнання для зміцнення робочих поверхонь рухомих ножів соломоподрібнювача зернозбирального комбайна «CLAAS», які показали підвищення ресурсу роботи барабанів у 1,2-1,3 рази. У розробленому технологічному процесі виготовлення ножів відмінено об'ємну термічну обробку ножів і замінено тільки на їх поверхневе зміцнення робочих поверхонь. Розроблені технологічні процеси фрикційної обробки та необхідне обладнання може застосовуватися для зміцнення робочих поверхонь напрямних технологічного обладнання, ножів для різання паперу для обладнання целюлозо-паперової промисловості.

Результати роботи впроваджено на ТзОВ «Удеч-Техніка» (м. Львів), ТзОВ «Завод Електронпобутприлад» (м. Львів), ТзОВ «САЮЗ» (м. Тернопіль), ФГ «СЕРЖ» (с. Дибще, Тернопільська обл.), ПАП «АГРОІНВЕСТ» (сmt. Козова, Тернопільська обл.).

Технічну новизну розробок захищено 1 патентом на винахід та 2 патентами на корисну модель.

Основні результати дисертаційної роботи можуть використовуватись у навчальному процесі НУ «Львівська політехніка» при проведенні лекційних і практичних занять з навчальних курсів «Математичне програмування» і «Технологічне обладнання та процеси виготовлення машин», а також у навчальному процесі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу під час проведення занять з дисциплін «Основи наукових досліджень» і «Технології зміцнення та відновлення деталей і конструкцій».

### **Апробація матеріалів дисертації.**

Отримані результати роботи представлялись на наступних наукових конференціях та симпозіумах:



- Всеукраїнська науково-технічна конференція «Прогресивні технології в машинобудуванні» (Україна, Львів) 2014, 2016 рр.
- International scientific conference “Cluster-Casting-Future”, (Rzeszow Poland, 2014)
- The 8th International techno-scientific conference on Surface Layer – SL’14 (Gorzow-Warsaw, Poland, 25-26 November 2014)
- XXII Міжнародний науково-технічний семінар «Високі технології у машинобудуванні», ІНТЕРПАРТНЕР – 2014, (Україна, Харків-Одеса, 22-27 вересня 2014 р.)
- V Міжнародний молодіжний науковий форум (Львів, Україна, 26–28 листопада 2015 р.)
- Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології в машинобудуванні» (Україна, Львів) 2017, 2018 рр.
- Всеукраїнська науково-технічна конференція «Обладнання і технології сучасного машинобудування», (Тернопіль, Україна 2017 р.)
- International youth science forum “Litteris Et Artibus”, (Lviv, Ukraine, 23-25 November 2017)
- XVIII Міжнародна науково-практичної конференція «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», (Краматорськ, Україна 2018 р)
- Міжнародної науково-технічної конференція «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (Львів, Україна 25–26 жовтня 2018 р.).
- V Ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna «Problematyka funkcjonowania i rozwoju branży metalowej w Polsce. Innowacje technologiczne : streszczenia wystapien», (Jedlina, Polska 5–6 lipca 2018 r)
- The 2nd international conference on design, simulation, manufacturing: The innovation exchange, DSMIE-2019 (Lutsk, Ukraine, June 11–14, 2019)
- Grabchenko's international conference on advanced manufacturing processes (InterPartner-2019) (Odessa, Ukraine September 10–13, 2019)

- The 3rd International conference on design, simulation, manufacturing: The innovation exchange, DSMIE-2020 (Kharkiv, Ukraine June 9-12, 2020).
- II Міжнародна науково-технічна конференція “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту (Вінниця, Україна, 13-15 травня 2021р)
- Семінарах у Кінгстонському університеті. Лондон (Великобританія, 2017, 2018, 2019, 2020)

### **Публікації**

Основні результати роботи опубліковано у 41 друкованій праці, серед яких – 5 наукових статей, що входять у наукометричну базу Scopus, 4 наукові статті у іноземних виданнях, 1 – праця в колективній іноземній монографії, 13 – наукових статей у виданнях України (з них 6 одноосібних), 2 патенти на корисну модель, 1 позитивне рішення щодо патенту на винахід та 15 тез конференцій.

### **Структура і обсяг роботи**

Дисертаційна робота, складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 357 назв, містить 199 рисунків, 10 таблиць, а також додатків на 40 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації – 347 сторінки. Загальний обсяг дисертації складає 458 сторінок.

### **На захист виносяться такі основні положення**

1. Розроблена математична модель та теоретичні дослідження впливу параметрів фрикційної обробки та геометричних параметрів робочої поверхні інструмента (ширина пазів та їх кількість) інструмента на термопружні характеристики поверхневих шарів деталей машин.

2. Розроблені динамічні моделі процесу фрикційної обробки плоских і циліндричних поверхонь деталей машин та теоретичні дослідження впливу

параметрів фрикційної обробки та геометричних параметрів робочої поверхні інструмента на динамічні характеристики поверхневих шарів деталей машин.

3. Встановлені закономірності впливу основних параметрів фрикційної обробки на фізико-хімічні процеси формування зміцненого шару.

4. Встановлені експериментально закономірності впливу режимів фрикційної обробки та форми робочої поверхні інструмента на фізико-механічні характеристики зміцненого шару (товщина, твердість, шорсткість, топологія поверхні).

5. Отримані експериментальні дані досліджень впливу фрикційної обробки на структурно-напружений стан поверхневого шару, зносотривкість при різних видах тертя (без мащення, з граничним мащенням, у оливо-абразивному середовищі), втомну контактну міцність.

6. Розроблену технологію фрикційної обробки деталей технологічного оснащення, проведені дослідно-промислові випробування і результати їх впровадження у виробництво та навчальний процес.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН ТА ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

#### **1.1. Стан поверхні та несуча здатність поверхневого шару деталей машин**

Надійність – найбільш використовуваний показник якості деталей машин, за допомогою якого можна визначити експлуатаційні показники такі як: зносостійкість, міцність посадок та спряжень, втомна міцність, корозійна стійкість. Матеріал виробу, точність виготовлення та якість поверхні безпосередньо впливають на експлуатаційні властивості машини. Будь-який вид руйнування бере свій початок з поверхні деталі, тому від якості поверхневого шару деталей, які між собою знаходяться у контакті, та під якою розуміється геометричні параметри, механічні та фізико-хімічні властивості, залежить надійність машини. До оцінки якості поверхневого шару необхідно також віднести комплексну оцінку стану поверхні, різні види нерівностей (форма поверхні, шорсткість, субшорсткість, хвилястість) фізико-хімічні властивості (хімічний склад, структура, фазовий склад, залишкові напруження, мікротвердість, екзоелектронна емісія), механічні властивості (границя міцності, границя текучості, тріщиностійкість, втомна міцність, зносостійкість, контактна жорсткість) [1 – 11].

Геометрія реальної поверхні суттєво відмінна від ідеальної, на якій присутні макро- і мікронерівності, що у великій мірі мають вплив на експлуатаційні властивості деталей машин. Процеси, які проходять у поверхневому шарі деталей під час їх експлуатації і їх робочі характеристики залежать суттєво від стану шару, який отриманий при технологічному обробленні, особливостей контактної взаємодії, умов навантаження. Взаємозв'язки вище перелічених факторів формують складну динамічну систему, де в процесі експлуатації зміна стану поверхневого шару

відбувається зі зміною умов навантаження та властивостей контактної взаємодії. Процес припрацювання робочих поверхонь супроводжується формуванням на поверхні вторинних структур, які у свою чергу призводять до зменшення коефіцієнта тертя спряженням, тобто у свою чергу призводить до зменшення діючих навантажень та зміни їх характеру [12].

Дана динамічна система, так само як будь-яка система, має можливість бути в стані стійкої рівноваги, тоді коли якась зміна у поверхневому шарі або навантаження, які є рівнодіючими формують процеси, що вводять систему в стан рівноваги (зруйновані вторинні структури замінюються новими, припрацювання та затягуванні утворених задирів і ін.). Також, можливі саме такі умови навантаження, при котрих для параметрів поверхневого шару неможливий стан рівноваги динамічної системи. Тобто в тому випадку нормальні умови контактної взаємодії не забезпечуються (немає стабільних вторинних структур, формуються задири, сила тертя зростає, відбувається інтенсивне абразивне зношування).

Від конструкції вузлів (типу) та умов їх експлуатації залежать характер та значення навантажень. Якщо неможливо зменшити діючі навантаження або нераціонально їх зменшувати за допомогою конструкторських рішень (наприклад зміною матеріалів, конструктивних елементів, габаритних розмірів), тоді за допомогою різного типу методів поверхневого зміцнення, що дають можливість змінити стан поверхневого шару і у свою чергу сформувати стан рівноваги системи «поверхневий шар – умови навантаження». Досить часто для динамічної системи стан рівноваги взагалі не можливо досягти при експлуатації спряжень в умовах динамічного навантаження. Тому для підвищення ресурсу роботи виробів та зменшенню швидкості їх зношування у таких випадках раціонально використовувати технологію поверхневого зміцнення (оброблення). Досить важким є завдання подати прямий зв'язок експлуатаційних властивостей сформованого поверхневого шару з даних параметрами. Також розв'язування такого типу завдань обтяжується через процеси, які проходять при експлуатації в поверхневому шарі, а також різні

умови навантаження [13].

Хімічний склад, мікрогеометрія та структурно-фазовий стан визначають ресурс та працездатність багатьох відповідальних деталей, тому що, в процесі експлуатації поверхневий об'єм матеріалу несе найбільше навантаження та контактну дію самого спряження деталей, а також найперше взаємодіє з зовнішнім середовищем. За допомогою різних технологічних методів та засобів можливо отримати відповідний поверхневий шар до заданих умов експлуатації, керувати структурою та фазовим складом, рівнем залишкових напружень, твердістю, мікрогеометрією, також особливою здатністю «затягувати» пори, мікротріщини та іншого типу дефекти, а саме основне забезпечувати зміцнення [1, 4, 8, 10].

## **1.2. Технологічні методи зміцнення поверхневих шарів та легування деталей**

В даний час, галузь машинобудування масово починає застосовувати технологічні методи зміцнення поверхневих шарів металу. За допомогою технологічних методів такого типу зміцнення є змога керувати якісними показниками формування поверхневих шарів деталей, тобто їх: мікротвердістю, мікро- та макро відхиленнями, знаком, а також глибиною залишкових напружень. Технології поверхневого зміцнення між собою суттєво відрізняються за фізико-хімічною природою самого процесу, технічними показниками, сферою застосування та ефективністю [1, 4, 9, 11, 13, 14 – 16].

За допомогою нанесення різного типу поверхневих покриттів або модифікуванням поверхневого шару металу можна отримати зміцнені робочі поверхні деталей машин. Якщо використовувати метод модифікування поверхневого шару, то кристалічна структура металу залишається незмінною. Процес зміцнення відбувається завдяки зміні фазового, напруженого стану, а

за певних умов і хімічного складу зміцнювального поверхневого шару металу. А от використовуючи метод нанесення покриттів між основним металом і покриттям обов'язково є зона (лінія) розмежування, що абсолютно відсутня при модифікуванні. Експлуатаційні характеристики деталей машин, в основному залежать від властивостей поверхневого їх шару. Окрім того, досить вагомим фактором є те, що поверхнєве зміцнення у порівнянні з повним об'ємним зміцненням майже завжди є менш ресурсозатратним та трудомістким [17 – 28].

Технологічні методи зміцнення металів умовно зведено у шість класів (рис. 1.1). Слід зазначити, що за допомогою технологічних методів з одного класу можна виконати процеси різних типів, тому що зовнішні умови проходження цих процесів неоднакові: у газовому середовищі; у рідині; без використання теплоти або з використанням теплоти, високому тиску, підвищеному тиску чи при нормальному тиску; у діелектричному середовищі чи електропровідному середовищі і т.д. Складні особливості технологічних процесів характеризують поєднання умов протікання процесів.

Із шести умовно сформованих класів саме третій клас вважають найперспективнішим, тобто напрям зміцнення за допомогою зміни структури поверхневого шару. Саме до даного класу відносяться чотири методи зміцнення: фізико-термічна обробка, наплавлення легованим металом, електрофізична обробка і механічна обробка (рис. 1.2) [4, 11, 16, 22, 26, 28-30].

Технологічний метод фізико-термічного оброблення включає в себе плазмове поверхнєве та лазерне зміцнення [30 – 42].

На даний час, технологія зміцнення поверхонь використовуючи лазерний промінь широко використовується у машинобудуванні і є надзвичайно актуальним, якщо необхідно здійснити зміцнення не всього об'єму металу, а лише поверхні, або ділянок дуже малих розмірів чи поверхонь у яких складний контур. Дане оброблення здійснюється з використанням оптичного квантового генератора (лазера). Цей тип поверхневого зміцнення за допомогою лазера характеризується деякими особливостями, а саме:

можливістю виконання зміцнення локальних (за площею та глибиною) об'ємів матеріалу зміцнювальної деталі саме у тих в місцях де проходить зношування; локальним зміцненням поверхні у місцях з важкодоступними заглибленнями; поверхневим «плямистим» зміцнення великої площі деталей; отриманням на зміцнених поверхнях заданої мікрошорсткості; через локальне термічне оброблення відсутня деформація деталей; простотою процесу автоматизації технологічної операції оброблення за допомогою променя лазера за контуром деталей різної форми та складності [43–53].

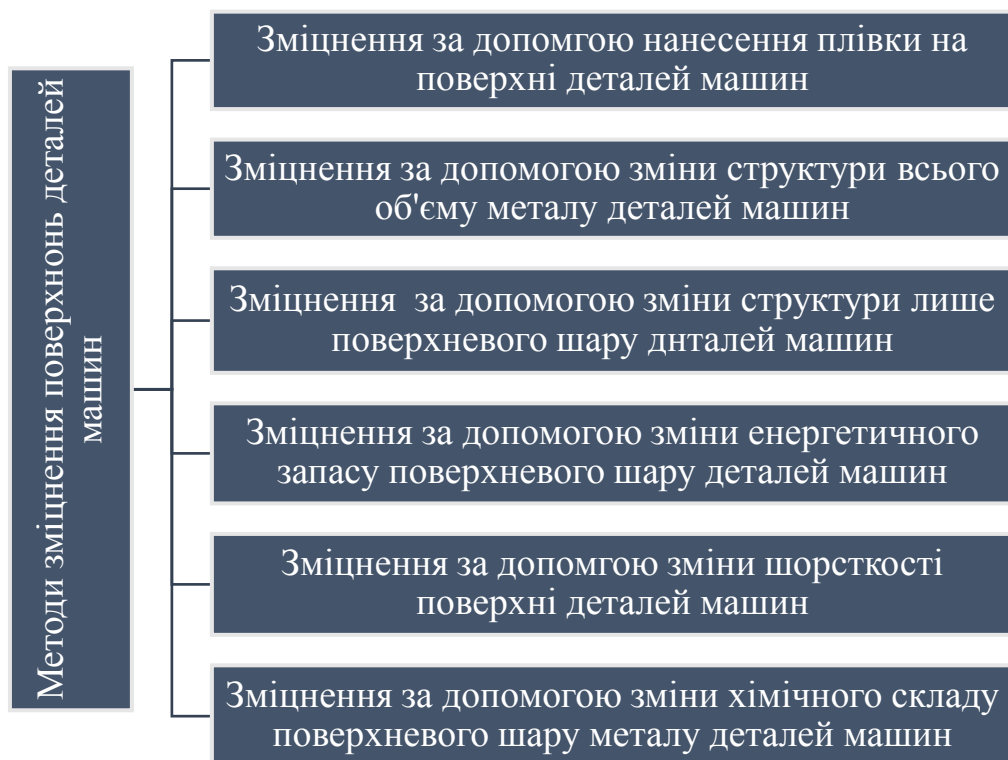


Рисунок 1.1. – Методів поверхневого зміцнення та їх класифікація

При використанні для зміцнення лазера, на локальну поверхню діє висококонцентрований лазерний промінь, який її нагріває. Суть даного процесу полягає у швидкісному нагріві зміцнювальної поверхні до температури, яка перевищує значення температури фазового перетворення  $A_{C3}$ , але у свою чергу є нижчою за значення температури плавлення, з наступним одночасним швидким охолодженням завдяки віддачі тепла в основний об'єм деталі. У сталі формується мартенсит і залишковий аустеніт



при даній обробці лазерним променем. Лазером можливо забезпечити поверхневе зміцнення на відносно секторах, що мають обмеження практичне що рахунок діаметра променю, яке може складати у межах 1-1,5 мм [54–64].

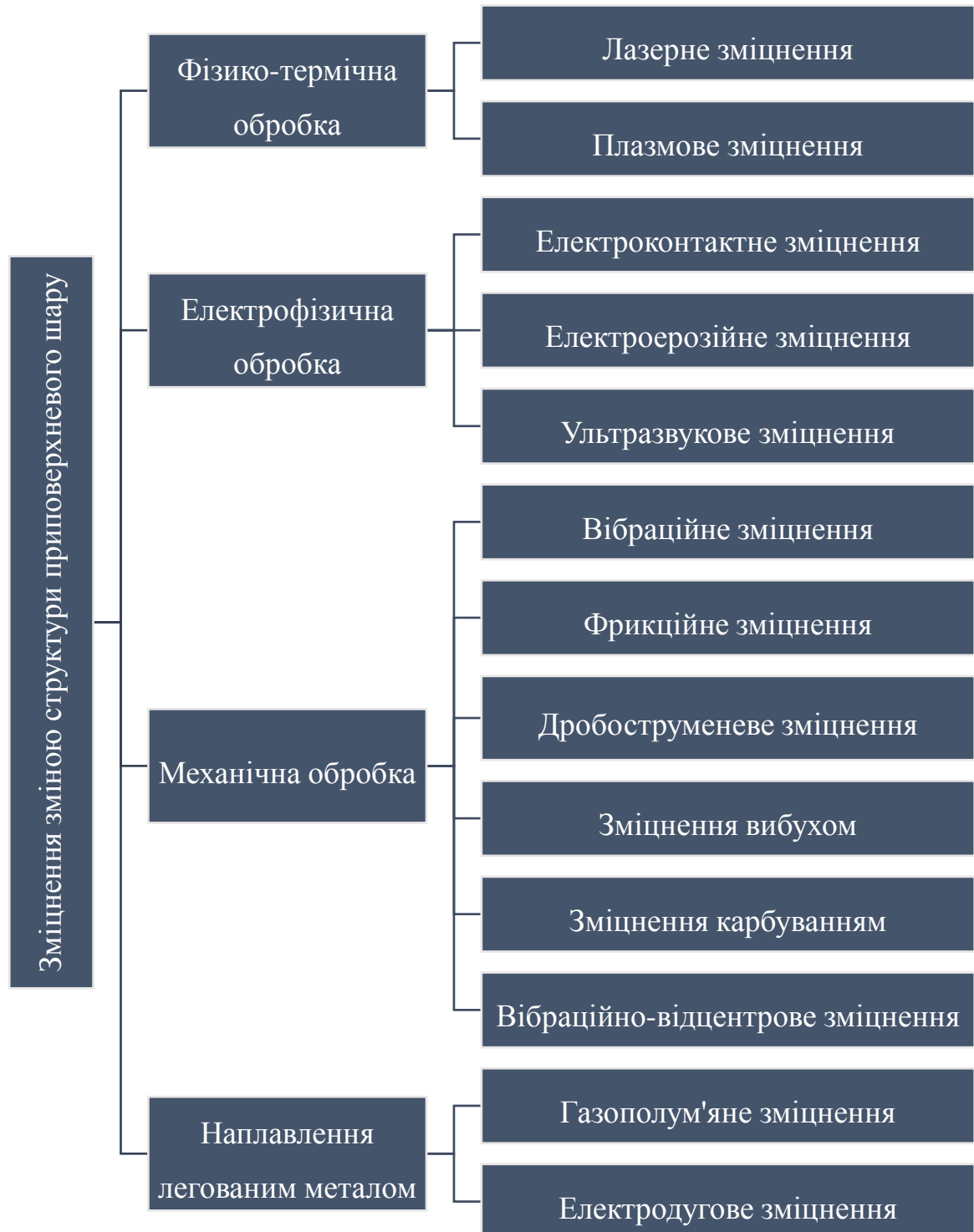


Рисунок 1.2. – Зміцнення за допомогою зміни структури поверхневого шарів

Процес поверхневого зміцнення лазерним променем визначається наступними головними параметрами такими як: енергія в імпульсі, питома потужність імпульсу, а також час імпульсу [35, 39, 43, 44, 49, 52].

Твердість в зоні оброблення лазером збільшується від 600-850 *HV* до 850-1100 *HV*, так як в структурі поверхневого шару формується дрібнозернистий мартенсит, який формується через швидке нагрівання та охолодження. Глибина зміцненої одиничної зони досягає до 0,9 мм. Після лазерного зміцнення шорсткість не змінюється [65–75].

Також на даний час ефективно і широко використовується у виробництві технологічний метод плазмового поверхневого зміцнення [76]. Даний метод подібний до методу зміцнення за допомогою лазерної дуги і полягає в термічних, структурних і фазових перетвореннях, що проходять під час швидкого локального нагріву поверхні деталі плазмовою дугою, та швидкого охолодження за рахунок відведення теплоти в основний об'єм матеріалу деталі [77–79].

Метою даного плазмового зміцнення є підвищення ресурсу експлуатації деталей машин завдяки зміцненні поверхневого шару робочої поверхні (товщина зміцненого шару до 1,2 мм). Основна суть даного методу полягає у термічному обробленні за рахунок плазмової дуги при та незмінному хімічному складі матеріалу, а також у внутрішніх шарах зберігаються первинні властивості вихідного металу [77–84].

Найбільш широко використання для генерування плазмового джерела нагрівання мають плазмотрони із відкритою дугою прямої дії (на зміцнювальну деталь подається додатній заряд), чи із закритою дугою непрямої дії (на зміцнювальну деталь подається від'ємний заряд) [78, 83].

Теплофізичною суттю цього методу зміцнення є саме висока швидкість нагріву та подальшого охолодження, досить висока температура нагріву і саме основне досить малий час перебування оброблювального матеріалу в інтервалі температур, що перевищують точку фазового перетворення [76–83, 86]. Дана технологічна операція поверхневого зміцнення це результат локального

високошвидкісного нагріву поверхневого шару оброблювальної деталі плазмовою дугою до температури фазового перетворення (точка  $A_{C3}$ ) і подальшим швидким його охолодженням, яке проходить за рахунок тепловідведення у основний об'єм матеріалу деталі. При використанні методу плазмового зміцнення поверхонь залізовуглецевих сплавів формується модифікована мартенситно-аустенітна структура у зоні термічного впливу, глибина якого рівна 0,5...2,5 мм. Залежно від вибраних режимів оброблення, а також самого структурного стану структура має здатність змінюватись [76, 80–87].

Структура поверхневого шару, яка сформована при швидкісному нагріванні та охолодженні має високу зносостійкість, твердість та опір руйнуванню. Ефект від технологічної операції плазмового зміцнення спостерігається підвищеними експлуатаційними властивостями деталей за рахунок зміни у поверхневому шарі його фізико-механічних характеристик, формуванням специфічної структури та фазового складу металу, і на поверхні наявністю стискаючих залишкових напружень [88].

Електрофізичні методи обробки також належать до технологічних методів поверхневого зміцнення деталей машин із використанням висококонцентрованих джерел енергії. Оброблення поверхневих шарів з використанням даних методів зміцнення відбувається за рахунок концентрації високої потужності на локальній ділянці поверхні, значення якої становить  $10^3 \dots 10^8 \text{ Вт/см}^2$ . Енергія електромагнітного поля чи електричного струму переходить у теплову енергію в зоні обробки, і це дає змогу плавити та навіть випаровувати метал. Отримати високу концентрацію можливо за рахунок локалізації енергії, що виділяється в часі і просторі через підведення її у канал розряду, потік плазми, промінь лазера чи електричний заряд [90].

Електроконтактні технологічні методи базуються на принципі використання тепла, що формується за рахунок проходження електричного струму через ланцюг якому зосереджений підвищений опір, тобто через

контакти. Так як даний технологічний метод поверхневого зміцнення за технологічністю є досить простий та і економічний, то він набуває більш широкого використання [4, 9, 11, 30, 95]. Тобто, основна суть цього методу знаходиться у тому, що під час проходження електричним струмом, який має задану густину замкнутим ланцюгом, то в процесі якого і проходить виділення тепла. Тому при заданій силі струму ступінь тепловиділення залежить від опору ланцюга, тобто температура може отримати значення близько  $3 \dots 5 \cdot 10^3$  K/c на ділянках з високим опором [90–95].

Електроерозійні технологічні методи оброблення використовують процес електричної ерозії, тобто електропровідних матеріалах проходить направлене локальне руйнування і під дією теплових імпульсних електричних розрядів, що виникають між електродом-інструментом та електродом-заготовкою.

Технологічна операція електроерозійного поверхневого зміцнення та покриття є різновидом електроерозійного оброблення і виконується за допомогою вібруючого електрода-зміцнювача у повітряному середовищі. Тобто, проходить термічне оброблення, дифузія та перенос легуючих елементів електрода-зміцнювача за рахунок короткій дії високої температури. Даний метод застосовують для покращення фізико-механічних параметрів металевих поверхонь: підвищення жаростійкості, корозійної стійкості, зносостійкості, тощо. Основна перевага даного технологічного методу полягає у можливості керувати експлуатаційними властивостями покриттів, також змінювати структурні та фізико-хімічні характеристики електродних матеріалів [4, 9, 11, 29, 30]. А ось низька продуктивність процесу електроерозійного зміцнення це основний недолік. Тому через низьку продуктивність процесу електроерозійного оброблення переважно його практичне застосування – локальне нанесення покриттів, тобто поверхневе зміцнення ділянок, що є невеликі за площею [93–95].

Технологічна операція ультразвукового поверхневого зміцнення полягає у тому, що інструмент пластично деформує поверхневий та

приповерхневі шари деталей машин за рахунок дії динамічної сили та статичної сили, які формуються коливною системою (магнітострикційний перетворювач, концентратор та ультразвуковий генератор). Він одночасно згладжує нерівності, які сформувалися попереднім механічним обробленням, а також відбувається процес зміцнення. Особливістю даного методу є: висока ефективність, продуктивність, а також здатність здійснити оброблення поверхонь деталей, яким важко виконати процес зміцнення іншими методами. Також, можна підсилити ефективність використання іншими методами оброблення у поєднанні з ультразвуковим зміцненням. Отже, здатність формування поверхневого або об'ємного зміцнення, а також їх комбінації це досить вагома перевага технологічного методу ультразвукового зміцнення. При даному методі можливо отримати у металі сприятливий розподіл залишкових напружень і, що дуже важливо, такий структурний стан, що дає змогу підняти в 2-3 рази запас міцності деталей машин, яких робота виконується при дії змінних навантажень, а також суттєво підвищити термін їх експлуатації. Технологічний метод ультразвукового зміцнення збільшує мікротвердість до 180% та зносостійкість у 1,5-1,8 рази, а глибина шару після зміцнення рівна в межах 1,5 мм [96–101].

Технологічна операція фрикційного зміцнення та технологічна операція поверхневого пластичного деформування (дробоструменеве, зміцнення карбуванням, вибухом, вібраційне та вібраційно-відцентрове зміцнення, та ін.) відносяться до механічних методів поверхневого зміцнення [98, 102–118].

Технологічну операцію поверхневого пластичного деформування можна застосувати для підвищення твердості поверхневого шару металу, опору втомному руйнуванню, а також для створення у поверхневому шарі залишкових напружень стиску і формування рельєфу мікронерівностей на поверхні деталі відносно технічних вимог [106–119].

Механічна обробка також є технологічним методом за допомогою якого можна на стадії виготовлення керування якістю поверхневих шарів, а також є

способом за допомогою якого є можливість отримати деталі певної розмірів та форми [5–9, 90,92].

Технологічна операція фрикційного оброблення входить у класифікацію як метод поверхневого зміцнення поверхонь деталей машин з використанням висококонцентрованих джерел енергії. При дослідженні температурних, а також силових параметрів, які виникають під час даної технологічної операції показали, що для формування зміцнених (білих) шарів необхідні тиски і температури, які можна отримати, за рахунок підвищення тертя між оброблюваною деталлю та інструментом. Технологічний метод фрикційно-зміцнювального оброблення за процесом виконання подібний до шліфування, обов'язковою умовою якого є встановити на шпиндель шліфувального верстата інструмент у вигляді металевого диску, а сам процес оброблення деталі здійснюється аналогічно процесу шліфування. Також слід зазначити, що у зону контакту деталь-інструмент необхідно подавати технологічне середовище (наприклад мінеральна олива), яка насичує оброблювальний шар вуглецем та покращує мікрогеометрію поверхні. Так як інструмент використовується, який виготовлений з металу, то це дає змогу суттєво збільшити швидкість оброблення (40-70 м/с і вище), тобто можливість утворити високу температуру, а також тисків під час процесу оброблення у зоні контакту інструмента з деталлю. Значення шорсткості поверхні після даної технологічно операції досягає  $R_a = 1,0-0,16$  мкм. Як матеріал інструмента використовуються вуглецеві сталі у стані постачання. Вибір матеріалу інструмента здійснюється таким чином, щоб досягнути максимальну різницю за фізико-механічними властивостями між матеріалом інструмента та оброблюваної деталі, до дасть змогу уникнути процесу налипання металу та наступним формуванням наросту. Тобто, якщо слід провести процес зміцнення загартованих деталей рекомендується використати інструмент із іншої марки сталі та у незагартованому стані. Даний технологічний процес поверхневого зміцнення циліндричних поверхонь

деталей машин можна виконати на токарно-гвинторізних верстатах. Для здійснення такої технологічної операції інструмент встановлюють на шпindelь спеціального пристрою з автономним приводом інструмента. Цей пристрій встановлюється замість різцетримача на супорт верстата [102–104].

Даний технологічний метод дає змогу виконувати поверхнєве зміцнення не лише плоских чи циліндричних поверхонь деталей машин, а також поверхні різного профілю, навіть профіль різі. Отже, для усіх сталей, для яких можливий процес гартування, а також для сірих і високоміцних чавунів можливо застосувати технологічну операцію зміцнення поверхневого шару з використанням фрикційного оброблення.

Технологічний метод наплавлення використовуючи леговані метали можна використати для підвищення зносостійкості поверхонь деталей машин, які саме працюють в умовах великих знакозмінних навантажень, в умовах високих температур, агресивному середовищі. Також цей технологічний метод можна застосувати з метою заміни дорогих та дефіцитних металів.

Для наплавлення легованого матеріалу можна застосувати стрічкові електроди чи суцільні дротяні, що покриті обмазкою. У вміст обмазки входить легуючі домішки, кількість яких регулюється залежно від властивостей та складу наплавленого шару металу. Також можливий такий варіант виконання коли електроди мають форму дроту та спечені з металевих порошків. Завдяки рівномірному в електроді розподілі легуючих елементів наплавлений метал за допомогою порошковими спеченими електродами є досить однорідним. Наплавлення може бути багатошарове і мати товщину від 3 мм до 10 мм, кількість шарів переважно залежить від марки електроду і дорівнює 1-3. Слід зазначити, що після наплавлення легованим металом поверхні деталі, необхідно провести наступне оброблення абразивним інструментом, та обов'язково провести відпуск тривалістю у 1-2 год., для зняття внутрішніх напружень. Також важливим моментом є те, що при струмі оберненої полярності, тобто коли мінус підключено до деталі, плюс підключено до електроду можна отримати високу якість наплавлення [120].

Також широкого застосування має технологічний метод наплавлення легованим металом при застосуванні тепла від газового полум'я. Розрізняють три види газополум'яного поверхневого зміцнення, такі як: дротяне, пруткове та порошкове. Необхідно використати присадні матеріали у вигляді металевого стержня чи порошоків для виконання процесу зміцнення даним методом. Даний технологічний метод полягає у нагріванні та пластифікації металу покриття за допомогою газовому полум'я, тобто горінні підготовленої суміші кисень–горючий газ, яка розпилюється на зміцнювальну поверхню. Температура горіння даної суміші може становити 2500-3200 °С. Технологічний метод газополум'яного зміцнення має наступні переваги: висока міцність покриттів, незначне окислення металу, дрібне розпилення, а до недоліків можна віднести низьку продуктивність процесу 2-4 кг/год [2, 5, 7].

### **1.3. Фізико-хімічні та механічні умови формування зміцненого шару**

Дослідження структурно-напружений стан загартованої сталі та впливу на нього певних видів механічної обробки показують, що можуть сформуватися такі умови при певних режимах в зоні оброблення (операція точіння, шліфування, тощо) при котрих має здатність утворитися зміцнений білий шар. Шліфувальний припал є негативним та небезпечним структурними концентраторами напружень, що досить добре відомо з різних джерел. Зміцнений білий шар за структурою аналогічний шліфувальним припалам. Так як припали виникають у деяких місцях на шліфованій поверхні, то вони є не бажаними, також на шліфованій поверхні створити рівномірний і суцільний припал, тобто мається на увазі зміцнений білий шар досить складно, а навіть у деяких випадках неможливо.

Щоб створити зміцнений білий шар на робочих поверхнях деталей машин, який володіє специфічним структурно-напруженим станом, або навіть



має нанокристалічну структуру, необхідно використати такий технологічний метод, під час виконання якого відбувається процес швидкісного нагрівання поверхневого шару металу, також його інтенсивне деформування з наступним етапом швидкісного охолодження [121–123].

Проведені експериментальні дослідження впливу на фізико-механічні властивості, структуру, опір корозійному та втомному руйнуванню загартованих сталей режимів оброблення використовуючи лезове (точіння) та абразивне оброблення дали змогу запропонувати декілька способів формування білих шарів на чавунах і гартованих сталях [124–158]. Найбільш використовуваним способом створення нанокристалічної структури в поверхневих шарах є нанесення покриттів за допомогою технологічного методу *PVD* і *CVD* [22]. Абсолютно іншим технологічним методом формування нанокристалічного шару є зменшення розміру зерен, тобто їх подрібнення в поверхневому шарі деталей машин до нанометричного розміру використовуючи інтенсивну пластичну деформацію, в яку також входить і тертя в контролюючому середовищі, піскоструйний або ударний наклеп, механічне стирання, дробоструменеве, прокатне, ультразвукове, лазерне, плазмове оброблення та ін. [159–171].

Нанокристалічні структури – це структури, які містять структурні елементи, геометричні розміри яких хоча в одному вимірі мають розмір менше за 100 нм, та володіють якісно новими функціональними і експлуатаційними властивостями. Найбільш суттєво інші властивості наноматеріалів є в діапазоні розміру кристалів 10-100 нм. Основна причина суттєвої зміни властивостей наноматеріалів це зменшення розміру зерен при збільшенні об'ємної долі границь розділу зерен [172–176].

Збільшити міцність поверхневого шару можна завдяки:

- Зміні у приповерхневих шарах їх структурних параметрів. Можна отримати при механічному зміцненні, значно подрібнюється структура оброблюваного металу, а кількість дислокацій збільшується, що впливає на зміцнення поверхневого шару.

- Зміні у приповерхневих шарах їх фазового стану. Даний спосіб використовують при термічних технологічних методах так як висока температура є основним чинником даного способу. Для покращення ефективності оброблення поверхневих шарів даний спосіб зміни фазового стану матеріалу можливо використовувати у поєднанні з іншими технологічними способами підвищення твердості.

- Зміні у приповерхневих шарах їх хімічного складу. Даний спосіб використовується переважно при хімічному обробленні, а також досить часто використовується у парі з попереднім способом.

- Нанесенні або напаяванні покриттів, що мають суттєво кращі фізичні характеристики [177–183].

Формування зміцнених поверхневих шарів можливо за рахунок складних перетворень всередині них. Важливу роль відіграє саме хімічні, а також структурно-фазові параметри даних шарів. Переважно структурні перетворення проходять завдяки впливу теплових та механічних взаємодій, тоді як фазові – лише від температурного впливу. Здійснити зміну хімічного складу поверхневого шару за рахунок насиченням його різними легуючими елементами із зовнішнього середовища, і теж завдяки перерозподілу домішок у матеріалі або наявних легуючих елементів через температурний вплив [184–191].

Умови, які є необхідними для утворення зміцнених шарів при нехімічних технологічних методах оброблення є наступні:

1. Циклічні різнонаправлені навантаження.
2. Висока ступінь деформації.
3. Висока швидкість деформації (приблизно  $10^3 - 10^4 \text{ c}^{-1}$ ).

Висока швидкість та ступінь деформації сприяє виникненню високої густини полісистемних механізмів-двійників, що призводить до акомодатії деформацій. При надзвичайно високій швидкості та ступені деформації можливе зменшення товщини двійників до нанометричних розмірів. Такі

надтонкі перетини двійників призводять не лише до формування субзерен, а також і до мартенситного перетворення в нанометричній об'єм.

Основна перевага технологічних методів механічного отримання нанокристалічного поверхневого шару у порівнянні із технологічними методами нанесення покриттів це саме відсутність проблеми створення плавного переходу властивостей та мікроструктури між основним об'ємом матеріалу та поверхневим шаром. Також автоматично і відсутня проблема з адгезією, яка відіграє основну роль впливає на експлуатаційні властивості поверхневих покриттів, а процедура формування наноструктури ніяк не пов'язана зі зміною хімічного складу матеріалу [177–191].

Також відомо те, що кінетичні та термодинамічні умови будь-якого оброблення металу суттєво впливають на фазові переходи, структурні зміни та взагалі на формування фізико-механічного стану. Фазові і структурні перетворення в сплавах при підвищених швидкостях нагріву, як показали систематичні дослідження, в основному пов'язані, зі зворотнім мартенситним перетворенням, також слід відзначити, що швидкий нагрів, а особливо сплавів, що знаходяться у метастабільному стані, дає змогу отримати такі структури, що не можливо створити стандартними видами термічної обробки.

Формування нанокристалічних структур приводить до зміни термодинамічних (температура плавлення, температура фазового переходу, коефіцієнт дифузії, теплопровідність) та механічних (твердість, модуль пружності, зносостійкість, в'язкість, та ін.) властивостей поверхневого шару. Зростання твердості і міцності відбувається за рахунок зменшення розміру зерен, так як зменшення розміру зумовлене формуванням додаткових границь зерен, і для руху дислокацій є перешкодою. Зростання міцності при малих нанорозмірних зернах відбувається через складність формування нових дислокацій та низьку густиною вже існуючих дислокацій. А величина мікротвердості нанокристалічного шару в 2-7 разів вища за твердість великозернистих аналогів, і що саме головне, що не існує ніякої залежності від вибору технологічного методу її досягнення [191–202].

При проведенні дослідження з твердості матеріалів у відповідності до залежностей розміру зерен було досліджено те, що зниження твердості проходить при зменшенні розміру зерен нижче за певний критичний розмір. На рис. 1.3 подано схему зміни границі текучості, твердості при зменшенні розміру зерна до так званого критичного розміру (10 нм). Також слід відмітити, що подальше зменшення розміру зерен до 7 нм або і менше навпаки призводить до збільшення твердості, тобто спостерігається зворотній ефект Холла–Петча, тобто так зване «розміцнення металу» при зменшенні розміру зерна [165–166, 173–176].

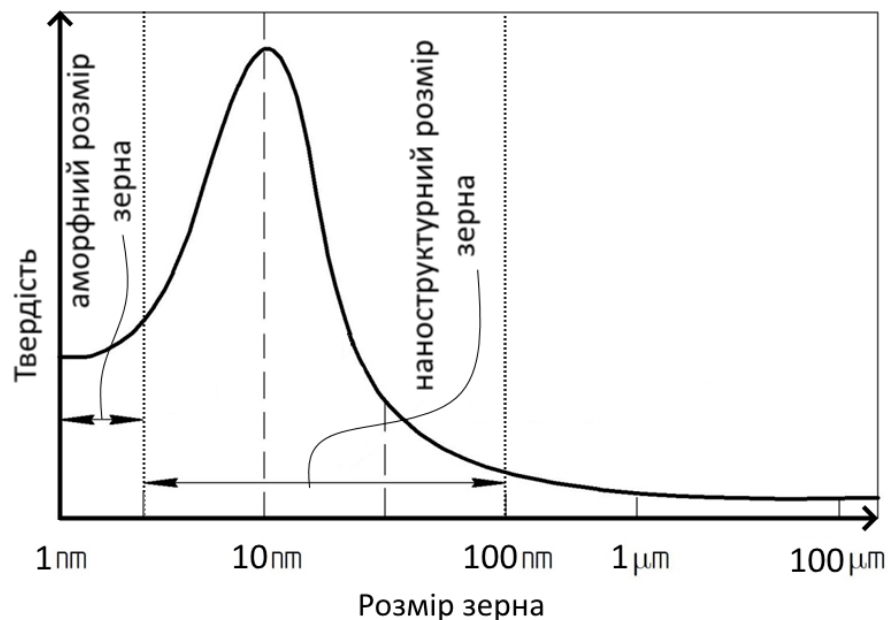


Рисунок 1.3 – Схема зміни границі текучості та твердості при зміні розміру зерна

Залежність розміру зерна до твердості нанокристалічного шару є складною, слід звернути увагу на механізм його деформування – тобто зерна взаємно проковзують границями (ротаційне розміцнення), у якого характер є недислокаційний. У кристалах зерен розміром меншим за 10 нм відсутні дислокації, а їх зернографічна фаза подібна за структурою до аморфної [204–210].

Відомо, що при формуванні аморфної структури у металах відбувається зміна магнітних, електричних, механічних та інших їх властивостей. Також, у аморфних матеріали присутній ближній порядок мають у їх структурі, який є метастабільною системою і якщо нагрівати його до температури кристалізації, то починається перебудова в звичайну кристалічну структуру. Переважно більшість аморфних сплавів має температуру кристалізації в межах 650-1000 К. Теж слід відмітити, що густина аморфних сплавів є нижча на 1-2% за густину кристалічних аналогів, а ось їх твердість вища у 5-10 разів. Це пояснюється відсутністю границі зерен та дислокацій. Вакансії в аморфних сплавах відрізняються розмірами та іншою формою, і отримали назву «вакансоподібні» дефекти, а їх вигляд нагадує вузькі щілини і атоми не можуть в них розміститись. За рахунок такого типу дефектів існує перешкода проходженні процесу дифузії елементів через аморфний поверхневий шар [204–210].

Важливою рисою аморфних сплавів є дуже чіткий лінійний зв'язок між міцністю та твердістю. Їх енергія руйнування та ударна в'язкість суттєво перевищують параметри звичайних кристалічних матеріалів [205, 209, 210].

Усі технологічні методи поверхневого зміцнення, які полягають у використанні висококонцентрованих джерел енергії основним завданням є створення зміцнених поверхневих шарів, завдяки яким відбувається підвищення довговічності робочих поверхонь деталей машин. Нанокристалічні шари формуються при використанні технологічних методів поверхневого зміцнення з висококонцентрованим джерелом енергії при наступних умовах. За рахунок дії висококонцентрованого джерела енергії відбувається нагрів поверхневого шару з великими швидкостями до високої температури, яка є вищою за точку фазового перетворення, наступним етапом є швидке охолодження завдяки відведенні теплоти в об'єм деталі, а також додатково можливий процес високошвидкісного їх деформування. Час дії на одиничну площу поверхневого шару джерела енергії є досить малим (

$\sim 10^{-3}$  с). Під час оброблення проходить процес високошвидкісного гартування поверхневого шару та відбуваються складні температурно-фазові перетворення. Після впливу такого технологічного методу на поверхневий шар набуває якісно нові характеристики, тобто змінюється його фізико-механічні властивості і структура, що суттєво впливає на довговічність деталей під час їх експлуатації. [199–202].

Суть технологічного методу поверхневої наноструктуризації є у формуванні в поверхневому шарі значної кількості дефектів і границь розділу, що є необхідно для зміни вихідної мікроструктури на структуру з нанорозмірними кристалами, а сама великозерниста структура повинна залишитися незмінною в об'ємі матеріалу. Технологічний метод фрикційного оброблення є одним з найбільш підходящих процесів поверхневого зміцнення, так як у зоні контакту інструмент-деталь відбувається термопластична деформація з нагріванням вище точки фазового перетворення та з наступним його швидким охолодженням, що додатково допомагає наноструктуризації поверхневих шарів металу деталей машин через коалесценції субзерен. Так як механізм коалесценції субзерен має властивість зберігати дефекти у динамічно-рекристалізованих об'ємах, то гетерогенність зміцненої поверхні зростає, що має вплив на корозійні властивості зміцненого шару. Слід зазначити, що процеси рекристалізації за рахунок динамічної складової особливо інтенсивно розвиваються в процесі перервного фрикційного оброблення (інтенсивні ударні навантаження у зоні контакту інструмент-деталь). Для забезпечення високої працездатності зміцнених поверхонь деталей машин для заданих умов експлуатації можна здійснити шляхом визначення оптимальних режимів оброблення, інструмента та геометричних параметрів робочої поверхні, жорсткості технологічної системи, технологічного середовища, яке подається у зону оброблення. Висока температура та напруження у зоні контакту інструмент-деталь є важливою умовою створення якісної нанокристалічної структури у поверхневому шарі

деталей машин при використанні технологічного методу фрикційного оброблення [203].

Під час фрикційного зміцнення висококонцентрований потік енергії формуються завдяки високошвидкісному тертю інструмента по оброблюваній поверхні деталі. Також у зоні контакту інструмента з деталлю у поверхневому шарі металу формуються інтенсивні зсувні деформації. Якщо під час фрикційного зміцнення використовувати інструмент, який має поперечні пази на своїй робочій частині, то у зоні контакту додатково виникнуть ударні навантаження при входженні чергової робочої частини у контакт із деталлю. У зоні одиничного контакту інструмента з поверхневим шаром металу виникає складний температурно-напружений стан металу. У зоні контакту інструмента з деталлю, швидкість нагріву у поверхневому шарі локального об'єму металу становить  $5 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$  К/с, а швидкість охолодження становить  $10^4 - 10^6$  К/с. Так як інструмент має перервну робочу частину, то у зоні одиничного контакту проходить процес циклювання нагрівання і охолодження. Як вже відзначалося раніше, що поверхневий шар металу нагрівається до температури, яка є вище точки фазового перетворення  $A_{C3}$ . Отже, нанокристалічний зміцнений поверхневий шар металу (білий шар) за вище описаною технологією має можливість сформуватися так як присутнє високошвидкісне нагрівання з наступним високошвидкісним охолодженням, тобто проходить циклювання температури, а також інтенсивне ударне деформування локальної зони одиничного контакту. В даному зміцненому нанокристалічному шарі сформований суттєво інший структурно-напружений стан металу, з іншими властивостями які появляються після процесу звичайного гартування. Тобто, відбувається підвищення міцності, твердості та одночасно в'язкості сталей [165, 167, 173, 197–202]. Для покращення шорсткості зміцнюваної поверхні, якості деталі в цілому та усунені процесу схоплювання інструмента з оброблювальною поверхнею деталі технологічне середовище подається у зону обробки під час технологічної операції фрикційного зміцнення. Під дією високої температури та тиску у зоні оброблення олива розкладається на

атомарний вуглець та відбувається його масоперенос у поверхневі шари оброблюваної деталі, що допомагає формуванню якісного зміцненого шару обробленої деталі. Теж паралельно, формуються умови для цілеспрямованої корекції хімічного складу приповерхневих шарів під час фрикційного зміцнення завдяки подачі у зону контакту спеціального технологічного середовища, що містить різні добавки наприклад вуглецю, азоту, бору, нікелю, хрому та ін. Через дію силового поля ювенільних поверхонь, які появляються під час процесу оброблення металу, проходить механо- і термодеструкція добавок технологічного середовища та відбувається утворенням атомів і у деформований мета вони дифундують. Тобто за їх рахунок проходить зниження рівня вільної поверхневої енергії та полегшуються самі процеси пластичного деформування металу [102, 103, 192, 211–214].

#### **1.4. Вплив динамічних процесів та утворення і легування зміцненого шару**

Під технологічному процесі фрикційного зміцнення досить характерним є формування внутрішніх напружень у поверхневому шарі деталей машин. Величина напружень є досить значною і визначає властивості поверхневого шару металу. Внутрішні напруження формуються через неоднорідність деформації по об'єму металу, вони виникають через розширення (стискання) поверхневого шару під час швидкого нагрівання і охолодження [53, 102, 103, 215].

У роботі [104] подано технологічний процес фрикційного поверхневого зміцнення та вплив ударних навантажень при формування зміцнених шарів, а також представлено спеціальний інструмент у якого на периферії присутні поперечні пази, завдяки якому здійснюється формування якості поверхні високошвидкісним тертям робочої поверхні диска по поверхні заготовки, та паралельно ще проходить ударна взаємодія, яка формується за рахунок



почергового входження гладкої частини та паза в контакт із заготовкою. Було виконано дослідження двох типів оброблення: перше – оброблення з використанням інструмента із суцільною робочою поверхнею та інструмента на периферії якого присутні пази. Експериментально досліджено, те що оброблення поверхонь інструментом із пазами дає змогу отримати кращі якісні характеристики поверхні.

У роботі [88] представлені результати експериментальних досліджень залежності параметрів шорсткості оброблювальної поверхні при зміцненні зразків зі сталей 40Х і 90ХФ прямокутної форми і розмірами 50x50x10 мм від режимів плазмового оброблення. Представлено три режими оброблення: оброблення без оплавлення поверхні, з мікро- та макрооплавленням поверхневих шарів з використанням установки УПС-804 і з плазмотроном ППУ-004. Мікрорельєф поверхні після вищеписаних процесів оброблення залежить від характеру розподілу теплових полів у ньому та температури нагрівання поверхневого шару. Дослідження показали, що найкраще значення шорсткості можна отримати за допомогою оброблення з мікрооплавленням. Так як при цьому проходить оплавлення мікровиступів поверхні і відбувається згладження виступів на поверхневому шарі. Інтенсивний тепловий потік разом із газоплазмовою сумішшю при застосуванні методу макрооплавленні формує нову мікрогеометрію оброблювальної поверхні, відбувається швидке оплавлення мікровиступів і западини, розплавлений метал виплескується з них і після застигання формує нові мікронерівності. Тобто, оброблення з мікрооплавлення є найбільш прогнозованим і менше енергозатратним типом плазмового оброблення. Вихідну мікрогеометрію поверхні практично зберігає плазмове оброблення без оплавлення. У роботі [88] дослідження впливу температури на формування зміцнених шарів не здійснювалося. У статті [59] розглядається вплив комбінованого лазерно-плазмово-іонного оброблення на властивості поверхневих шарів. Дане оброблення є різновидом оброблення з використання висококонцентрованих потоків енергії, що не можна сказати про оброблення тиском. Подано в цій роботі ударну взаємодію, що виникає при

обробленні тиском і для отримання заданих характеристик в поверхневих шарах повинна формуватися густина теплового потоку  $10^{12}$ - $10^{14}$  Вт/м<sup>2</sup> з мінімальним часом нагрівання поверхні  $10^{-6}$ - $10^{-8}$  с. Щоб досягнути такі результати, лазерне зміцнення, яке базується на фазовому перетворення в поверхневому шарі, вимагає потік із мінімальною густиною випромінювання лазера  $10^7$ - $10^8$  Вт/м<sup>2</sup> і з тривалістю випромінювання на оброблювальну поверхню 0,02-1 с. У роботі [59] досліджували зразки на які наносили шар нітриду титану перед лазерною обробкою або після неї та при різних температурах оброблення. Вивчення коливань, які виникають в процесі зміцнення є досить важливим питань, яке у свою чергу впливає і на якість та на точність оброблених поверхонь, також слід врахувати, що на якість поверхневого шару впливає інтенсивний тепловий потік.

Технологічна операція фрикційного зміцнення поверхонь деталей машин за кінематикою подібна до процесу шліфування, але суттєво відрізняється за температурними та силовими параметрами, які формуються в зоні контакту інструмента із оброблювальною деталлю. В процесі фрикційного зміцнення з використанням інструмента з пазами на його робочій частині виникає перервний процес оброблення, відбувається інтенсивне зсувне деформування поверхневого шару при якому контакт інструмента із заготовкою циклічно переривається та проходить припинення теплового насичення поверхневого шару. Даний технологічний метод дає змогу суттєво підвищити якість оброблювальної поверхні та забезпечити формування у поверхневому шарі заготовки нанокристалічного шару, що, як зазначалося вище підвищує твердість [218].

Внаслідок коливань технологічної системи верстат-інструмент-деталь появляються наступні похибки оброблення: відхилення від геометричної форми та хвилястість. В процесі зміцнення виникають коливання динамічної системи, які впливають на зміну температури та сили у зоні контакту. До коливної системи відноситься підсистема інструмента, яка складається з інструмент-диска та приводу, підсистема заготовки і пружної системи

верстата. Профіль інструмента та кінематика процесу зміцнення мають здатність до вібрацій та коливань. Верстат це складна структура, яка через статичні та динамічні властивості впливає на коливання в процесі зміцнення [219–223].

Щоб зменшити коливань та вібрації пружної системи верстата до його вузлів ставлять високі вимоги динамічної якості, зокрема це відноситься до шпindelних вузлів верстату. Динамічна якість верстата встановлюється значенням коливань переднього кінця шпindelя (осьових і радіальних), частотою власних коливань і демфуючих властивостей, а також гранично допустимою частотою обертання. Закріплений на пружних опорах шпindelний вузол може обертатись з частотою, яка є більшою за першу критичну, а у деяких випадках і за другу критичну кутову швидкість. Щоб забезпечити необхідну точність оброблення деталей у шпindelному вузлі замість статичної жорсткості створюють на робочих режимах динамічну жорсткість. Дані характеристик визначають точність обертання шпindelя, тобто втрати при терті в підшипниках, температура та їх довговічність [220–224].

Правильно вибране співвідношення ширини пазу до довжини робочого виступу інструмента, а також кількість пазів забезпечує високі показники процесу. Як відомо робота у резонансному режимі пружної системи проходить при співпадінні частоти збурення з власною частотою. Велике значення амплітуди коливання є несприятливим і небажаним для роботи не лише через те, що робота пружної системи може проходити у резонансному режимі, а і через те, що можливе зниження якості поверхневого шару. Якщо робота верстату проходить у нерезонансному режимі, процес зміцнення виконується у звичайному режимі і амплітуда коливань зменшується. Тобто при зміні частоти збурення через періодичну зміну амплітуди коливань викликає у верстата нестійку роботу, а також при вибиранні частоти при роботі, яка є близькою до частоти резонансу пружної системи, то технологічний процес зміцнення проходить в несприятливих умовах [219–223].

Під час переривчастого процесу технологічної операції поверхневого зміцнення відбувається періодична зміна збурювальної сили, яка призводить до зміни загальної жорсткості системи. Параметр жорсткості визначається властивостями верстатної пружної системи, що знаходиться у розімкнутому стані і його конструкцією. В залежності від складових системи амплітуда власних коливань збільшується в часі або залишається обмеженою. Коливання зі зростаючими амплітудами є досить небезпечними так як вони призводять до резонансу [224–228].

Визначення динамічних параметрів системи верстата у процесів роботи є складним завданням і для вирішення якого варто застосовувати методи математичного моделювання. У статті [220] подано опис динамічної моделі процесу переривчастого шліфування, де розглянуто динамічну жорстку систему процесу круглого зовнішнього шліфування, у процесі якого моделюються сили і деформації в технологічній системі при заданій глибині шліфування. Представлена динамічна модель дає змогу визначити амплітуду параметричних коливань, що виникають при технологічній операції переривчастого шліфування та з допомогою якої можна здійснити вибір режимів оброблення.

У статті [225] подано динамічну модель параметричних коливань, що формуються під час процесу круглого врізного переривчастого шліфування, використовуючи для моделювання інструмент у якого на периферії сформовані поперечні пази. При аналізі коливання у напрямі за величиною глибини шліфування процесу переривчастого шліфування, було встановлено, що їх значення знаходяться в діапазоні значень жорсткості, яка формується при технологічній операції тонкого шліфування. Отже, висновок впливає наступний, що переривчасте шліфування у порівнянні з шліфуванням використовуючи суцільний круг не погіршує геометричні параметри оброблювальної поверхні.

### **1.5. Вплив якості поверхневого шару на довговічність деталей**

Якість оброблення деталей і стан їх поверхневого шару формується на фінішних операціях технологічного процесу виготовлення і має суттєвий вплив довговічність деталей машин. Для визначення оптимальних параметрів якості поверхонь деталей машин проводиться ряд досліджень, які повинні глибше відображувати їх експлуатаційні властивості [1–8, 186–189, 191–194, 229–230].

Експлуатаційні властивості деталей машин визначають їх стан поверхні. Експлуатаційні властивості деталей машин це параметри, які одночасно залежать від умов експлуатації та параметрів стану поверхневого шару, який формується під час їх оброблення. Зміна властивостей поверхневого шару і поверхні можна отримати завдяки зміні структури поверхневих шарів (створенню метастабільних нанокристалічних структур, аморфізація), а також завдяки легуванню поверхневого шару, або створенням на поверхні деталі шару чи шарів з суттєво іншим складом від основного матеріалу. Для виконання процесу поверхневого оброблення та зміцнення використовується технологічні методи з використанням висококонцентрованих джерел енергії. Під час технологічної операції фрикційного зміцнення у поверхневих шарах оброблюваної деталі відбувається процес високошвидкісного нагріву зони контакту інструмент-деталь завдяки високошвидкісному терті інструмента по оброблюваній поверхні деталі до температури, яка є вище за значення точки фазового перетворень. Переважно при такого типу операції у поверхневих шарах деталей машин, можуть утворитися нанокристалічні структури, які мають особливі фізико-механічні, корозійні, електрохімічні та експлуатаційні характеристики [191–194, 229–230].

У роботі [231] подано дослідження такого процесу як фретинг-корозія зміцнених поверхневих шарів, які сформовані завдяки технологічній операції фрикційного оброблення, які продемонстрували те, даним утвореним шарам на сталевих деталях, притаманна вища твердість, міцність, а також в'язкість у

порівняння із загартованими та низько відпущеними структурами вуглецевих сталей. Експериментальні дослідження процесу фретинг-корозії пари сталь 40Х-Бронза БрА10Ж4Н4 без мащення показали, що технологічна операція фрикційного оброблення має суттєвий вплив опору зношування. Даний технологічний процес знижує значення величини зношування досліджуваних зразка і контрзразка, та вагомим параметром є зменшення усталеного коефіцієнта тертя. Створений білий шар за допомогою процесу фрикційного оброблення підмінює значення опору зношування у 1,8 рази порівняно з незміцненою парою, а у бронзових контрзразків, які працюють в парі, значення зносостійкості підвищилось у 1,6 рази. Експериментальні дослідження процесу фретинг-корозії трибопар у авіаційній оливі МС-20 показали, що при застосуванні технологічної операції фрикційного зміцнення при використанні мінеральної оливи як технологічного середовища, збільшила у 2,6 і 3,4 рази зносостійкість при роботі в парі з бронзою БрА10Ж4Н4 та 3,3 і 4,7 рази – зі сталлю 30ХГСА відповідно. При дослідженні без мащення, закономірність проявляється такого самого характеру. Технологічна операція фрикційного зміцнення лише для зразків, які були виготовлені зі сталі 40Х у загартованому і низько-відпущеному стані.

Технологічна операція лазерного зміцнення використовується для покращення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин, які виконують роботу в умовах в абразивно-масляного середовища та тертя без мащення. Слід відмітити, що підвищується зносостійкість як зміцнених деталей так і відповідних їх пар. Операція лазерного зміцнення найбільш ефективно при використанні для поверхонь деталей такі, які працюють у умовах тертя з мащенням. Операція лазерного зміцнення має суттєвий вплив на параметр зносостійкості інструментальних і конструкційних сталей [35, 38, 45, 49, 52–58, 65]. У роботі [232] подано, що формування стійких залишкових стискальних напруження відбувається якщо визначити оптимальні режими оброблення швидкорізальних сталей, що дозволить збільшити параметр довговічності деталей машин у 2-4 рази до порівняння з іншими відомими

технологічними методами зміцнення, в залежності від умов експлуатації.

У роботі [78] по дано варіанти застосування технологічної операції плазмового зміцнення у поєднанні з іншими технологічними методами. Здійснено експериментальні дослідження твердості, структури та характеру руйнувань сталі 45 та сталі 30X1ГАС в різних виконаннях об'ємного і плазмового термічного оброблення (плазмове поверхнєве зміцнення + відпуск, об'ємне гартування + плазмове поверхнєве зміцнення + відпуск). Дана методика поєднання технологічних методів зміцнення дає змогу збільшити параметр зносостійкості та мікротвердості у 1,5-2 рази у зрівнянні з технологічною операцією простого плазмового зміцненням.

Технологічна операція електроіскрового зміцнення також одним з альтернативних технологічних методів локального чи поверхнєвого зміцнення, що дає змогу збільшити параметри поверхнєвого шару деталей машин, такі як: зносостійкість, мікротвердість та довговічності. У роботі [162] представлено аналіз процес наплавлення на поверхні різального інструмента за допомогою електроіскрового технологічного методу. Високі значення триботехнічних властивостей та параметрів зносостійкості можна отримати за допомогою чергування електродів, що формують на поверхні складну структуру, де глобули складають її основу та виконують роль армувального елемента, який зв'язаний м'якою підкладкою із титанового сплаву. Глобули подані як диборид цирконію, а мікротвердість яких становить 28 ГПа. Отже, експериментальні дослідження показали, що електроіскрове зміцнення дає змогу на 70% вищу зносостійкість при терті на повітрі, і суттєво піднімає значення довговічності у металорізальних інструментах їх поверхнєвого шару, а й зокрема у інструментах у твердосплавних пластинах з вольфрамним наповненням.

## 1.6. Мета і основні задачі дослідження

**Метою роботи** є розроблення науково-технологічних основ фрикційного зміцнення робочих поверхонь деталей машин задля підвищення експлуатаційної надійності керуванням параметрами якості оброблених поверхонь та поверхневого нанокристалічного шару.

### **Задачі дослідження:**

- провести аналіз методів формування нанокристалічних зміцнених поверхневих шарів на масивних деталях і їх вплив на довговічність деталей машин під час експлуатації;
- визначити термонапружений стан у поверхневому шарі зони контакту інструмент-деталь під час фрикційного оброблення деталей машин інструментом з перервною робочою частиною;
- розробити математичні та імітаційні моделі динамічних процесів під час фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей, побудувати амплітудно-частотні характеристики процесу зміцнення;
- дослідити вплив форми робочих поверхонь інструментів під час фрикційного оброблення на структурний і фазовий склади зміцнених шарів;
- встановити вплив параметрів процесу фрикційного оброблення та легування на формування показників якості оброблених поверхонь та зміцнених нанокристалічних шарів;
- дослідити вплив зміцнених нанокристалічних поверхневих шарів на довговічність деталей машин;
- розробити практичні рекомендації по зміцненню робочих поверхонь деталей машин.



## РОЗДІЛ 2

### ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ДОСЛІДЖУВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

#### 2.1. Досліджувані матеріали та їх характеристики

Експериментальні дослідження впливу фрикційного оброблення на формування зміцнених поверхневих шарів з нанокристалічною структурою проводили на сталях і чавунах, які використовуються у загальному машинобудуванні. Це вуглецеві сталі 20, 35, 45, леговані конструкційні сталі 40Х, 40ХН, пружинна сталь 65Г, вуглецева інструментальна сталь У8А у різних структурних станах та сірий СЧ 20 і високоміцний ВЧ 50-2 чавуни. Деякі модельні експерименти проводили на армко-залізі. Хімічний склад та механічні властивості досліджуваних матеріалів приведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Хімічний склад та механічні характеристики досліджуваних сталей

№ п/п	Марка металу	Хімічний склад, %						Механічні характеристики			
		C	Si	Mn	Cr	Ni	інші	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
1.	сталь 20	0,21	0,32	0,46	0,19	0,18	Cu-0,26	210	430	24	53
2.	сталь 35	0,36	0,27	0,71	0,24	0,21	Cu-0,22	310	520	21	63
3.	сталь 45	0,47	0,31	0,66	0,16	0,17	Cu-0,21	410	680	19	62
4.	40Х	0,42	0,28	0,68	0,98	0,27	Cu-0,25	720	840	14	60
5.	40ХН	0,41	0,29	0,73	0,74	1,28	Cu-0,28	760	900	20	39
6.	Сталь 65Г	0,68	0,26	1,12	0,23	0,21	Cu-0,19	840	880	15	50
7.	Сталь У8А	0,82	0,24	0,21	0,22	0,25	Cu-0,18	310	600	17	25
8.	СЧ 20	3,56	1,86	0,95	0,08	0,05	-	-	210	0,25	-
9.	ВЧ 50-2	3,52	1,95	1,06	0,24	-	Mg-0,03	380	500	5	-
10.	армко-залізо	0,02	0,12	0,09	0,05	-	-	240	350	27	77

Термічне оброблення сталевих зразків проводили в соляних ваннах після лезових обробок з припуском (0,2-0,3 мм на сторону) під наступне

шліфування та фрикційне оброблення робочих поверхонь зразків. Дане оброблення було фінішним. Припуск під фрикційне оброблення складав 0,02-0,04 мм на сторону. Зразки виготовлені зі сталі 20 нормалізували від температури 900 °С (витримка – 2 год.). Твердість після оброблення становила 160-170 НВ. Зразки виготовлені зі сталі 35 гартували від температури 890 °С у воду з наступним низьким (температура витримки 200 °С) та високим (температура витримки 400 °С) відпусками. Твердість зразків після низького відпуску була HRC 31-34, після високого – 220-240 НВ. Зразки виготовлені зі сталі 45 гартували від температури 860 °С через воду в оливу з наступним низьким (температура витримки 200 °С) та високим (температура витримки 500 °С) відпусками. Твердість зразків після низького відпуску була HRC 41-45, а після високого – HRC 27-31. Зразки виготовлені зі сталі У8А гартували від температури 790 °С в оливу з наступним низьким (температура витримки 200 °С) та високим (температура витримки 550 °С) відпусками. Твердість зразків після низького відпуску була HRC 61-63, після високого – HRC 36-38. Зразки виготовлені зі сталей 40Х і 40ХН гартували від температури 850 °С в оливу з наступним низьким (температура витримки 200 °С) та високим (температура витримки 550 °С) відпусками. Твердість зразків після низького відпуску була HRC 45-48, після високого – HRC 27-33. Зразки виготовлені зі сталі 65Г гартували від температури 820 °С у оливу з наступним відпуском (температура витримки 250 °С). Твердість зразків була HRC 39-43. Гартування усіх видів зразків проводили у соляних ваннах. Витримка після досягнення температури гартування складала 6-12 хв. Відпуск проводили у електропечах. Витримка при температурах відпуску була 2 год., охолодження зразків після відпуску відбувалось на повітрі.

## 2.2 Технологія фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей машин

Фрикційне оброблення відноситься до технологій поверхневого зміцнення висококонцентрованими потоками енергії. Під час фрикційного оброблення висококонцентрований потік енергії утворюється у зоні контакту інструмента та оброблюваної поверхні деталі за рахунок високошвидкісного (60-90 м/с) тертя металевого інструмента-диска по оброблюваній деталі (рис. 2.1). Залежно від оброблюваного матеріалу та необхідних властивостей, які необхідно сформувати у поверхневому шарі, а також габаритів деталі (продуктивності виконання операції зміцнення) використовуємо різні за геометрією периферії інструменти. Швидкість нагрівання у зоні контакту досягає  $10^5$ - $10^6$  К/с. Поверхневі шари металу нагріваються до температур вище точки фазових перетворень ( $A_{c3}$ ). Після переміщення джерела теплоти нагрітий поверхневий шар охолоджується з великими швидкостями ( $10^4$ - $10^5$  К/с) за рахунок відведення теплоти у глибину металу деталі. При високошвидкісному охолодженні отримується стан, при якому із твердого розчину ще не встигають виділитися окремі фази або це виділення не встигло повністю завершитися. Також у зоні контакту відбувається одночасне швидкісне зсувне деформування оброблюваної поверхні. За рахунок високошвидкісного нагрівання і охолодження та інтенсивного зсувного деформування у поверхневому шарі деталей формуються нанокристалічні структури (білий шар). Також основним моментом фрикційного зміцнення є подача технологічного середовища у зону обробки. Як технологічне середовище під час фрикційного оброблення використовується мінеральна олива, мінеральна олива з активними полімервмісними добавками, вода, водяний розчин аміліну (для насичення поверхневого шару азотом).

Фрикційне оброблення плоских поверхонь деталей машин за виконанням та кінематикою процесу подібна до шліфування. Для її реалізації використовуються плоскошліфувальні верстати. Замість абразивного круга

встановлюється металевий інструмент-диск (рис. 2.2). Габаритні і посадочні розміри металевого інструмента відповідають розмірам шліфувального круга, який використовується на даному верстаті. Для формування у зоні контакту інструмент-оброблювана поверхня концентрованого теплового потоку необхідна лінійна швидкість на робочій поверхні інструмента 60-90 м/с. Для забезпечення необхідної частоти обертання інструмента потрібно провести модернізацію вузла головного приводу шліфувального круга, інші функціональні рухи верстата залишаються без зміни.



Рисунок 2.1 – Формування висококонцентрованого потоку енергії

На формування структурно-напруженого стану металу суттєво впливають режими фрикційного оброблення, використовуване технологічне середовище, матеріал та форма робочої частини зміцнювального інструмента та інші чинники.

Фрикційне оброблення плоских поверхонь проводили на модернізованому плоскошліфувальному верстаті HFS 3063 VS фірми KNUTH (Німеччина) (рис. 2.3). Замінили привід шпинделя верстата на інший з більшою частотою та можливістю керуванням частоти обертання

використавши електродвигун постійного струму і пульт керування фірми Siemens. Провели перевірочний розрахунок підшипників шпиндельного вузла при роботі з більшими частотами обертання та більшими навантаженнями. Зовнішній діаметр інструмента становив 360 мм, ширина його робочої частини – 6-10 мм. Металевий диск встановили на планшайбу, яка використовується на даному верстаті. Перед встановленням планшайби з металевим диском на верстат проводили її статичне балансування [233].

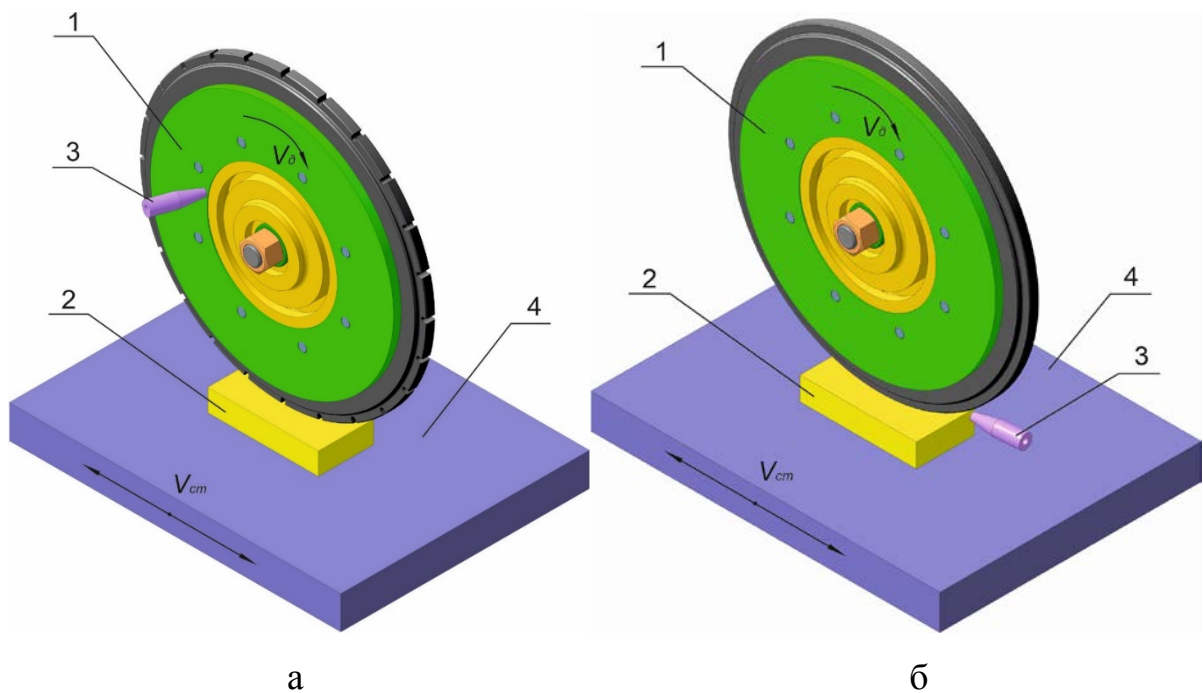


Рисунок 2.2 – Схема фрикційної обробки плоских поверхонь деталей машин: а – подача середовища через канали, які виходять у паз інструмента, б – методом поливу. 1 – інструмент, 2 – оброблювальна плоска поверхня деталі, 3 – сопло для подачі технологічного середовища, 4 – стіл верстата

Також для зміцнення плоских поверхонь деталей машин використовували плоско-шліфувальний верстат SPC-20a фірми Jotes (Польща) (рис. 2.4). Замінили привід шпинделя верстата на інший з більшим числом обертів, використавши трьох фазний асинхронний двигун типу АИР 90L4/2У3 та можливість керування частоти обертання використавши частотний перетворювач. Провели перевірочний розрахунок підшипників шпиндельного

вузла при роботі з більшими частотами обертання та більшими навантаженнями. Зовнішній діаметр інструмента становив 260 мм, ширина його робочої частини – 8-10 мм. Збірний металевий диск встановили на конус шпинделя.



Рисунок 2.3 – Плоскошліфувальний верстат HFS 3063 VS фірми KNUTH (Німеччина)



Рисунок 2.4 – Плоскошліфувальний верстат SPC-20a фірми Jotes (Польща)

Отже, дані два верстати мають однакову компоувальну схему, яка представлена на рис. 2.5.

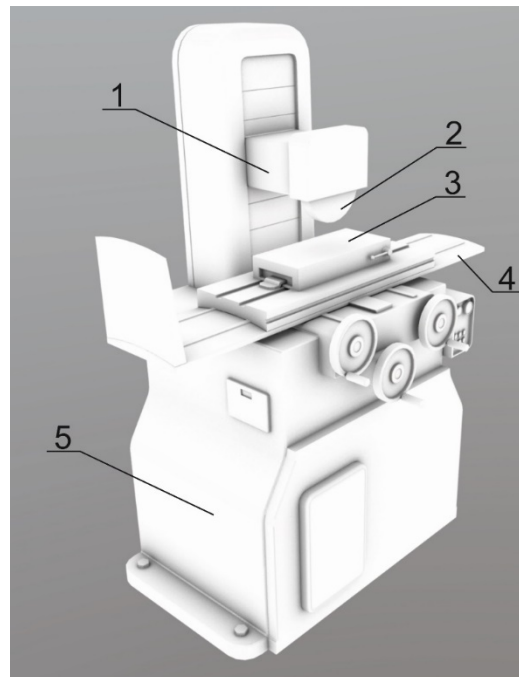


Рисунок 2.5 – 3D-модель плоско-шліфувального верстата: 1 – шпindelний вузол; 2 – інструмент-диск; 3 – магнітна плита; 4 – стіл; 5 – станина

### **2.3 Технологія фрикційного оброблення циліндричних поверхонь деталей машин**

Фрикційне оброблення циліндричних поверхонь деталей машин за виконанням та кінематикою процесу подібна до шліфування та точіння. Щоб її реалізувати використовуються плоско- або круглошліфувальні верстати, а також розроблене спеціальне обладнання на базі токарного верстата. Як інструмент використовується металевий диск, який встановлюється замість абразивного круга. Розміри металевого диска відповідають розмірам абразивного круга, який використовується на даному верстаті. Зміцнення циліндричних поверхонь також можна проводити на модернізованому токарному верстаті на якому замість різцетримача встановлюється

спеціальний пристрій для автономного приводу інструмента (рис. 2.6). Привід забезпечує швидкість обертання інструмента 60-90 м/с. Привід від електродвигуна здійснюється через клинопасову передачу. Усі рухи верстата збережені. Металевий диск зовнішній діаметр якого становив 240 мм, ширина його робочої частини – 6-8 мм.

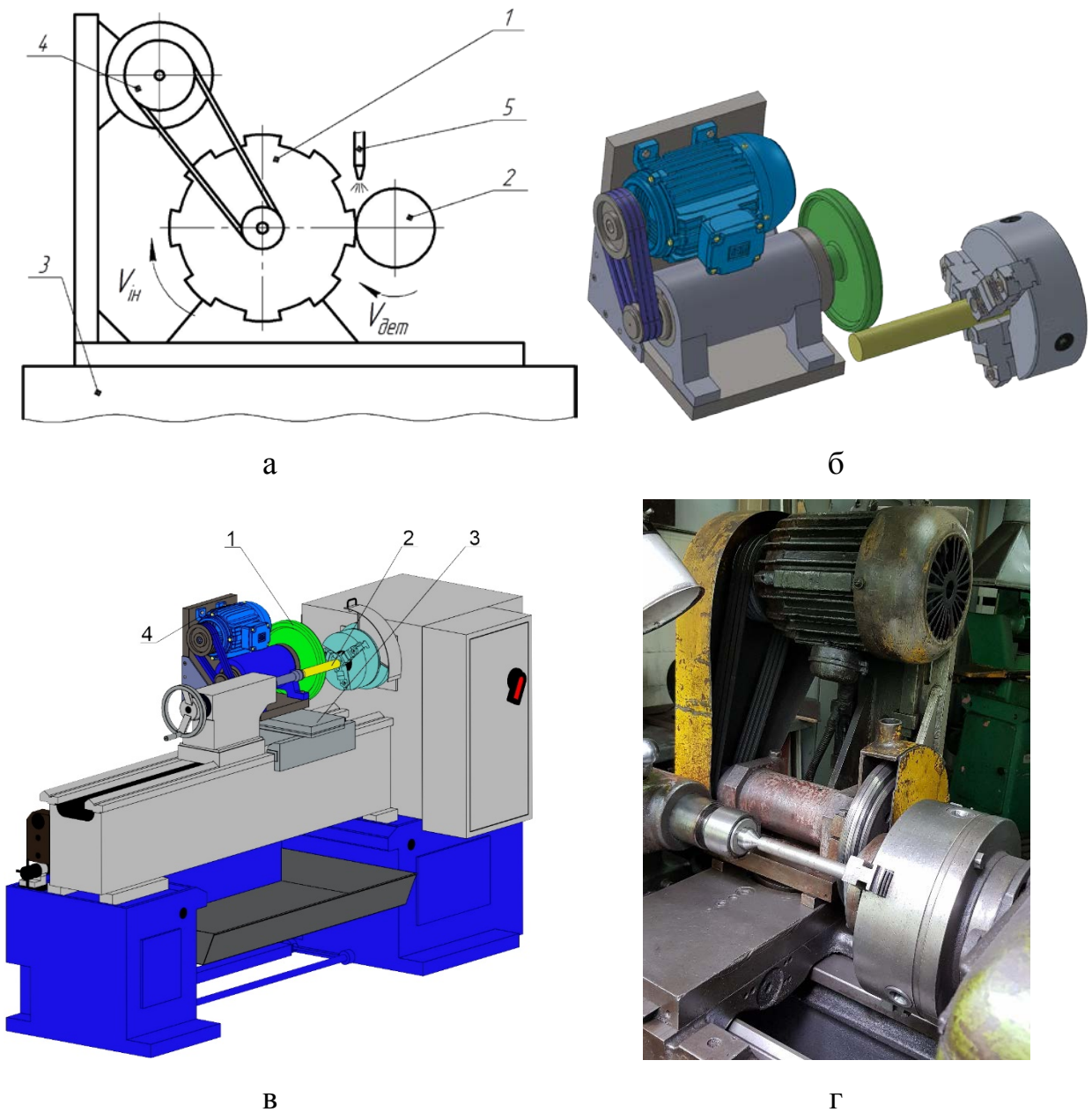


Рисунок 2.6 – Фрикційне оброблення циліндричних поверхонь деталей машин: а – схема обробки, б – фото установки

Для покращання переміщення інструмента з поперечною подачею з обох



сторін робочої частини інструмента зробили заокруглення радіусом 1-1,5 мм та краї робочої частини інструмента заправляли, використовуючи абразивний круг, який закріплювали на оправці в центрах верстата. Після чого проводили доведення його робочої поверхні абразивним і ельборовим брусками з дрібним зерном. Радіальне биття робочої поверхні інструмента було не більше 0,02 мм, а шорсткість – не більше  $Ra$  0,4 мкм. Інструмент встановлювали безпосередньо на конусну частину шпинделя спеціального пристрою. Перед встановленням інструмента на шпиндель проводили його статичне балансування на пристрої для балансування шліфувальних кругів.

#### **2.4 Конструкція інструментів для фрикційного оброблення**

У роботі розглядатимемо наступні інструменти (рис.2.7):

- Гладкий диск (прототип для усіх дисків);
- Інструмент з поперечними пазами (патент № 75804 «Інструмент для отримання наноструктурних поверхневих шарів деталей машин») [234];
- Інструмент з різнонаправленими пазами (патент № 134389 «Інструмент для формування наноструктурних зміцнених поверхневих шарів деталей машин») [235];
- Інструмент хвилеподібний (патент № 146839 «Інструмент для поверхневої нанострутиризації плоских, торцевих і циліндричних поверхонь») [236];
- Інструмент з поперечним пазом та внутрішньою подачею технологічного середовища (патент № 123883 «Інструмент для легування поверхневих шарів деталей машин») [237].

Інструменти виконані збірними для можливості заміни диска-вставки, яка виготовляється з різних матеріалів: сталь 45 (нормалізована), нержавіюча сталь та титанового сплаву та складаються з корпусу 1, на який

встановлюється диск 2 з робочою частиною на периферії та затискається гайкою (кільцем) 3, яка притискається болтами 4 до корпусу.

За базовий інструмент взято інструмент з гладкою робочою поверхнею, яка безперервно контактує з оброблювальною поверхнею (рис. 2.7 а). Інструменти з поперечним пазом (рис. 2.7 б), різнонаправленим пазом (рис. 2.7 в) та з хвилеподібний (рис. 2.7 г) мають перервну поверхню, тобто забезпечують переривання теплового потоку який формується у зоні контакту.

Інструмент для легування поверхневих шарів деталей машин виконаний збірним, що складається з корпусу на який встановлюється диск-вкладка та затискається гайкою (кільцем) з лівою різью, на робочій частині диска інструмента нарізані поперечні пази у яких радіально розташовані отвори, для подачі технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь, діаметром  $\varnothing$  1-4 мм (рис. 2.8).

При використанні інструмента для легування поверхневих шарів деталей машин з нарізаними поперечними пазами на його робочій поверхні з радіально розташованими отворами у даних пазах під час фрикційного оброблення деталей машин у зоні контакту інструмент-деталь виникають додаткові ударні навантаження та зсувні деформування. Під час проходження паза над зоною контакту інструмент-деталь контакт між ними розривається, відбувається миттєве переривання дії джерела теплового потоку, а також відбувається подача середовища через отвори у диску на ювенільні поверхні оброблювальної деталі. При входженні у контакт нової гладкої поверхні поновлюється дія джерела теплового потоку та виникає ударне навантаження зони контакту. У даному випадку виникає циклічна дія теплового потоку. У зоні контакту інструмент-деталь виникає складно-напружений стан металу. Така конструкція робочої поверхні інструмента приводить до багатократно повторюваного процесу деформування поверхневого шару металу деталей, що дозволяє отримати високу ступінь деформації та інтенсифікувати процеси зсувного деформування і легування (насичення) поверхневого шару. За

рахунок інтенсивного деформування оброблюваної поверхні деталей машин у їх поверхневих шарах формуються нанокристалічні структури у вигляді білих шарів з покращеними фізико-механічними властивостями та зміненим хімічним складом у порівнянні з основною структурою металу деталі. За рахунок високошвидкісного тертя інструмента по оброблюваній поверхні у зоні їх контакту утворюються ювенільні поверхні, тобто фізично і хімічно чисті поверхні. На даних поверхнях відсутні окисли, а також різні адсорбовані частинки з оточуючого середовища.

Подаючи технологічне середовище безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь на ювенільні поверхні оброблюваної деталі, інтенсифікуються процеси масопереносу хімічних елементів, складових середовища, у поверхневі шари металу. Покращуються параметри якості оброблюваної поверхні, зменшуються складові сили дії інструмента та деталі в зоні їх контакту, що сприяє зменшенню потужності, яка затрачується на процес оброблення.

Так як використовуємо різні верстати у яких можливо встановити інструменти з різним зовнішнім діаметром, було розроблено інструменти з різним зовнішнім діаметром та відповідним посадковим отвором (рис. 2.9).

Даний процес потребує високих швидкостей обертання щоб забезпечити швидкість 60-90 м/с на периферії диска, тому дуже важливо є балансування інструмента. Статичне балансування інструмента виконується на стандартному пристрої для балансування шліфувального круга, де інструмент встановлюється на оправку, яка ставиться на дві круглі поперечні циліндричні напрямні і за допомогою важок, які встановлюються на протилежній стороні отримує компенсаційну вагу (рис. 2.10).

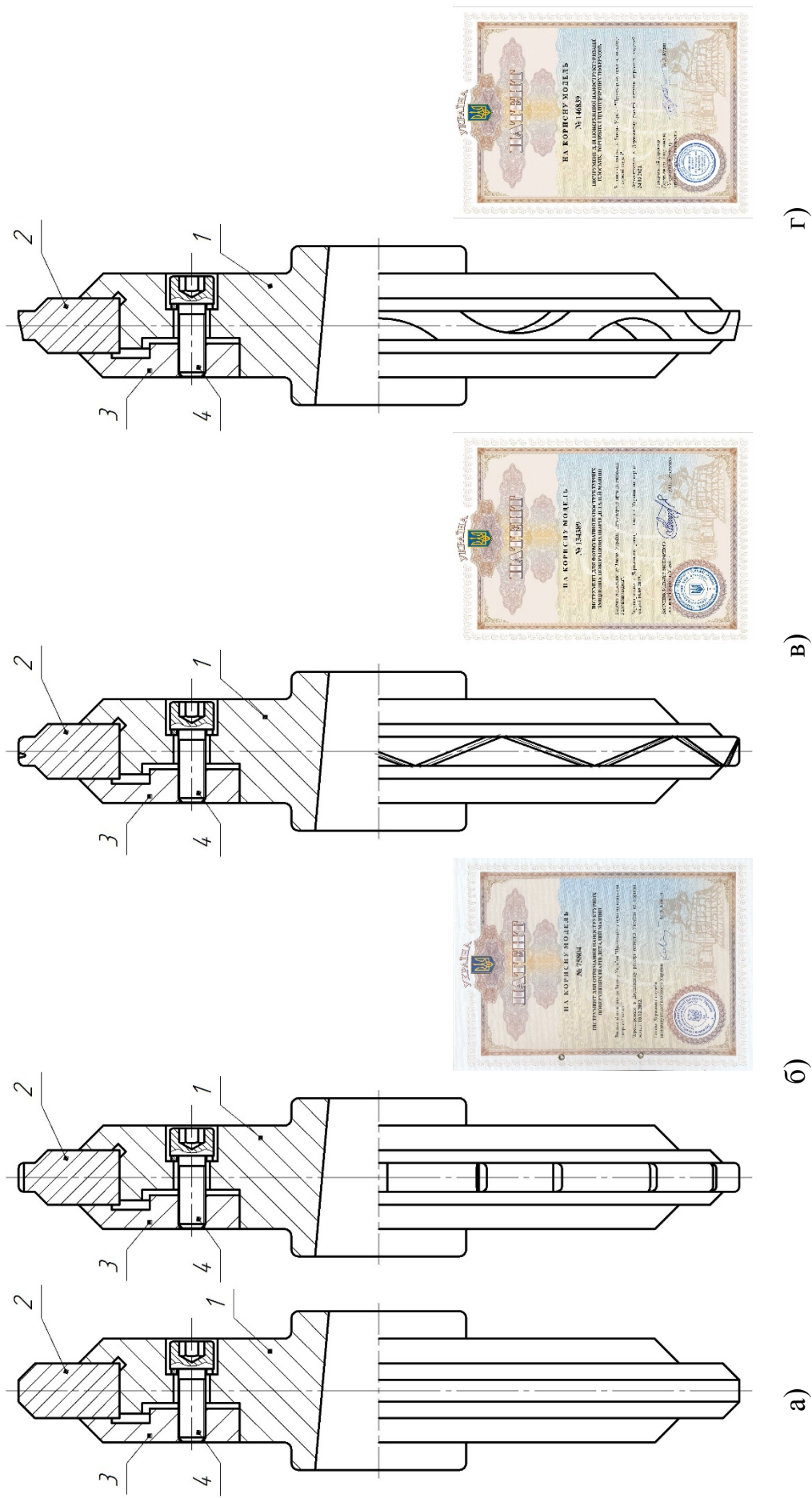


Рисунок 2.7 – Інструменти для фрикційного зміцнення: а) диск з гладкою периферією; б) диск з поперечними пазами на периферії; в) диск з різнонаправленими пазами на периферії; диск з хвилеподібною робочою поверхню.

1 – корпус, 2 – диск (з різною периферією); 3 – прижимне кільце; 4 – болт

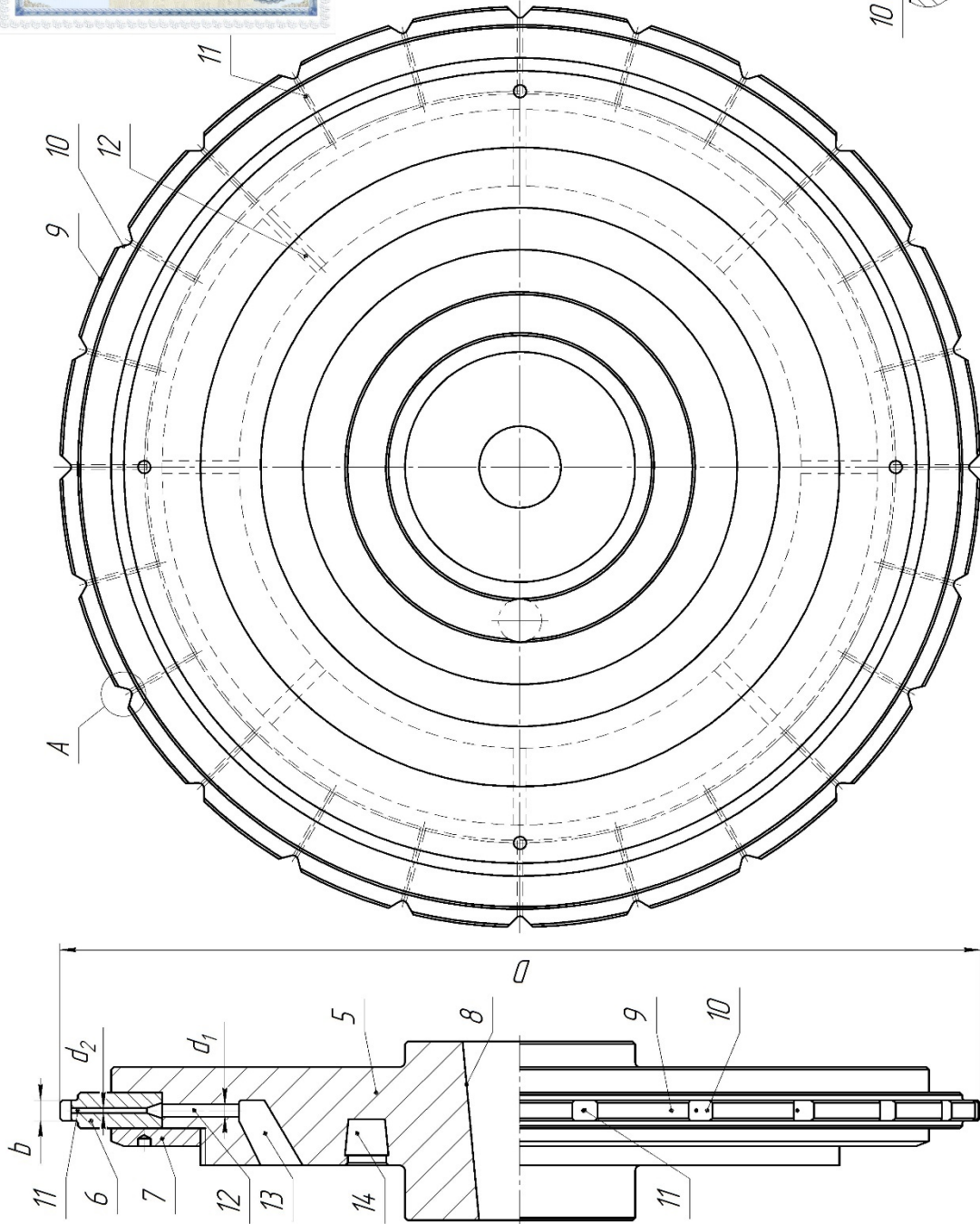
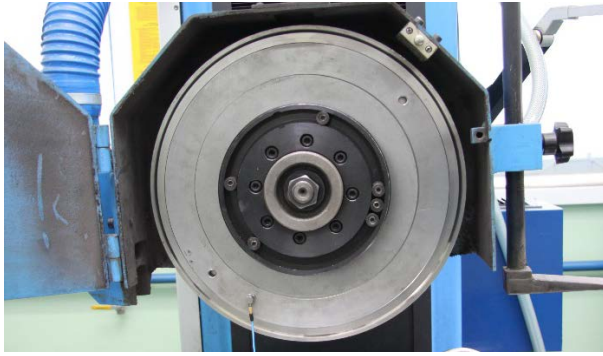


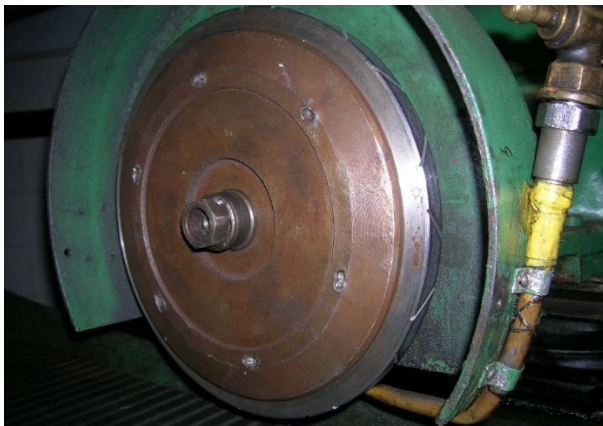
Рисунок 2.8 – Інструменти для фрикційного оброблення з внутрішньою подачею технологічного середовища



а



б



в



г

Рисунок 2.9 – Інструмент для фрикційного оброблення: а – гладкий диск, б – поперечний паз; в – різнонаправлений паз, г – хвилястий

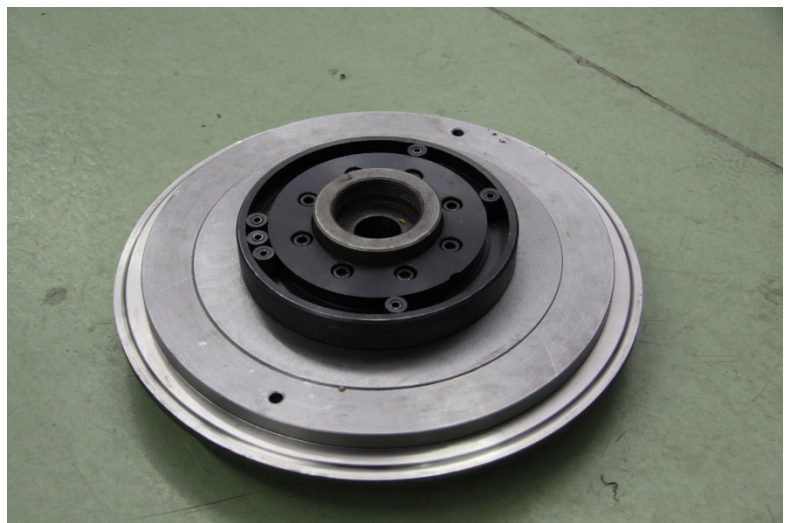
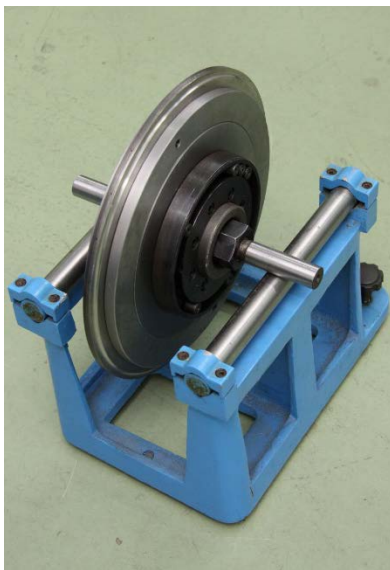


Рисунок 2.10 – Балансування інструмента

## 2.5 Методики визначення складових сил дії інструмент-деталь у зоні їх контакту

Для виконання процесу фрикційного оброблення плоских поверхонь деталей машин, переважно використовують серійні існуючі плоскошліфувальні верстати, а для виконання процесу фрикційного оброблення циліндричних поверхонь – круглошліфувальні верстати або встановлюється спеціальне обладнання на токарно-гвинторізні верстати. Для забезпечення необхідної швидкості обертання інструмента (на шліфувальному верстаті) слід виконати модернізацію головного приводу верстата. Отже, при модернізації шліфувального верстата чи при проектуванні спеціального пристрою для токарного верстату слід знати числові значення сил дії у зоні, які діють при обробленні, щоб перевірити або вибрати підшипники.

Фрикційне оброблення плоских поверхонь деталей машин, як зазначалося раніше, за кінематикою процесу подібне до плоского шліфування, тому сили дії у зоні контакту інструмент-деталь можна розкласти за таким самим принципом на три складові: нормальну  $P_y$ , що діє за радіусом інструмента та перпендикулярно до осі його обертання; тангенціальну  $P_z$ , що діє дотично до робочої поверхні інструмента та паралельно до оброблюваної плоскої поверхні, а також поперечну  $P_x$ , що діє паралельно до осі обертання інструмента у напрямку, який є протилежний до напрямку руху подачі (рис. 2.11 а).

Фрикційне оброблення циліндричних поверхонь деталей машин, як зазначалося раніше, за кінематикою процесу та принципом роботи подібне до круглого шліфування або при встановленні спеціального пристрою на токарний верстат подібне до процесу точіння тому сили дії у зоні контакту інструмент-деталь можна розкласти за таким самим принципом на три складові [238]: нормальну  $P_y$ , що діє за радіусом інструмента та перпендикулярно до осі його обертання; тангенціальну  $P_z$ , що діє дотично до робочої поверхні інструмента та паралельно до оброблюваної плоскої

поверхні, а також поперечну  $P_x$ , що діє паралельно осі обертання інструмента у напрямку, який є протилежний до напрямку руху подачі (рис. 2.11 б).

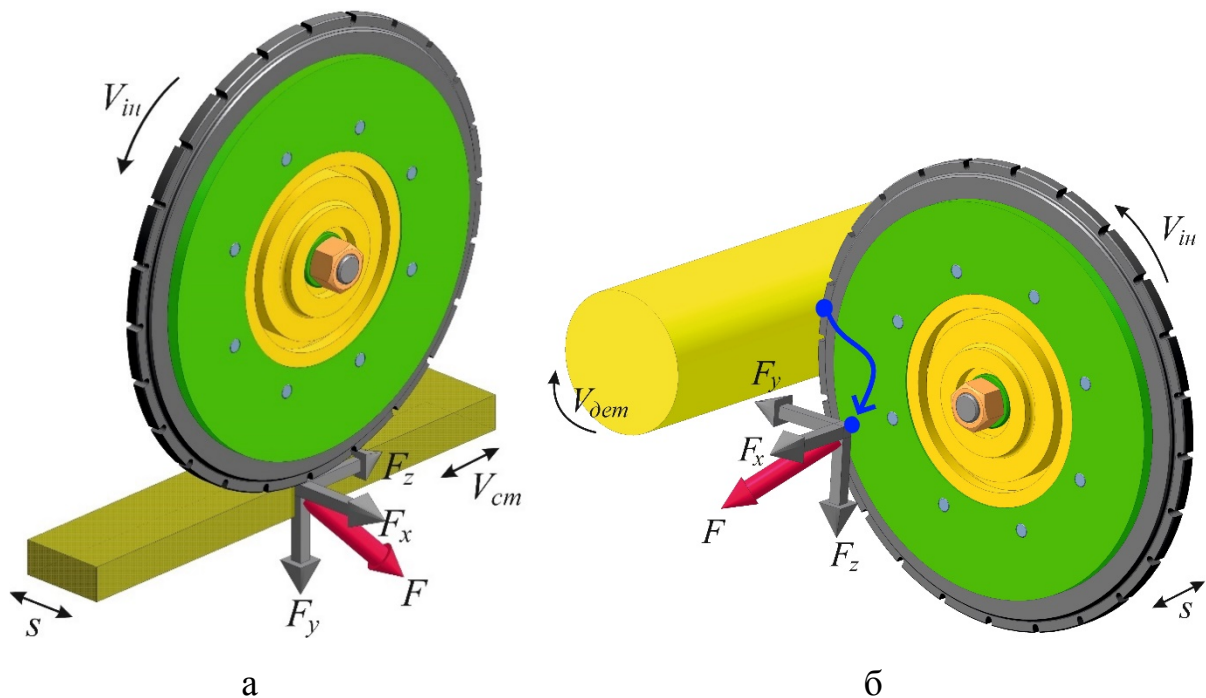


Рисунок 2.11 – Складові сили при фрикційному обробленні: а – плоских поверхонь, б – круглих поверхонь

Вимірювання значення складових сил дії у зоні контакту інструмент-деталь плоских поверхонь виконували за допомогою трьох-компонентного динамометра типу 9257В фірми *Kistler* (Швейцарія) (рис. 2.12 а).

Цей динамометр складається з двох кварцевих елементів зсуву (для вимірювання  $F_x$  і  $F_y$ ) та одного елемента стиску (для  $F_z$ ), все це закріплено в одному корпусі та утворює 3-х компонентний давач сили. А також, динамометр використовує п'єзоелектричну систему вимірювання сили та є дуже жорсткою системою і через високі власні частоти мають можливість здійснювати вимірювання навіть дуже швидких процесів. Перевагою кварцевого п'єзодавача сили є те, що йому не потрібно виставляти нульове значення – він відразу готовий до вимірювання.

П'єзоелектричний динамометр через герметичні ізолювані за «масою» кабелів з'єднаний з багатоканальним підсилювачем-перетворювачем типу



5070 фірми Kistler з внутрішньою пам'яттю і за допомогою USB порту передає дані на комп'ютер (рис. 2.12 б). Для запису і обробки даних кожної складової сили використовували програма *LabView Signal Express*.



а



б

Рисунок 4.12 – Набір фірми Kistler (Швейцарія) для вимірювання складових сили при обробленні (а); трикомпонентний динамометр типу 9257В (б)

Визначення значення складових сил, які виникають у зоні контакту інструмент-деталь під час обробки циліндричних поверхонь проводили за допомогою спеціально розробленого динамометра, який був встановлений у конусних отворах шпиндельного вузла та у задній бабці верстату.

Для вимірювання значень складових сили дії, що виникають у зоні контакту інструмент-деталь необхідно застосувати динамометр, який має два нерухомі пружні елементи, у центрах яких закріплюється досліджуваний зразок. Два нерухомі пружні елементи закріплюємо у двох протилежних частинах верстата (шпindelний вузол та задня бабка). Один пружний елемент закріплюємо у конічному отворі задньої бабки з використанням перехідної втулки. Даний пружний елемент є нерухомим. Другий пружний елемент динамометра закріплюємо у конічному отворі шпindelного вузла верстата. Для цього необхідно демонтувати трикулачковий самоцентруючий патрон. Також другий пружний елемент, який закріплюється у шпindelі верстата повинен бути нерухомим. Для забезпечення нерухомого положення пружного елемента у рухомому шпindelі, його необхідно встановити у перехідну втулку з використанням підшипників. До пружного елемента прикріплена труба, що проходить через отвір у шпindelі, та кріпиться до корпусу верстата. Така конструкція кріплення пружного елемента до корпусу верстата з використанням труби забезпечує його нерухоме положення у шпindelі, а також дає можливість регулювання повороту навколо своєї осі. Циліндричний зразок на верстаті закріплюється в центрах, які закріплені на пружних елементах динамометра (рис. 4.13).

Нерухомі пружні елементи динамометра, встановлені у шпindelі та задній бабці верстата виставляють таким чином, щоб поверхні на яких наклеєні тензодавачі, були в одних площинах. Площинність плоских поверхонь пружних елементів динамометрів, на яких наклеєні тензодавачі, між собою забезпечували за рахунок повертання динамометра, який кріпився у шпindelному вузлі токарного верстата. Після встановлення площинності відповідних площин між пружними елементами, тобто між динамометром, який встановлений у задній бабці верстата і динамометром, встановленим у внутрішньому конусі шпindelя верстата, останній динамометр фіксували до корпусу верстата.

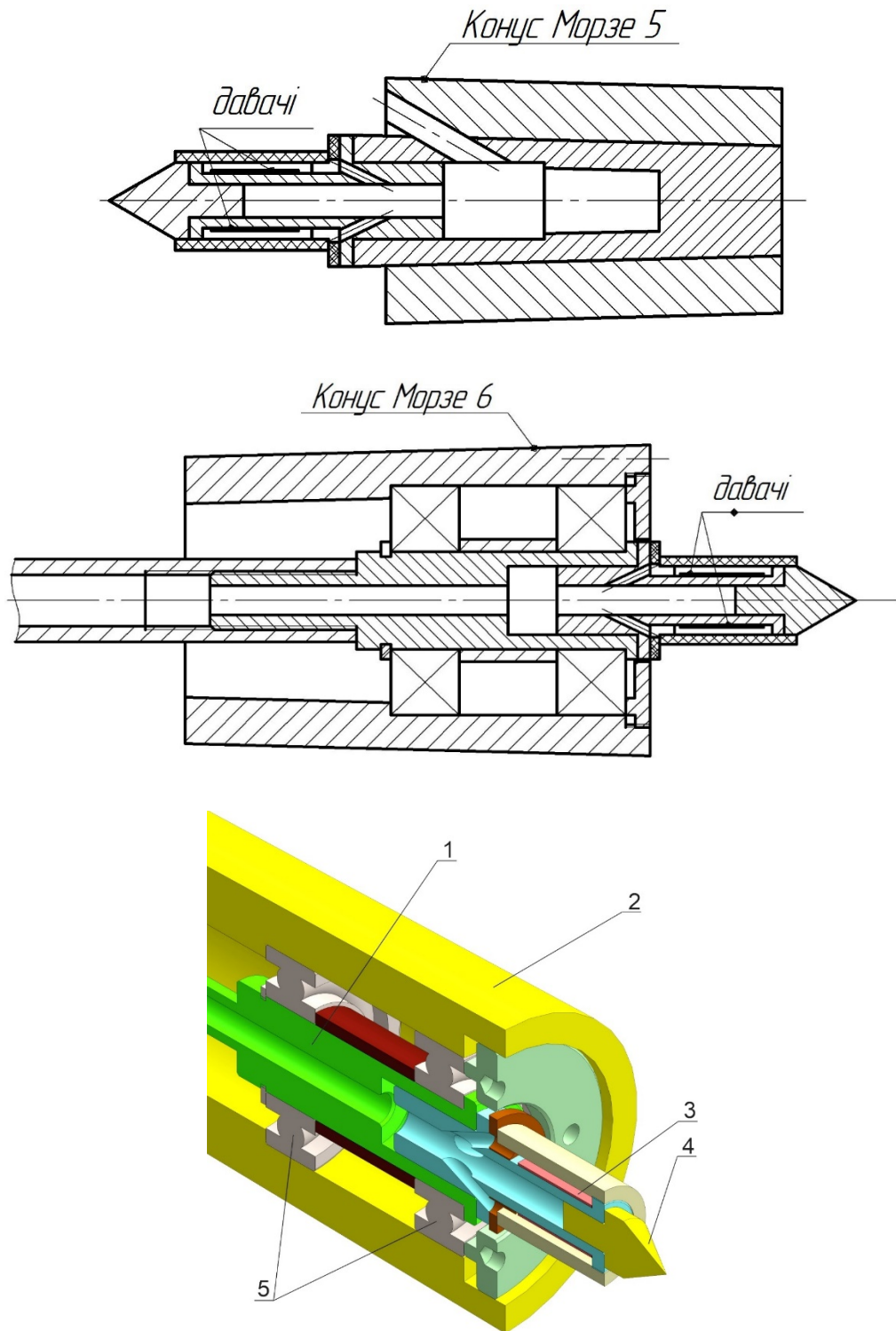


Рисунок 2.13 – Схеми встановлення пружних елементів динамометрів у перехідні конуси для кріплення на верстаті: а – для кріплення у шпинделі; б – для кріплення у задній бабці

Запропонована конструкція динамометра дає змогу реєструвати

нормальну  $P_y$  та тангенціальну  $P_z$  складові сили дії, яка виникає у зоні контакту інструмент-деталь. Реєстрація осьові складової  $P_x$  сили дії за даною схемою закріплення зразків на верстаті є проблематично. Зразок притискається центром, який встановлюється у задню бабку, до центра, який закріплений у шпинделі верстата. Сила затиску зразка при кожному встановленні є різною і не контролюється. У розробленій конструкції динамометра центри закріплені у пружних елементах, що у свою чергу встановлені у задню бабку та шпиндель верстата. Дослідження з визначення значення складових сили, що виникають у зоні контакту інструмент-деталь, під час фрикційного оброблення плоских поверхонь показали, що осьова складова  $P_x$  сили є майже у 10 разів меншою за тангенціальну складову  $P_z$  і складає приблизно 4-8 Н. Осьова складова  $P_x$  буде набагато меншою за силу затиску під час закріплення зразка і визначити її величину буде складно. Тому даною складовою сили дії нехтуємо.

Під дією сили, яка виникає у зоні контакту інструмента з оброблюваною поверхнею зразка, під час фрикційного оброблення деформуються пружності елементи динамометра. Плоскі поверхні пружного елемента динамометра мають різну жорсткість у напрямках, які є взаємно перпендикулярні (жорсткості відносяться як 1:100). Малу жорсткість пружний елемент динамометра має у напрямку перпендикулярному до її осі, велику жорсткість – у напрямку вздовж її осі. Тоді, складова сили, яка діє на пружний елемент динамометра, сприймається ним лише в одному напрямку, перпендикулярному до її осі. Пружні елементи виготовлені зі сталі 60С2 (гартування і середній відпуск). Площа поперечного перерізу пружного елемента динамометра підібрана таким чином, щоб матеріал його працював в області пружних деформацій.

Також слід зазначити, що використовуючи два нерухомі пружні елементи, які кріплять у двох протилежних частинах верстата, визначається алгебраїчна сума показів з їх давачів і тоді на величину показів динамометра не впливає точка прикладання зовнішньої сили.

На плоских поверхнях пружних елементів динамометра, які є у взаємно

перпендикулярних площинах, наклеєні тензодавачі марки 5ПКБ-5-100. Тензодавачі під'єднали так, щоб сигнал від вимірювальних схем, був пропорційний алгебраїчним сумах деформації пружних елементів динамометра (рис. 2.14). Тензодавачі, по два на кожному з пружних елементів динамометра, підключали за мостовою схемою. В одне плече моста під'єднали регульовальні резистори, якими встановлювали «нуль» розбалансування моста перед кожною серією досліджень. Внаслідок деформації пружних елементів динамометра під дією сили, яка виникає у зоні контакту інструмент-деталь під час фрикційного оброблення, змінюються величини опорів на протилежних тензодавачах, наклеєних на пружних елементах динамометра. Відповідно проходить розбалансування мостів, у які з'єднані тензодавачі. Для вимірювання величини розбалансування моста на одну протилежну пару контактів моста подавали постійну стабілізовану напругу 5В. З іншої протилежної пари контактів знімали сигнали розбалансування опорів тензодавачів. Сигнали розбалансування з тензодавачів, які підключені у відповідні вимірні схеми, підсилювали за допомогою спеціальних стабілізованих підсилювачів для тензодавачів за кожним каналом. Підсилені сигнали передавали на аналого-цифровий перетворювач L-Card E14-140M на кожний відповідний канал. Частота перетворення аналогового сигналу, який подавався з мостових схем тензодавачів, у цифровий сигнал становила 100 кГц. Отриманий перетворений цифровий сигнал з кожного каналу реєстрували на комп'ютері за допомогою використовуваної програми «PowerGraph». Для тарування кожного каналу вимірювання динамометром кожної складової сили, яка виникає у зоні контакту інструмент-деталь, використовували взірцевий динамометр типу ДОСМ-3-0,05 (ВО «Точприлад») і проводили за кожним каналом окремо.

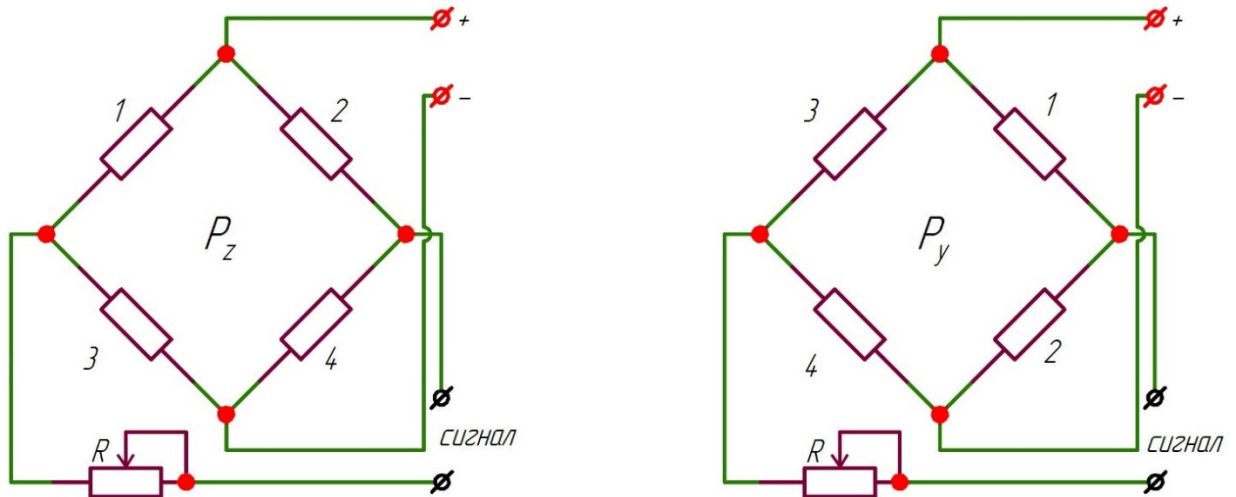


Рисунок 2.14 – Схеми підключення тензодавачів, розташованих на пружних елементах динамометра для вимірювання нормальної  $P_y$  і тангенціальної  $P_z$  складових сили, яка виникає у зоні контакту інструмента-деталь

Швидкість обертання круга для фрикційного оброблення використовували оптичний тахометр ST 723 фірми Sentry (Тайвань) (рис. 2.15). Цей прилад здійснює точне вимірювання частоти обертання, лінійної і колової швидкості та записує отримані значення в пам'ять приладу. Вимірювання виконуються безконтактним способом. Діапазони розрізувальної здатності: 6,0...9999,9: 0,1 об./хв.; 10000...99999 об./хв.; 1 об./хв.



Рисунок 2.15 – Оптичний тахометр ST 723 фірми Sentry (Тайвань)

Перед кожним встановленням деталі на динамометр проводили перевірку точності встановлення за допомогою індикатора годинникового типу (рис. 2.16).



Рисунок 2.16 – Перевірка точності встановлення зразка у динамометрі

## 2.6. Методика проведення дослідження зносотривкості

Дослідження зносотривкості проводили при терті без мащення та з граничним мащенням пари сталь 40ХН – чавун СЧ 20 за схемою «кільце-кільце» на універсальній установці тертя типу УМТ-1 (рис. 2.17). Зразки, які використовували для досліджень показані на рис. 2.18. Швидкість ковзання змінювали від 0,2 м/с до 4 м/с. Навантаження на зразки регулювали в межах від 0,1 МПа до 1,5 МПа. Нерухомий зразок був зв'язаний з диференціальним давачем силовимірювача, сигнал з якого подавався на автоматичний самопишучий потенціометр, який фіксував момент тертя даної пари. На нерухомому зразку закріплювали термопари діаметром 0,2 мм. Сигнали з

термопар подавали на автоматичний самопишучий триканальний потенціометр. При цьому фіксувалася інтегральна температура під зоною тертя на глибині 0,3-0,5 мм під поверхнею тертя. Час випробувань пари тертя на одному етапі складав 8 год.



Рисунок 2.17 – Універсальна машина тертя типу УМТ-1

Під час дослідження зносотривкості при граничному мащенні у зону тертя подавали мінеральне масло по 15-20 капель в хвилину з допомогою спеціальної камери.

Перед початком експериментів проводили припрацювання пари тертя до стабілізації моменту тертя та прилягання спряжених поверхонь, які характеризуються слідами тертя на площі не менше 90 % робочої поверхні тертя кожного зразка пари.

Зразки (рухомі) досліджуваних пар тертя виготовляли зі сталі 40ХН (гартування і низький відпуск, HRC 48-51), контрзразки (нерухомі) виготовляли з сірого чавуну СЧ 20. Робочі поверхні рухомих зразків пари тертя зміцнювали фрикційною обробкою, нерухомі зразки – були тільки шліфовані (незміцнені). При зміцненні обох тіл пари тертя ефект підвищення зносотривкості нівелюється. Для порівняння використовували незміцнену



пару тертя. Шорсткість робочих поверхонь після фрикційної обробки становила  $R_a = 0,25-0,50$  мкм, після шліфування -  $R_a = 0,50-0,63$  мкм.

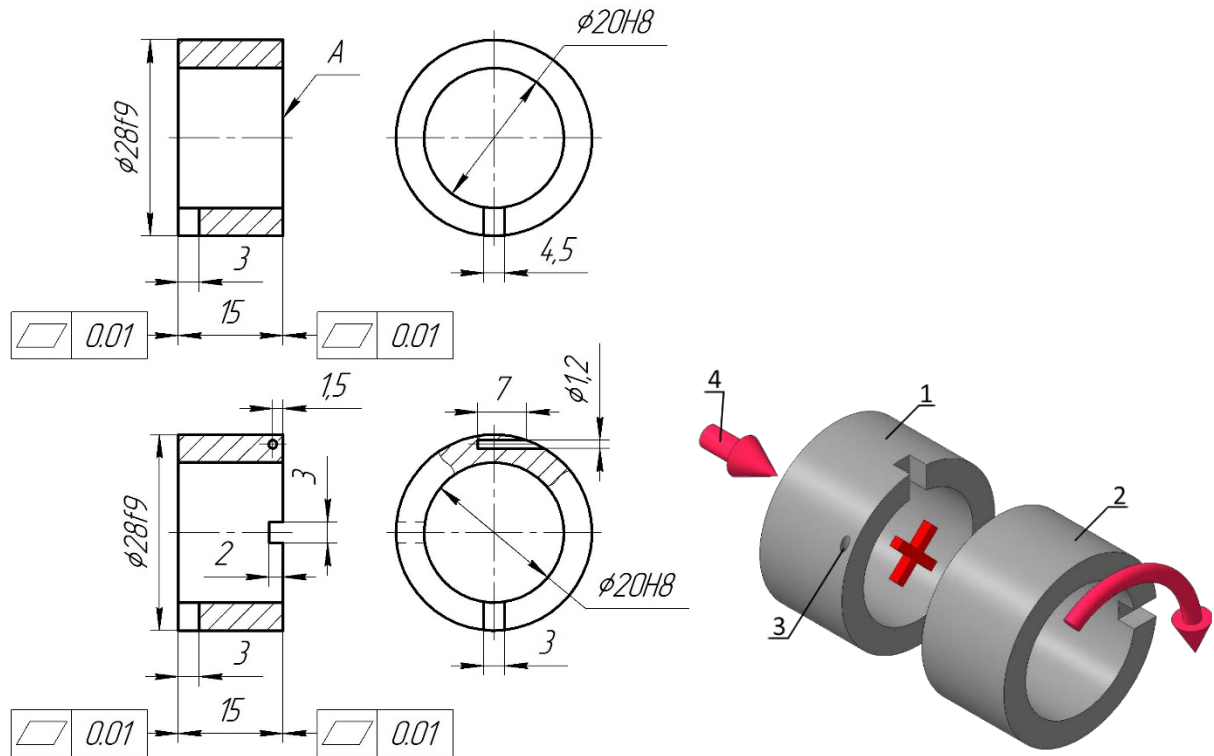


Рисунок 2.18 – Креслення та 3D модель зразків типу «Кільце-кільце»

За критерій величини зношування приймали втрату маси зразків після кожного етапу тертя, яку визначали при зважуванні на аналітичній вазі з точністю  $\pm 0,2$  мг. Після цього визначали інтенсивність зношування елементів пари тертя.

Величину середньої інтенсивності зношування  $J$  на кожному етапі дослідів визначали як відношення величини лінійного зношування  $\Delta h$  до пройденого шляху тертя  $L$ , тобто  $J = \Delta h / L$ .

Величину лінійного зношування  $\Delta h$  визначали за формулою:

$$\Delta h = \frac{\Delta G}{\rho \cdot F} \quad [\text{м}], \quad (2.1)$$

де  $\Delta G$  - втрата маси зразка на даному етапі випробувань, мг;

$\rho$  - густина матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

$F$  - площа поверхні тертя зразка, мм<sup>2</sup>.

Робочі поверхні рухомих зразків, виготовлених зі сталі 40ХН, зміцнювали фрикційною обробкою інструментом-диском з гладкою робочою поверхнею та інструментом з нарізаними поперечними пазами на робочій частині. Робочі поверхні контрзразків, виготовлених з сірого чавуну СЧ 20, були не зміцнені.

Дослідження зносотривкості при терті ковзання у оливо-абразивному середовищі проводили на установці тертя за схемою «кільце-вкладка» при швидкості ковзання  $V = 0,9$  м/с і зміні питомого навантаження  $P$  від 2 МПа до 6 МПа. Час випробувань пари тертя складав  $t = 6$  год. До мінеральної оливи додавали 0,1 % абразиву за масою дисперсністю 10-20 мкм. Оливу з абразивом інтенсивно подавали у зону тертя з використанням спеціальної автономної системи.

Досліджувані зразки (кільця та вкладки) виготовляли з сірого чавуну СЧ 20 (рис. 2.20). Для порівняння вкладки виготовляли з бронзи БрОЦС5-5-5 та антифрикційного сплаву БС-6. Зміцнювали тільки робочі поверхні кілець, робочі поверхні вкладок не зміцнювали, їх тільки шліфували електрокорундовим кругом. Зміцнення робочих поверхонь кілець проводили використовуючи фрикційне оброблення за допомогою спеціального пристрою, змонтованого на універсальному токарно-гвинторізному верстаті моделі 16К20. Як технологічне середовище використовували мінеральну оливу та оливу з поверхнево активними полімервмісними добавками. Шорсткість робочих поверхонь зразків після фрикційного оброблення становила  $R_a = 0,25-0,58$  мкм, після шліфування –  $R_a = 0,50-0,63$  мкм.

Дослідження опору втомному руйнуванню під час контактного навантаження проводили на круглих зразках діаметром 35 мм виготовлених зі сталей 40ХН та У8А після гартування і низького відпуску на трироликівій установці (рис. 2.21). Зовнішні притискні ролики діаметром 50 мм і радіусом контактної поверхні 8 мм були розташовані під кутом  $120^\circ$  між собою і за допомогою спеціального пристрою притискалися до досліджуваного зразка.

Така конструкція пристрою забезпечувала рівномірне притискання кожним роликом до досліджуваного зразка, а також контактні навантаження не передаються на підшипники шпинделя зразка. Притискні ролики виготовляли зі сталі ШХ15 після гартування і низького відпуску, (твердість 61-63 HRC). Обертання надавали зразку з частотою  $50 \text{ с}^{-1}$ , притискні ролики вільно обертались у підшипниках. Дослідження проводили у мінеральному мастилі «Індустріальне І-40». Базова кількість циклів до руйнування була  $5 \cdot 10^7$ .



Рисунок 2.19 – Універсальна машина тертя типу СМТ-1

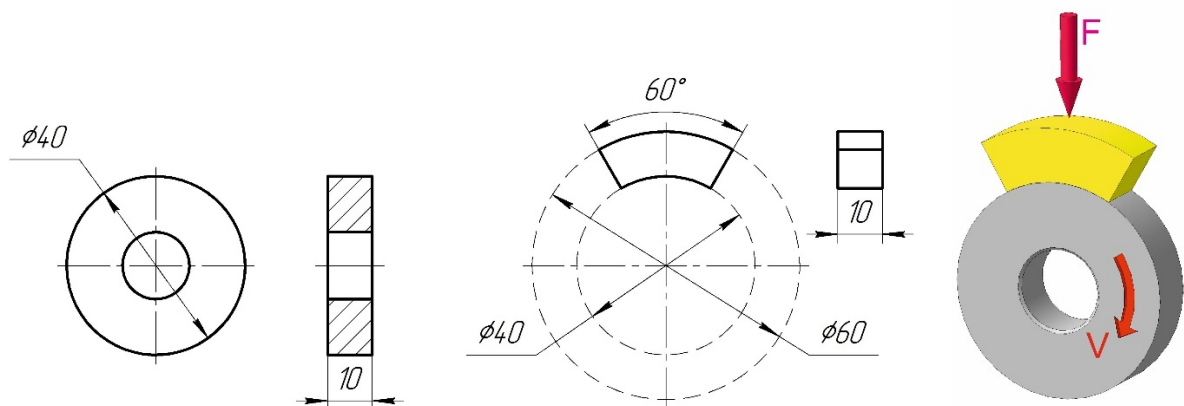


Рисунок 2.20 – Креслення та 3D модель зразків типу «кільце-вкладка»

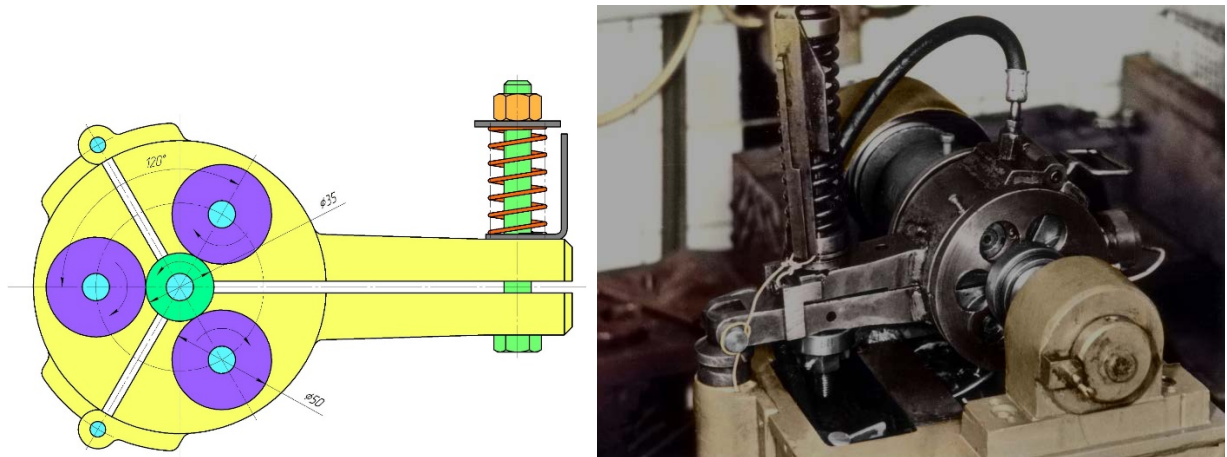


Рисунок 2.21 – Схема навантаження досліджуваних зразків на трироликівій установці (а) і загальний вигляд установки для визначення контактної втомної міцності

## 2.7 Методика визначення логарифмічного декременту

### 2.7.1 Зменшення рівня шуму після отримання даних з АЦП

Для визначення чи оцінки технічного стану або певних факторів технічної системи проводимо вимірювання вихідних параметрів і на основі вимірювань проводимо їх оцінку. Але у процесі вимірювання з'являються різного роду внутрішні і зовнішні «шуми» (спотворення), які вносять похибку у вимірювання. Класична схема вимірювання і оцифрування сигналу виглядає наступним чином.

Цифровою обробкою сигналів прийнято називати в обчислювальній техніці арифметичну обробку послідовностей рівновіддалених у часі відрізків.

Будь-який безперервний (аналоговий) сигнал  $s(t)$  може бути надано дискретизації за часом і квантуванню за рівнем (оцифрування), тобто представлений в цифровій формі. Якщо частота дискретизації сигналу  $F_d$  не менше, аніж подвоєна найвища частота в спектрі сигналу  $F_{max}$  (тобто,

$F_d \geq 2 \cdot F_{\max}$ , Теорема Найквіста-Шеннона-Котельникова), то отриманий дискретний сигнал  $s(k)$  еквівалентний сигналу  $s(t)$  в тому сенсі, що  $s(t)$  може бути в точності відновлений з  $s(k)$ . Перетворення сигналу в цифрову форму проводиться аналого-цифровими перетворювачами (АЦП). Як правило, вони використовують двійкову систему представлення при рівномірній шкалі з певним числом розрядів.

Для зменшення «шуму» у отриманих оцифрованих результатах за допомогою АЦП будемо використовувати математичні пакети *Mathcad* або *MATLAB* та дискретне перетворення Фур'є.

*Mathcad* містить функції для виконання швидкого дискретного прямого і зворотного перетворення Фур'є (ШПФ). У *Mathcad* входять два типи функцій для дискретного перетворення Фур'є: *fft/ifft* і *cfft/icfft*. Використовуйте функції *fft* і *ifft*, якщо виконані наступні дві умови: аргументи дійсні; вектор даних має  $2^m$  елементів.

**Перетворення Фур'є в дійсній області.** Для дійсних векторів з  $2^m$  елементами можна застосовувати пару функцій *fft/ifft*. В алгоритмі обчислення цих функцій використовуються переваги симетрії, яка існує тільки для дійсних даних.

*fft (v)* – Повертає дискретне перетворення Фур'є  $2^m$ -мірного дійсного вектору. Аргумент можна інтерпретувати як результат вимірювань через рівні проміжки часу деякого сигналу.

*ifft (v)* – Повертає зворотне дискретне перетворення Фур'є

Алгоритм визначення дійсного сигналу із вхідного сигналу подано на рис. 2.22

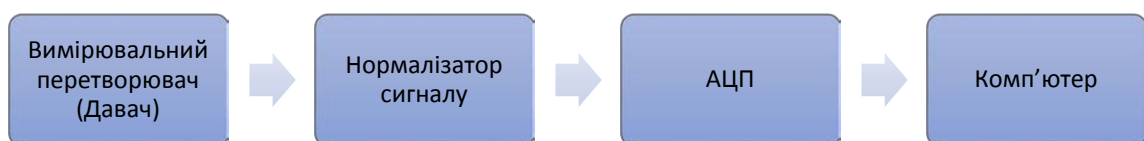


Рисунок 2.22 – Схема вимірювального каналу

### Перевірка даного алгоритму у середовищі MathCAD.

Для перевірки правильності фільтрації сигналу і відокремлювання дійсного сигналу задаємо функцію і до якої додаємо випадкові величини, тобто «шум» та перевіримо відповідність сигналу після ШПФ з дійсним сигналом.

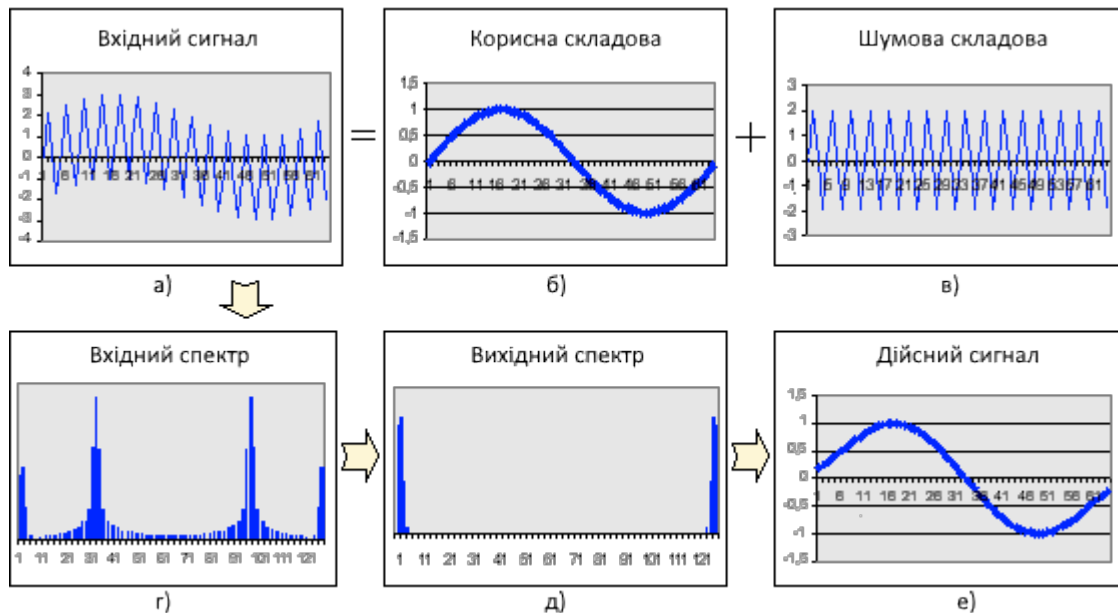


Рисунок 2.23 – Алгоритм використання ШПФ.

Нехай дійсний сигнал відповідає рівнянню, графік функції представлено на рис. (2.24):

$$f(x) = \sin(0.045x) + \cos(0.057x)$$

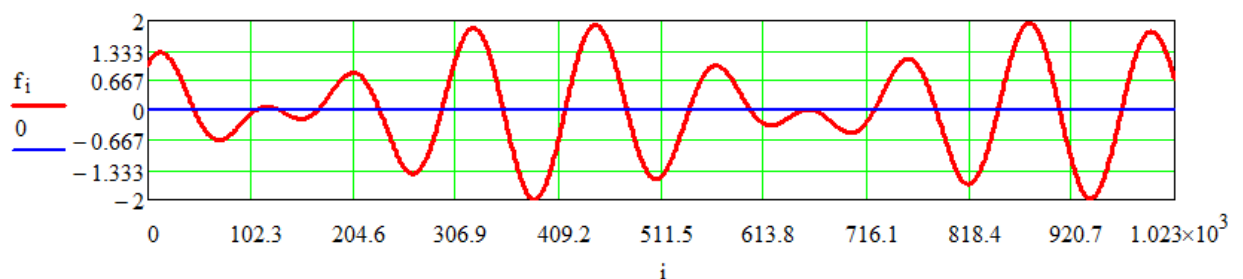


Рисунок 2.24 – Графік дійсного сигналу

За допомогою генератора випадкових чисел додаємо перешкоди у дійсний сигнал. Спотворений дійсний сигнал представлено на рис. 2.25

За допомогою функції `cfft` проводимо перетворення Фур'є та отримуємо спектр сигналу (Фур'є-образ сигналу), який представлено на рис.2.26.

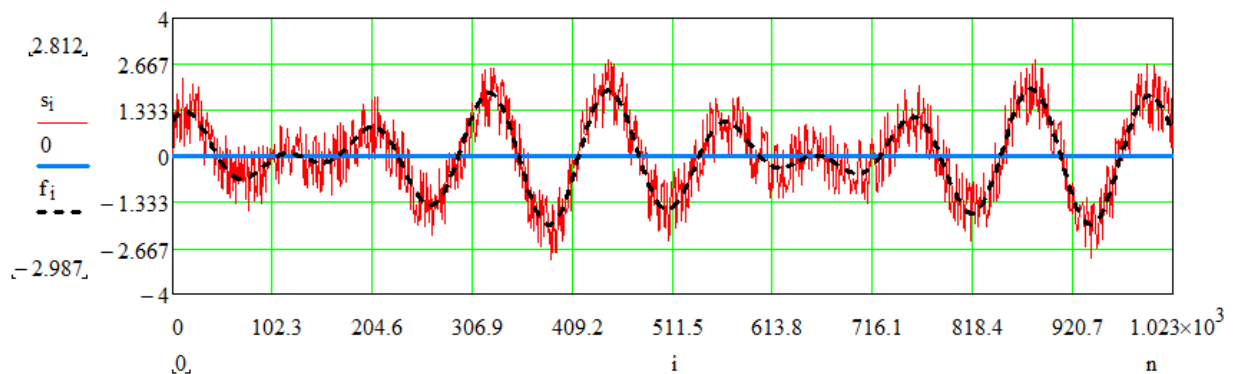


Рисунок 2.25 – Спотворений сигнал

Розкладання сигналу на синусоїди (тобто отримання коефіцієнтів) називається прямим перетворенням Фур'є. Провівши вибір коефіцієнтів, які відповідають умові  $k_1 \leq |C(x)| \leq k_2$ , підставляємо їх у функцію зворотного перетворення Фур'є та отримує сигнал без перешкод.

Отже, ШПФ, яке виконане у середовищі Mathcad за допомогою функцій `cfft/icfft` адекватно усуває перешкоди, які паралельно зафіксовані з реальним сигналом (рис. 2.27).

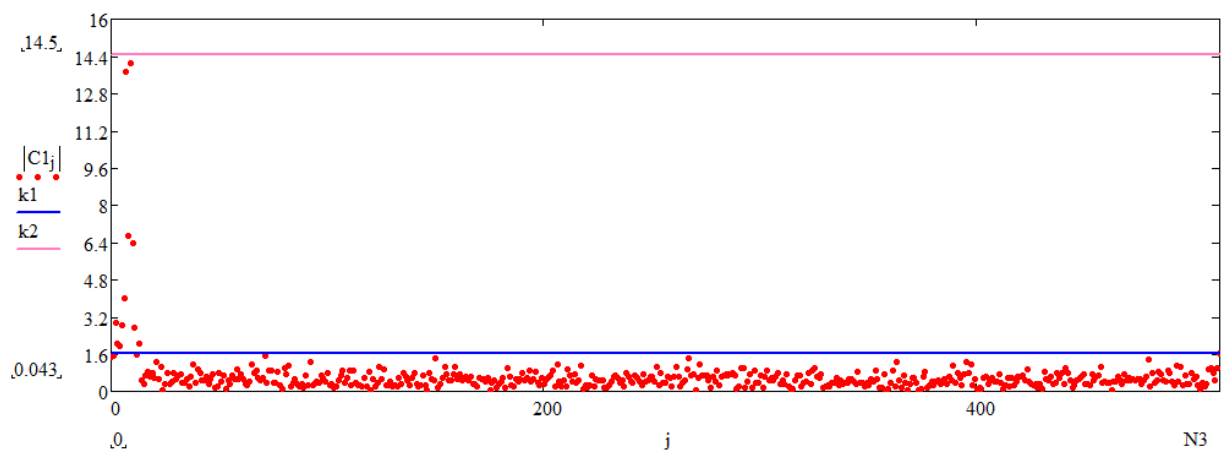


Рисунок 2.26 – Фур'є-образ сигналу

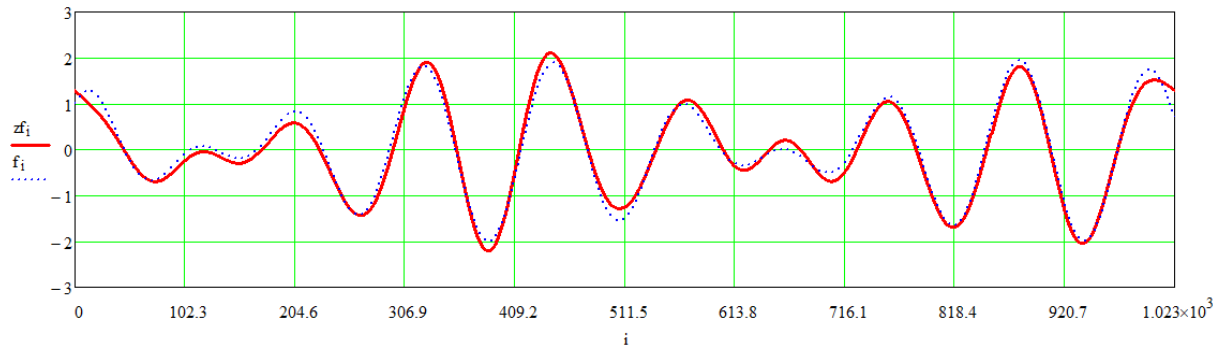


Рисунок 2.27 – Порівняння дійсного сигналу та сигналу після ШПФ

### 2.7.2 Коефіцієнт в'язкого опору

Значення коефіцієнта в'язкого опору  $\mu$  визначимо за допомогою логарифмічного декременту загасання за наступною формулою (рис. 2.28):

$$\mu = \frac{2m \ln \left( \frac{X_i}{X_{i+1}} \right)}{T} \quad (2.2)$$

де,  $\mu$  – коефіцієнт в'язкого опору,  $\left( \frac{\text{Нс}}{\text{м}} \right)$ ;

$m$  – маса досліджуваного деталі чи вузла, (кг);

$X_i$  та  $X_{i+1}$  – максимальне значення двох послідовних амплітуд;

$T$  – період між двома послідовним амплітудами, (с).

Основним завданням є записати значення амплітуд у необхідному напрямі для певної деталі чи вузла за допомогою датчика (акселерометра) та АЦП.

Для дослідження імпульсного збурення використовували набір фірми *PCB*, в комплект входить ударний молоток моделі M355B15 та акселерометр моделі M353 (рис. 2.29). Цей молоток складається з корпусу, п'єзоелектричного динамометра та ударного елемента, які є швидкозмінним та встановлені на кінцях головки молотка. П'єзоелектричний динамометр дає змогу виміряти електричні сигнали, які складаються з амплітуди і частоти



прикладеної сили. Для вимірювання амплітуд та періоду коливань використовуємо акселерометр, який вимірює коливання у напрямі перпендикулярному до площини встановлення. Оцифрування даних виконано за допомогою АЦП моделі 9162 фірми *National Instruments*.

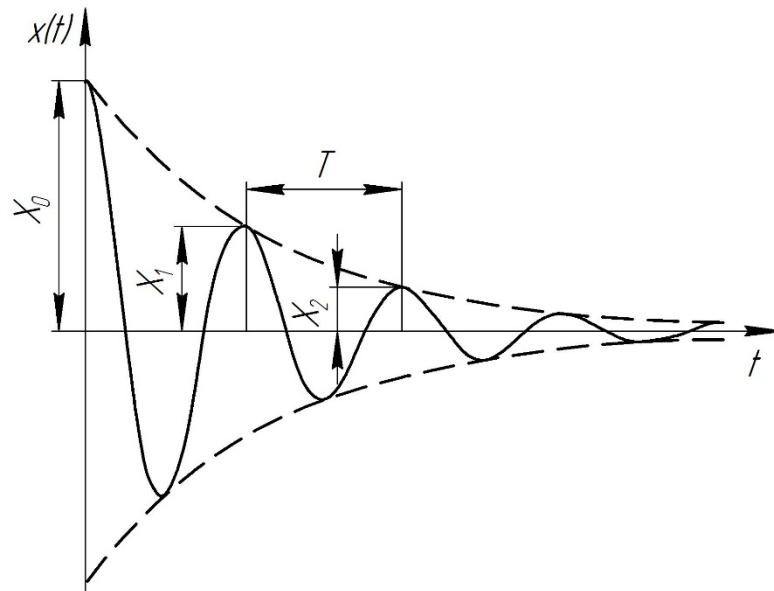


Рисунок 2.28 – Затухаючі коливання

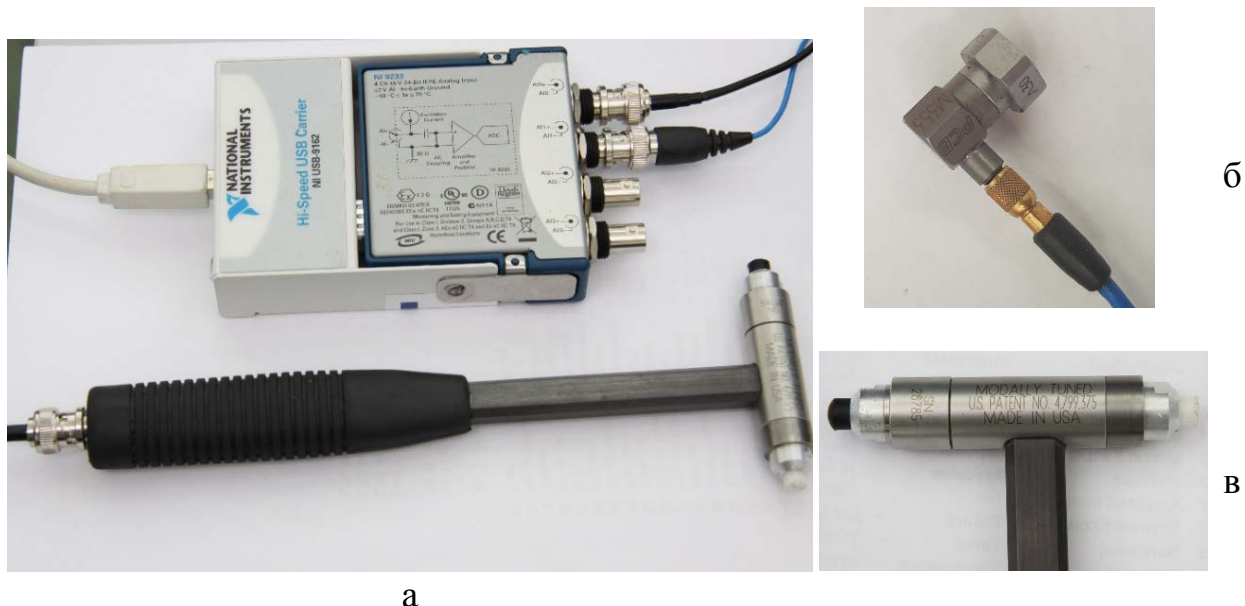


Рисунок 2.29 – Комплект для визначення імпульсного збудрення та затухаючих коливань фірми PCB (США)

## **2.8 Досліджень балансу жорсткості складових верстата**

Завданням дослідження балансу жорсткості верстата є визначення розподілу жорсткості окремих вузлів відносно суми усієї жорсткості технологічної системи.

Баланс жорсткості верстата можна визначити за допомогою вимірювання переміщень відповідних його вузлів під навантаженням в площинах, які паралельні та перпендикулярні площині напрямних станини.

Визначення балансу податливості (жорсткості) верстата дає змогу визначити коефіцієнти жорсткості окремих вузлів верстата для побудови математичної моделі його пружної системи.

### **2.8.1. Досліджень балансу жорсткості складових токарного верстата**

Відносно зміщення оправки, яка встановлена у патроні верстата, а також оправки, яка встановлена на шпиндель спеціального пристрою для зміцнення циліндричних поверхонь деталей машин прийнято як сумарне пружне переміщення системи верстата, що складається з  $n$  ланок.

Визначення балансу пружних переміщень здійснювали на токарно-гвинторізному верстаті традиційної компоновки мод. 16К20. Навантаження необхідно прикладати перпендикулярно осі шпинделя в напрямках паралельно та перпендикулярно площині напрямних станини. Навантажувальний пристрій закріплюється на шпинделі спеціального пристрою замість інструмента, контроль навантаження виконується динамометром стиску. Вимірювання величини пружних переміщень вузлів верстата виконували індикаторами у яких ціна поділки шкали рівна 0,001 мм та 0,002 мм після навантаження та розвантаження з кроком – 1 кН. Схема розташування індикаторів представлена на рис. 2.30. для визначення балансу

пружних переміщень вузлів верстата мод. 16К20.

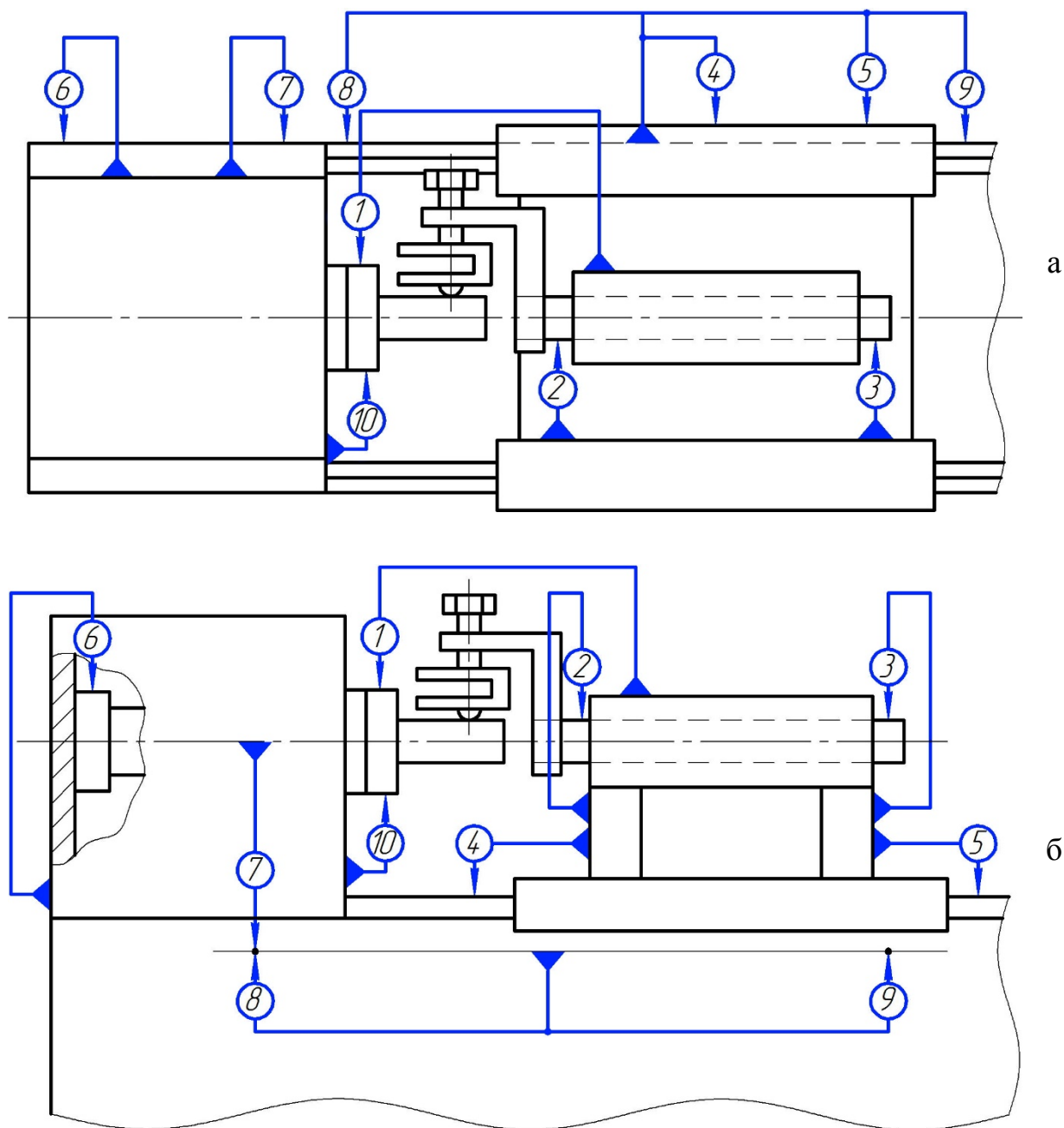


Рисунок 2.30 – Схема розташування індикаторів для визначення балансу пружних переміщень вузлів верстата мод. 16К20 при навантаженні горизонтальною силою (а) та вертикальною силою (б)

Для визначення переміщень елементів пружної системи верстата мод. 16К20 необхідно виміряти відносні переміщення за допомогою індикаторів наступних елементів: індикатор 1 – шпинделя відносно спеціального

пристрою для зміцнення; індикатори 2 і 3 – спеціальної оправки, закріпленої на шпинделі спеціального пристрою для зміцнення, відносно корпусу супорта; індикатори 4 і 5 – супорта відносно станини; індикатори 6 і 7 – шпиндельної бабки відносно станини; індикатори 8 і 9 – прогину станини; індикатор 10 – шпинделя відносно шпиндельної бабки.

За отриманими результатами визначення податливості в точках у яких були встановлені індикатори можна визначити баланс податливості, який визначає відсоткове значення переміщень окремих вузлів верстата відносно сумарного зміщення осей шпинделя та спеціального пристрою для зміцнення циліндричних поверхонь деталей машин.

Баланс податливості розраховується за наступною формулою:

$$\Delta_{\text{пр}i} = \frac{\Delta r_{\text{пр}i} \cdot K_{\text{пр}i}}{\sum_{i=1}^n \Delta r_{\text{пр}i} \cdot K_{\text{пр}i}} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

де  $\Delta_{\text{пр}i}$  – складова балансу пружних переміщень  $i$ -го вузла верстата;

$\sum_{i=1}^n \Delta r_{\text{пр}i} \cdot K_{\text{пр}i}$  – загальна податливість пружної системи верстата, яка визначається сумарним зміщенням осей шпинделя та спеціального пристрою для зміцнення циліндричних поверхонь деталей машин в точці встановлення індикатора 1 від дії навантаження  $P$  в кожному з розглянутих напрямків;

$K_{\text{пр}i}$  – коефіцієнт впливу пружних переміщень складових ланок.

### **2.8.2. Досліджень балансу жорсткості складових плоскошліфувального верстата**

Відносно зміщення оправки, яка встановлена на шпинделі верстата та стола верстата прийнято як сумарне пружне переміщення системи верстата, що складається з  $n$  ланок.

Визначення балансу пружних переміщень здійснювали на плоско-

шліфувальному верстаті традиційної компоновки. Згідно рекомендацій стандартів виміру жорсткості плоскошліфувального верстата навантаження необхідно прикладати під кутом  $20^\circ$  відносно вертикального переміщення шпindelної бабки. Навантажувальний пристрій закріплюється на шпинделі верстата та кріпиться за «Т» пази на столі верстата, контроль навантаження виконується динамометром стиску. Вимірювання величини пружних переміщень вузлів верстата виконували індикаторами у яких ціна поділки шкали рівна 0,001 мм та 0,002 мм після навантаження та розвантаження з кроком – 1 кН. Схема розташування індикаторів представлена на рис. 2.31. для визначення балансу пружних переміщень вузлів плоскошліфувального верстата.

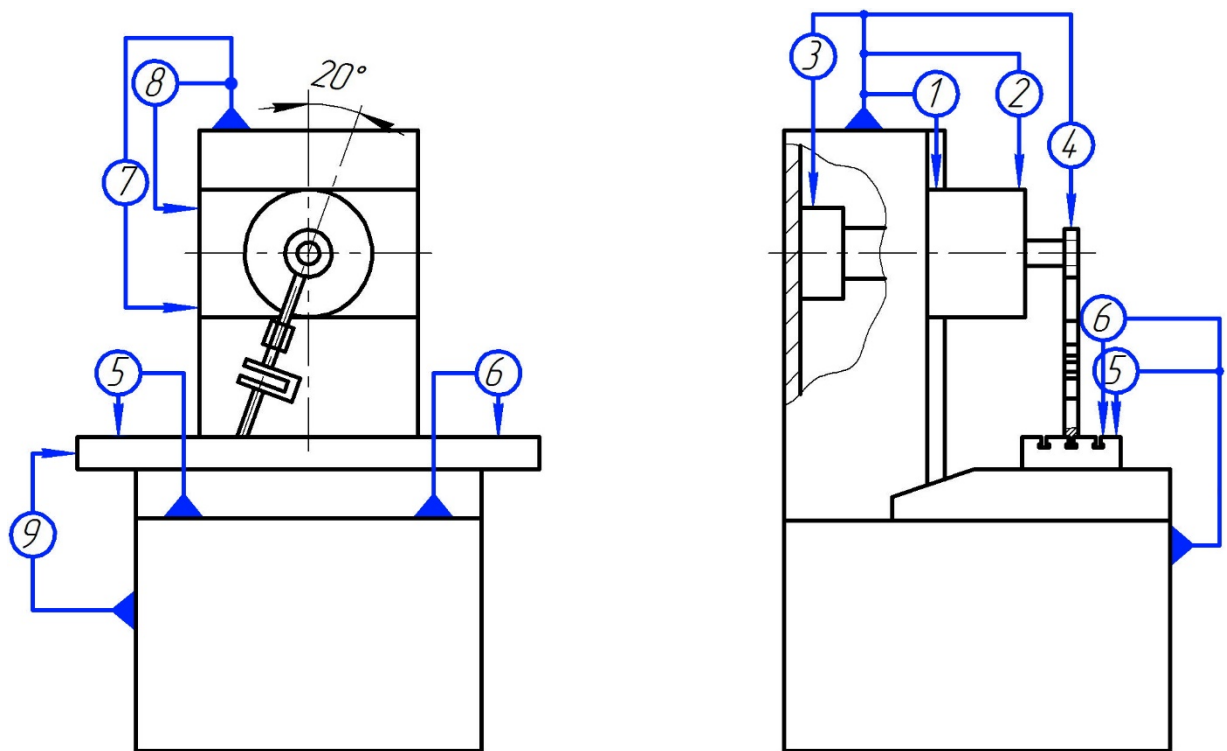


Рисунок 2.31 – Схема розташування індикаторів для визначення балансу пружних переміщень вузлів плоско-шліфувального верстата

Для визначення переміщень елементів пружної системи плоскошліфувального верстата необхідно виміряти відносні переміщення за допомогою індикаторів наступних елементів: індикатори 1 і 2 – шпindelної

бабки відносно станини (вертикальний напрям); індикатори 3 і 4 – шпинделя відносно станини (вертикальний напрям); індикатори 5 і 6 – стола верстата відносно станини (вертикальний напрям); індикатори 7 і 8 – шпindelної бабки відносно станини (горизонтальний напрям); індикатор 9 – стола верстата відносно станини (горизонтальний напрям);

## **2.9 Визначення температури за глибиною під час зміння плоских поверхонь**

Кінетика температури у приповерхневих шарах є дуже важливим фактором при дослідженні структурно-напруженого стану поверхневих шарів металу та їх формування, а також параметрів якості обробленої поверхні металу.

Для реєстрації температури у поверхневому шарі запропоновано спеціальний розбірний плоский зразок (рис. 2.32). Цей зразок складається з двох частин, які з'єднуються між собою за допомогою болтового з'єднання. На одній частині зразка фрезеровано нахилений паз у який встановлюються термопари, шириною 5 мм і під кутом  $1^{\circ}30'$ . На початку пазу товщина стінки складає близько 100 мкм, завдяки конусності, товщина стінки вдовж зразка збільшується. Шліфування базової і оброблюваної поверхонь проводили попередньо зібраного зразка.

Для вимірювання температури у поперечному напрямі у фрезерований паз припаювали три термопари в різних місцях за довжиною оброблюваної поверхні зразка. Після припаювання термопар у пазі, для зменшення можливості перекошування з'єднаних частин їх з'єднували між собою на плиті. Після з'єднання частин між собою зразка проводили повторну операцію шліфування зразка з обох сторін на даному плоскошліфувальному верстаті.

Після фрикційного зміцнення досліджуваного зразка, за допомогою

мікроскопа проводили вимірювання глибини, на якій припаяна термопара, враховуючи величину осадки металу, яка становила 20-30 мкм, термопари були припаяні на глибині 310-330 мкм, 610-640 мкм та 950-960 мкм.

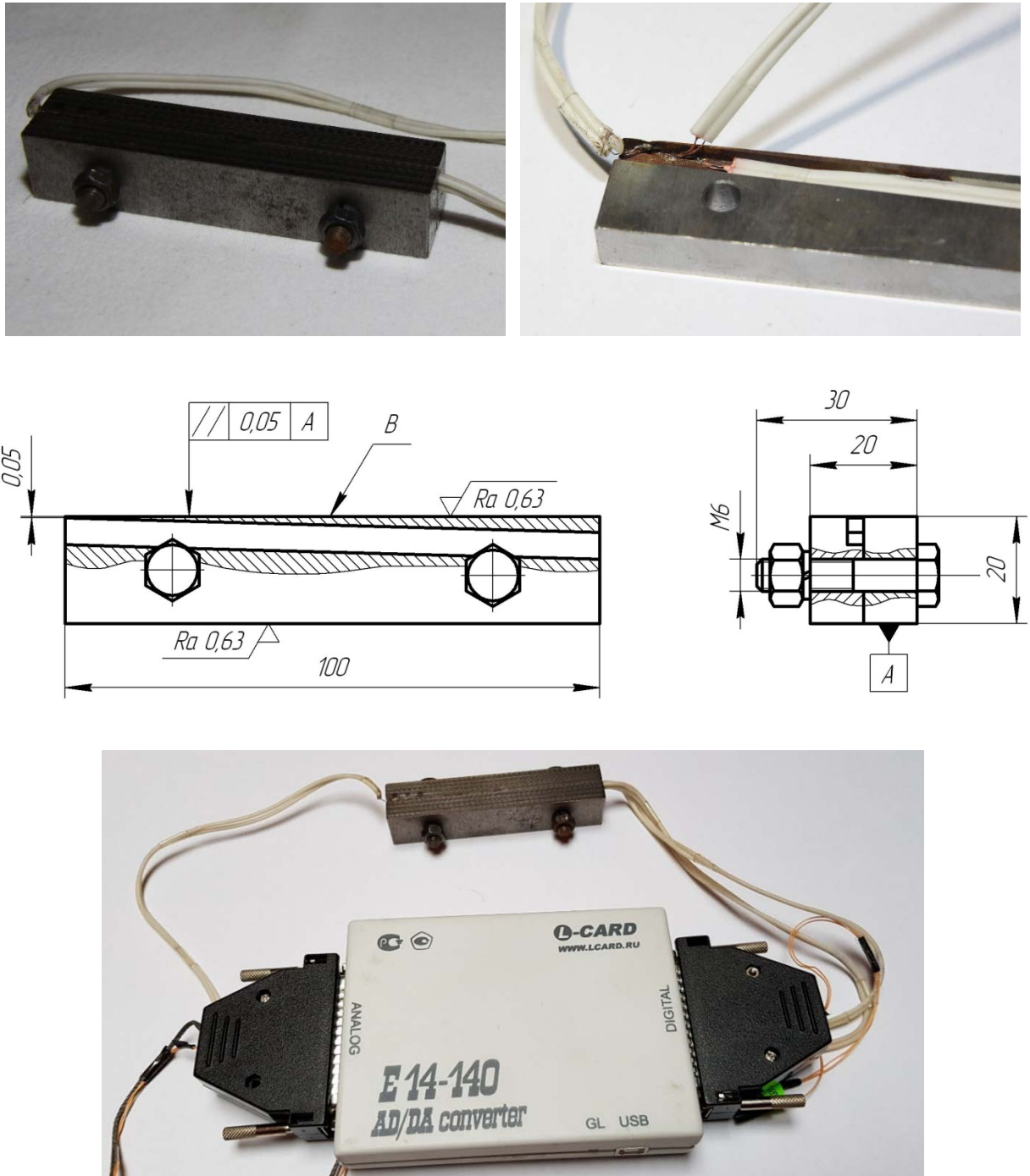


Рисунок 2.32 – Зразок для вимірювання температури за глибиною зміцненого шару при фрикційній обробці: а – фото зразка, б – ескіз зразка

Вимірювання температури проводили за допомогою хромель-

алюмелевих термопар (ТХА). Перед початком вимірювання проводили тарування. Вихідний сигнал з термопар через підсилювач подавали на аналогово-цифровий перетворювач моделі E14-440 фірма L-card (частота перетворення сигналу 100 кГц) та запис даних з кеш-пам'яті АЦП записували на комп'ютері за допомогою програми «*Power Graph*», яка має змогу такого здійснювати опрацювання вхідних сигналів та відображати отримані сигнали. Схема підключення термопар подана на рис. 2.33.

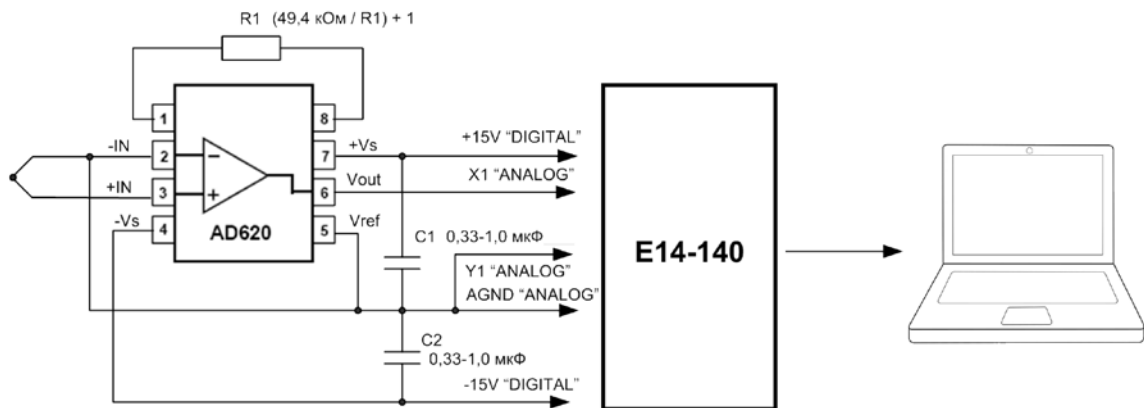


Рисунок 2.33 – Схема підключення термопар за допомогою підсилювача до комп'ютера через АЦП

## 2.10 Математичне моделювання технологічних параметрів фрикційного оброблення

Для проведення експериментальних досліджень використовують методи математичного планування експериментів, які дозволяють одночасно змінювати усі досліджувані фактори, і отримати математичні моделі процесу при неповному знанні досліджуваних фізичних явищ. Математичні методи використовуються на стадії підготовки, проведення експериментальних досліджень та оброблення отриманих результатів [239].

Під час фрикційного оброблення поверхневі шари металу оброблюваних



поверхонь деталей нагріваються з великими швидкостями до температур, які перевищують точки фазових переходів ( $A_{c3}$ ), а потім швидко охолоджуються. У зоні контакту інструмента з оброблюваною поверхнею проходить інтенсивне деформування металу. У поверхневих шарах формується зміцнений шар з нанокристалічною структурою. Отримати аналітичні залежності, які описують взаємозв'язок параметрів фрикційного оброблення з товщиною зміцненого нанокристалічного шару, складовими сили дії у зоні контакту інструмент-деталь, глибиною насичення легуючими елементами є проблематично.

На основі математичного планування експерименту отримані математичні залежності взаємозв'язку параметрів фрикційного оброблення з товщиною зміцненого шару, складових сили дії у зоні контакту інструмент-деталь.

Математична теорія експерименту використовує твердження на основі, якої будь-яку аналітичну функцію  $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , ( $x_1, x_2, \dots, x_n$  – незалежні змінні) можна записати у вигляді поліному, розклавши її у ряд Тейлора [240].

Тобто, отримаємо довільну аналітичну залежність у вигляді ряду:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{(n-1)n}x_{n-1}x_n + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{nn}x_n^2. \quad (2.4)$$

При проведенні експериментальних досліджень математичні залежності модельованих процесів можна описати рівняннями регресії ступеневого вигляду:

$$\delta = C_\delta v_\delta^m s^n t^l. \quad (2.5)$$

Для моделювання параметрів процесу фрикційного оброблення приймаємо змінними факторами режими оброблення, а саме:  $v_{cm}$  – швидкість переміщення деталі,  $s$  – поперечна подача,  $t$  – величина втискання.

Залежності, які отримані під час експериментальних досліджень мають

нелінійний характер, тому для їх моделювання використовуємо плани 2-го порядку. Використовуємо некомпозиційні плани другого порядку, які мають за критерій оптимальності рототабельність, тобто інваріантність щодо повороту вісей у факторному просторі [241]. Основними перевагами некомпозиційних планів є те, що варіювання параметрів кожного фактору проводиться лише на трьох рівнях, є значна кількість нулів у рядках плану і це спрощує обчислення коефіцієнтів регресії, є меншою кількістю дослідів. Некомпозиційні плани мають ортогональність і рототабельність одночасно, тому не вирішується питання щодо вибору критерію оптимальності плану.

За результатами експериментів, проведених згідно матриць некомпозиційного плану другого порядку, використовуючи три фактори, будували математичну модель на основі рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 \quad (2.6)$$

Для проведення експериментів і побудови математичної моделі необхідно тимчасово відійти від фізичного змісту змінних факторів та перейти до їх безрозмірних величин. Для цього кодуємо фактори лінійно перетворюємо координати факторного простору, тобто переносимо початки координат у нульову точку плану і вибираємо масштаби за вісями в одиницях інтервалів варіювання. У кодованому вигляді позначаємо верхній рівень як +1, нижній – як -1, а основний як 0. Кодовані значення факторів  $x_i$  визначаються з залежності [242]:

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{i \max})}{\ln \tilde{x}_{i \max} - \ln \tilde{x}_{i \min}} + 1. \quad (2.7)$$

де  $\tilde{x}_i$  – натуральне значення  $i$ -го фактору;

$\tilde{x}_{i \max}, \tilde{x}_{i \min}$  – відповідно максимальні та мінімальні значення  $i$ -го фактору в натуральних одиницях.

Щоб виключити систематичну похибку під час виконання експериментів, згідно відповідного рядка матриці планування, їх проводили у випадковій послідовності, на основі таблиці випадкових чисел. Кожний експеримент згідно плану повторювали 3-5 разів. За результатами проведених  $n$  паралельних експериментів для кожного рядка матриці визначали середнє арифметичне значення параметра оптимізації  $\bar{y}_j$ :

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju}, \quad (2.8)$$

де  $u$  – номер паралельного експерименту;

$y_{ju}$  – значення параметрів оптимізації для  $u$ -го паралельного експерименту згідно  $j$ -му рядка матриці.

Далі під час обчислення результатів моделювання застосовували лише середні значення проведених паралельних експериментів.

За результатами проведених експериментів, згідно матриці планування визначили коефіцієнти рівняння регресії використовуючи метод найменших квадратів за формулами [242]:

$$\begin{aligned} b_o &= \frac{1}{n_o} \sum_{u=1}^{n_o} y_{ou}; \quad b_i = A \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j; \quad b_{il} = D \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j; \\ b_{ii} &= B \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j + C \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{pn_o} \sum_{u=1}^{n_o} y_{ou}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

де  $n_o$  – число експериментів у центрі плану;

$u$  – номер паралельного експерименту в центрі плану;

$y_{ou}$  – величина функції відклику в  $u$ -му експерименті;

$j$  – номер експерименту згідно матриці планування;

$i, j$  – номери факторів моделі;

$x_{ij}, x_{lj}$  – кодовані величини  $i$ -го та  $l$ -го факторів у  $j$ -му досліді;

$y_j$  – величина функцій відклику в  $j$ -му експерименті;  $A, B, C, D, p$  – константи, які залежать від кількості факторів.

Дисперсію відтворюваності дослідів  $s_y^2$  визначали за результатами експериментів проведених у центрі плану згідно залежності:

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{i \max})}{\ln \tilde{x}_{i \max} - \ln \tilde{x}_{i \min}} + 1. \quad (2.10)$$

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_o} (y_{ou} - \bar{y}_o)^2}{n_o - 1}, \quad (2.11)$$

де  $\bar{y}_o$  – середнє арифметичне значення функцій відклику, обчислене за результатами  $n_o$  експериментів у центрі плану.

Перевіряємо значимість коефіцієнтів моделі використовуючи  $t$ -критерій Стьюдента, порівнюючи абсолютні величини отриманих коефіцієнтів моделі з величинами довірливих інтервалів. Довірливі інтервали обчислювали за дисперсіями коефіцієнтів регресії  $s^2\{b_o\}$ ,  $s^2\{b_i\}$ ,  $s^2\{b_{il}\}$ ,  $s^2\{b_{ii}\}$  за формулами:

$$s^2\{b_o\} = \frac{1}{n_o} s_y^2; \quad s^2\{b_i\} = A s_y^2; \quad (2.12)$$

$$s^2\{b_{il}\} = D s_y^2; \quad s^2\{b_{ii}\} = B_1 s_y^2,$$

Дисперсію відтворюваності проведених експериментів  $S_y^2$  визначаємо за результатами проведених  $n_o$  дослідів у центрі плану за формулою:

$$S_y^2 = \frac{S_E}{n_o - 1}, \quad (2.13)$$

$$s_E = \sum_{u=1}^{n_o} (y_{ou} - \bar{y}_o)^2; \quad \bar{y}_o = \frac{1}{n_o} \sum_{u=1}^{n_o} y_{ou}.$$

Величини довірливих інтервалів  $\Delta b_o$ ,  $\Delta b_i$ ,  $\Delta b_{il}$ ,  $\Delta b_{ii}$  знаходимо за формулами:

$$\begin{aligned}\Delta b_o &= \pm t_m s\{b_o\}, & \Delta b_i &= \pm t_m s\{b_i\}, \\ \Delta b_{il} &= \pm t_m s\{b_{il}\}, & \Delta b_{ii} &= \pm t_m s\{b_{ii}\},\end{aligned}\tag{2.14}$$

де  $t_m$  – табличне значення критерію згідно прийнятого рівня значимості та числа ступенів вільності  $f$ .

Число ступенів вільності визначаємо за формулою:

$$f = (n - 1)N.\tag{2.14}$$

Коефіцієнти регресії є значимими, коли їх абсолютні величини будуть більшими за довірливий інтервал. Статистично незначимі коефіцієнти виключаються з рівняння регресії. У випадку коли коефіцієнти регресії є незначимими при квадратичному члені, тоді усі отримані коефіцієнти перераховуються з використанням методу найменших квадратів.

Адекватність отриманої математичної моделі перевіряються згідно  $F$ -критерію Фішера за рівнянням:

$$F_p = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} < F_m\tag{2.15}$$

Дисперсія адекватності отриманої математичної моделі  $s_{ad}^2$  обчислюється за формулою

$$s_{ad}^2 = \frac{s_R - s_E}{f},\tag{2.16}$$

де  $s_R$  – сума квадратів відхилень емпіричних значень  $y_j$  функції відклику від її значень  $\hat{y}_j$ , визначених з отриманого рівняння регресії;

$f = N - k' - (n_o - 1)$  – число ступенів вільності;

$k'$  – кількість коефіцієнтів апроксимуючого поліному.

У випадку, коли величина критерію  $F_p$  є меншою за табличне значення  $F_m$  згідно прийнятого рівня значимості і відповідних ступенях вільності,

гіпотеза адекватності побудованої математичної моделі приймається.

Підставляючи в обчислені рівняння регресії залежності переведення розмірних величин у безрозмірні отримуються математичні моделі шуканих взаємозв'язків параметрів оброблення.

Оброблення результатів проведених експериментів і побудова математичних моделей проводили з використанням багатофункціонального математичного пакету MathCAD. Отримані розрахунки приведено у Додатку Н.

### **2.11 Діаграма причинно-наслідкових зв'язків між факторами фрикційного оброблення**

Процес фрикційного оброблення робочих поверхонь деталей розглянемо як технічну систему. Причинно-наслідкові зв'язки, які виникають між параметрами та факторами фрикційного оброблення робочих поверхонь деталей машин представимо, використовуючи діаграму Ісікави. Причинно-наслідкова діаграма Ісікави відома як «риб'ячий скелет» (*Fishbone Diagram*) або як діаграма «аналізу кореневих причин» [243, 244].

Діаграма базується на графічному способі дослідження причинно-наслідкових зв'язків між причинами та наслідками досліджуваного процесу, виявити важливі взаємозв'язки між параметрами та краще вивчити процес фрикційного оброблення. Діаграма дозволяє визначити чинники, які впливають на поставлену проблему та визначити їх дії, проаналізувати можливість проведення процесу у певних допустимих межах.

Для правильного вирішення поставленої проблеми, її краще візуалізувати, тобто представити графічно. Досліджувану проблему зображується у вигляді «голови риби» скелету». «Хребет скелету» умовно представляється прямою горизонтальною лінією, а «кістки» – нахиленими

лініями, які описують причини і фактори, що безпосередньо впливають та мають відношення до даної проблеми. Усі можливі варіанти причин поділяються за принципом «5М» (рис. 2.34):

- *Man* (оператор) – причини, пов'язані з впливом людського фактору;
- *Machines* (обладнання) – причини, пов'язані з впливом параметрів обладнання;
- *Materials* (матеріали) – причини, пов'язані з впливом характеристик та властивостей оброблюваних та допоміжних матеріалів;
- *Methods* (методи оброблення, технології) – причини, пов'язані з впливом параметрів технологій виготовлення, з організацією виробничих процесів;
- *Measurements* (вимірювання) – причини, пов'язані з впливом методів, засобів та обладнання для вимірювання процесів виготовлення та виробів.

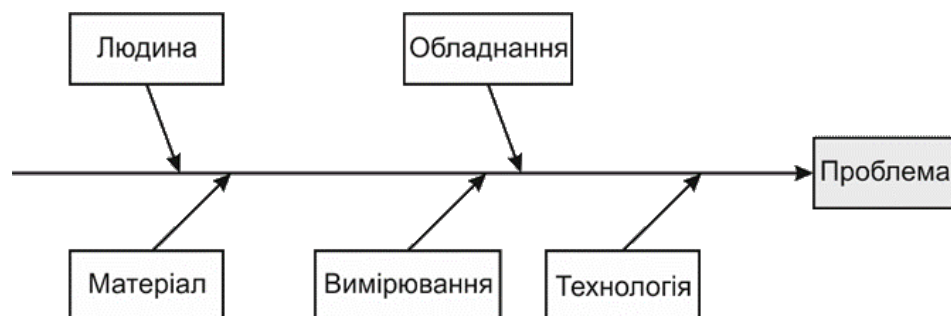


Рисунок 2.34 – Діаграма Ісікави з основними категоріями причин і наслідків

Основні категорії причин і наслідків на діаграмі розподіляються у спадаючому порядку. Спочатку представляються категорії, які з найбільшою ймовірністю можуть впливати на причини виникнення даної проблеми. Далі для кожної розглядуваної категорії відображаються додаткові «кістки», які зазначають окремі причини. Отримується розгалужена сітка, яке пов'язує причини виникнення певних суперечностей на різних рівнях деталізації.

Ймовірні фактори, які впливають на формування якісних зміцнених поверхневих шарів з нанокристалічною структурою на оброблюваних

поверхнях деталей після фрикційного оброблення можна представити на діаграмі Ісікави.

Параметром, який приймається як наслідок, для фрикційного оброблення робочих поверхонь є формування якісних зміцнених шарів з нанокристалічною структурою, які здатні підвищити експлуатаційні характеристики деталей машин.

Головними факторами, які найбільше впливають на формування зміцнених шарів з нанокристалічною структурою у поверхневих шарах деталей машин є: технологія, умови оброблення, обладнання, деталь, інструмент. Це фактори першого рівня.

Усі зазначені фактори є взаємопов'язані і не завжди можуть розділені на вказані категорії. Процес фрикційного оброблення робочих поверхонь деталей машин включає ряд факторів, які дещо є специфічними, для формування зміцнених поверхневих шарів. У нашому випадку на процес формування параметрів зміцнених шарів найбільше залежить від механічних, термічних, фізичних, хімічних процесів, які проходять у поверхневих шарах металу деталей.

Формування зміцненого шару проходить за рахунок високошвидкісного тертя металевого інструмента по оброблюваній поверхні. У зоні контакту інструмент-деталь виникає джерело висококонцентрованої енергії. На формування джерела концентрованої теплової енергії впливають сили тертя між інструментом і оброблюваною поверхнею, які залежать від матеріалу з якого виготовлений інструмент. Інтенсивність теплового потоку впливає на швидкість нагрівання оброблюваної поверхні.

Для другого рівня визначимо наступні фактори:

- для технології: технологічна схема зміцнення; режими обробки; технологічне середовище;
- для умов оброблення: швидкість охолодження; швидкість нагрівання; температура нагрівання; швидкість зсувного деформування; масоперенос;
- для обладнання: тип; жорсткість складових; частота обертання



шпинделя; демпфування;

- для деталі: матеріал; геометричні характеристики;
- для інструмента: матеріал; розміри; форма робочої частини.

На третьому рівні фактори, які відносяться до процесу формування зміцнених шарів з нанокристалічною структурою, ще більше деталізуються.

Дані фактори впливають на фактори другого рівня. Запишемо

- для матеріалу: термофізичні властивості; структура; шорсткість; хімічний склад;
- для характеристики деталі: маса; розміри; форма;
- для режимів обробки: швидкість деталі; подача;
- для технологічного середовища: хімічний склад; поверхнева активність; функціональна активність;
- для характеристики обладнання: жорсткість; частота обертання; дисипація.

Записуємо їх поряд з відповідними факторами другого рівня і з'єднуємо стрілками.

Також виділимо фактори на які неможливо вплинути, у даному випадку це хімічний склад матеріалу деталі, фізико-механічні властивості інструмента.

Оцінимо вплив усіх рівнів факторів на характеристики формування параметрів якості оброблювальної поверхні деталі.

Отримана діаграма дозволяє детальніше охарактеризувати процес фрикційного оброблення робочих поверхонь деталей машин, який є ефективним методом підвищення довговічності деталей машин в експлуатації. Узагальнена інформація про процес формування зміцнених поверхневих шарів з нанокристалічною структурою отримана на основі побудованої діаграми є необхідної для прийняття керуючих рішень. Діаграма Ісікава дозволяє представити взаємозв'язок між причинами і наслідками та зіставити їх відносну важливість. У той же час не розглядається логічна перевірка ланцюжка причин, що ведуть до першопричини, тобто відсутні правила перевірки в зворотному напрямку від першопричини до результатів (рис.2.35).

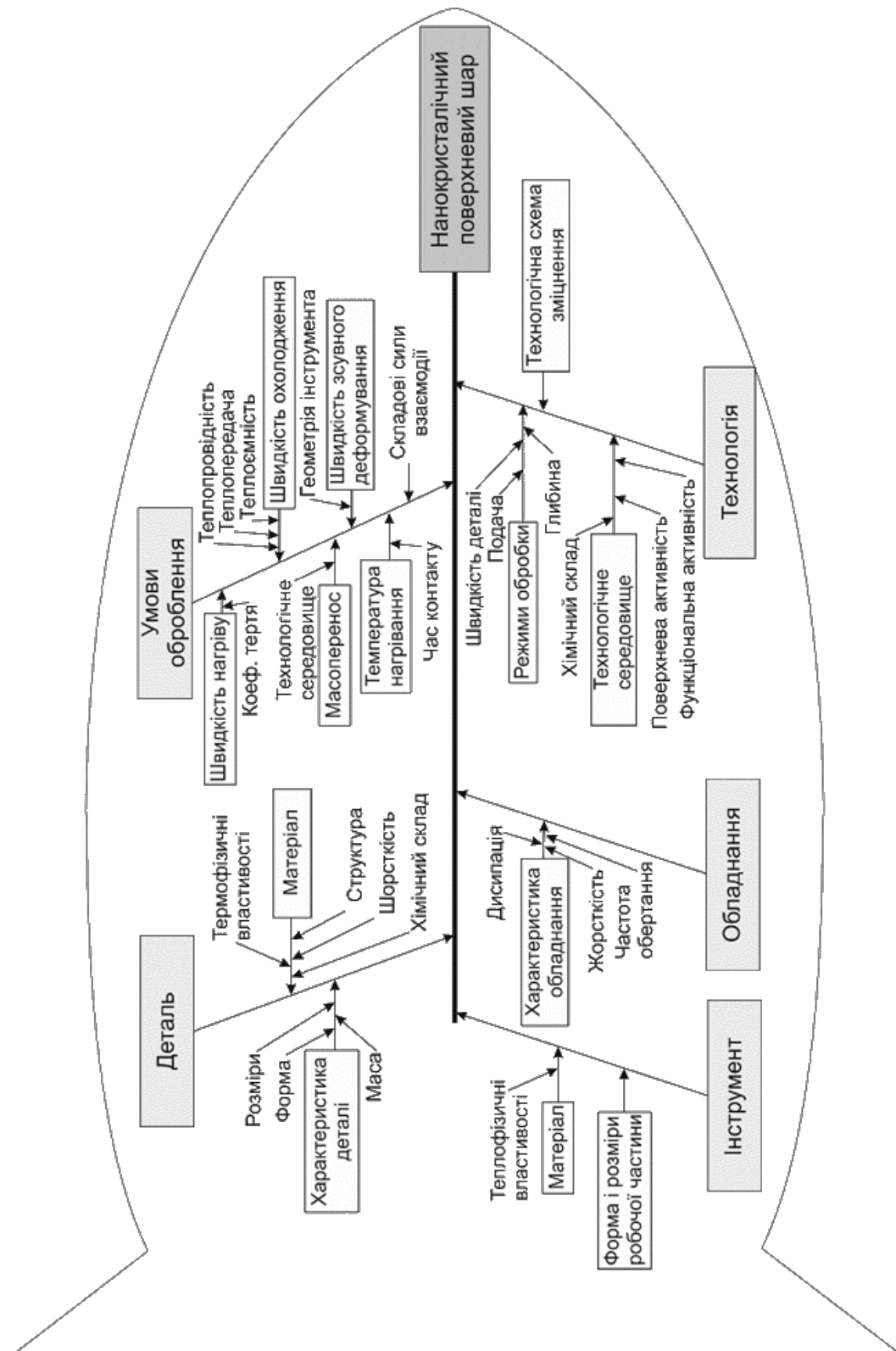


Рисунок 2.35 – Діаграма Ісікави з основними категоріями причин фрикційного зміцнення деталей машин

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ФРИКЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ

#### 3.1. Термопружні процеси у поверхневих шарах металу

У процесі фрикційної обробки у поверхневих шарах металу деталей у зоні контакту інструмента з оброблюваною поверхнею проходять високошвидкісні процеси нагрівання та охолодження, а також деформування. При цьому у зоні контакту інструмента з оброблюваною поверхнею змінюється інтенсивність теплового потоку, розподіл температури за глибиною та поза нею, ступінь деформування, опір металу деформуванню.

Для цілеспрямованого керування процесом формування у поверхневих шарах оброблюваних деталей зміцненого білого шару з нанокристалічною структурою потрібно знати залежності формування і розподілу теплових потоків, зміну напруженого стану.

Під час фрикційної обробки у зоні контакту інструмент-деталь з за рахунок високошвидкісного тертя інструмента по оброблюваній поверхні деталі виникає висококонцентрований потік теплової енергії, який нагріває поверхневий шар до температур вище точки фазових переходів (вище  $A_{c3}$ ) з високими швидкостями. За короткий час нагрівання у поверхневих шарах металу проходять фазові і структурні перетворення. При переміщенні джерела теплової енергії від зони контакту проходить високошвидкісне охолодження металу поверхневого шару і фіксується неврівноважений стан зі зміненою структурою.

Зону оброблення можна розглядати, аналогічно як і для шліфування [??], як таку, що складається з трьох ділянок, а саме: перша, яка знаходиться перед зоною інструмента з оброблюваною поверхнею; друга – зона безпосереднього контакту і третя – зона, яка знаходить за зоною безпосереднього контакту інструмента з оброблюваною поверхнею (рис. 3.1).

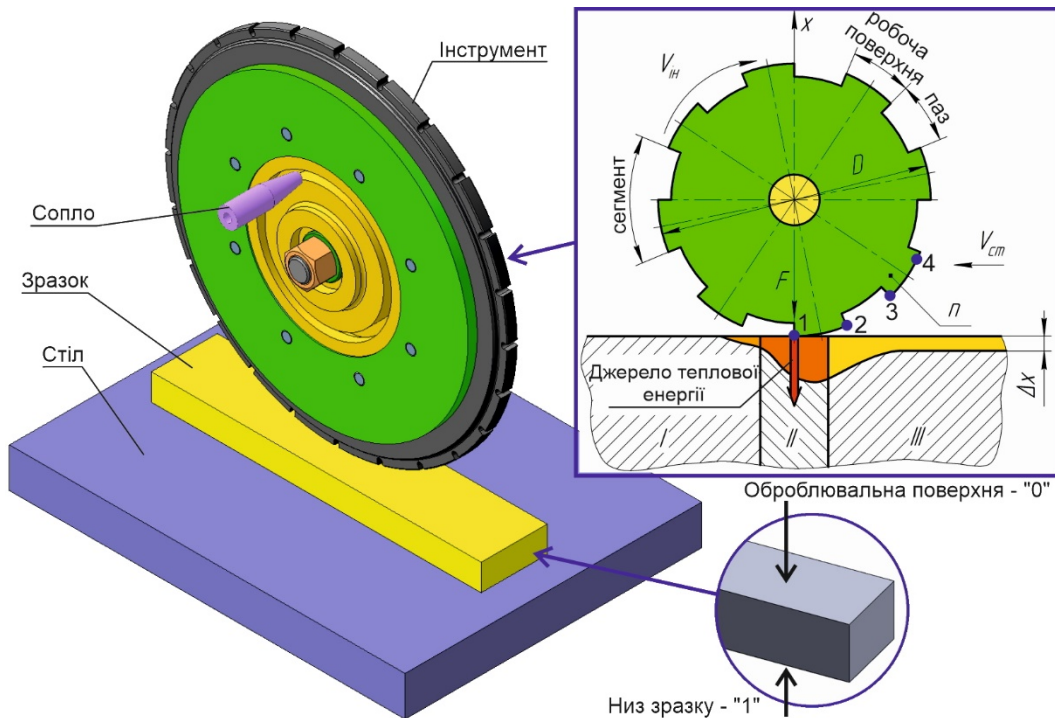


Рисунок 3.1 – Область оброблення під час фрикційної обробки плоских поверхонь: 1 – ділянка перед зоною оброблення; 2 – ділянка безпосереднього контакту; 3– ділянка за зоною контакту інструмент-деталь

Метал поверхневого шару першої зони перед інструментом не встигає нагріватися тому, що джерело теплової енергії яким є зона контакту інструмент-деталь є відносно малим за розміром. Друга зона, яка є під зоною контакту інструмент-деталь, нагрівається з дуже великими швидкостями, а також у даній зоні виникають інтенсивне і ударне деформування поверхневого шару металу. Метал поверхневого шару металу нагрівається до високих температур, які перевищують точку фазових перетворень  $A_{c3}$ , і проходять фазові і структурні перетворення. У третій зоні, яка знаходиться за зоною контакту інструмент-деталь проходить інтенсивне охолодження нагрітого поверхневого шару металу. Товщина прогрітого металу під зоною контакту є невеликою, то за рахунок відведення теплоти у глибину металу швидкості охолодження є дуже великими. Під час фрикційного оброблення у зону оброблення подається технологічне середовище, яке використовується для зменшення процесів схоплення поверхонь інструмента з оброблюваною

деталлю, яке також частково поглинає теплоту з поверхневого шару за зоною оброблення.

Для можливості керування властивостями і характеристиками зміцнених поверхневих шарів деталей, необхідно визначити функціональні взаємозв'язки між параметрами процесу оброблення і станом поверхневого шару.

### **3.2 Математичне моделювання термонапруженого стану у поверхневому шарі під зоною контакту**

Технологічна операція фрикційного оброблення належить до методів поверхневого зміцнення з використанням висококонцентрованих джерел енергії, яке виникає у зоні контакту інструмент-деталь під час високошвидкісного тертя інструмента по оброблюваній поверхні. У зоні контакту, крім теплового потоку, проходить зсувне та ударне деформування від проходження гладкої робочої частини інструмента та пазу. Процес фрикційного оброблення є дуже швидкоплинним. Використання існуючих методів експериментальних досліджень не дозволяє встановити зміну теплових полів та деформацій за глибиною шару оброблюваної поверхні деталі.

Теоретичні дослідження теплових процесів, які проходять під час шліфування абразивними кругами проводять, розв'язуючи задачу з прийнятими допущеннями, сильно спрощують. Деколи розв'язки таких задач значно відрізняються від тих процесів, які відбуваються під час обробки.

Термопружні процеси, які проходять у поверхневому шарі металу під час фрикційного оброблення вивчаємо на основі положень термопружності. На основі положень термопружності узагальнюється теорія пружності для неізотермічної деформації. Виходячи з термодинамічних необоротних

процесів, що базуються на теорії пружності і теплопровідності, досліджували взаємозв'язки, які виникають між полями деформації і температури. Нестационарні теплові дії (тепловий удар) спричиняють динамічні та термомеханічні ефекти [245].

Теорія термопружності дозволяє визначити механізми процесів, які проходять у пружних тілах під дією теплоти та деформування. Задачі термопружності є достатньо складними і для їх розв'язку необхідно застосовувати спеціальні методи чисельного розв'язування до яких відноситься метод скінчених елементів, з допомогою якого просто як фізично, так і математично інтерпретується чисельні алгоритми [246].

Будь-яке пружне тіло з точки зору термопружності розглядається як термодинамічна система, яка взаємодіє з навколишнім середовищем через механічну роботу зовнішніх сил та теплообмін. Приймаємо, що розглядуване тіло є ідеально пружне, початково однорідне, ізотропне і має малі переміщення відносно початкового стану. Термодинамічні параметри, які є макроскопічними величинами, визначаються скінченною кількістю незалежних змінних і характеризують термодинамічну систему. У даній системі температура є мірою інтенсивності теплового руху, яка є відмінною її від механічної енергії. Термодинаміка встановлює взаємозв'язок між дією температури і деформуванням [247, 248]

У процесі фрикційного оброблення плоских поверхонь деталей машин приймається, що у зоні контакту на поверхнях інструмента та оброблюваної деталі температури є рівними. Потужність теплового потоку у кожній точці зони контакту дорівнює сумі теплових потоків, які поглинаються кожним тілом. Зона контакту залежить від профілю та розмірів робочої частини інструмента та деталі, режимів оброблення, сили притискання інструмента до оброблюваної поверхні. Зону контакту у певному наближенні можна розглядати як тонку стрічку. Приймаємо наступні допущення для розроблення моделі термонапруженого стану, а саме [246, 247] – у зоні контакту проходить лише пружне деформування контактуючих тіл; зона контакту під час

оброблення не змінюється; вплив динамічних процесів на тертя у зоні контакту не враховується; теплофізичні параметри матеріалів інструмента і оброблюваної поверхні є постійними і на залежать від зміни температури і напружень; оливова плівка, яка є на контактуючих поверхнях інструмента і оброблюваної деталі не впливає на розподіл навантаження у зоні контакту. Приймаємо, питома густина теплового потоку у зоні контакту інструмента з оброблюваною поверхнею є постійною.

У класичній теорії термопружності [248, 249, 250] приймається припущення, що швидкість поширення тепла в матеріалах є нескінченною. Таке твердження є її недоліком. Тому для її удосконалення Грін та Ліндсей [251] запропонували модифіковану теорію термопружності (GL-теорія), де рівняння теплопровідності стало гіперболічним із введенням двох так званих параметрів "часу релаксації". Подібні узагальнення моделі термопружності розглядаються у роботі [252]. На сьогоднішній день відомий набір теорій узагальнення термопружності, а саме Лорд-Шульман, Чандрасехарая-Цоу, Грін-Нагді та інших, вичерпний огляд існуючих теорій узагальнення подано в [253, 254]. Дослідники використовували різні методики для вирішення узагальнених проблем термопружності [255, 256, 257].

### Постановка проблеми

Нехай  $\Omega$  буде обмежена зв'язна область точок  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d$  з неперервною границею Ліпшица  $\partial\Omega = \Gamma$  і  $\mathbf{n} = \{n_i\}_{i=1}^d$  є одиницею зовнішнього вектору нормалі  $n_i = \cos(n, x_i)$ . Також розглянемо інтервал часу  $[0, T]$ ,  $0 < T < +\infty$ . Метою є знайти вектор пружних переміщень  $\mathbf{u} = \{u_i(\mathbf{x}, t)\}_{i=1}^d$  та збурення температури  $\theta = \theta(\mathbf{x}, t)$ , які задовольняють наступним рівнянням  $\Omega \times (0, T]$  (тут і скрізь очікується звичайне підсумовування за повторюваними індексами):

$$\rho(u_i'' - f_i) - \sigma_{ji,j} = 0, \quad (3.1)$$

$$\rho(T_0 S' - w) + q_{i,i} = 0. \quad (3.2)$$

Наведені вище вирази (3.1) та (3.2) є рівняннями руху та теплопровідності,  $\sigma_{ij}$  є тензором напружень, який визначається наступним рівнянням:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}[\varepsilon_{km}(\mathbf{u}) - \alpha_{km}(\theta + t_1\theta')] + a_{ijkl}\varepsilon_{km}(\mathbf{u}'), \quad (3.3)$$

Густина ентропії  $S$  визначається через:

$$\rho S = \rho c_v T_0^{-1}(\theta + t_0\theta') + c_{ijkl}\alpha_{km}\varepsilon_{ij}(\mathbf{u}). \quad (3.4)$$

Тут, у рівняннях (3.3) та (3.4), параметри  $t_1 \geq t_0 > 0$  мають часову розмірність і були введені Гріном та Ліндсей у [251] для усунення ефекту нескінченної швидкості розповсюдження тепла від класичної задачі теплопровідності. Ці параметри також відомі як так звані "часи релаксації", і їх значення завжди приймаються менше  $10^{-10}$  с. Встановивши  $t_1 = t_0 = 0$ , ми підійшли до класичної моделі термопружності.

Вектор  $q_i$  визначається за класичним законом Фур'є:

$$q_i = -\lambda_{ij}\theta_{,j}. \quad (3.5)$$

Тензор деформацій  $\varepsilon_{km}$ , приймається наступний, щоб задовольнити співвідношення:

$$\varepsilon_{km}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2}(u_{k,m} + u_{m,k}), \quad (3.6)$$

де кома в нижньому індексі позначає часткову похідну від просторової змінної, тобто  $g_{,k} = \partial g / \partial x_k$ . Позначимо:  $\rho$  – густина маси в'язкопружного матеріалу,  $c_v$  є його питомою теплоємністю і  $T_0$  є фіксованою рівномірною



опорною температурою зразка,  $f_i$  є вектором об'ємних сил і представляє об'ємне джерело тепла. Тензори  $a_{ijkm}$  та  $c_{ijkm}$  описують властивості в'язкості та пружності матеріалу із загальними властивостями симетрії та еліптичності. Тензори  $\lambda_{ij}$ ,  $\alpha_{km}$  визначають симетричну та еліптичну теплопровідність та теплові розширення відповідно.

Систему рівнянь (3.1) – (3.6) необхідно доповнити граничними умовами:

$$\begin{cases} u_i = 0 & \text{на } \Gamma_u \times [0, T], \Gamma_u \subset \Gamma, \text{mes}(\Gamma_u) > 0, \\ \sigma_{ij} n_j = \bar{\sigma}_i & \text{на } \Gamma_\sigma \times [0, T], \Gamma_\sigma = \Gamma \setminus \Gamma_u, \\ \theta = 0 & \text{на } \Gamma_\theta \times [0, T], \Gamma_\theta \subset \Gamma, \text{mes}(\Gamma_\theta) > 0, \\ q_i n_i = \bar{h} & \text{на } \Gamma_q \times [0, T], \Gamma_q = \Gamma \setminus \Gamma_\theta, \end{cases} \quad (3.7)$$

і початкові умови:

$$\mathbf{u}|_{t=0} = \mathbf{u}_0, \mathbf{u}'|_{t=0} = \mathbf{v}_0, \theta|_{t=0} = \theta_0, \mathbf{q}|_{t=0} = \mathbf{q}_0 \quad \text{в } \Omega. \quad (3.8)$$

Тут  $\bar{\sigma} = \{\bar{\sigma}_i(\mathbf{x}, t)\}_{i=0}^d$  і  $\bar{h} = \bar{h}(\mathbf{x}, t)$  представляють вектор поверхневого навантаження і теплового потоку відповідно.

### Постановка варіаційної задачі

Введемо простори допустимих пружних переміщень та приростів температури (відносно початкової температури  $T_0$ ) відповідно:

$$\mathbf{V} = \{\mathbf{v} \in [H^1(\Omega)]^d : \mathbf{v} = 0 \text{ на } \Gamma_u\}, \quad Z = \{\zeta \in H^1(\Omega) : \zeta = 0 \text{ на } \Gamma_\theta\}. \quad (3.9)$$

Тут символ  $H^m(\Omega)$  означає стандартний простір Соболева. Позначаємо  $\Phi := \mathbf{V} \times Z$  подвійний простір  $\Phi' := \mathbf{V}' \times Z'$  і  $\mathbf{H} = [L^2(\Omega)]^d$ . Тоді початкову крайову задачу термopружності Гріна-Ліндсі (3.1) – (3.8) можна переписати у наступному вигляді:

задано  $\boldsymbol{\psi}_0 = (\mathbf{u}_0, \theta_0) \in \Phi$ ,  $\mathbf{v}_0 \in \mathbf{H}$ ,  $\theta_{10} \in L^2(\Omega)$  та  $(l, \mu) \in L^2(0, T; \Phi')$ ;  
 знайти пару  $\boldsymbol{\psi} = \{\mathbf{u}, \theta\} \in L^2(0, T; \Phi)$  таку, що

$$\begin{aligned} m(\mathbf{u}''(t), \mathbf{v}) + a(\mathbf{u}'(t), \mathbf{v}) + c(\mathbf{u}(t), \mathbf{v}) - \gamma(\theta(t) + t_1 \theta'(t), \mathbf{v}) &= \langle l(t), \mathbf{v} \rangle, \\ s(\theta'(t) + t_0 \theta''(t), \eta) + k(\theta(t), \eta) + \gamma(\eta, \mathbf{u}'(t)) &= \langle \mu(t), \eta \rangle \quad \forall t \in (0, T], \\ m(\mathbf{u}'(0) - \mathbf{v}_0, \mathbf{v}) = 0, \quad c(\mathbf{u}(0) - \mathbf{u}_0, \mathbf{v}) = 0 \quad \forall \mathbf{v} \in \mathbf{V}, \\ s(\theta(0) - \theta_0, \eta) = 0, \quad s(\theta'(0) - \theta_{10}, \eta) = 0 \quad \forall \eta \in Z. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Введені дволінійні та лінійні форми є такими:

$$\begin{aligned} m(\mathbf{u}, \mathbf{v}) &:= \int_{\Omega} \rho u_i v_i dx = \int_{\Omega} \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} dx, \quad a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) := \int_{\Omega} a_{ijkm} \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{km}(\mathbf{v}) dx, \\ c(\mathbf{u}, \mathbf{v}) &:= \int_{\Omega} c_{ijkm} \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{km}(\mathbf{v}) dx, \quad \langle l, \mathbf{v} \rangle := \int_{\Omega} \rho f_i v_i dx + \int_{\Gamma_{\sigma}} \bar{\sigma}_i v_i d\gamma, \\ \gamma(\eta, \mathbf{v}) &:= \int_{\Omega} \eta c_{ijkm} \alpha_{km} \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) dx \quad \forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in V, \\ s(\theta, \eta) &= \int_{\Omega} \rho c_v T_0^{-1} \theta \eta dx, \quad k(\theta, \eta) = \int_{\Omega} T_0^{-1} \lambda_{ij} \theta_{,i} \eta_{,j} dx, \\ \langle \mu, \eta \rangle &:= \int_{\Omega} T_0^{-1} \rho w \eta dx - \int_{\Gamma_h} T_0^{-1} \bar{h} \eta d\gamma \quad \forall \eta, \theta \in Z. \end{aligned} \quad (3.11)$$

### Напівдискретизація простору: схема скінченних елементів

Для наближеного розв'язання задачі (3.10) припустимо, що  $\{\mathbf{V}_h\}$  і  $\{Z_h\}$  є послідовностями скінченновимірних підпросторів такими, що

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{V}_h \subset \mathbf{V}, \quad Z_h \subset Z \quad \forall h > 0, \\ \dim \mathbf{V}_h = N = N(h) \rightarrow \infty, \quad \dim Z_h = M = M(h) \rightarrow \infty, \quad \text{якщо } h \rightarrow 0, \\ \bigcup_{h>0} \mathbf{V}_h \text{ dense in } \mathbf{V}, \quad \bigcup_{h>0} Z_h \text{ dense in } Z. \end{array} \right. \quad (3.12)$$

На цій основі ми визначаємо послідовність напівдискретних наближень Гальоркіна  $\{\boldsymbol{\psi}_h\}_{h>0} = \{(\mathbf{u}_h, \theta_h)\}_{h>0}$ , виражених як розв'язок наступних варіаційних задач:

задано  $h > 0$  та  $\Phi_h = {}_h Z_h$ ;

знайти пару  $\Psi_h = \{\mathbf{u}_h, \theta_h\} \in L^2(0, T; \Phi)$  таку, що

$$\begin{aligned} m(\mathbf{u}_h''(t), \mathbf{v}) + a(\mathbf{u}_h'(t), \mathbf{v}) + c(\mathbf{u}_h(t), \mathbf{v}) - \gamma(\theta_h(t) + t_1 \theta_h'(t), \mathbf{v}) &= \langle l(t), \mathbf{v} \rangle, \\ s(\theta_h'(t) + t_0 \theta_h''(t), \eta) + k(\theta_h(t), \eta) + \gamma(\eta, \mathbf{u}_h'(t)) &= \langle \mu(t), \eta \rangle \quad \forall t \in (0, T], \\ m(\mathbf{u}_h'(0) - \mathbf{v}_0, \mathbf{v}) = 0, \quad c(\mathbf{u}_h(0) - \mathbf{u}_0, \mathbf{v}) = 0 \quad \forall \mathbf{v} \in \mathbf{V}_h, \\ s(\theta_h(0) - \theta_0, \eta) = 0, \quad s(\theta_h'(0) - \theta_{10}, \eta) = 0 \quad \forall \eta \in Z_h. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Для конкретизації структури задачі (3.13) виберемо деякі базиси  $\{\varphi_k(\mathbf{x})\}_{k=1}^N$  та  $\{\phi_k(\mathbf{x})\}_{k=1}^M$  простору  $\mathbf{V}_h$  і  $Z_h$  відповідно. Перш за все, цей вибір однозначно визначає форму напівдискретних наближень як лінійну комбінацію:

$$\mathbf{u}_h(\mathbf{x}, t) = \sum_{k=1}^N u_k(t) \varphi_k(\mathbf{x}), \quad \theta_h(\mathbf{x}, t) = \sum_{k=1}^M \mathcal{G}_k(t) \phi_k(\mathbf{x}) \quad \forall (\mathbf{x}, t) \in \Omega \times [0, T] \quad (3.14)$$

з невідомими коефіцієнтами  $\mathbf{U}(t) = \{u_k(t)\}_{k=1}^N$  і  $\Theta(t) = \{\mathcal{G}_m(t)\}_{m=1}^M$ , по-друге, після застосування процедури Гальоркіна, дозволяє отримати задачу Коші для обчислення вищезазначених коефіцієнтів.

$$\begin{aligned} M\mathbf{U}''(t) + A\mathbf{U}'(t) + C\mathbf{U}(t) - G[\Theta(t) + t_1 \Theta'(t)] &= \mathbf{L}(t), \\ S[\Theta'(t) + t_0 \Theta''(t)] + K\Theta(t) + G^T \mathbf{U}(t) &= \mathbf{W}(t) \quad \forall t \in (0, T], \\ C\mathbf{U}(0) = \mathbf{U}_0, \quad M\mathbf{U}'(0) = \mathbf{V}_0, \quad K\Theta(0) = \Theta_0, \quad S\Theta'(0) &= \Theta_{01}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Матриці та права сторона вектору обчислюються згідно з правилами:

$$\begin{aligned} A = \{a(\varphi_i, \varphi_k)\}_{i,k=1}^N, \quad G = \{\gamma(\phi_i, \varphi_k)\}_{i,k=1}^{M,N}, \\ \mathbf{L}(t) = \{\langle l(t), \varphi_i \rangle\}_{i=1}^N, \quad \mathbf{W}(t) = \{\langle \mu(t), \phi_i \rangle\}_{i=1}^M \quad \forall T \in (0, t), \end{aligned} \quad (3.16)$$

та

$$\mathbf{V}_0 = \{m(\mathbf{v}_0, \varphi_k)\}_{k=1}^N, \quad \mathbf{U}_0 = \{c(\mathbf{u}_0, \varphi_k)\}_{k=1}^N, \quad \Theta_0 = \{s(\theta_0, \phi_i)\}_{i=1}^M. \quad (3.17)$$

Та решта матриць:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \{m(\boldsymbol{\varphi}_i, \boldsymbol{\varphi}_k)\}_{i,k=1}^N, & \mathbf{C} &= \{c(\boldsymbol{\varphi}_i, \boldsymbol{\varphi}_k)\}_{i,k=1}^N, \\ \mathbf{S} &= \{s(\phi_i, \phi_k)\}_{i,k=1}^M, & \mathbf{K} &= \{k(\phi_i, \phi_k)\}_{i,k=1}^M \end{aligned} \quad (3.18)$$

є симетричними та позитивно визначеними. Цей факт гарантує унікальну розв'язність задачі Коші (3.15). Отже, для кожної  $h > 0$  задачі Коші (3.15) є єдине рішення  $\{\mathbf{U}(t), \Theta(t)\}$ , яке дозволяє знайти напівдискретні наближення Гальоркіна  $(\mathbf{u}_h, \theta_h) \in L^2(0, T; \mathbf{V}_h \times G_h)$  враховуючи (3.14).

### Дискретизація часу: однокрокова повторювана схема

задано  $\Delta t > 0$ ,  $1 \geq \beta \geq \gamma \geq 0$ ,  $(\dot{\mathbf{U}}^j, \mathbf{U}^j, \dot{\Theta}^j, \Theta^j)$ ;

знайти  $(\ddot{\mathbf{U}}^{j+1/2}, \ddot{\Theta}^{j+1/2})$  таке, що

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M} + \Delta t \gamma \mathbf{A} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \beta \mathbf{C} & -(\Delta t \gamma t_1 + \frac{1}{2} \Delta t^2 \beta) \mathbf{G}^T \\ \Delta t \gamma \mathbf{G} & (t_0 + \Delta t \gamma) \mathbf{S} + \frac{1}{2} \Delta t^2 \beta \mathbf{K} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{U}}^{j+1/2} \\ \ddot{\Theta}^{j+1/2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{L}_{j+1/2} - (\mathbf{A} + \Delta t \gamma \mathbf{C}) \dot{\mathbf{U}}^j - \mathbf{C} \mathbf{U}^j + (t_1 + \Delta t \gamma) \mathbf{Y}^T \dot{\Theta}^j + \mathbf{Y}^T \Theta^j \\ \mathbf{F}_{j+1/2} - \mathbf{Y} \dot{\mathbf{U}}^j - \mathbf{S} \dot{\Theta}^j - \mathbf{K} \Theta^j - \Delta t \gamma \mathbf{K} \dot{\Theta}^j \end{pmatrix}, \quad (3.19)$$

$$\mathbf{U}^{j+1} = \mathbf{U}^j + \Delta t \dot{\mathbf{U}}^j + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{\mathbf{U}}^{j+1/2}, \quad \dot{\mathbf{U}}^{j+1} = \dot{\mathbf{U}}^j + \Delta t \ddot{\mathbf{U}}^{j+1/2}$$

$$\Theta^{j+1} = \Theta^j + \Delta t \dot{\Theta}^j + \frac{1}{2} \Delta t^2 \ddot{\Theta}^{j+1/2}, \quad \dot{\Theta}^{j+1} = \dot{\Theta}^j + \Delta t \ddot{\Theta}^{j+1/2}, \quad j = 0, 1, \dots, N_T - 1$$

### 3.3 Дослідження процесів термопружності у поверхневих шарах

Математична модель термопружності побудована на основі методу скінчених елементів у середовищі Mathematica [258]. Побудована модель дозволяє визначати швидкості зміни температури, власне температуру та напруження за глибиною шару; густину потоку у зоні контакту інструмент-

деталь; потенціальну і кінетичну енергію; швидкість і енергію навантаження; час розсіювання енергії, втрати енергії і перетворення енергії з механічною на теплову; температуру і переміщення поверхні зони контакту. Під час використання методу скінчених елементів замінюється на систему скінчених елементів зі скінченим числом ступенів вільності. Для підвищення точності обчислень необхідно зменшити розмір елементів системи.

Проведені теоретичні дослідження процесів термопружності, які проходять у поверхневих шарах металу плоских поверхонь досліджуваних зразках, під час фрикційного оброблення інструментом з поперечними пазами на робочій поверхні показали наступне: під час фрикційного оброблення у зоні контакту інструмент-деталь утворюється інтенсивний тепловий потік енергії за рахунок високошвидкісного тертя інструмента по оброблюваній поверхні. На величину теплового потоку впливає швидкість ковзання у зоні контакту інструмент-деталь, сила притискання інструмента до оброблюваної поверхні, а також коефіцієнт тертя між парою ковзання. Густина теплового потоку залежить від розмірів зони контакту інструмента з оброблюваною поверхнею. Вона залежить від ширини робочої частини інструмента, а також від ширини зони контакту, яка залежить від сили притиску інструмента до оброблюваної поверхні деталі, а також від пружних властивостей матеріалу як інструмента так і деталі. Питома густина теплового джерела енергії визначається з рівняння [246]:

$$q = \frac{2v \cdot F \cdot \cos(\pi\gamma) \cdot \mu \left(\frac{1}{2} + y\right)^{\frac{1}{2}-\gamma} \left(\frac{1}{2} - y\right)^{\frac{1}{2}+\gamma}}{\pi^{3/2} (1 + 4\gamma^2) l_s \cdot b}, \quad (3.20)$$

$$\gamma = \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{\mu(1 - \chi^0)}{1 + \chi^0};$$

де  $v$  – відносна швидкість ковзання в зоні контакту інструмент-деталь, м/с;  
 $F$  – нормальна складова сили взаємодії у зоні контакту інструмент-деталь, Н;

$\mu$  – коефіцієнт тертя в зоні контакту;  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  $l_s$  – довжина лінії контакту, м;  $b$  – півширина зони контакту, м;  $\chi^0$  – постійна Мусхелішвілі для плоских деформацій,  $\chi^0 = 3-4\nu$ .

Математичне моделювання процесів термопружності, які протікають у поверхневих шарах деталей, проводили під час фрикційного оброблення зразків, виготовлених зі сталі 45, інструментом, виготовленим з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т з поперечними пазами на його робочій частині. Під час фрикційного оброблення інструментом з гладкою робочою частиною у зоні контакту інструмента з оброблюваною поверхнею деталі утворюється концентроване джерело теплової енергії. На зону контакту постійно діє джерело теплової енергії, тобто тепловий потік, а також зсувне деформування поверхневого шару металу за рахунок високошвидкісного тертя інструмента по оброблюваній поверхні. Зсувне деформування від тертя робочої поверхні інструмента проходить у напрямку обертання інструмента. Лінійна швидкість на периферії на робочій частині інструмента під час його обертання складає 60-90 м/с. Таке зсувне деформування є також однонаправленим і постійним, хоча інтенсивність такого деформування є високою. Швидкість переміщення оброблюваної поверхні відносно інструмента, а це відповідно переміщення джерела теплової енергії є в межах 0,03-0,12 м/с, що набагато менша за швидкість тертя у зоні контакту інструмента по оброблюваній поверхні. Інструмент притискається до оброблюваної поверхні зі силою, яка рівна 800-1200 Н.

Для підвищення інтенсивності деформування поверхневого шару металу у зоні контакту використовується інструмент з перервною робочою частиною. На робочій частині інструмента нарізані поперечні пази. Кількість пазів вибирається кратною чотирьом. При малій ширині пазів (біля 3 мм), співрозмірних з шириною зони контакту проходить розривання теплового потоку. При цьому динамічні навантаження є невеликими. Час переривання дії теплового потоку є малим. Під час проходження пазу над зоною контакту

відбувається переривання теплового потоку у поверхневий шар металу, а також розвантажується зона контакту. У момент входження у контакт чергової гладкої частини інструмента проходить ударне навантаження на зону контакту з наступним зсувним деформуванням її. Дія теплового потоку відновлюється з великою інтенсивністю. При збільшенні ширини пазів, окрім збільшення часу на переривання дії теплового потоку проходить також і інтенсивне динамічне навантаження на зону контакту інструмент-деталь. Ширину пази на робочій поверхні інструментів (зовнішній діаметр складав 240 мм) вибирали в межах від 6 мм до 12 мм (ряд 6, 9 та 12 мм). На робочій частині інструмента були виготовлено 16, 24 та 32 пази.

Зона контакту інструмент-деталь є локальною, з малими розмірами, які залежать від ширини робочої поверхні інструмента та від сили притискання інструмента до оброблюваної поверхні деталі, а також пружних властивостей контактуючих матеріалів. Для зміцнення певної поверхні необхідно переміщення зони контакту по даній поверхні. Для цього потрібно, щоб джерело теплової енергії було рухомим. Під час руху джерела теплової енергії проходить поступове нагрівання поверхневого шару металу, де проходить зона контакту. Після проходження зони контакту по оброблюваній поверхні відбувається різке охолодження поверхневого шару металу. За рахунок дії на оброблювану поверхню концентрованого джерела енергії зони контакту відбувається швидке нагрівання поверхневого шару металу. Час нагрівання окремої точки поверхневого шару металу буде залежати від ширини зони контакту інструмент-деталь і часу переміщення джерела енергії, яким є зона контакту. Час контакту визначається швидкістю переміщення оброблюваної поверхні, тобто залежить від режимів оброблення, а саме від переміщення стола верстату (у даному випадку під час оброблення плоских поверхонь).

Після проходження над одиничною точкою (одиничним об'ємом) поверхневого шару металу джерела теплової енергії проходить швидке охолодження металу поверхневого шару. Джерело теплової енергії яким є зона контакту інструмент-деталь нагріває невеликий локальний об'єм металу. Так

як об'єм нагрітого металу є порівняно малим за об'ємом у відношенні до об'єму оброблюваної деталі за рахунок відводу теплоти у глибину металу проходить швидкісне охолодження поверхневого шару оброблюваної поверхні.

Розглянемо процеси, які відбуваються у поверхневих шарах під час фрикційного оброблення плоских поверхонь інструментом поперечними пазами на робочій частині. Вибираємо параметри фрикційного оброблення використовуючи модернізований плоскошліфувальний верстат, на якому встановлений інструмент діаметром 240 мм, виготовлений з нержавіючої сталі 12X18Н10Т. На робочій поверхні інструмента нарізані 24 пази шириною 9 мм, які складають 24 фрагменти гладкої частини і пазу. При вибраних режимах фрикційного оброблення (лінійна швидкість на робочій частині інструмента складала 60 м/с) час проходження гладкої частини на робочій поверхні інструмента складає  $3,7 \cdot 10^{-4}$  с, а пазу –  $1,5 \cdot 10^{-4}$  с. Сили притискання інструмента до оброблюваної поверхні складала 1000 Н.

Під час входження у контакт першої гладкої поверхні робочої частини інструмента з оброблюваною поверхнею деталі починає діяти джерело теплової енергії. Джерело енергії формується за рахунок високошвидкісного тертя робочої поверхні інструменті по контактуючій поверхні деталі. У даному випадку механічна енергія, яка утворюється від високошвидкісного тертя інструмента по оброблюваній поверхні перетворюється у потік висококонцентрованої теплової енергії. Для спрощення моделювання розподілу параметрів термопружності товщина оброблюваного зразка задається у відносних величинах. Величина «1» відповідає оброблюваній поверхні, а «0» – базовій поверхні, поверхні на яку встановлюється оброблюваний зразок на магнітну плиту стола верстата [259].

Результати моделювання показали, що у перші моменти тертя інструмента по оброблюваній поверхні, коли формується тепловий потік концентрованої енергії питома густина теплового потоку, який формується на оброблюваній поверхні становить  $1,3 \cdot 10^6$  Дж/(с·м<sup>2</sup>) (рис. 3.2). З глибиною



зразка величина теплового потоку різко зменшується.

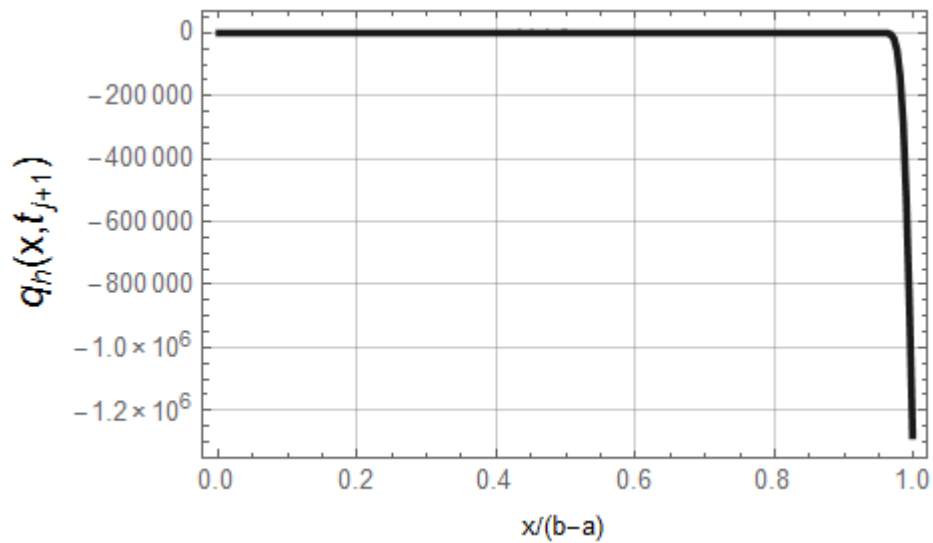


Рисунок 3.2 – Розподіл густини теплового потоку за глибиною під час фрикційного оброблення плоских поверхонь

Під дією концентрованого потоку теплової енергії, який формується під зоною контакту інструмента з оброблюваною поверхнею локальний об'єм поверхневого шару починає інтенсивно нагріватися. Швидкість нагрівання у початкові моменти часу складає до  $2 \cdot 10^6$  К/с (рис. 3.3). З глибиною швидкість нагрівання поверхневого шару різко зменшується. Так, у початковий момент тертя інструмента по оброблюваній поверхні на глибині біля 50 мкм густина теплового потоку і, відповідно, швидкість нагрівання зменшились приблизно у два рази від значень, які є оброблюваній поверхні.

Температура на оброблюваній поверхні у початковий момент дії теплового потоку від тертя інструмента по оброблюваній поверхні також різко зростає і складає біля  $35$  °С, яка з глибиною різко зменшується. На глибині біля 50 мкм температура поверхневого шару зменшується до температур навколишнього середовища (рис. 3.4). У даній математичній моделі температура навколишнього середовища прийнято  $20$  °С.

Під час фрикційного оброблення плоских поверхонь інструмент притискається до оброблюваної поверхні зразка. У даному випадку сила притискання становила  $1000$  Н. Під дією сили притискання та за рахунок

об'ємного розширення під дією їх нагрівання локальних об'ємів металу поверхневих шарів у них формуються напруження, які різко зростають на оброблюваній поверхні і з глибиною зменшуються (рис. 3.5).

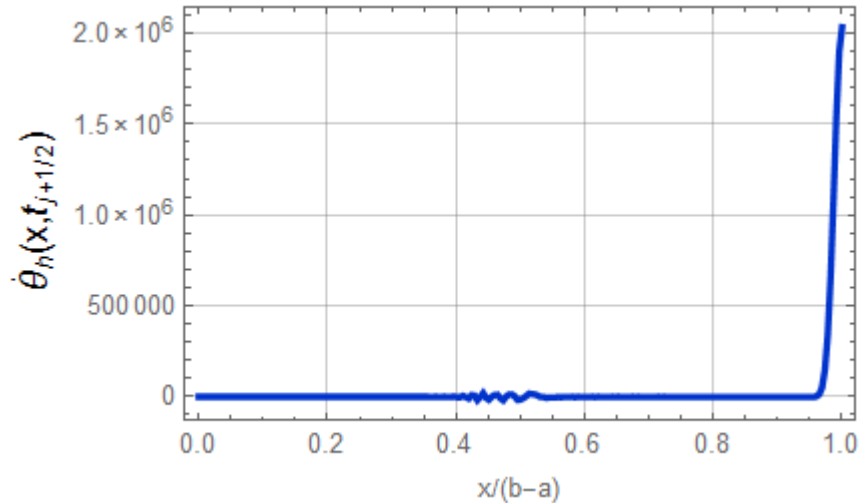


Рисунок 3.3 – Розподіл швидкості нагрівання поверхневого шару за глибиною під час фрикційного оброблення плоских поверхонь

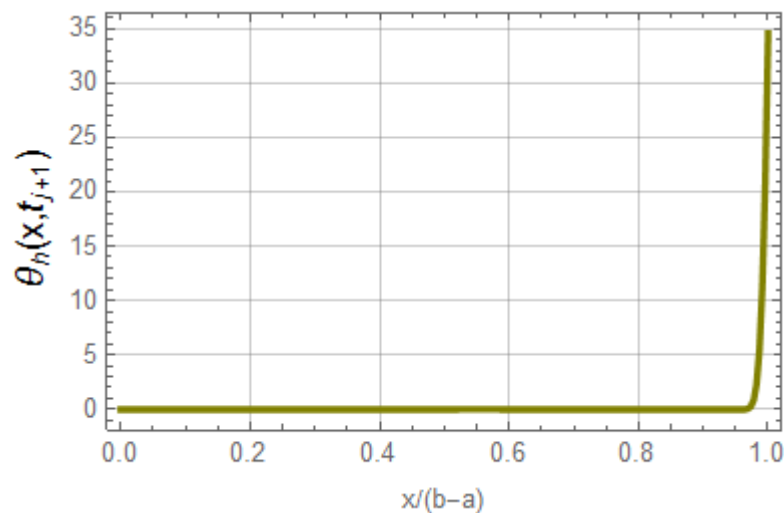


Рисунок 3.4 – Розподіл температури поверхневого шару за глибиною під час фрикційного оброблення плоских поверхонь

Напруження біля оброблюваної поверхні становлять біля 0,14 ГПа, які з глибиною різко зменшуються.

Під час закінчення тертя першої гладкої поверхні робочої частини інструмента зона контакту нагрівається до температури приблизно 240 °С

(рис. 3.6). До такої температури нагрівається тільки оброблювана поверхня у зоні контакту інструмент-деталь. З глибиною поверхневого шару температура різко знижується до температур навколишнього середовища.

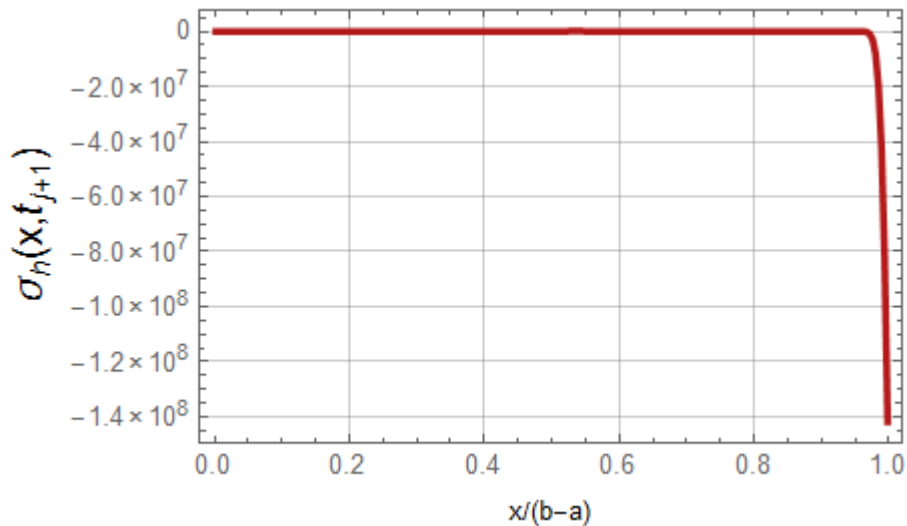


Рисунок 3.5 – Розподіл напружень у поверхневому шарі за глибиною під час фрикційного оброблення плоских поверхонь

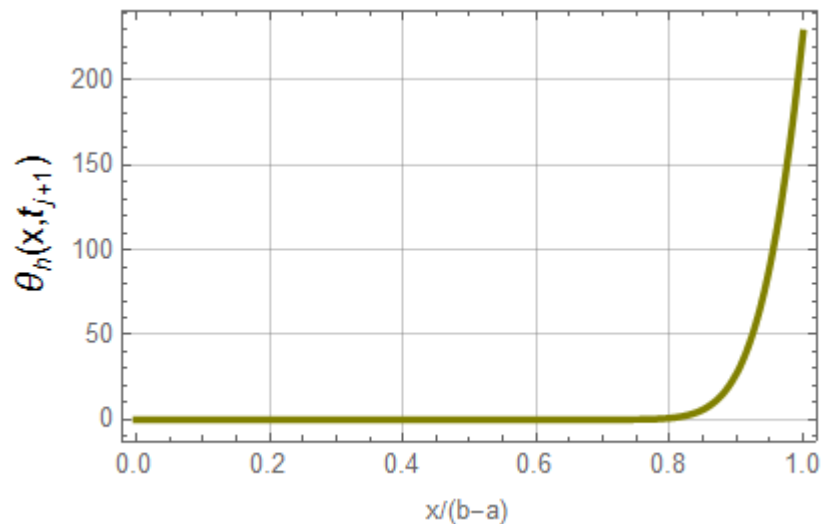


Рисунок 3.6 – Розподіл температури за глибиною поверхневого шару в момент завершення тертя гладкої поверхні робочої частини інструмента

У даному випадку слід відмітити, що зменшується також і швидкість нагрівання поверхневого шару. Найбільша швидкість нагрівання металу

поверхневого шару спостерігається на початку тертя гладкої поверхні робочої частини інструмента. У процесі тертя поверхневий шар металу нагрівається, його температура збільшується інтенсивно, а швидкість нагрівання поверхневого шару зменшується. Так, у момент завершення дії джерела теплового потоку, тобто коли завершується процес тертя гладкої поверхні інструмента швидкість нагрівання зменшилась до величини приблизно  $3 \cdot 10^5$  К/с (рис. 3.7).

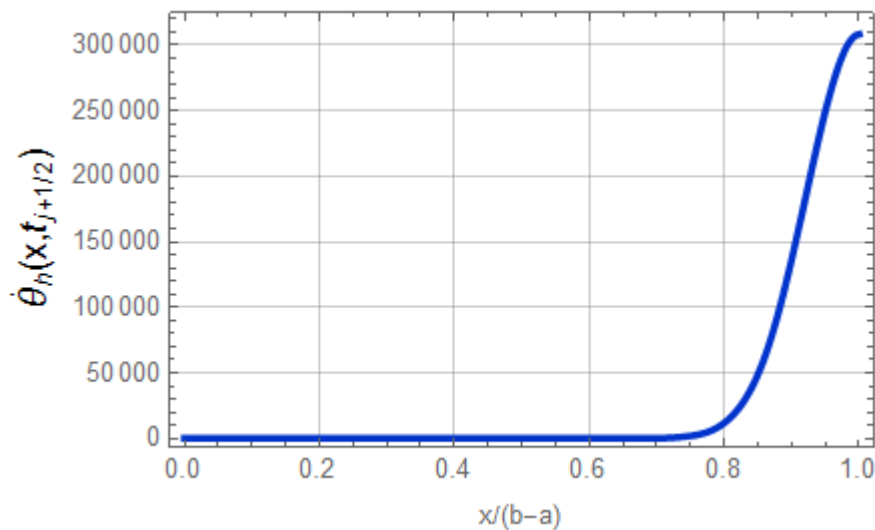


Рисунок 3.7 – Розподіл швидкості нагрівання за глибиною поверхневого шару в момент завершення тертя гладкої поверхні робочої частини інструмента

Напруження у поверхневому шарі металу біля поверхні також збільшуються і дорівнюють 1 ГПа. З глибиною напруження різко зменшуються (рис. 3.8).

Під час проходження пазу над зоною контакту проходить розрив контакту інструмента з оброблюваною поверхнею. Припиняється дія джерела теплової енергії на оброблювану поверхню, але за рахунок інерційної дії тепловий потік продовжує переміщатися у глибину металу зразка. Відповідно поверхневий шар металу від оброблюваної поверхні починає швидко охолоджуватись. Швидкість охолодження на поверхні складає біля  $1,7 \cdot 10^6$  К/с. З глибиною шару швидкість охолодження різко зменшується.

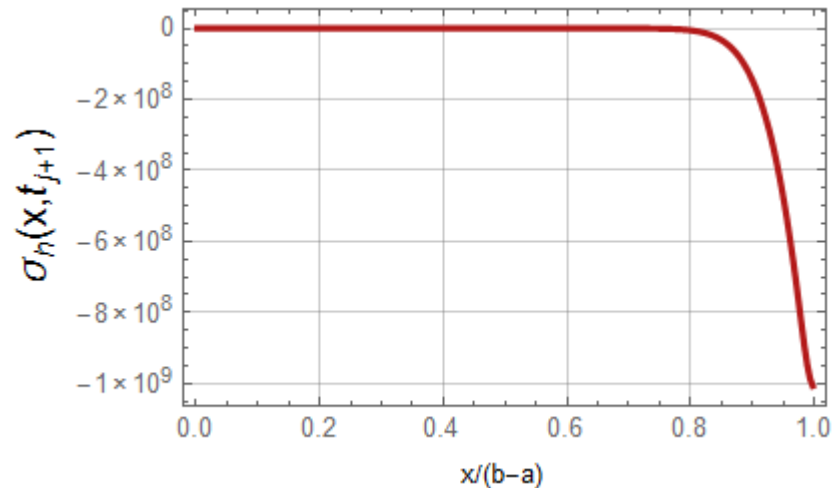


Рисунок 3.8 – Розподіл напружень за глибиною поверхневого шару в момент завершення тертя гладкої поверхні робочої частини інструмента

При проходженні пазу над зоною контакту інструмент-деталь оброблювана поверхня починає інтенсивно охолоджуватися за рахунок відведення теплоти у глибину металу, так як дія теплового потоку припинена. Перед входженням у черговий контакт гладкої частини оброблювана поверхня охолодилася до температури біля  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . За час проходження пазу над зоною контакту інструмент-деталь вона охолодилась на  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.9). Час проходження пазу над зоною контакту залежить від його ширини та лінійної швидкості на периферії інструмента, тобто на його робочій частині. У даному випадку при ширині пазу  $9\text{ мм}$  і швидкості обертання інструмента час проходження пазу становив  $1,5 \cdot 10^{-4}\text{ с}$ .

Під час наступних почергових входження у контакт гладких поверхонь робочої частини інструмента температура на оброблюваній поверхні збільшується, відповідно збільшується температура за глибиною поверхневого шару. Збільшення температури на оброблюваній поверхні у зоні контакту проходить за експоненціальною залежністю.

Напруження на оброблюваній поверхні і у поверхневому шарі металу також збільшуються. На величину напружень впливає сили притискання інструмента до оброблюваної поверхні, а також деформації від збільшення

питомого об'єму металу від його нагрівання. Під час проходження пазу над зоною контакту напруження металу на поверхні змінюється досить незначно, хоча зона контакту розвантажується від дії сили притиску, але напруження, які виникають від дії температури залишаються майже незмінними. На зміну напружень вказує зміна швидкості навантаження зони контакту інструмент-деталь, яка зменшується до нуля.

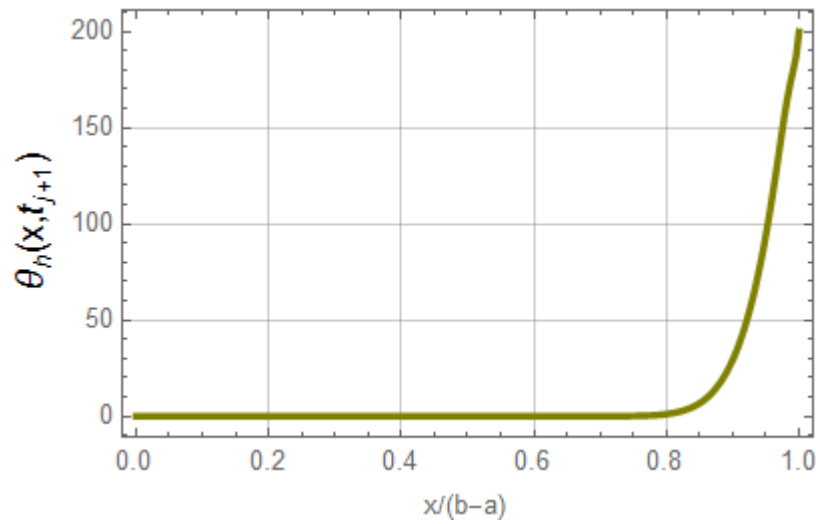


Рисунок 3.9 – Розподіл температури за глибиною поверхневого шару в момент завершення тертя гладкої поверхні робочої частини інструмента

Проведемо теоретичні дослідження впливу сили притискання, яка найбільше впливає на формування теплового потоку у зоні контакту інструмент-деталь, кількості пазів на робочій частині інструменти та ширини пазів на параметри термопружності під час фрикційного оброблення плоских поверхонь на плоскошліфувальному верстаті. На даному верстаті можна встановити інструмент зовнішній діаметр якого становить 240 мм. Як інструмент для фрикційного оброблення використовуємо з пазами на його робочій частині.

Під час фрикційного оброблення плоских поверхонь сила притиску змінюється від 800 Н до 1200 Н. При заданій ширині робочої частини інструмента густина теплового потоку у зоні контакту інструмент-деталь збільшується від  $1,3 \cdot 10^6$  до  $1,7 \cdot 10^6$  Дж/(с·м<sup>2</sup>). Даний потік теплової енергії

відноситься до висококонцентрованих. У даному випадку сили притискання збільшується на 50 %, а густина теплового потоку енергії збільшилась лише 30 %. Сила притискання на величину теплового потоку впливає за нелінійним законом. На величини сили притискання значно впливає кількість пазів на робочій поверхні інструмента, а також ширина пазів. При однакових режимах фрикційного оброблення найбільша сила притискання зареєстрована під час оброблення інструментом з гладкою робочою поверхнею, тобто без пазів. При використанні інструментами з пазами на робочій частині сила притискання інструмента до оброблюваної поверхні зменшується.

Параметри термопружності будемо визначати у момент часу, коли інструмент буде виходити з одиничної зони контакту.

Дослідження впливу сили притискання і відповідно величини теплового потоку на параметри термопружності у зоні контакту інструмент-деталь під час фрикційного оброблення проводили інструментом з 16 пазами на робочій частині і шириною пазу 9 мм. Для прийнятого діаметра оброблюваного інструмента 240 мм довжина одного сектора, яка складається з гладкої поверхні і пазу буде дорівнювати 47,1 мм. Так як ширина пазу у даному випадку становить 9 мм, то співвідношення ширини пазу до гладкої частини буде 1/5. Приймаючи силу притискання інструмента до оброблюваної поверхні рівну 800 Н, густина теплового потоку буде  $1,3 \cdot 10^6$  Дж/(с·м<sup>2</sup>). Як показали теоретичні дослідження температура на оброблюваній поверхні, при заданій густині теплового потоку становила біля 1000 °С. З глибиною температура зменшується. Для того щоб у металі поверхневого шару проходили фазові і структурні зміни необхідно його нагріти до температури не менше 900 °С. До таких температур нагрівається поверхневий шар товщиною 100-150 мкм (рис. 3.10). Швидкість нагрівання поверхневого шару біля поверхні зменшилась до 60000 К/с. З глибиною швидкість нагрівання зменшується ще більше. Напруження у поверхневому шарі біля поверхні складала біля 4,8 ГПа.

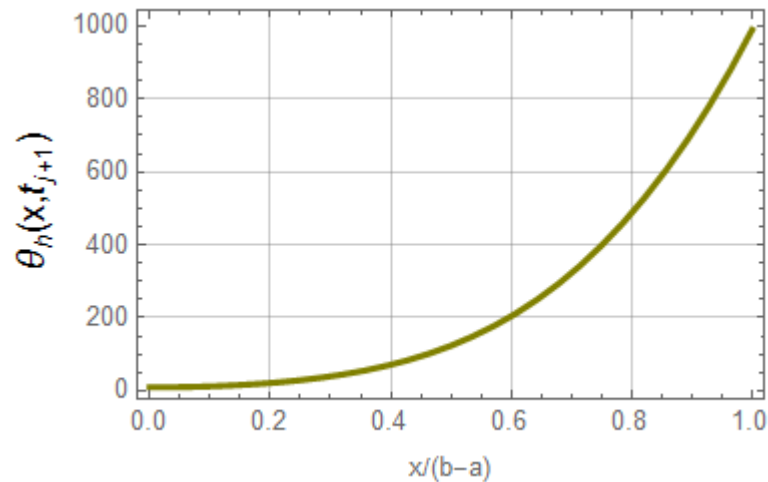


Рисунок 3.10 – Розподіл температури за глибиною поверхневого шару в момент завершення тертя робочої частини інструмента ( $P = 800 \text{ Н}$ )

При збільшенні сили притискання інструмента до оброблюваної поверхні до  $1200 \text{ Н}$  густина теплового потоку збільшується до  $1,7 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ . За таких умов оброблення температура на оброблюваній поверхні у зоні контакту інструмент-деталь збільшилась до  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ , яка з глибиною зменшується. Уданому випадку до температур вище за  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  нагрівся поверхневий товщиною біля  $500 \text{ мкм}$  (рис. 3.11). Швидкість нагрівання поверхневого шару біля поверхні під час закінчення тертя гладкої поверхні інструмента у зоні контакту понизилась і становила біля  $120000 \text{ К/с}$ , яка з глибиною шару ще більше зменшилась.

Напруження у поверхневому шарі біля оброблюваної поверхні були рівними  $6 \text{ ГПа}$ .

Для дослідження впливу кількості пазів на термопружні характеристики у поверхневих шарах металу під час їх фрикційного оброблення проводили з різною кількістю пазів на робочій частині інструмента. Кількість пазів вибирали кратними чотирьом, а саме  $16$ ,  $24$  і  $32$ . Збільшення кількості пазів становило  $\frac{1}{2}$  і  $2$  рази. Збільшення кількості пазів приводить до зменшення довжини одиничного сегмента на робочій частині інструмента. При однаковій ширині паза зменшується довжина гладкої поверхні. З іншого боку збільшення



кількості пазів приводить до збільшення частоти ударних деформацій зони контакту під час оброблення.

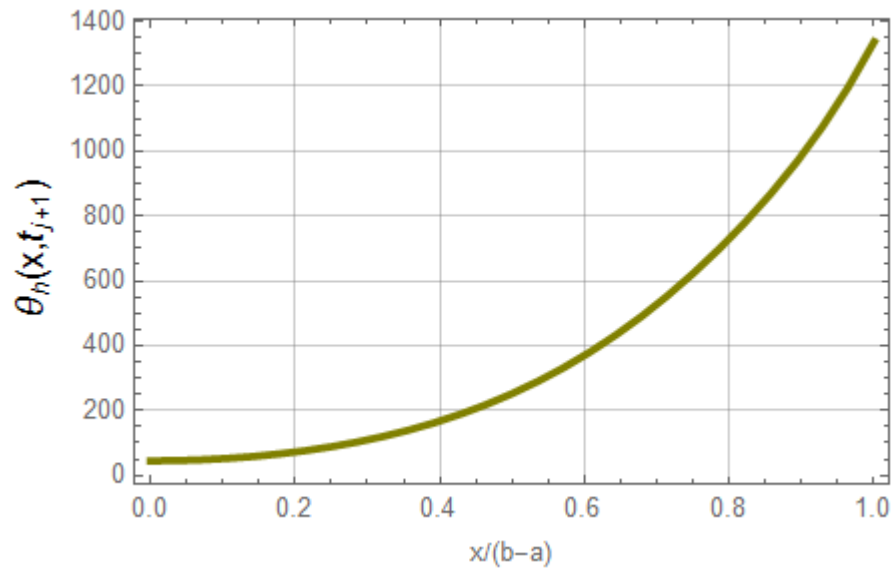


Рисунок 3.11 – Розподіл температури за глибиною поверхневого шару в момент завершення тертя робочої частини інструмента ( $P = 1200 \text{ Н}$ )

Дослідження впливу кількості пазів проводили при ширині пазу 9 мм і силі притискання інструмента до оброблюваної поверхні 1000 Н. Проведені дослідження показали, що під час фрикційного оброблення інструментом з 16 пазами на робочій частині інструмента температура на оброблюваній поверхні складала біля  $1180 \text{ }^\circ\text{C}$ . З глибиною шару температура зменшується. До температур біля  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  нагрівається шар товщиною біля 400 мкм (рис. 3.12). Під час проходження пазу над зоною контакту температура зменшується до  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Зі збільшенням кількості пазів на робочій частині інструмента до 24 температура на оброблюваній поверхні дещо зменшується і становить біля  $1180 \text{ }^\circ\text{C}$ . Під час проходження пазу над зоною оброблення температура понижується приблизно до  $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ . Товщина шару, яка нагрівається під зоною контакту до температур близько  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  становить приблизно 400 мкм.

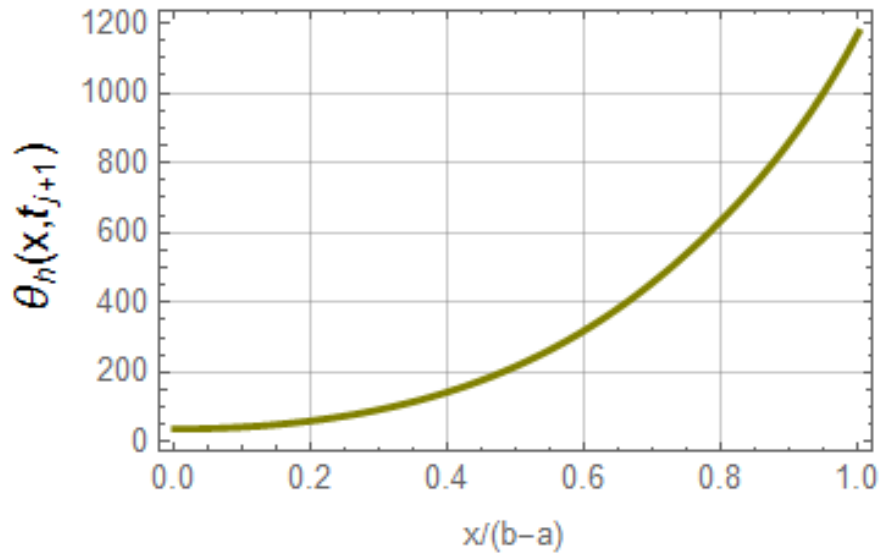


Рисунок 3.12 – Розподіл температури за глибиною поверхневого шару в момент завершення тертя робочої частини інструмента ( $P = 1000$  Н,  $N = 16$ )

Наступне збільшення кількості пазів на робочій частині інструмента до 32, приводить до ще більшого зменшення температури на оброблюваній поверхні, а також у поверхневому шарі металу під зоною контакту. Температура на оброблюваній поверхні становила  $1160$  °С. Під час проходження пазу над зоною контакту температура на оброблюваній поверхні понижувалася до температур біля  $1030$  °С. Товщина шару металу, який нагрівається до температур вище  $900$  °С, у даному випадку складає приблизно  $300$  мкм.

Напруження у поверхневому шарі під час оброблення з різною кількістю пазів зменшуються від  $6,2$  ГПа (під час оброблення інструментом з 16 пазами на робочій частині) до  $5,2$  ГПа (під час оброблення інструментом з 32 пазами). Збільшення кількості пазів на робочій частині не значно понижує напруження у металі поверхневого шару.

Проведемо дослідження впливу ширини пазу на параметри процесу фрикційного оброблення плоских поверхонь при 24 пазах на робочій частині інструмента і силі притискання його до оброблюваної поверхні рівній  $1200$  Н. Ширину пазу була прийнята наступна, а саме –  $6$  мм,  $9$  мм та  $12$  мм. Ширину

пазу збільшуємо на  $\frac{1}{2}$  та у 2 рази. Час розриву контакту між робочою поверхнею інструмента і оброблюваною поверхнею зразка буде відповідно – 0,1 мс, 0,15 мс і 0,2 мс. У даному випадку співвідношення ширини пазу до гладкої частини буде наступним: при ширині пазу 6 мм воно буде становити  $1/4$ ; при ширині пазу 9 мм –  $1/3$ ; при ширині пазу 12 мм –  $1/1,5$ .

Спочатку розглянемо результати моделювання зміни параметрів термопружності під час оброблення інструментом з шириною пазу 6 мм. Даний паз має найменшу ширину і відповідно час, коли розривається дія теплового потоку на оброблювану поверхню буде найменшим. При заданих параметрах оброблення температура на оброблюваній поверхні після проходження зони контакту буде становити біля  $1480\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.13). Температура металу на оброблюваній поверхні є близькою до температури плавлення досліджуваної сталі. Час контакту є дуже малим (біля 0,4 мс), швидкість нагрівання поверхневого шару є дуже велика і складає біля  $70000\text{ K/s}$ . Хоча температура на оброблюваній поверхні є дуже великою, але метал поверхневого шару не встигає розплавитись, бо під час припинення дії теплового потоку він починає швидко охолоджуватися. Швидкість охолодження оброблюваної поверхні при цьому складає біля  $1,4 \cdot 10^6\text{ K/s}$  яка з глибиною різко зменшується і вже на глибині біля 100 мкм складає біля  $5 \cdot 10^5\text{ K/s}$  і також з глибиною далі значно зменшується.

У процесі оброблення під час проходження пазу над оброблюваною поверхнею вона охолоджується до температури  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Під час оброблення даним інструментом до температур фазових і структурних перетворень прогріваються шари товщиною до 800 мкм.

Напруження, які виникають у поверхневому шарі біля оброблюваної поверхні, становлять 7,2 ГПа, які з глибиною шару зменшуються.

Зі збільшенням ширини пазу до 9 мм при інших таких самих параметрах оброблення температура на оброблюваній поверхні у зоні контакту інструмент-деталь зменшується до  $1220\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При проходженні пазу над

оброблюваною поверхнею зона контакту охолоджується до температури біля 1100 °С. Відповідно і напруження зменшуються до 6 ГПа у порівнянні з обробленням інструментом з пазом, який має ширину 6 мм.

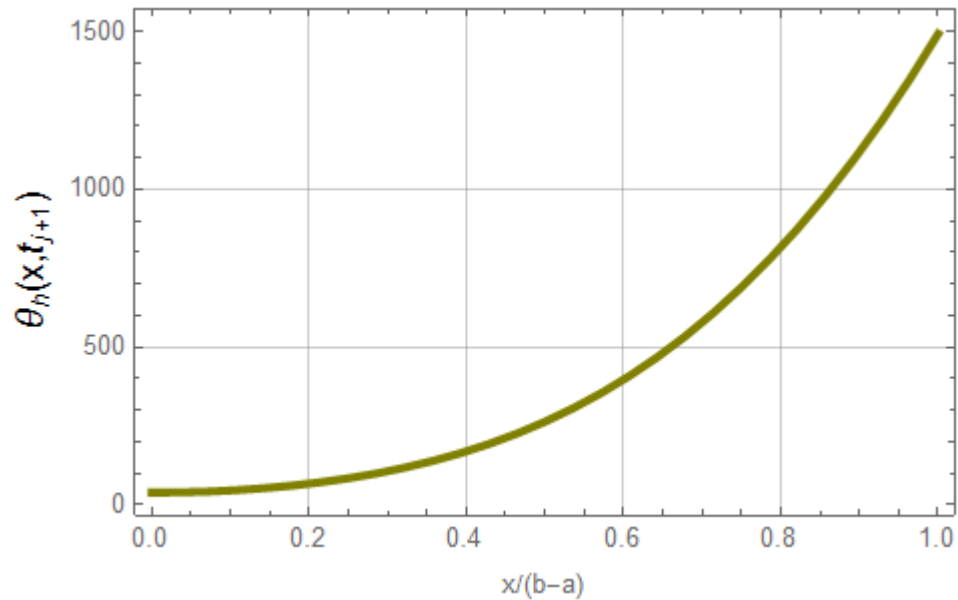


Рисунок 3.13 – Розподіл температури за глибиною поверхневого шару в момент завершення тертя робочої частини інструмента  
( $P = 1200$  Н,  $l = 6$  мм)

Збільшення ширини пазу до 12 мм на робочій частині інструмента під час оброблення приводить до зменшення температури зони контакту на оброблюваній поверхні до 1100 °С (рис. 3.14). З глибиною шару температура понижується. Товщина шару металу, який нагрівається до температури більше 900 °С складає біля 300 мкм.

Напруження, які виникають на оброблюваній поверхні становлять 5,4 ГПа і зменшуються у поверхневому шарі.

Під час фрикційного оброблення найбільша температура отримується у зоні контакту інструмент-деталь на оброблюваній поверхні. При проходженні пазу над зоною контакту по черговою гладкої поверхні і пазу на робочій поверхні інструмента відбувається циклювання нагрівання і охолодження оброблюваної поверхні. При ширині пазу 12 мм і заданих параметрах процесу оброблення величина циклювання температури на оброблюваній поверхні

становить більше 150 °C (рис. 3.15).

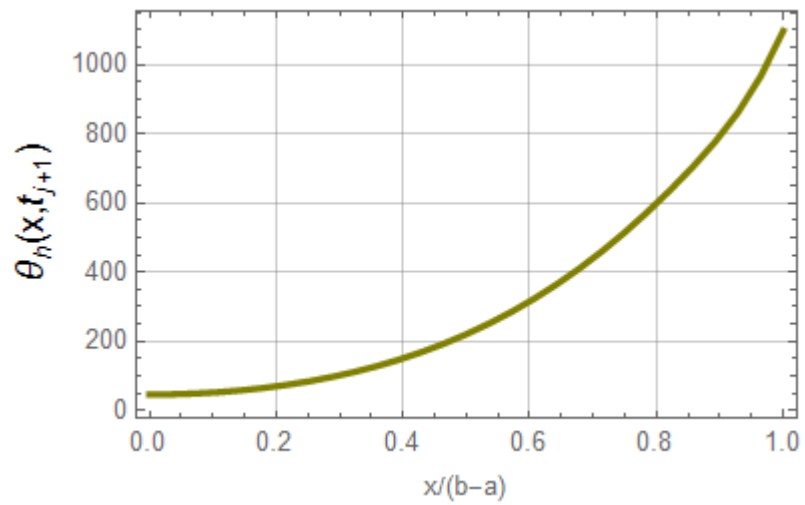


Рисунок 3.14 – Розподіл температури за глибиною поверхневого шару в момент завершення тертя робочої частини інструмента  
( $P = 1200$  Н,  $l = 12$  мм)

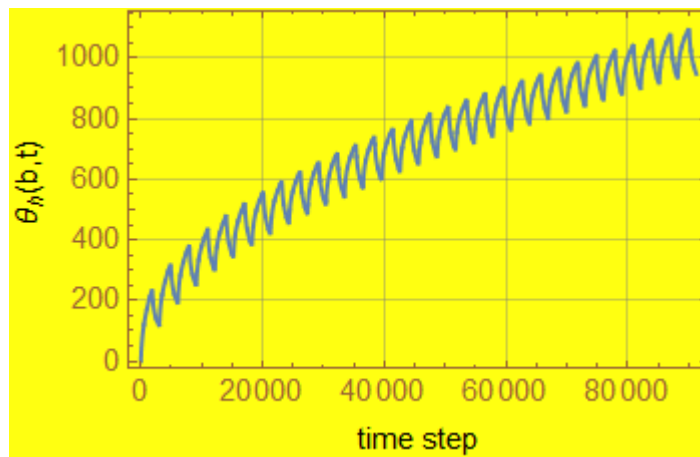


Рисунок 3.15 – Зміна температури на оброблюваній поверхні у зоні контакту інструмент-деталь під час фрикційного оброблення  
( $P = 1200$  Н,  $l = 12$  мм)

### **3.4 Експериментальне визначення розподілу температури за глибиною**

Для експериментального підтвердження отриманих теоретичних результатів моделювання зміни температури у зоні оброблення під час фрикційного оброблення визначали розподіл температур за глибиною оброблюваного шару. Для розподілу температури під час оброблення був розроблений спеціальний збірний зразок, який складався з двох половинок з'єднаних між собою болтами (див. рис. 2.33). У одній з половинок профрезерований паз під кутом  $1,5^\circ$ . Під поверхнею були припаяні три термомпари на глибинах від оброблюваної поверхні відповідно 410-430 мкм, 710-740 мкм та 1040-1060 мкм.

Для реєстрації зміни температури за глибиною у поверхневому шарі зразка під час оброблення були використані хромель-алюмелеві термомпари (ТХА). Встановлені штучні термомпари дозволяють визначити розподіл теплоти під час фрикційного оброблення. Штучні термомпари під час вимірювання мають певну інерційність, тому значення температури, зареєстровані ними дають занижені значення. Тим не менш ми оцінити характер зміни теплоти в залежності від переміщення інструмента і його розташування відносно термомпар.

Для визначення миттєвої температури, яка може бути зареєстрована на оброблюваній поверхні у зоні контакту інструмент-деталь можна було б використати напівштучну термомпару. Для даної термомпари один з електродів використовують матеріал досліджуваного зразка. У зразку висвердлюється отвір малого діаметра у який вставляється ізольований електрод, який не торкається до стінок отвору і виступає над поверхнею зразка. Під час оброблення інструмент зрізає виступаючий електрод і замикає його з металом зразка. У даний момент часу реєструється миттєва температура у зоні контакту інструмент-зразок. Під час таких вимірювань температури отримані значення є досить точними, але вони дають значення лише миттєвої температури у зоні

контакту, а розподілу температури отримати не можемо.

Під час вимірювання температури під час фрикційного оброблення інструмент проходив вздовж оброблюваної поверхні з поперечною подачею за подвійний хід. Переміщення інструмента було так встановлено, щоб перший подвійний хід інструмент проходив поряд з встановленими термопарами, а вже другий подвійний хід інструмента проходив над розташованими у зразку термопарами (рис. 3.16).

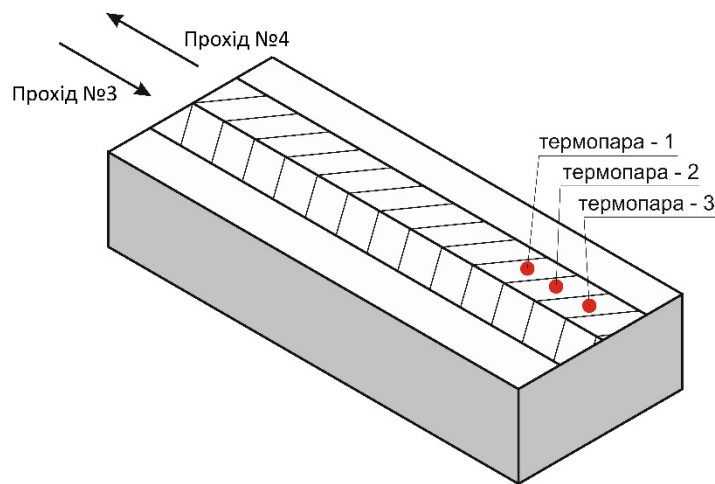


Рисунок 3.16 – Схема переміщення інструмента під час вимірювання розподілу температури за глибиною

Сигнали з трьох термопар окремо подавалися на підсилювачі, а далі до аналогово-цифрового перетворювача, з якого одночасно передавались на комп'ютер і реєструвались за кожним каналом у програмі «*Power Graph*». Зареєстрований сигнал з одного з каналів термопар представлено на рис. 3.17.

Зареєстровані сигнали від термопар є з спотвореннями (шумами). Для усунення спотворень у отриманих оцифрованих результатах вимірювань використовуємо математичний пакет *MathCAD 15* і дискретне перетворення Фур'є. Після обробки отриманих сигналів і усунення спотворень отримано результати зміни температури з кожної термопар, які були закріплені на різних глибинах від оброблюваної поверхні.

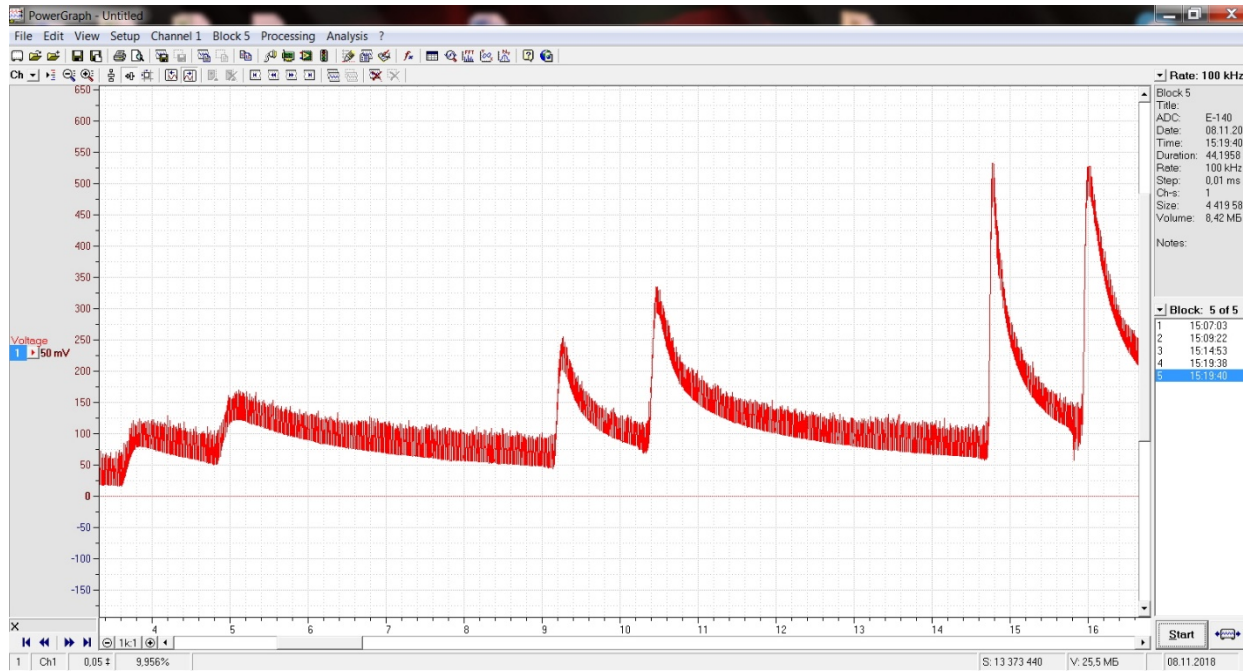


Рисунок 3.17 – Зображення запису зареєстрованих показів одного з каналів термопар у програмі «Power Graph»

Експериментальні дослідження проводили інструментом з 24 пазами шириною 12 мм на його робочій частині з силою притискання у 1000 Н інструмента до оброблюваної поверхні зразків.

Проведені дослідження показали, що під час першого подвійного проходу інструмента по оброблюваній поверхні усі три термопарі показали різке збільшення температури у поверхневому шарі металу (рис. 3.18). Під час першого подвійного проходу біля термопар, останні зареєстрували різке зростання температури, хоча прохід був поряд з ними.

Під час другого подвійного проходу, коли інструмент проходить над термопарами, реєструємо різке зростання температури до якої нагрівається метал поверхневого шару.

Після переміщення зони контакту інструмента з оброблюваною поверхнею, тобто джерела концентрованої теплової енергії, проходить різке охолодження металу поверхневого шару. Отримані експериментальні значення швидкостей нагрівання і охолодження значно відрізняються від отриманих теоретично, але характер зміни температур є таким самим.



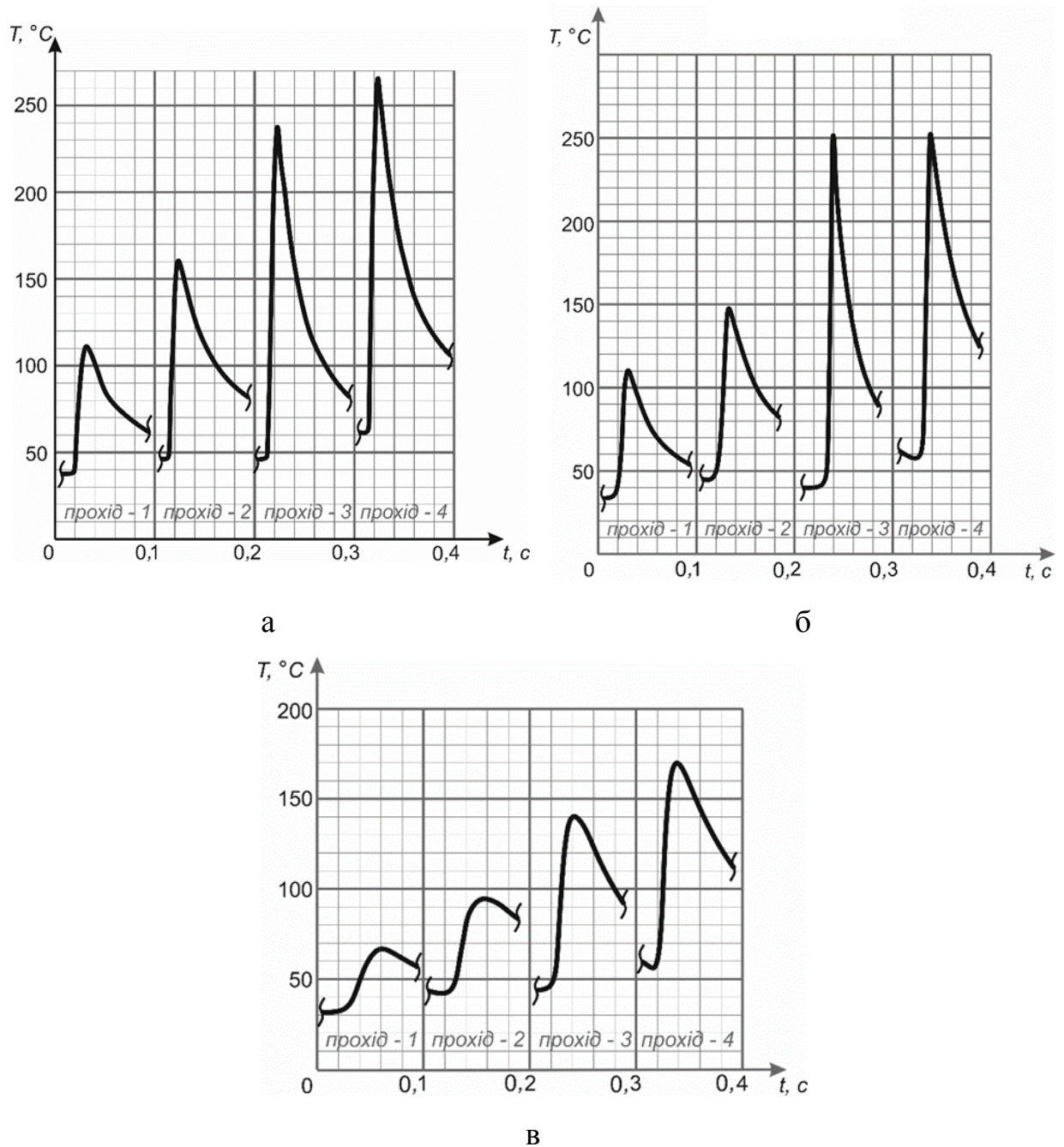


Рисунок 3.18 – Розподіл температур, зареєстрованих термопарами, розташованими на різних глибинах від оброблюваної поверхні:

а – 410-430 мкм; б – 710-740 мкм; в – 1040-1060 мкм

На основі проведених експериментальних досліджень обчислено швидкості нагрівання і охолодження поверхневого шару під час фрикційного оброблення плоских поверхонь зразків. Так, на глибині біля 400 мкм швидкість нагрівання поверхневого шару складає біля  $2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$  К/с, а швидкість охолодження біля  $1 \cdot 10^4 - 1,5 \cdot 10^4$  К/с.

Із-за інерційності термопар ми не могли зафіксувати зміну температур від проходження гладкої частини і пазу, які є на робочій частині інструмента. Слід відзначити, що експериментальні результати зміни температур отримані на певній глибині від поверхні, яка перевищує товщину поверхневого шару у якій проходять структурні і фазові переходи.

### Висновки до розділу 3

1. Доповнено математичну модель термопружного стану поверхневих шарів металу під час фрикційного оброблення плоских поверхонь деталей, на основі припущення, що швидкість поширення тепла в матеріалах є скінченою і рівняння теплопровідності стало гіперболічним із введенням двох так званих параметрів "часу релаксації".

2. Збільшення сили притискання інструмента до оброблюваної поверхні на 50 % (від 800 Н до 1200 Н) приводить до збільшення теплового потоку лише на 30 %, тобто від  $1,3 \cdot 10^6$  Дж/(с·м<sup>2</sup>) до  $1,7 \cdot 10^6$  Дж/(с·м<sup>2</sup>).

3. Швидкість нагрівання зони контакту на оброблюваній поверхні при входженні чергової гладкої частини складає біля  $1,5 \cdot 10^6$  К/с, при закінченні тертя гладкої поверхні інструмента зменшується до приблизно  $3 \cdot 10^5$  К/с. З глибиною поверхневого шару швидкість нагрівання його значно зменшується.

4. На основі проведених експериментальних досліджень обчислено швидкості нагрівання і охолодження поверхневого шару під час фрикційного оброблення плоских поверхонь зразків. Так, на глибині біля 400 мкм швидкість нагрівання поверхневого шару складає біля  $2 \cdot 10^4$  -  $3 \cdot 10^4$  К/с, а швидкість охолодження біля  $1 \cdot 10^4$  -  $1,5 \cdot 10^4$  К/с.

## РОЗДІЛ 4

### ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ФРИКЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕСУ ОБРОБЛЕННЯ

Як вже зазначалося у розділі 2.2 і 2.3 розглядається технологічна операція фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь на модернізованому металообробному обладнанні (плоско-шліфувальний та токарно-гвинторізний верстати) з використовуючи інструменти з різними робочими поверхнями.

Під час технологічної операції фрикційного оброблення у зоні контакту інструмент-деталь проходить інтенсивне тертя інструмента по оброблювальній поверхні деталі і виникає інтенсивне джерело теплової енергії, а також зсувне деформування поверхневого шару. Переважно, під час механічної обробки деталей машин необхідно знизити динамічні навантаження ВПД системи, але у даному випадку, під час фрикційного оброблення динамічні навантаження відіграють позитивну роль, формують додаткові навантаження, що впливають на подрібнення зерна структури поверхневого шару обробленої деталі. Тому для перевірки небезпечних режимів роботи і формування рекомендації з вибирання режимів оброблення необхідно дослідити динамічні характеристики процесу.

У даному розділі окремо розглянуто динамічні процеси під час фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин.

#### **4.1. Математична модель динамічних процесів під час фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей машин**

Для дослідження динамічних процесів, які проходять під час фрикційного оброблення плоских поверхонь розробляємо розрахункову схему

пружної системи верстата, яка представляє собою багатомасову модель. Для цього верстат розбиваємо на ряд вузлів, кожен з яких представляє собою окрему масу (рис. 4.1.). Крім того визначається деталь або вузол, який приймається як деталь з умовно безмежною масою до якої «прив'язуються» усі решта маси. Розрахункова схема пружної системи верстата є тримасовою моделлю. Як деталь з умовно безмежною масою прийнята станина верстата до якої «прив'язані» усі решта мас (маса шпindelного вузла, маса інструмента та маса стола з деталлю). Взаємозв'язок між окремими масами описуються пружними і демпфуючими зв'язками [261 – 265].

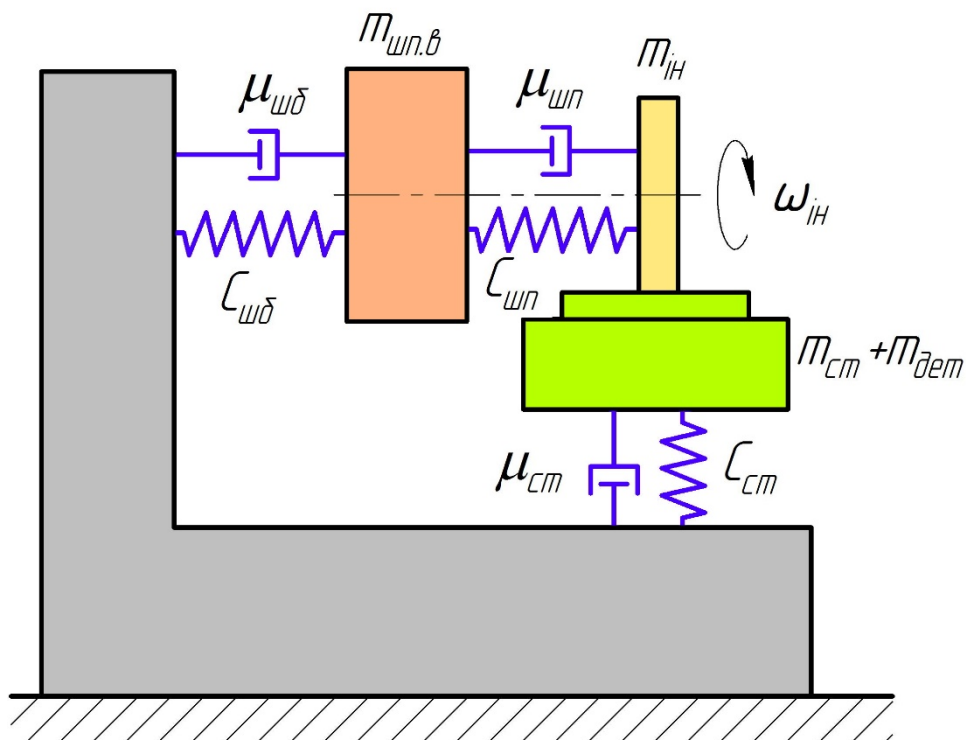


Рисунок 4.1 – Коливальна схема верстата

Для визначення динамічних параметрів в зоні контакту інструмент-деталь замінюємо подану вище коливальну схему верстата на розрахункову схему (рис. 4.2).

Як зазначалося раніше, під час фрикційного оброблення у зоні контакту інструмент-деталь проходить високошвидкісне тертя інструмента по оброблювальній поверхні деталі, то у зоні контакту виникає інтенсивне

концентроване джерело теплової енергії, а також зсувне деформування металу поверхневого шару. Для збільшення товщини зміцненого шару, а також подрібнення зерна його структури у зоні контакту створюємо додаткове джерело інтенсивного різкого (ударного) навантаження за рахунок геометрії робочої поверхні (периферії) інструмента.

Математичну модель процесу технологічної операції фрикційного зміцнення розглянемо при використанні інструмента з поперечними пазами (рис. 4.3), так як усі інструменти окрім гладкого мають перервний тепловий потік, а інструмент з поперечними пазами окрім перервного теплового потоку має повний вихід з «плями» (зони) контакту [266].

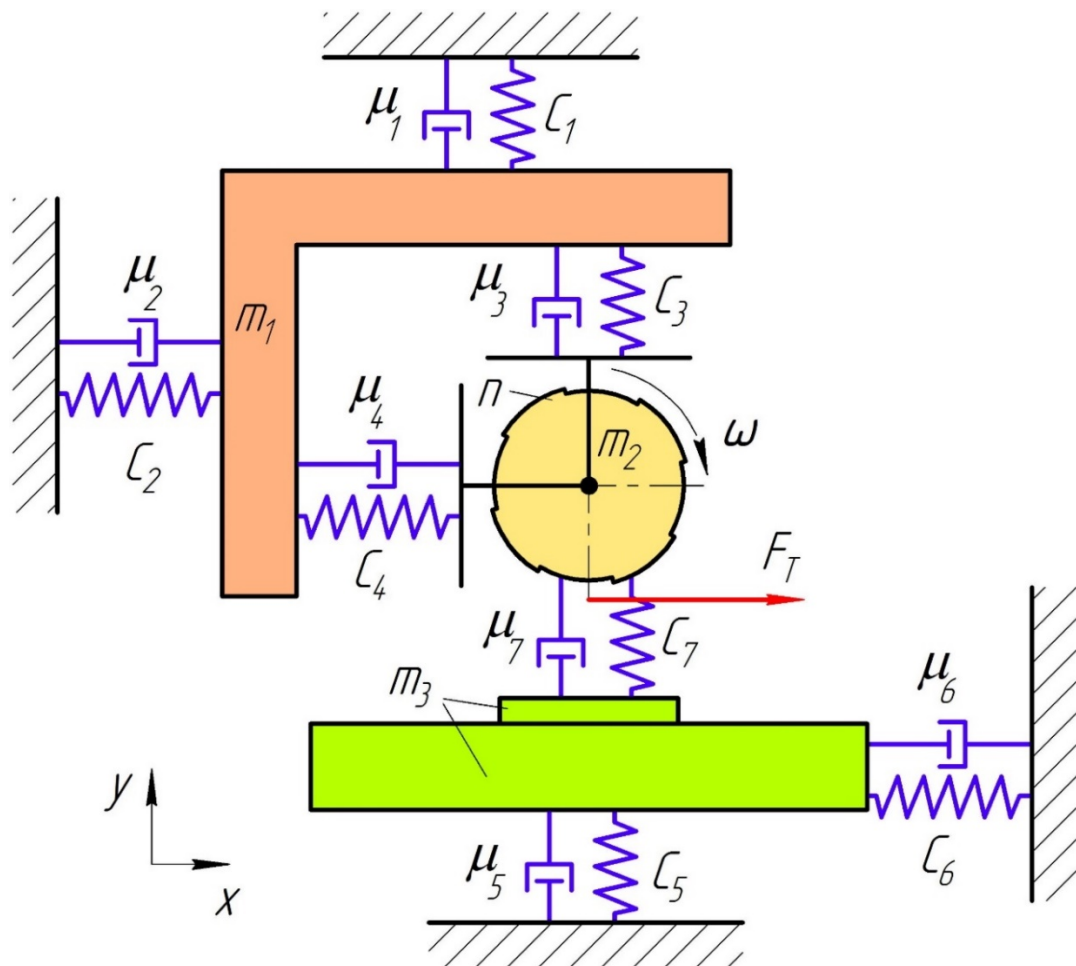


Рисунок 4.2 – Розрахункова схема верстата

Інструмент, має на периферії сформовані поперечні пази з однаковим коловим кроком, тобто відбувається чергування гладкої частини інструмента і

паза з однаковою частотою. Ширина пазу вибирається з умови гарантованого повного виходу з контакту робочої поверхні інструмента з оброблюваною поверхнею. Ширина пазу становила 6-12 мм. Під час фрикційного оброблення інструмент притискається з силою 500-1200 Н до оброблюваної поверхні. Під її дією у зоні контакту виникає радіальна складова сили дії інструмента на деталь. За рахунок обертання інструмента у зоні контакту виникає тангенціальна складова сили дії інструмента на деталь, яка буде визначати величину інтенсивності теплового потоку. Під час проходження пазу над зоною контакту інструмент-деталь зона контакту розвантажується і у цей момент часу нормальна і тангенціальні складові сили дії інструмента на деталь рівні нулеві. Дія джерела теплової енергії призупиняється. Під час входження у контакт наступної гладкої поверхні інструмента проходить різке (ударне) навантаження зони контакту, а потім високошвидкісне тертя гладкої частини інструмента по оброблюваній поверхні деталі. У зоні контакту відновлюється дія джерела інтенсивної теплової енергії. Зона контакту на оброблюваній поверхні сприймає імпульсну дію теплової енергії, зсувного деформування та додаткового ударного навантаження. Частота ударних навантажень залежить від кількості пазів на робочій частині інструмента. Усі ці процеси сприяють формуванню зміцненого білого шару з нанокристалічною структурою більшої товщини з підвищеною твердістю і подрібненим зерном, ніж після обробки інструментом з гладкою робочою поверхнею [235, 267]

У даній математичній моделі силу притиску інструмента до деталі запропоновано подати у неявній формі, тобто задати через відносне переміщення шпиндельної бабки до стола верстата ( $\Delta y$ ). Іншими словами, задавши певну величину переміщення  $\Delta y$  формується сила притиску врахувавши сумарні жорсткості коливальної схеми верстата. Даний вибір було здійснено виходячи з того, що більшість верстатів немає можливості вимірювати складові сили під час процесу оброблення, а лише за допомогою лімба можна встановити величину вертикального переміщення. Нормальна складова сили, яка повинна бути під час оброблення, попередньо визначається

за допомогою експериментальних досліджень [268–270].

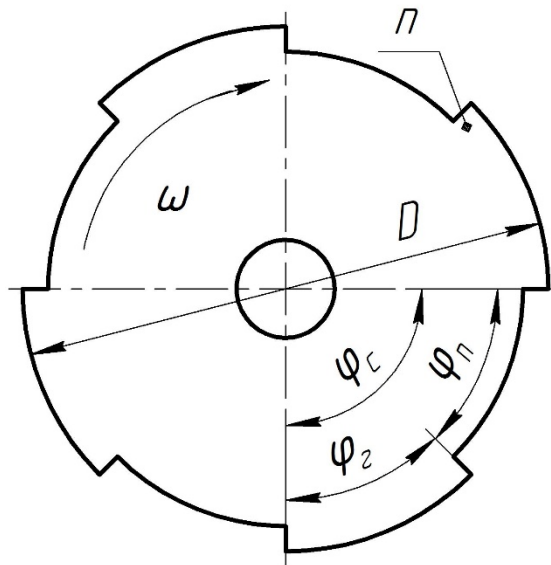


Рисунок 4.3 – Геометрія периферії інструмента

Для механічної системи верстата можна виділити шість узагальнених координат, які характеризують можливі рухи інструмента та деталі у горизонтальній і вертикальній площинах. Як узагальнені координати прийнято відповідні лінійні переміщення інструмента та деталі (див .рис. 4.2).

Позначимо:  $\omega$  – кутова швидкість обертання інструмента (рад/с);  $x_1, y_1$  – горизонтальні та вертикальні переміщення шпиндельної бабки (м);  $x_2, y_2$  – горизонтальні та вертикальні переміщення інструмента (м);  $x_3, y_3$  – горизонтальні та вертикальні переміщення стола верстата (м).  $m_1$  – маса шпиндельної бабки (кг);  $m_2$  – маса інструмента (диска) (кг);  $m_3$  – маса оброблювальної деталі (кг);  $c_1$  і  $c_2$  – жорсткість між напрямними колони та шпиндельною бабкою верстата у горизонтальній і вертикальній площині, (Н/м);  $c_3$  і  $c_4$  – жорсткість опор шпинделя верстата у горизонтальній і вертикальній площині (Н/м);  $c_5$  і  $c_6$  – жорсткість стола верстата у горизонтальній і вертикальній площині (Н/м);  $c_7$  – контактна жорсткість між оброблювальною деталлю та інструментом (Н/м);  $\mu_1$  і  $\mu_2$  – коефіцієнт демпфування між напрямними колони та шпиндельною бабкою верстата у



горизонтальній і вертикальній площині (Нс/м);  $\mu_3$  і  $\mu_4$  – коефіцієнт демпфування опор шпинделя верстата у горизонтальній і вертикальній площині (Нс/м);  $\mu_5$  і  $\mu_6$  – коефіцієнт демпфування стола верстата у горизонтальній і вертикальній площині (Нс/м);  $\mu_7$  – коефіцієнт демпфування між інструментом і деталлю (внутрішнє затухання) (Нс/м);  $F_T$  – сила тертя між деталлю та інструментом (Н) [271–274].

Узагальнені координати  $q_{i,j}$  в нашому випадку будуть (де  $i = 1, 2, 3$  – номер маси,  $j = 1, 2$  – номер координати):

- для шпиндельного бабки (вузла) масою  $m_1$ :  $q_{11} = x_1$ ;  $q_{12} = y_1$ .
- для інструмента масою  $m_2$ :  $q_{21} = x_2$ ;  $q_{22} = y_2$ .
- для деталі (заготовка) масою  $m_3$ :  $q_{31} = x_3$ ;  $q_{32} = y_3$ .

Диференціальні рівняння, які описують рух системи, побудовані на основі рівнянь Лагранжа другого роду [275–278], мають вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{i,j}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_{i,j}} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_{i,j}} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_{i,j}} = Q_{q_i}, \quad (4.1)$$

де  $T$  – кінетична енергії системи;

$\Pi$  – потенціальна енергії системи;

$\Phi$  – функція розсіювання енергії в системі (дисипативна функція Релея);

$Q_{q_i}$  – узагальнені сили, що відповідають обраним узагальненим координатам  $x_i$  та  $y_i$ .

Під час формування математичної моделі приймемо наступні припущення: вважатимемо, що закон зміни жорсткості в пружних елементах системи не виходить за межі лінійності і відповідає закону Гука. Це виправдано за умови реалізації малих відхилень пружини від положення рівноваги; механічну систему верстата розглядатимемо як таку, що складається з абсолютно твердих тіл, з'єднаних ідеальними голономними в'язями та пружними елементами строго визначеної жорсткості; у динамічну модель у вигляді демпферів введемо коефіцієнти в'язкого тертя, які

пропорційні швидкості переміщення рухомих повзунів вздовж відповідних напрямних осей та відображають розсіювання енергії у відповідних пружних елементах системи [275–278].

Тоді, узагальнена сила, яка визначається відношенням віртуальних робіт сил  $\sum \delta A(F_k)$ , що діють на кожний елемент до приросту певної узагальненої координати  $\delta q_{i,j}$  для відповідних мас будуть мати вигляд:

$$Q_{i,j} = \frac{\delta A_{i,j}}{\delta q_{i,j}}. \quad (4.2)$$

Отже, для шпindelьної бабки узагальнена сила буде мати вигляд:

$$Q_{x_1} = 0; \quad Q_{y_1} = \frac{N \cdot \delta y_1}{\delta y_1} = N. \quad (4.3)$$

Для інструмента:

$$Q_{x_2} = f \frac{(N - N_{23}) \cdot \delta x_2}{\delta x_2} = f(N - N_{23}); \quad Q_{y_2} = \frac{N_{23} \cdot \delta y_2}{\delta y_2} = N_{23}. \quad (4.4)$$

Для деталі:

$$Q_{x_3} = f \frac{(N - N_{23}) \cdot \delta x_3}{\delta x_3} = f(N - N_{23}); \quad Q_{y_3} = \frac{N_{23} \cdot \delta y_3}{\delta y_3} = N_{23}. \quad (4.5)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя між інструментом і деталлю;

$N$  – сила нормального притиску інструмента до деталі, яка формується через переміщення  $y_0$  шпindelьної бабки у напрямку деталі (глибина різання при технологічній операції шліфування), тобто:

$$N = c_y^* \cdot y_0, \quad (4.6)$$

де  $y_0$  – переміщення шпindelьної бабки у напрямі до деталі, коли гладка поверхня інструмента контактує з оброблювальною поверхнею деталі, тобто за допомогою даного переміщення формується взаємна сила притиску;

$c_y^*$  – зведена жорсткість системи у вертикальному напрямі:

$$\frac{1}{c_y^*} = \frac{1}{c_1 + c_3} + \frac{1}{c_5 + c_7}. \quad (4.7)$$

Формування сили притиску, як вже описувалося раніше, відбувається завдяки переміщенню шпіндельної бабки (опусканні) у напрямі до деталі через передачу гвинт-гайка на величину  $y_0$ , яку приймаємо постійною під час оброблення (переміщення, яке контролюється лімбом верстата і формує силу притиску між гладкою поверхнею інструмента та оброблювальною поверхнею деталі) [279, 280]. Завдяки геометрії інструмента (чергуванні гладкої поверхні інструмента з пазом) відбувається зменшення сили притиску між інструментом та деталлю на величину переміщення  $y_{23}$ .

$$y_{23} = \begin{cases} 0, & \text{при } \omega t = (0 \dots \varphi_r) + \frac{2\pi}{n} \cdot m \\ (R - R \cdot \cos \omega t), & \text{при } \omega t = \left(\varphi_r \dots \frac{\varphi_n}{2}\right) + \frac{2\pi}{n} \cdot m \\ (R - R \cdot \cos \omega t) - \left(R - R \cdot \cos \left(\frac{\varphi_c - \varphi_r}{2}\right)\right), & \\ \text{при } \omega t = \left(\frac{\varphi_n}{2} \dots \varphi_r\right) + \frac{2\pi}{n} \cdot m & \end{cases} \quad (4.8)$$

$$m = 0, 1, 2 \dots (n - 1)$$

Так як нормальна сила змінюється залежно від перебування у контакті гладкої поверхні або паза на робочій частині інструмента з оброблювальною поверхнею, то аналітичні залежності відповідних узагальнених сил  $Q_i$  мають вигляд:

$$\begin{aligned} Q_{y_1} &= N; & Q_{y_2} &= N_{23}; \\ Q_{x_1} &= 0; & Q_{x_2} &= F_T = f \cdot (N - N_{23}); \\ |Q_{y_2}| &= |-Q_{y_3}|; \\ |Q_{x_2}| &= |-Q_{x_3}|. \end{aligned} \quad (4.9)$$

де,  $N_{23}$  – сила, що зменшує силу нормального притиску інструмента до деталі,

яка формується через переміщення  $y_{23}$ , яке викликано почерговою зміною гладкої частини та паза під час обертання інструмента:

$$N_{23} = c_y^* \cdot y_{23}, \quad (4.10)$$

Також, необхідно описати випадок, коли паз на периферії інструмента є вузьким і дає можливість припинити дію теплового потоку, але не дає можливості вільно вийти з контакту інструмента із деталлю (рис. 4.4). Тому мінімальне значення сили притиску буде визначатися з залежності [266]:

якщо  $y_0 < \Delta R$ ,

$$\text{тоді } |N_{min}| = c_y^* \cdot (y_0 - \Delta R) \text{ при } \omega t = (\varphi_r \dots \varphi_c) + \frac{2\pi}{n} \cdot m \quad (4.11)$$

$$\Delta R = R - R' = R - R \cdot \cos\left(\frac{\varphi_c - \varphi_{\Pi}}{2}\right) = R \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{n}(1 - k)\right)\right)$$

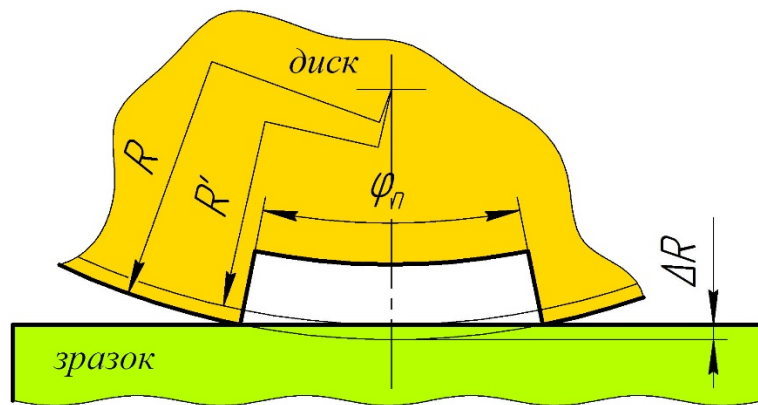


Рисунок 4.4 – Контакт інструмента у зоні контакті

Кінетична енергія системи визначатиметься як сума доданків, які враховують прямолінійний рух інструмента і стола у горизонтальній і вертикальній площинах:

$$T = \frac{m_1(\dot{x}_1 + \dot{y}_1)^2}{2} + \frac{m_2(\dot{x}_2 + \dot{y}_2)^2}{2} + \frac{m_3(\dot{x}_3 + \dot{y}_3)^2}{2}. \quad (4.12)$$

Знайдемо відповідні похідні від виразу кінетичної енергії, які входять у ліві частини рівнянь Лагранжа 2-го роду:

- для шпindelної бабки:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{11}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} = m_1 \dot{x}_1; & \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{12}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} = m_1 \dot{y}_1; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) = m_1 \ddot{x}_1; & \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} \right) = m_1 \ddot{y}_1;\end{aligned}\tag{4.13}$$

- для інструмента:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{21}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} = m_2 \dot{x}_2; & \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{22}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_2} = m_2 \dot{y}_2; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) = m_2 \ddot{x}_2; & \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_2} \right) = m_2 \ddot{y}_2;\end{aligned}\tag{4.14}$$

- для деталі:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{31}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3} = m_3 \dot{x}_3; & \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{32}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_3} = m_3 \dot{y}_3; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3} \right) = m_3 \ddot{x}_3; & \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_3} \right) = m_3 \ddot{y}_3;\end{aligned}\tag{4.15}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_i} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y_i} = 0.$$

Потенціальна енергія в системі накопичується у відповідних пружних елементах. Для її знаходження використаємо наступну залежність:

$$\begin{aligned}\Pi = \frac{c_1 \cdot y_1^2}{2} + \frac{c_3 (y_1 - y_2)^2}{2} + \frac{c_7 (y_2 - y_3)^2}{2} + \frac{c_5 \cdot y_3^2}{2} + \frac{c_2 \cdot x_1^2}{2} + \\ + \frac{c_4 (x_1 - x_2)^2}{2} + \frac{c_6 \cdot x_3^2}{2}.\end{aligned}\tag{4.16}$$

Знайдемо відповідні похідні від виразу потенціальної енергії, які

входять у ліві частини рівнянь Лагранжа 2-го роду:

- для шпindelної бабки:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} &= c_2 x_1 + c_4 x_1 - c_4 x_2; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial y_1} &= c_1 y_1 + c_3 y_1 - c_3 y_2;\end{aligned}\tag{4.17}$$

- для інструмента:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Pi}{\partial x_2} &= -c_4 x_1 + c_4 x_2; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial y_2} &= -c_3 y_1 + c_3 y_2 + c_7 y_2 - c_7 y_3;\end{aligned}\tag{4.18}$$

- для деталі:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Pi}{\partial x_3} &= c_6 x_3; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial y_3} &= -c_7 y_2 + c_7 y_3 + c_5 y_3.\end{aligned}\tag{4.19}$$

Дисипативну функцію  $\Phi$  для системи, вважаючи, що розсіювання енергії прямо пропорційне швидкості, розраховуємо за таким виразом:

$$\begin{aligned}\Phi &= \frac{\mu_1 \cdot \dot{y}_1^2}{2} + \frac{\mu_3 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2)^2}{2} + \frac{\mu_7 (\dot{y}_2 - \dot{y}_3)^2}{2} + \frac{\mu_5 \cdot \dot{y}_3^2}{2} + \frac{\mu_2 \cdot \dot{x}_1^2}{2} + \\ &+ \frac{\mu_4 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2}{2} + \frac{\mu_6 \cdot \dot{x}_3^2}{2}.\end{aligned}\tag{4.20}$$

Знайдемо відповідні похідні від виразу дисипативної функції, які входять у ліві частини рівнянь Лагранжа 2-го роду:

- для шпindelної бабки:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_1} = \mu_2 \dot{x}_1 + \mu_4 \dot{x}_1 - \mu_4 \dot{x}_2;\tag{4.21}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y_1} = \mu_1 \dot{y}_1 + \mu_3 \dot{y}_1 - \mu_3 \dot{y}_2;$$

- для інструмента:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_2} = -\mu_4 \dot{x}_1 + \mu_4 \dot{x}_2;$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y_2} = -\mu_3 \dot{y}_1 + \mu_3 \dot{y}_2 + \mu_7 \dot{y}_2 - \mu_7 \dot{y}_3;$$

(4.22)

- для деталі:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y_3} = -\mu_7 \dot{y}_2 + \mu_7 \dot{y}_3 + \mu_5 \dot{y}_3; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} = \mu_6 \dot{x}_3. \quad (4.23)$$

Математична модель [281], яка описує динаміку механічної системи верстата:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \ddot{x}_1 + c_2 x_1 + c_4 x_1 - c_4 x_2 + \mu_2 \dot{x}_1 + \mu_4 \dot{x}_1 - \mu_4 \dot{x}_2 = Q_{x_1} \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_4 x_1 + c_4 x_2 - \mu_4 \dot{x}_1 + \mu_4 \dot{x}_2 = Q_{x_2} \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_6 x_3 + \mu_6 \dot{x}_3 = -Q_{x_3} \\ m_1 \ddot{y}_1 + c_1 y_1 + c_3 y_1 - c_3 y_2 + \mu_1 \dot{y}_1 + \mu_3 \dot{y}_1 - \mu_3 \dot{y}_2 = 0 \\ m_2 \ddot{y}_2 - c_3 y_1 + c_3 y_2 + c_7 y_2 - c_7 y_3 - \mu_3 \dot{y}_1 + \mu_3 \dot{y}_2 + \mu_7 \dot{y}_2 - \mu_7 \dot{y}_3 = Q_{y_2} \\ m_3 \ddot{y}_3 - c_7 y_2 + c_7 y_3 + c_5 y_3 - \mu_7 \dot{y}_2 + \mu_7 \dot{y}_3 + \mu_5 \dot{y}_3 = -Q_{y_3} \end{array} \right. \quad (4.24)$$

Початкова сила притиску інструмента до деталі коли контакт відбувається гладкою частиною інструмента:

$$F_0 = y_0 \cdot c_y^*. \quad (4.25)$$

Початкові умови:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i|_{t=0} &= 0, \quad \dot{y}_i|_{t=0} = 0, \\ y_1|_{t=0} &= \frac{F_0}{c_1 + c_3}, \quad y_2|_{t=0} = \frac{F_0}{c_1 + c_3 + c_7}, \\ y_3|_{t=0} &= \frac{F_0}{c_1 + c_3 + c_5 + c_7}, \\ x_1|_{t=0} &= 0, \quad x_2|_{t=0} = 0, \quad x_3|_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Моделювання взаємодії інструмента з деталлю здійснено за допомогою контактної жорсткості та демпфуванням енергії локального пружно-пластичного деформування. Тому додатково вводиться умова перевірки наявності взаємного контакту інструмента з деталлю. Тобто, якщо інструмент матиме переміщення у протилежний напрям від деталі, тоді контактна жорсткість та демпфування будуть відсутні:

$$\text{Якщо } u_3 - u_2 < 0, \quad \text{тоді } c_7 = 0, \mu_7 = 0. \quad (4.27)$$

#### **4.2. Імітаційна модель динамічних процесів під час фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей машин**

Моделювання динамічних процесів технологічної операції фрикційного оброблення плоских поверхонь виконано з використанням математичного пакета MATLAB-Simulink. За допомогою даного пакету можна провести перевірку будь-якої ланки математичної моделі продовж моделювання процесу [282, 283].

Моделювання процесу виконано з використанням інструмента з поперечними пазами, які по черговому з однаковим коловим кроком чергуються з гладкою поверхнею. Для побудови імітаційної моделі спершу слід розробити її блок-схему та описати алгоритм роботи (рис.4.5).

Алгоритм імітаційної моделі починається з блоку вводу даних (блок 2), таких як: параметри інструмента (колова швидкість, початкове переміщення, яке формує силу притиску, діаметр, кількість пазів, розмір пазів, маса), параметрів верстата (коефіцієнт жорсткості елементів, коефіцієнт дисипації, маси шпindelної бабки, маси стола) та параметрів для моделювання самого процесу (кількість розрахункових обертів інструмента, яка задає час моделювання). Отримавши вхідні дані у блоці 3 розраховуємо час



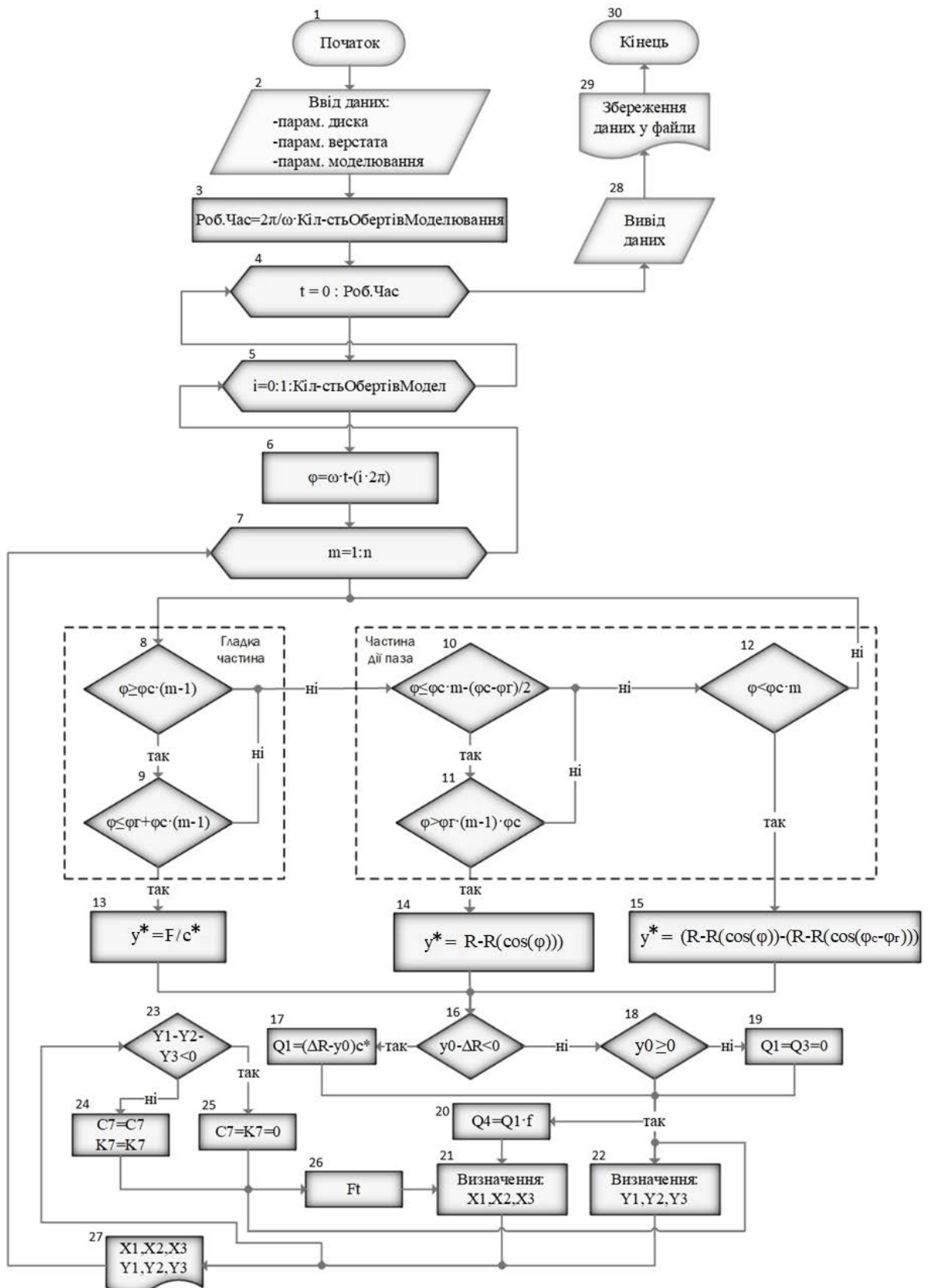


Рисунок 4.5 – Блок-схема імітаційної моделі процесу фрикційного оброблення плоских поверхонь

моделювання для циклу, що сформований у блоці 4. Кожний оберт інструмента рівний  $2\pi$ , то слід після кожного повного оберту здійснювати переприсвоювання значень повороту від 0 до  $2\pi$ , за дану операцію відповідає блок 5 та 6. Так, як периферія інструмента має пази, то слід чітко визначити їх перебування під час обертання, для цього запропоновано цикл (блок 7), який залежно від кількості пазів проводить перевірку геометрії інструмента. Шпиндельна бабка формує постійну силу притиску інструмента до оброблювальної бабки завдяки початковому переміщенню за рахунок гвинт-гайки, а геометрія інструмента послаблює дану силу у момент проходження пазу. Тому дуже важливо є записати перехід між гладкою частиною і першою половиною паза, а також між другою половиною паза та наступною гладкою частиною. За гладку частину відповідає блок 8 та 9 відповідно до яких виконується розрахунок сили при контакті гладкої поверхні з деталлю у блоці 13. Визначення паза проводиться у два етапи, пошук першої і окремо другої частини паза. Перша частина паза (блок 10 і 11) у якій сила притиску спадає і визначається блоком 14, та друга частина паза (блок 12), де сила притиску зростає і визначається блоком 15 та 20. Отже, знайшовши сили контакту, необхідно провести перевірку значення початкового переміщення до параметра  $\Delta R$  (див. рис. 4.5), яке виконується у блоці 16 і 17, тобто перевірити чи відбулося повне розвантаження контакту деталі з інструментом. При повному розвантаженні контакту необхідно задати незалежність між інструментом та деталлю, тобто забрати зв'язок між ними, за дану дію відповідає блок 18 та 19. Черговою важливою перевіркою є перевірки наявності контакту між деталлю та інструментом під час контакту гладкої поверхні, так як можливий такий випадок, коли переміщення деталі та інструмента можуть бути протилежними, за дану перевірку відповідає блок 23, 24 і 25, у яких при відсутності контакту проходить переприсвоєння значень контактної жорсткості та контактного демпфування. Сила тертя, яка залежить від сили притиску інструмента до деталі та наявності даної сили

розраховується у блоці 26.

Провівши всі необхідні попередні розрахунки та перевірки у блоці 21 та 22 представлено диференціальні рівняння переміщення шпindelної бабки, інструмента та стола з деталлю. Отримані дані заносяться у матрицю, а цикл задає наступний крок у часі рівний кроку інтегрування. Після виходу з циклу 4 відбувається повне представлення даних у вигляді графіків, формування матриць з даними та збереження інформації у відповідних форматах файлів.

Використавши логіку, яка подана у блок-схемі розроблена імітаційна модель, яка складається із трьох частин: перша частина – блок схема (рис. 4.6) розроблена у Simulink, друга частина – графічний інтерфейс (рис. 4.7) та третя частина – код, який поєднує дані частини, відповідає за змінні та формує графічну інформацію для представлення на екрані та подальшого її зберігання у відповідні формати файлів.

Для легкої зміни вихідних параметрів для імітаційної моделі розроблено графічний інтерфейс на п'ять зон: інформація про інструмент (сила притиску, розміри інструмента, кількість пазів, кутова швидкість, маса), інформація про верстат (коефіцієнти жорсткості та демпфування), маси (елементів верстата) та елементи керування відображенням інформації.

Блок-схема даної моделі (див. рис. 4.6) загалом складається з 14 підблоків, а саме: генератора обертів, блоків геометрії інструмента, перевірки контакту, блоків вертикальних та горизонтальних переміщень шпindelної бабки, інструмента та стола верстата.

Перевірку моделі на адекватність виконано при наступних параметрах: кількість пазів  $n = 4$ , величина дії гладкої поверхні  $\varphi_r = 0,25\pi$ ; величина дії паза  $\varphi_n = 0,25\pi$ , тобто сегмент рівний  $\varphi_c = 0,5\pi$ ; сила притиску інструмента до деталі  $F = 500H$ ; діаметр інструмента  $D = 360$  мм; кутова частота обертання шпинделя  $\omega = 100$  рад/с, а розв'язок диференціальних рівнянь виконано методом Рунге-Кутта. Генерування кута повороту інструмента виконуватиме за допомогою блоку «Repeating Sequence», у якому можна

задати значення зміни амплітуди та час одного сегмента. Визначення розташування паза у часі виконаємо за допомогою булевих операторів (рис 4.8) [284–286]. Тому, при булевій перевірці у циклі кількості пазів кожного модельованого оберту, відбувається паралельно накладання кожного пазу, яке за допомогою суматора перетворюється у єдиний сигнал.

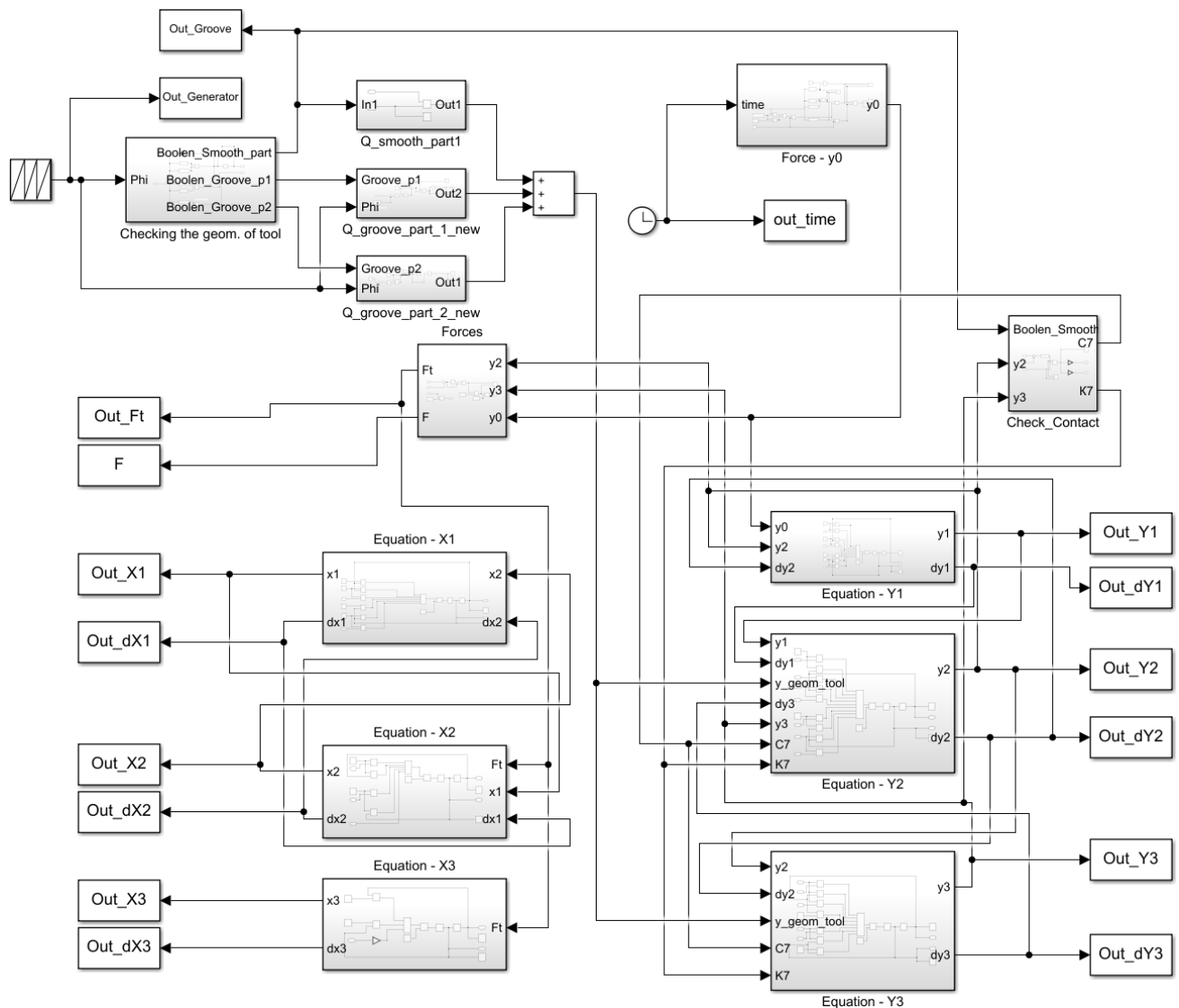


Рисунок 4.6 – Імітаційна схема виконана у MATLAB-Simulink

Для моделювання процесу вибрано час, що рівний трьом повним оборотам інструмента, генератор обертання та геометрія інструмента представлені на рис 4.9, також проставляємо «зонди», щоб додатково здійснити перевірку при дослідженні переміщень та швидкостей точки

переходу між пазом та гладкою частиною.

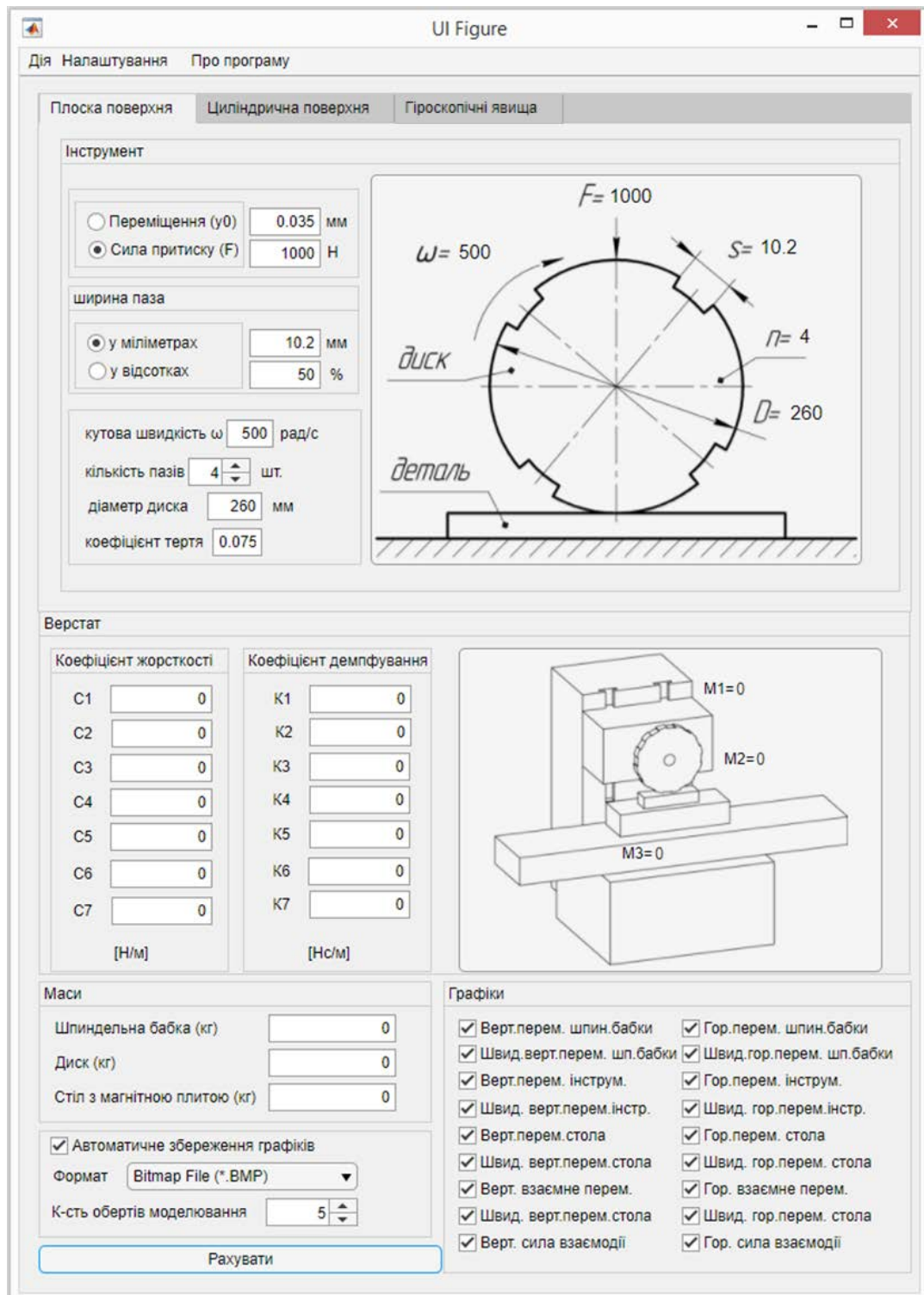


Рисунок 4.7 – Інтерфейс імітаційної моделі для моделювання динамічних процесів

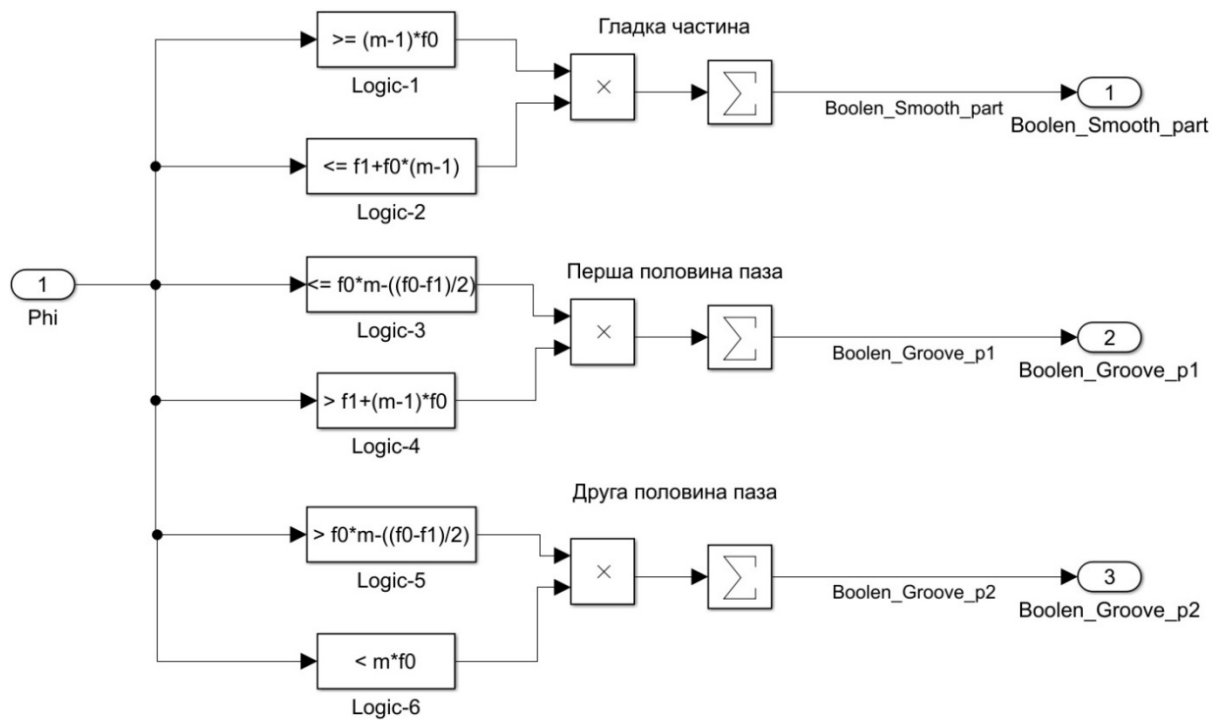


Рисунок 4.8. Визначення розташування паза при обертанні інструмента

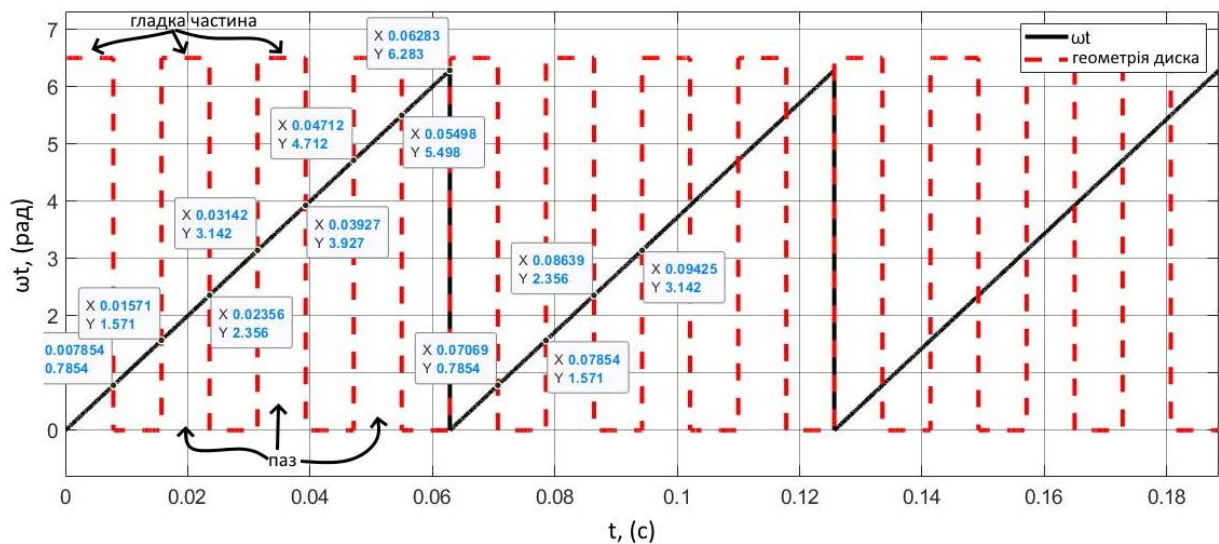


Рисунок 4.9 – Моделювання обертання інструмента з поперечними пазами

Блок визначення вертикального переміщення шпиндельної бабки представлено на рис. 4.10, а горизонтальне переміщення на рис.4.11. Усі блоки даної моделі, які змодельовані відповідно до диференціальних рівнянь (4.24) представлені у додатку (Л).

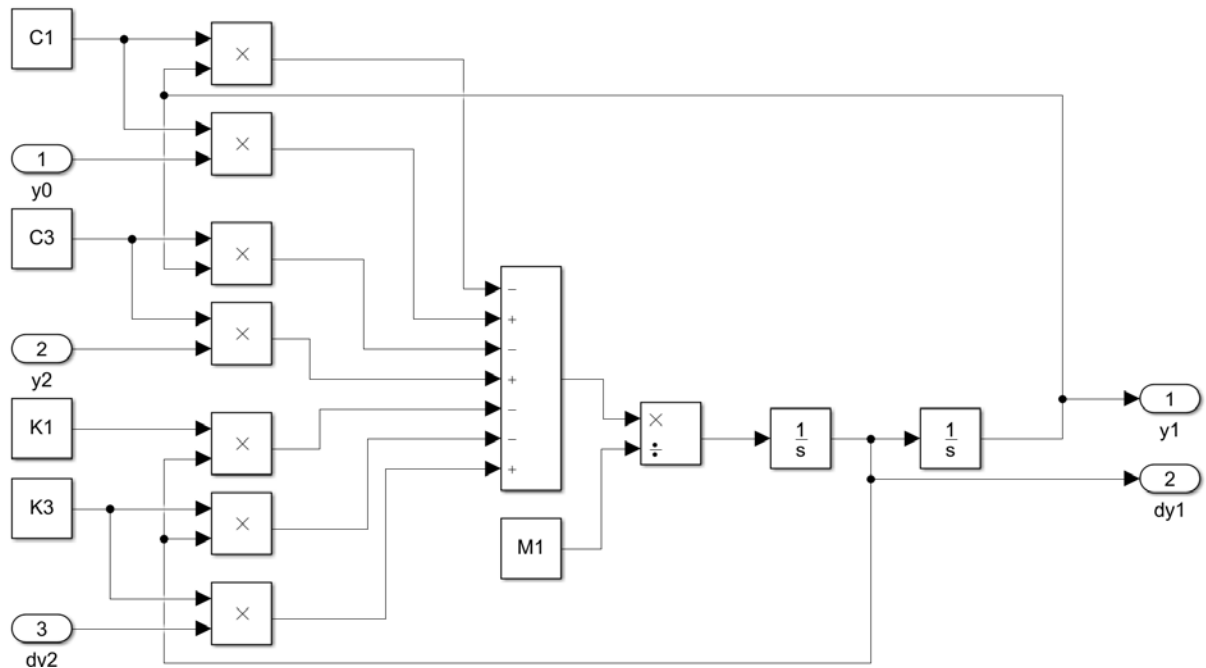


Рисунок 4.10 – Блок імітаційної моделі з визначення переміщення та швидкості шпindelьної бабки у вертикальній площині

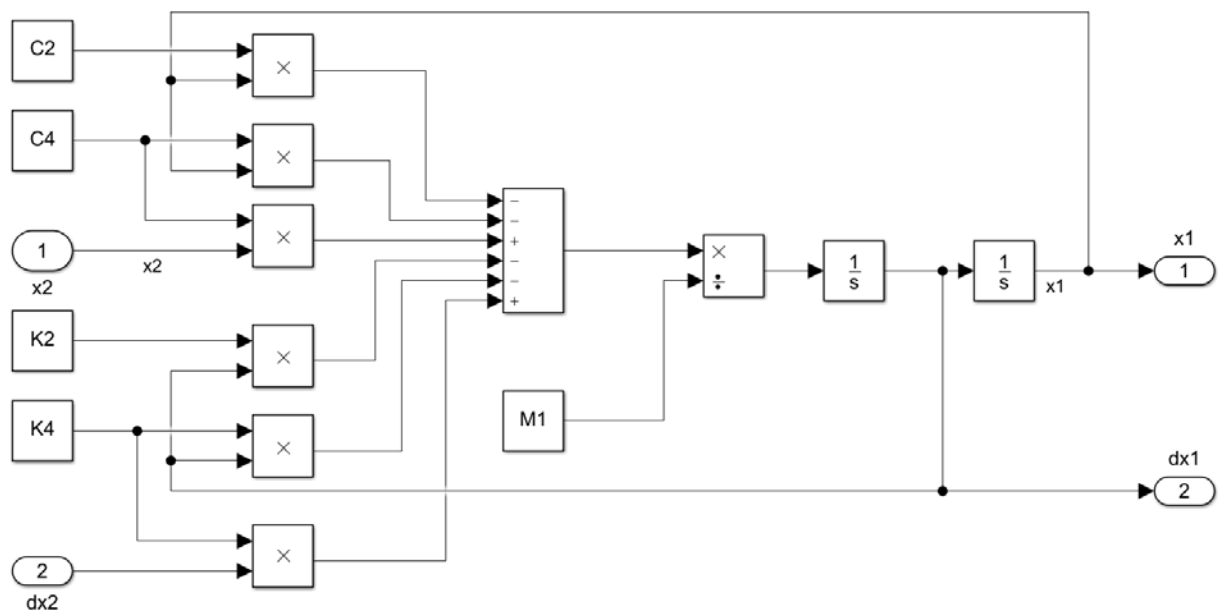


Рисунок 4.11 – Блок імітаційної моделі з визначення переміщення та швидкості шпindelьної бабки у горизонтальній площині

Силу притиску задаємо за допомогою переміщення ( $y_0$ ) у вертикальному напрямі шпindelьною бабкою, тобто сила притиску є сталою

при контакті гладкої частини інструмента з деталлю, але при проходженні паза над зоною обробки відбувається послаблення сили притиску. Отже, у зоні контакту інструмент задає переміщення відповідно до своєї геометрії (рис. 4.12.)

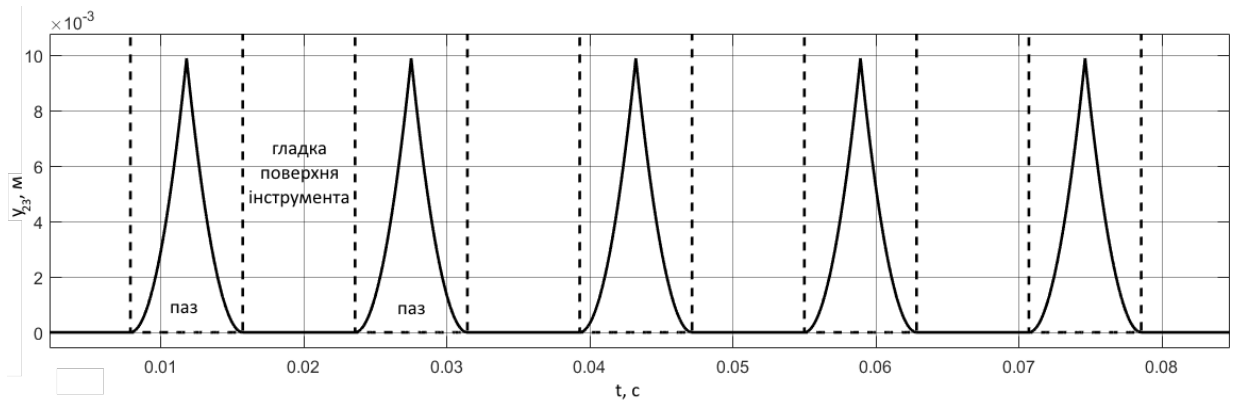


Рисунок 4.12 – Моделювання вертикальних переміщень відносно до геометрії інструмента

Чисельні розв'язки вертикальних переміщень шпиндельної бабки, інструмента та стола з деталлю представлені на рис. 4.13 та швидкості вертикальних переміщень представлені на рис. 4.14. Продовж дії першої гладкої робочої частини інструмента ( $\varphi = \pi/4$ , рад;  $t = 0,007854$ , с), стіл з деталлю, шпиндельна бабка та інструмент знаходяться у стані спокою та зміщенні відносно початкової точки, шпиндельна бабка вгору на величину  $2,6 \cdot 10^{-6}$  м, інструмент вгору на величину  $5 \cdot 10^{-6}$  м та стіл з деталлю вниз на величину  $1,2 \cdot 10^{-6}$  м. При виході з зони контакту гладкої частини відбувається розвантаження зони, так як над зоною контакти перебуває паз (відсутність контакту) і спостерігаються вільні коливання відносно нуля (три маси рухаються вертикально у протилежний напрям відносно попереднього стану, який був сформований притиском гладкої частини інструмента до деталі). У фазі близькі до ( $\varphi = \pi/2$ , рад;  $t = 0,01571$ , с) повороту інструмента проходить удар деталі з наступною гладкою поверхнею інструмента, і як наслідок того шпиндельна бабка, інструмент та стіл з деталлю переходять у



попереднє положення з вираженим перехідним процесом, який має коливальний характер.

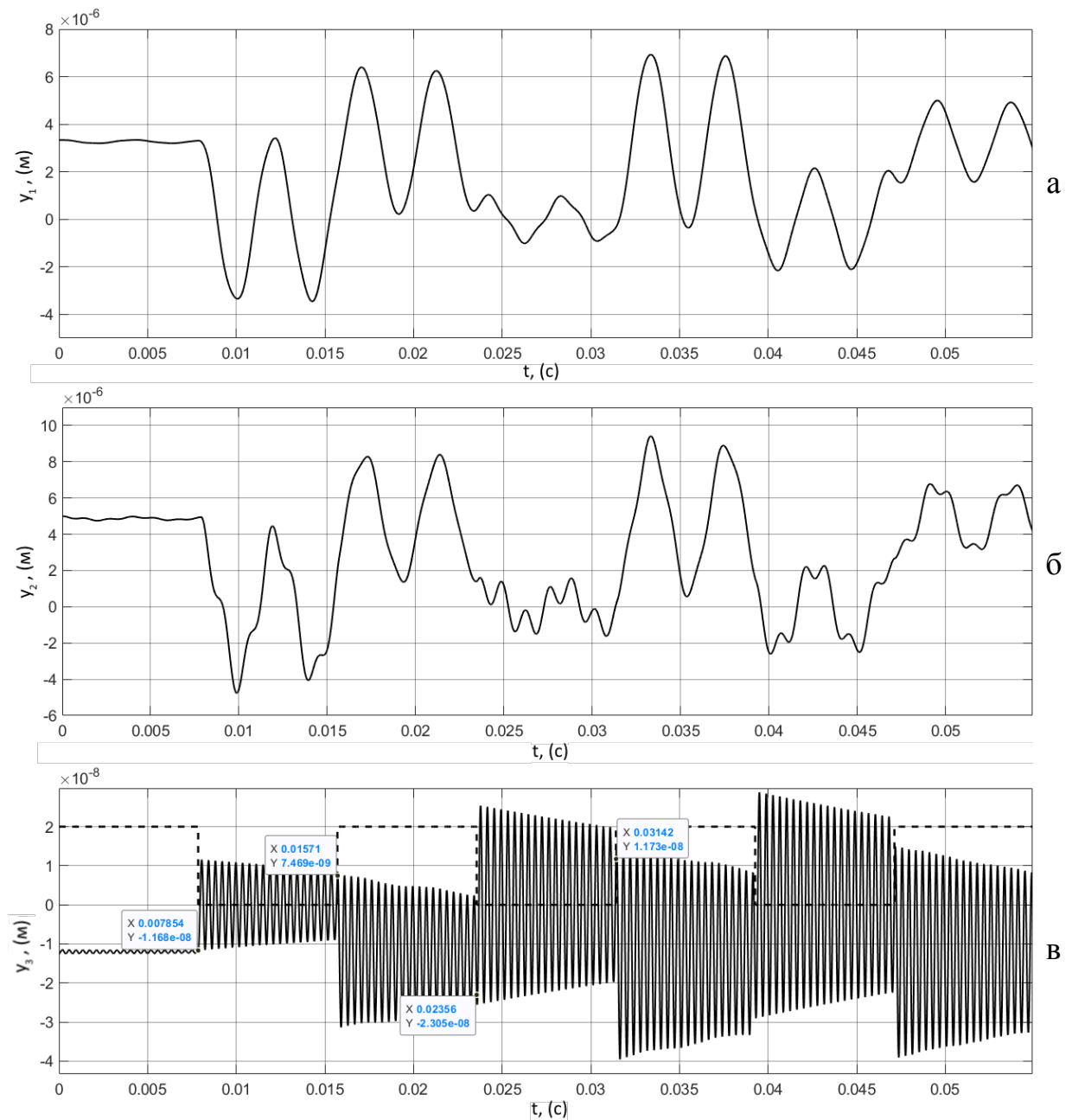


Рисунок 4.13 – Чисельні розв’язки переміщень шпindelьної бабки (а), інструмента (б) та стола (в) у вертикальній площині

Аналізуючи чисельні розв’язки переміщення шпindelьної бабки, інструмента та стола можна зробити висновок, що їх переміщення абсолютно логічні, мають усталений характер, а також дана математична модель адекватна та відповідає фізичному процесі. Відповідно до переміщень їх

пришвидшення мають реальний характер, що відповідає досліджуваному процесу (рис. 4.14). Для наглядності відображення переміщення стола у вертикальному напрямі завдяки чергуванні гладкої частини і паза, які формують збурення, на рис. 4.13 в додатково додано пунктирна лінія у масштабі відносно основного графіка («2» – гладка частина; «0» – паз).

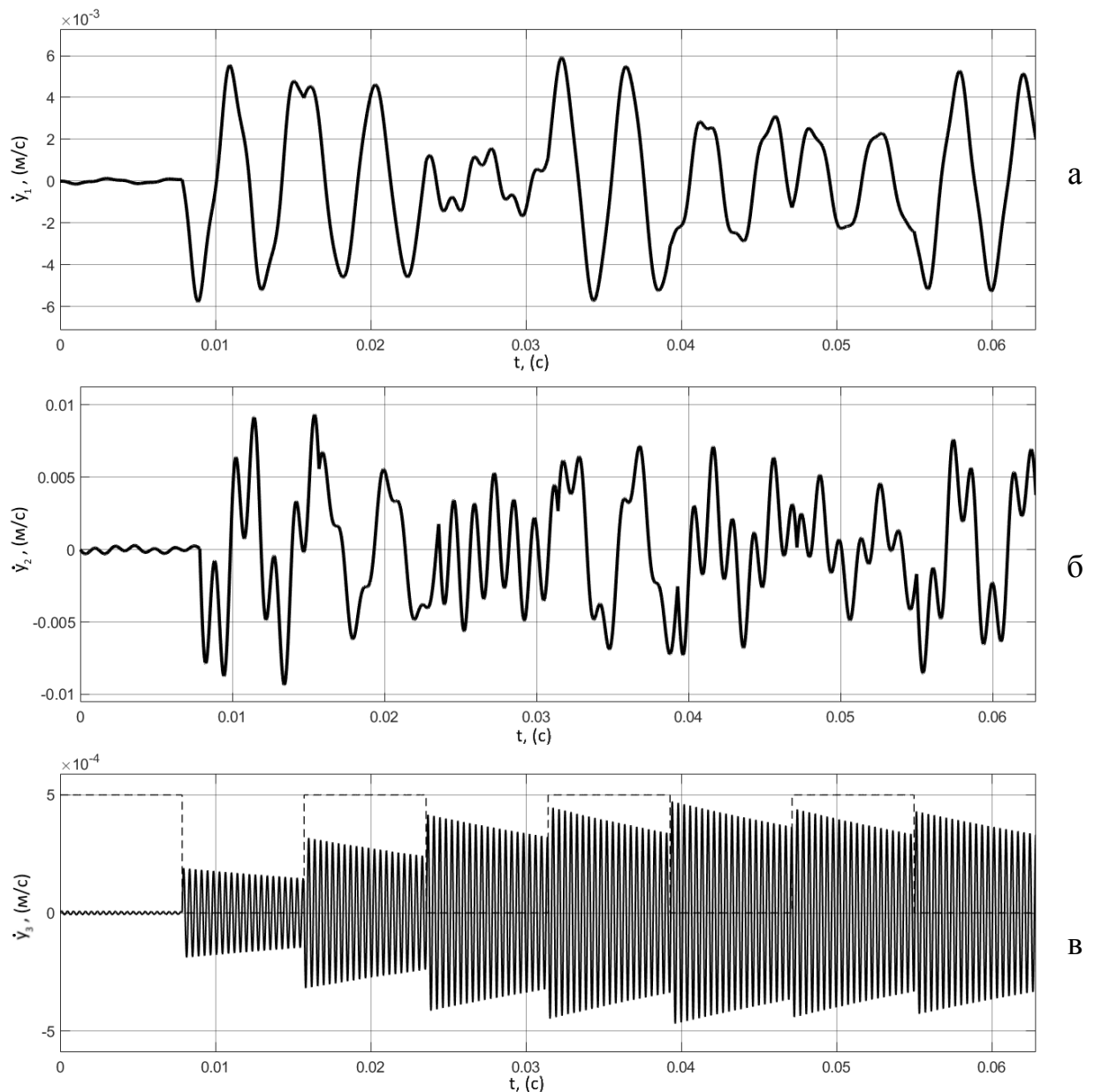


Рисунок 4.14 – Чисельні розв’язки швидкостей переміщень шпindelної бабки (а), інструмента (б) та стола (в) у вертикальній площині

Процес технологічної операції фрикційного оброблення плоских деталей за кінематикою подібний до технологічної операції плоского

шліфування і виконується на плоско-шліфувальному верстаті. Інструмент почергово входить у контакт з оброблювальною деталлю після проходження поверхні зміцнення і виходить з контакту з нею. Отже, імітацію навантаження деталі у даній моделі при входженні інструмента у контакт, силу притиску слід подати змінною, яка від нуля наростає до робочого значення. Тобто для простоти перевірки процесу задаємо наступний порядок формування сили притиску інструмента до деталі: перший етап – це холостий хід, відсутність сили притиску при оберті першого сегмента, перебування інструмента поза межами оброблювальної деталі (гладка поверхня та паз, тобто  $\pi/4$ ); другий етап – лінійне збільшення сили притиску до її заданого значення при оберті наступних трьох сегментів, входження у контакт інструмента з деталлю (від  $\pi/4$  до  $2\pi$ ); третій етап – робоча сила притиску, тобто усі решта обертання інструмента приймемо як такі, які задають постійну силу притиску рівну  $F = 500 \text{ Н}$  (рис. 4.15). А також початкові умови переміщення усіх мас у вертикальному напрямі будуть рівні нулеві, тобто права частина рівнянь (4.26) буде рівна нулеві.

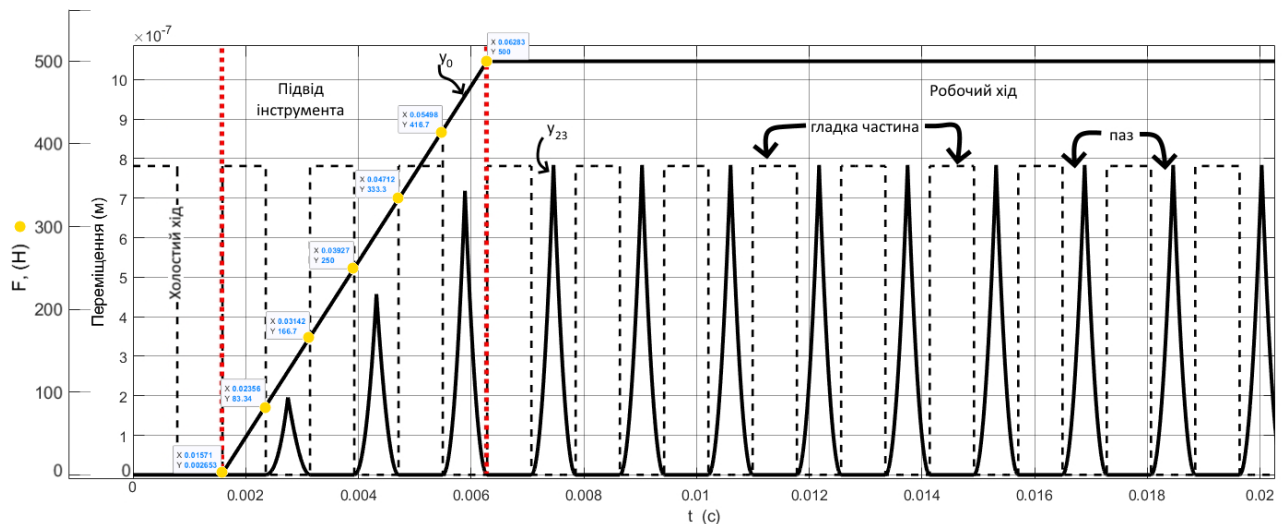


Рисунок 4.15 – Моделювання переміщення інструмента та сили притиску інструмента до деталі

Чисельні розв'язки переміщень у вертикальному напрямі представлено на рис. 4.16, та швидкості переміщень у вертикальному напрямі представлені

на рис. 4.17. Дані переміщення, після першого повного оберту за своїм характером в повній мірі відповідають переміщенням, які зображені на

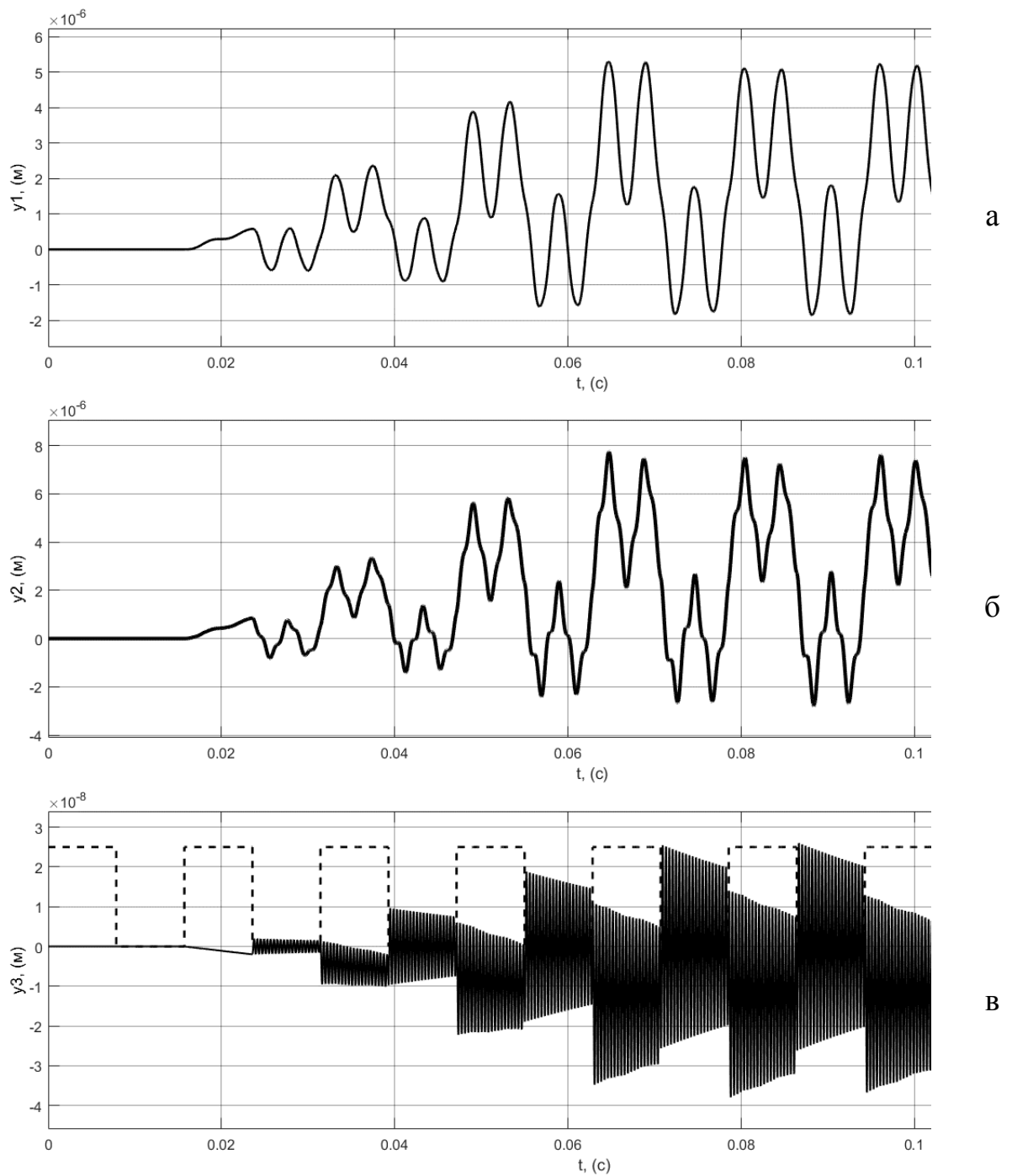


Рисунок 4.16 – Чисельні розв'язки переміщень шпиндельної бабки (а), інструмента (б) та стола (в) у вертикальній площині

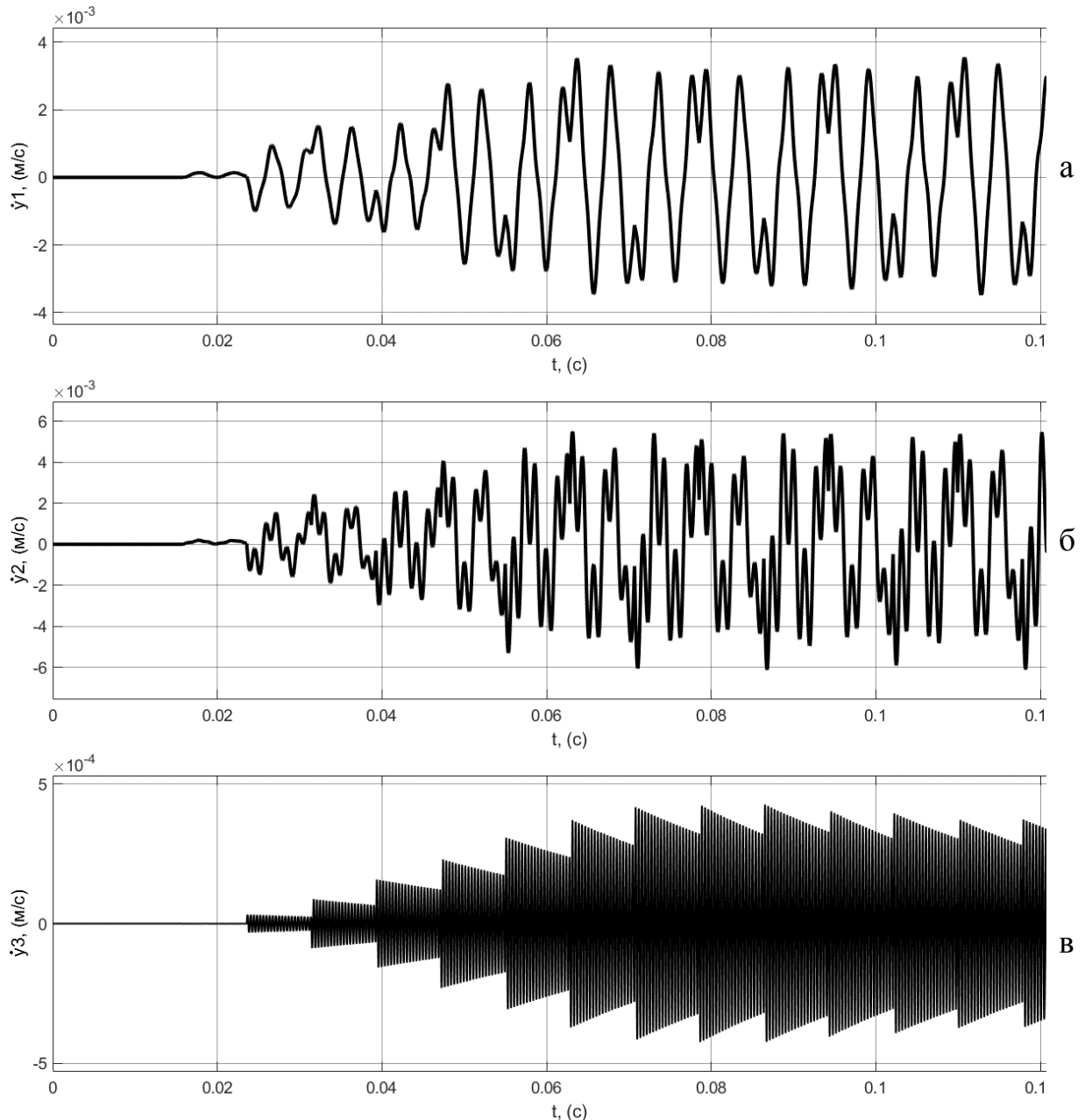


Рисунок 4.17 – Чисельні розв’язки швидкостей переміщень у вертикальній площині шпindelьної бабки (а), інструмента (б) та стола (в)

рис.4.13. Після обертання першого сегмента ( $\varphi = \pi / 2$ , рад) відбувається початок лінійного навантаження зони контакту інструмент-деталь силою від 0 до 83 Н при дії гладкої частини ( $\varphi = \pi/2 \dots 3\pi/4$ , рад) другого сегмента, наступна гладка частина ( $\varphi = \pi \dots 5\pi/4$ , рад) третього сегмента здійснює навантаження силою від 166,7...250 Н, а остання гладка частина ( $\varphi = 3\pi/2 \dots 7\pi/4$ , рад) четвертого сегмента формує навантаження силою від

416,7...500 Н (див. рис. 4.15). Після проходження гладкої частини відбувається розвантаження зони, так як над зоною контакту перебуває паз (відсутність контакту) і спостерігаються вільні коливання відносно нуля. Після повного першого оберту, коливальна система верстата отримує сталу силу притиску і процес стабілізується. Аналогічно переміщення (рис. 4.18) та швидкості переміщень (рис.4.19) у горизонтальній площині відповідають досліджуваному процесі і є адекватними.

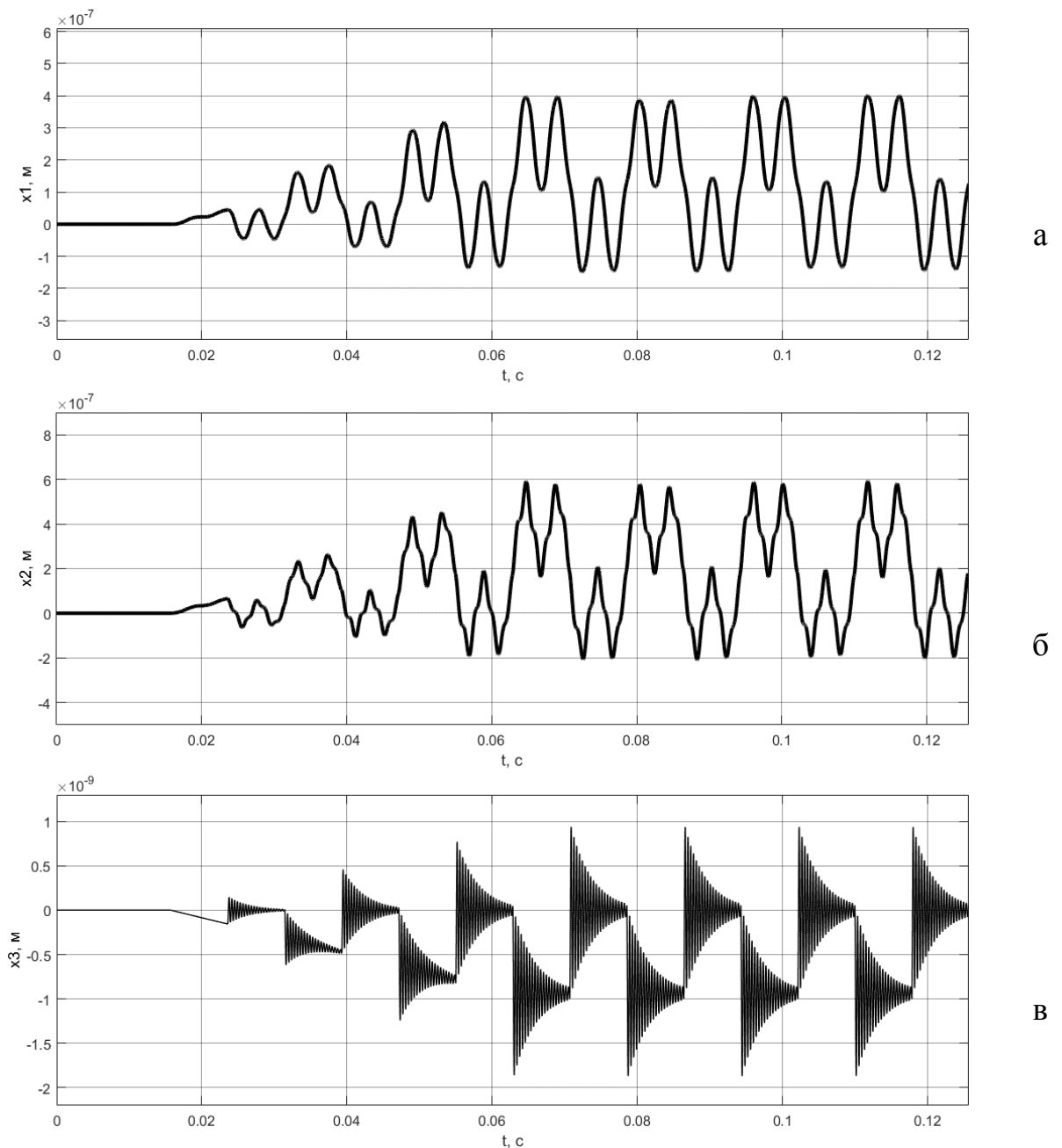


Рисунок 4.18 – Чисельні розв’язки переміщень шпindelної бабки (а), інструмента (б) та стола (в) у горизонтальній площині

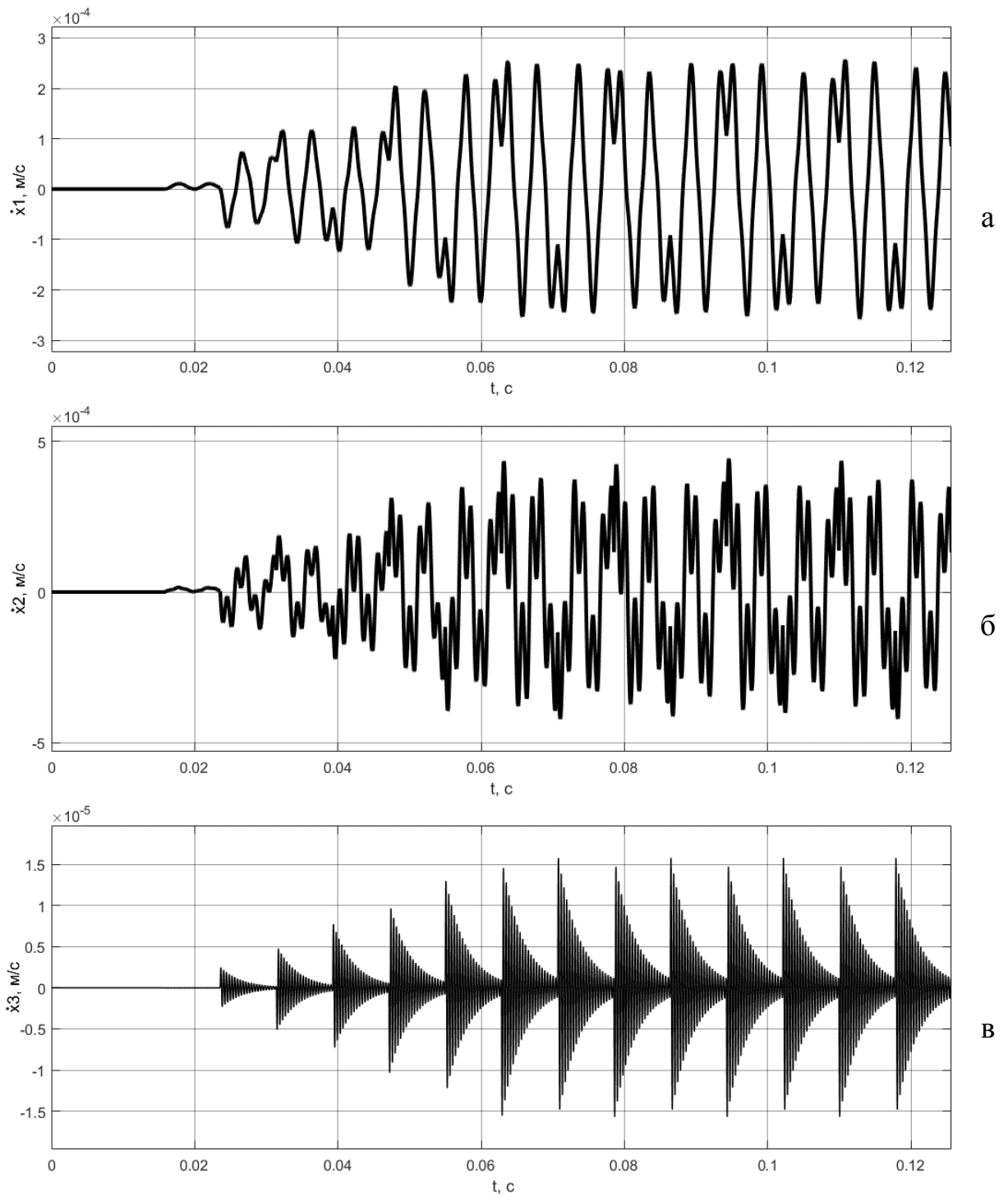


Рисунок 4.19 – Чисельні розв’язки швидкостей переміщень шпindelної бабки (а), інструмента (б) та стола (в) у горизонтальній площині

Швидкість переміщення у вертикальному напрямі стола є не високою, тому її вплив є не значний, а швидкість переміщення шпindelної бабки та інструмента є значно вищою і чим вище підніметься інструмент у процесі зіткнення з деталлю, яка закріплена на столі верстата, тим вищою буде швидкість зіткнення, та інтенсивніше проходитиме процес зсувного деформування поверхневого шару деталей машин. Також отримавши чисельні розв'язки переміщення кожної маси, можна отримати відповідні реакції даних мас відносно сили притиску, яка діє у зоні контакту.

Розроблена динамічна модель пружної системи верстата дає можливість визначити вертикальні та горизонтальні переміщення і швидкості шпindelної бабки, інструмента та деталі, а також реакції кожної маси відносно суміжної маси.

Чисельні розв'язки переміщень виконані для наступних параметрів: кількість пазів  $n = 16$ , ширина паза – 4 мм; сила притиску інструмента до деталі  $F = 500H$ ; діаметр інструмента  $D = 260$  мм; кутова частота обертання шпиделя  $\omega = 500$  рад/с. Переміщення у вертикальному напрямі  $y_1, y_2, y_3$  відповідної маси отримують усталений характер та однакову частоту після того як величина  $y_0$  буде рівна робочому переміщенні (рис. 4.20), тобто сформується повне робоче значення сили притиску (повний вхід у контакт інструмента з оброблювальною поверхнею деталі), швидкість переміщення інструмента у вертикальному напрямі представлено на рис. 4.21.

Переміщення інструмента у горизонтальному напрямі (рис. 4.22) викликане силою тертя, яка залежить від сили притиску інструмента до деталі і є змінною під час процесу оброблення. Швидкість переміщення інструмента у горизонтальному напрямі представлено на рис. 4. 23.

Важливим параметром дослідження є реакція, яка виникає у зоні контакту під час процесу оброблення і представлена на рис. 4.24.

Моделювання процесу фрикційного оброблення плоских деталей виконано при декількох ширинах паза та силах притиску (рис. 4.25 та



рис. 4.26).

З аналізу літератури, у розділі 1, відомо, що на формування нанокристалічних структури у поверхневих шарах має особливий вплив високочастотні деформації невисоких значень амплітуди. При аналізі отриманого чисельного розв'язку переміщень системи з використанням різних значень сили притиску та ширини паза можна стверджувати, що суттєвий вплив на амплітуду коливань має значення ширини паза, при збільшенні ширини пазу зростає значення різниці між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції, яка виникає у зоні оброблення між інструментом та оброблювальною деталлю, так, наприклад, при використанні інструмента з пазом в якого ширина паза рівна 4 мм, силі притиску 750 Н і кількістю пазів на периферії інструмента, яка рівна 8 шт., значення різниці між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції рівне 10 Н, а при ширині паза, яка складає 8 мм, то різниця між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції у 7,5 разів вища і складає 75 Н (рис. 4.27). Але при збільшенні кількості пазів на периферії інструмента величина різниці між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції зменшується і наприклад, при такій самі сили притиску інструмента до деталі з кількістю пазів 24 шт. і шириною паза 4 мм різниця амплітуд буде рівна 5 Н, а при ширині паза 8 мм різниця амплітуд буде мати значення 38 Н. Також слід відзначити, що величина різниці між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції є однакою при використанні однієї ширини інструмента при різних силах притиску. Тобто, якщо величина переміщення інструмента до деталі, яка формує силу притиску, є більшою за величину  $\Delta R$  (рис.4.4), то різниця між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції буде однаковою при різних силах притиску, але однакою ширині паза.

Але також дуже вагомим фактором є частота ударів інструмента з деталлю, як зазначалося раніше з аналізу літературних джерел, що для формування нанокристалічних шарів необхідно високочастотну деформацію невисоких значень амплітуди. При аналізі частоти ударів можна зробити

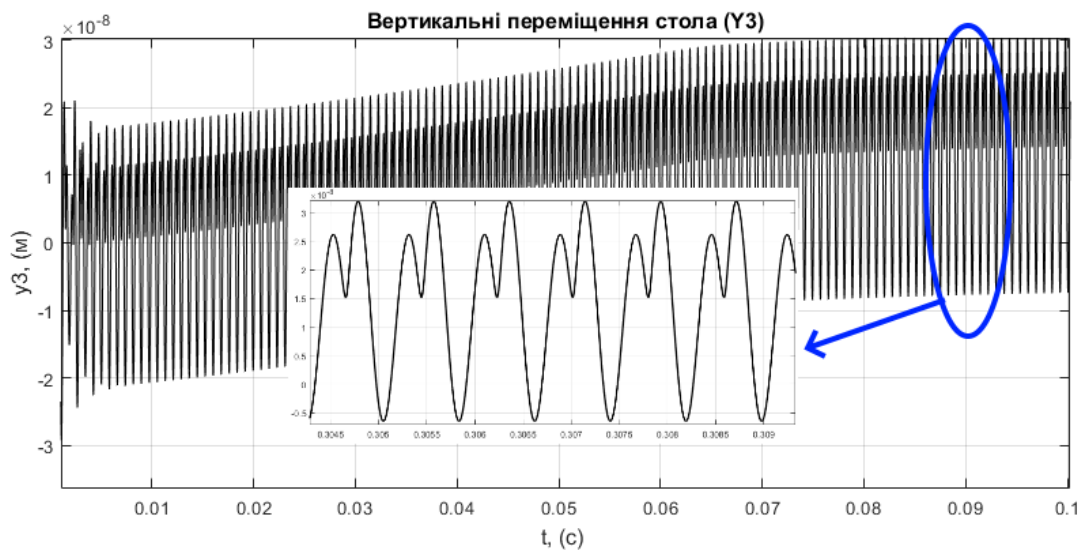
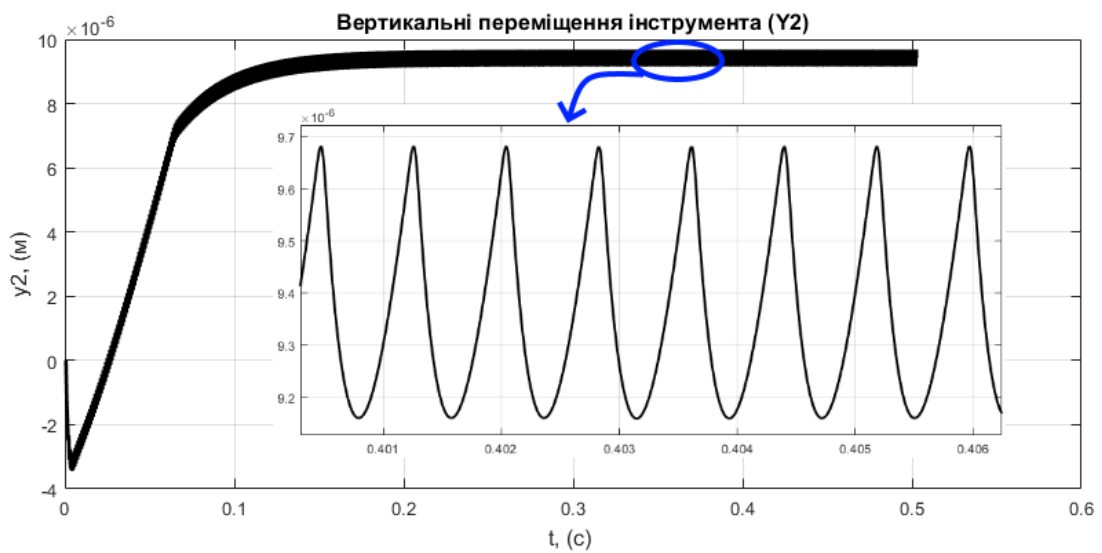
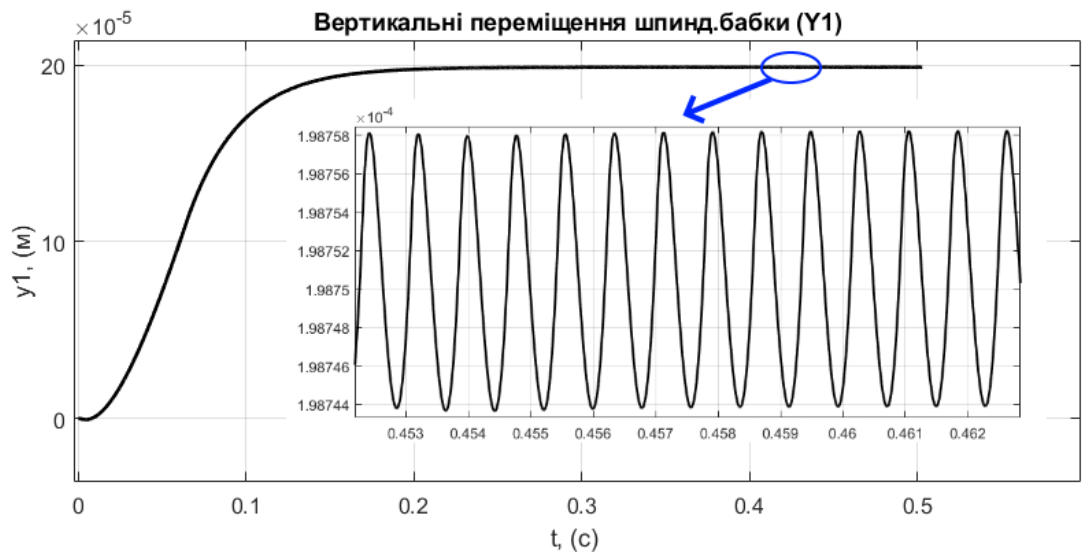


Рисунок 4.20 – Переміщення у вертикальній площині: а – шпіндельної бабки; б – шпинделя з інструментом; в – стола з деталлю

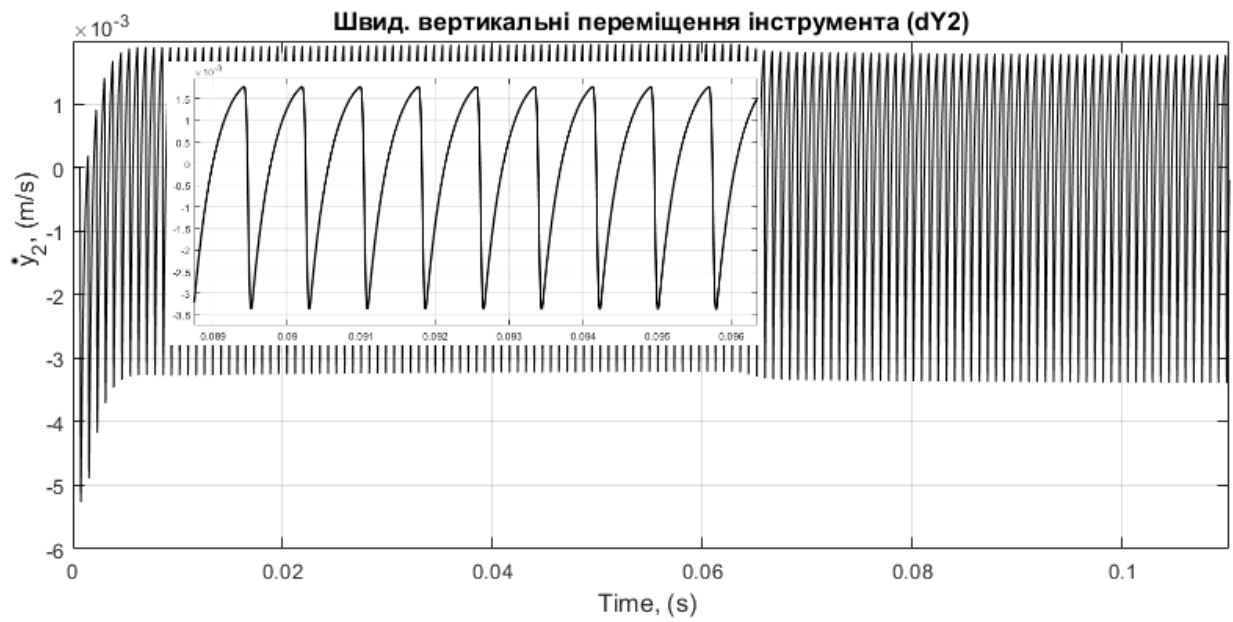


Рисунок 4.21 – Швидкість переміщень інструмента у вертикальній площині

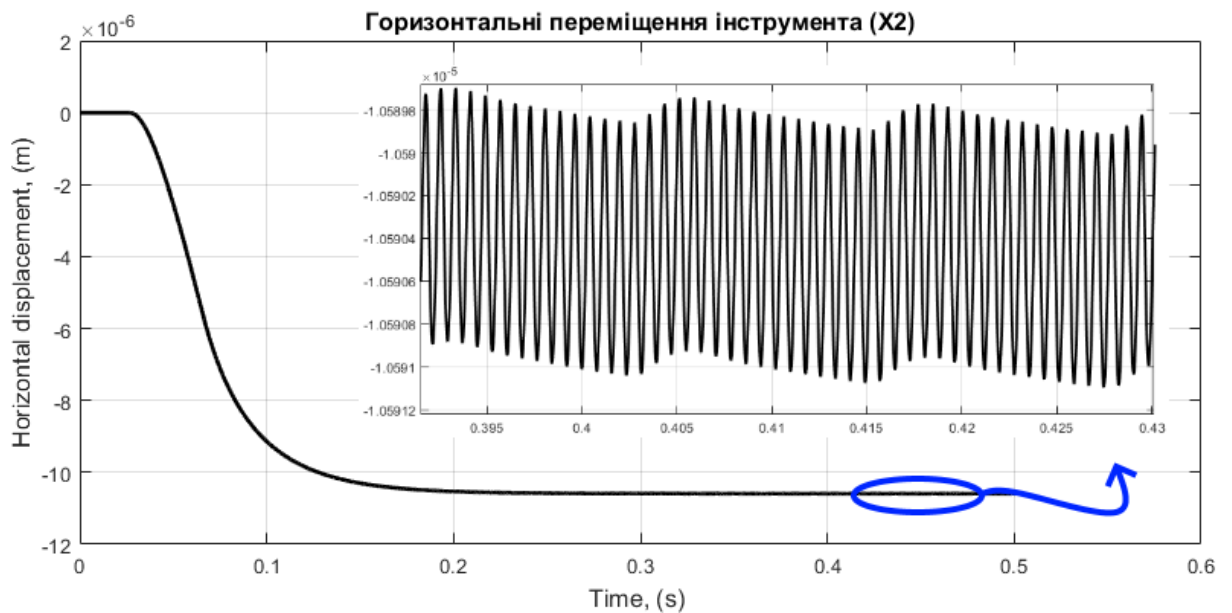


Рисунок 4.22 – Переміщення інструмента у горизонтальній площині

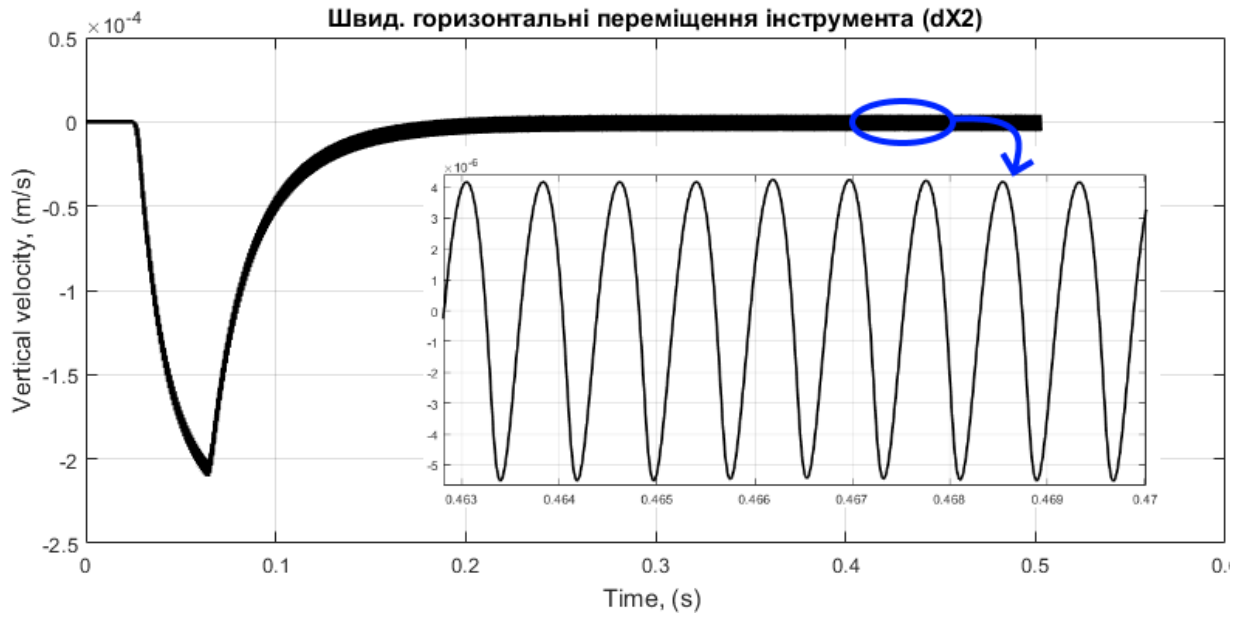


Рисунок 4.23 – Швидкість переміщення інструмента у горизонтальній площині

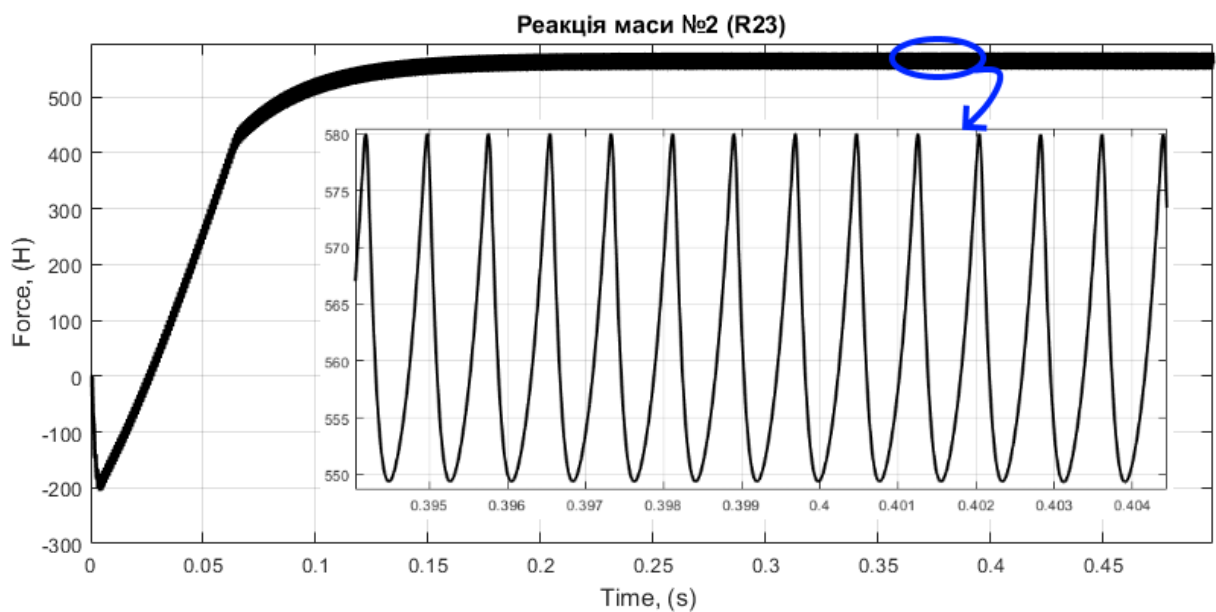


Рисунок 4.24 – Сила дії інструмента на деталь

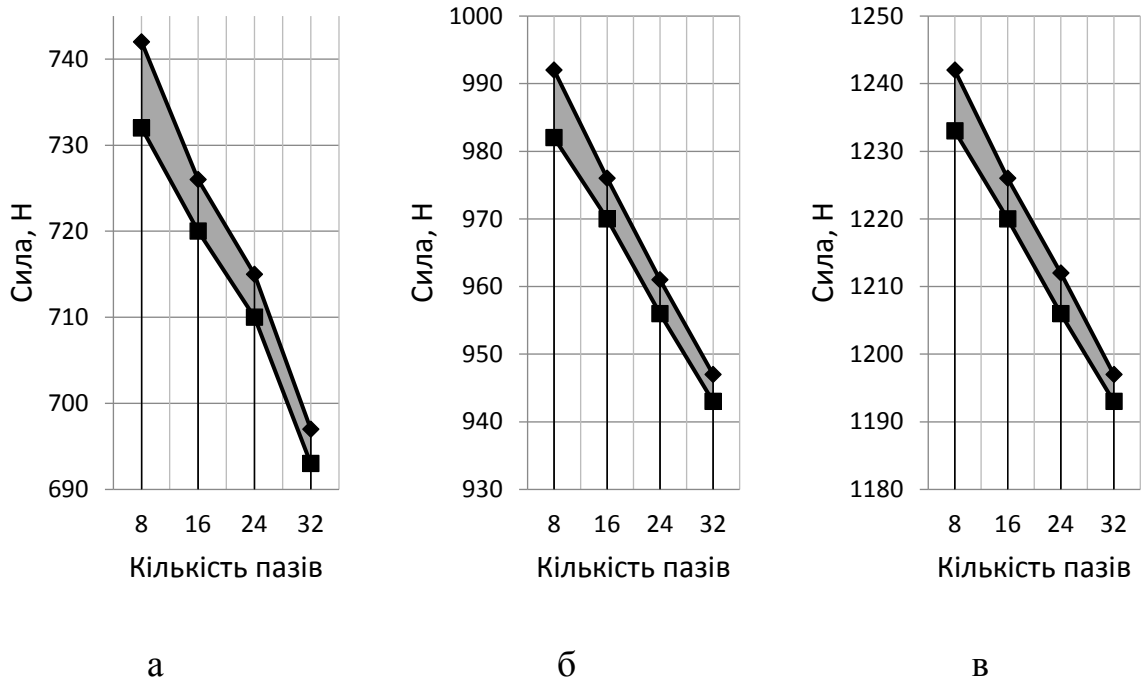


Рисунок 4.25 – Значення амплітуди сили дії інструмента на деталь у зоні контакту при ширині паза 4 мм: а – сила притиску 750 Н; б – сила притиску 1000 Н; в – сила притиску 1250 Н

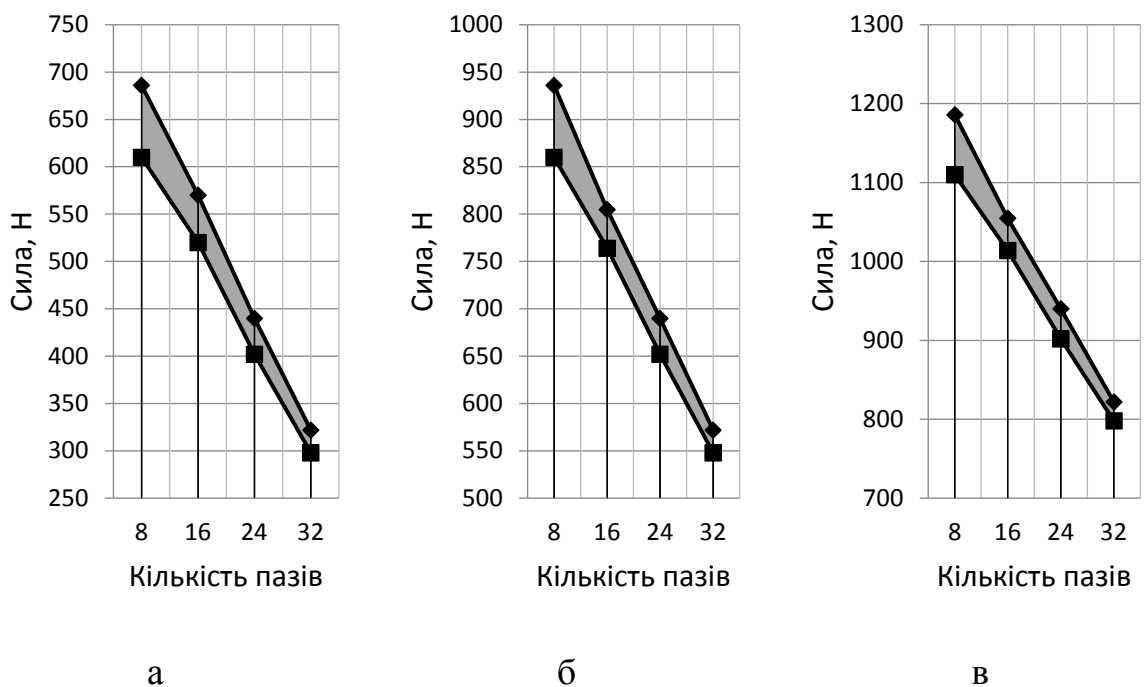


Рисунок 4.26 – Значення амплітуди сили дії інструмента на деталь у зоні контакту при ширині контакту 8 мм: а – сила притиску 750 Н; б – сила притиску 1000 Н; в – сила притиску 1250 Н

висновок, що при збільшенні кількості пазів суттєво збільшується частота ударів у зоні оброблення, так при кількості пазів 8 шт. частота ударів інструмента з деталлю рівна 750 Гц, а при кількості пазів 32 шт. частота ударів інструмента з деталлю рівна 2,5 КГц (рис. 4.28).

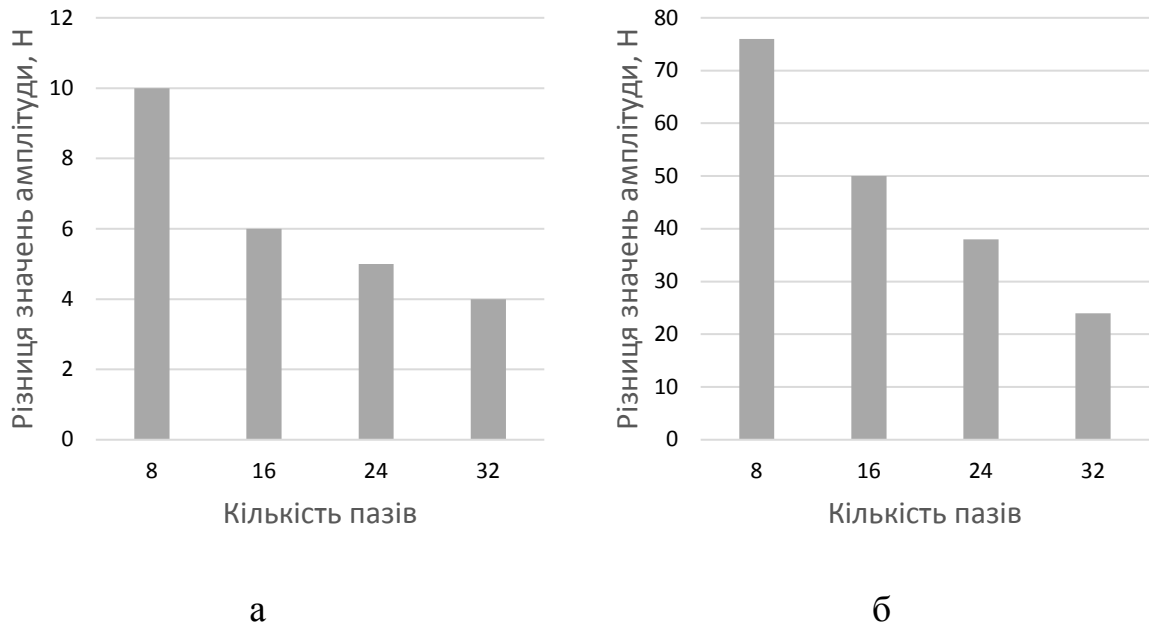


Рисунок 4.27 – Різниця між максимальними та мінімальними значеннями амплітуди реакції дії інструмента на деталь: а – ширина паза 4 мм; б – ширина паза 8 мм

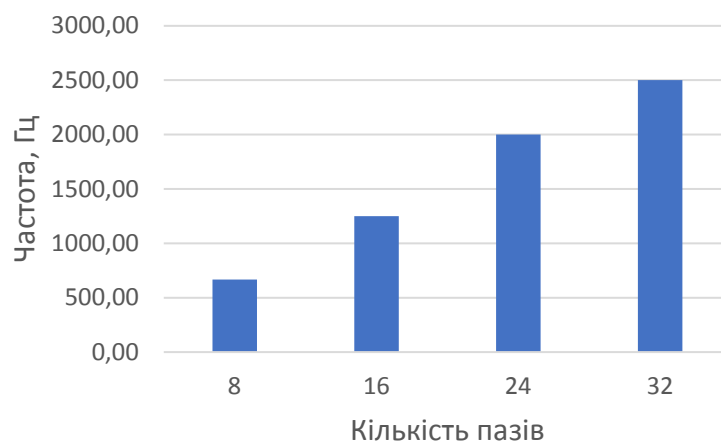


Рисунок 4.28 – Значення частоти взаємного переміщення деталі та інструмента у зоні їх контакту

### 4.3. Ампліудно-частотна характеристика процесу фрикційного зміцнення плоских деталей машин

Визначення АЧХ процесу технологічної операції фрикційного оброблення проводиться на основі раніше записаних диференціальних рівнянь (4.24), які описують пружну систему плоско-шліфувального верстата при фрикційному обробленні плоских поверхонь деталей машин інструментом з поперечними пазами на його периферії.

Як було представлено, вище даний процес оброблення є перервним, тобто для підвищення величини товщини зміцненого шару необхідно не лише збільшення температури нагрівання, яка повинна бути вищою за точки фазових перетворень у зоні контакту між деталлю та інструментом, а і збільшити зсувні деформування, які формуються за допомогою чергування гладкої частини та пазу.

Збурення пружної системи верстата відбувається за рахунок входження пазів ( $n$ ) які знаходяться на робочій поверхні інструмента і чергуються з гладкою поверхнею інструмента у контакт з оброблюваною поверхнею деталі. Розглянемо випадок, коли відношенням гладкої поверхні інструмента до паза рівне один до одного. Приймаємо, що збурення коливальної системи буде відбуватися за законом [265, 287]:

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t) \quad (4.28)$$

де  $\omega$  – колова швидкість інструмента, на якому знаходяться пази ( $n$ )

Тому збурення коливальної системи буде мати наступний вигляд:

$$\omega = \omega_{\text{ін}} \cdot n. \quad (4.29)$$

Для дослідження впливу кількості пазів на робочій частині інструмента на динамічні характеристики процесу фрикційного оброблення проведемо аналіз системи з допомогою частотних характеристик. Тому, силу збурення подаємо як  $\overline{F_0}e^{i\omega t}$ , а результат шукатимемо у вигляді  $\overline{X_1}e^{i\omega t}$ ,  $\overline{X_2}e^{i\omega t}$ ,  $\overline{X_3}e^{i\omega t}$ ,

$\bar{Y}_1 e^{i\omega t}$ ,  $\bar{Y}_2 e^{i\omega t}$  та  $\bar{Y}_3 e^{i\omega t}$ , де  $i = \sqrt{-1}$  – комплексна одиниця;  $\bar{F}_0$  – амплітуда комплексної змінної сили збурення;  $\bar{X}_1$ ,  $\bar{X}_2$ ,  $\bar{X}_3$ ,  $\bar{Y}_1$ ,  $\bar{Y}_2$  та  $\bar{Y}_3$  – комплексні амплітуди.

Підставивши комплексні величини в систему (4.24) та поділивши ліві та праві частини отриманих рівнянь на  $e^{i\omega t}$  отримаємо систему:

- у горизонтальній площині:

$$\begin{aligned} -m_1 \bar{X}_1 \omega^2 + c_2 \bar{X}_1 + c_4 (\bar{X}_1 - \bar{X}_2) + i\omega \mu_2 \bar{X}_1 + i\omega \mu_4 (\bar{X}_1 - \bar{X}_2) &= 0, \\ -m_2 \bar{X}_2 \omega^2 + c_4 (\bar{X}_2 - \bar{X}_1) + i\omega \mu_4 (\bar{X}_2 - \bar{X}_1) - F \cdot f &= 0, \\ -m_3 \bar{X}_3 \omega^2 + c_6 \bar{X}_3 + i\omega \mu_6 \bar{X}_3 + F \cdot f &= 0. \end{aligned} \quad (4.30)$$

- у вертикальній площині:

$$\begin{aligned} m_1 \bar{Y}_1 \omega^2 + c_1 (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_0) + c_3 (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) + i\omega \mu_1 \bar{Y}_1 + i\omega \mu_3 (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) &= 0, \\ m_2 \bar{Y}_2 \omega^2 + c_3 (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1) + c_7 (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_3) + i\omega \mu_3 (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1) + \\ + i\omega \mu_7 (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_3) &= F, \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$m_3 \bar{Y}_3 \omega^2 + c_7 (\bar{Y}_3 - \bar{Y}_2) + c_5 \bar{Y}_3 + i\omega \mu_7 (\bar{Y}_3 - \bar{Y}_2) + i\omega \mu_5 \bar{Y}_3 = -F.$$

Використавши математичний пакету *Mathcad* здійснюємо символний розв'язок систем рівнянь (4.30) та (4.31) та знаходимо модулі комплексних амплітуд  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $Y_1$ ,  $Y_2$ , та  $Y_3$ . Так, як досить громіздкий вигляд рівнянь модулів комплексних амплітуд у роботі їх не подається. На основі аналізу отриманої АЧХ пружної системи, представленої на рис. 4.29, отримуємо значення частот збурення при яких виникає резонанс у системі. Отож, резонанс шпindelної бабки можливий при  $\omega_1 = 3050 \text{ c}^{-1}$ , інструмента –  $\omega_2 = 3150 \text{ c}^{-1}$ , а стола при  $\omega_3 = 3650 \text{ c}^{-1}$ . Розрахунки частот ударних навантажень проведено для інструмента у якого на робочій поверхні є один паз (таким чином можна отримати співвідношення кутової швидкості



обертання інструмента до кількості пазів при яких виникає явище резонансу).

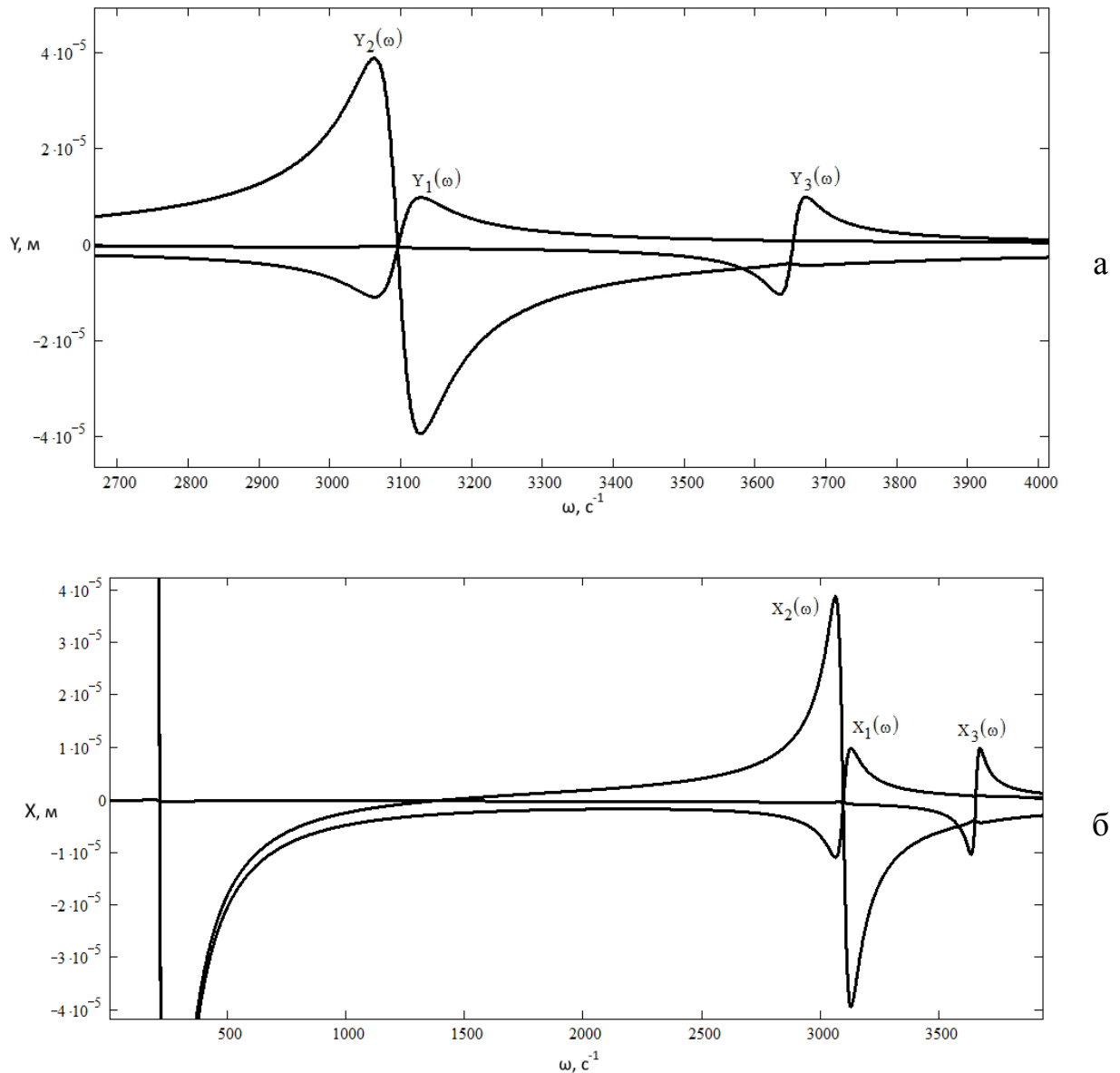


Рисунок 4.29 – Графік амплітудно частотної характеристики обладнання:

а – вертикальна площина; б – горизонтальна площина

Для відображення небезпечних частот обертання інструмента та кількості пазів на робочій частині інструмента при яких може виникнути явище резонансу, побудована графічна залежність виникнення резонансу від кількості пазів (рис. 4.30).

З отриманої залежності випливає, що при збільшенні кількості пазів на робочій поверхні інструмента явище резонансу можливе при дуже малих

лінійних швидкостях на його периферії. Мінімальна швидкість під час якої проходить процес фрикційного зміцнення складає 60 м/с. При такій швидкості резонанс можливий, якщо на робочій поверхні інструмента буде 8-11 пазів. Тому для нормальної роботи інструмента необхідно, щоб на робочій частині інструмента було не менше 12 пазів. Інструмент буде працювати при нормальних умовах коливань на частотах які є зміщені вправо від резонансу системи.

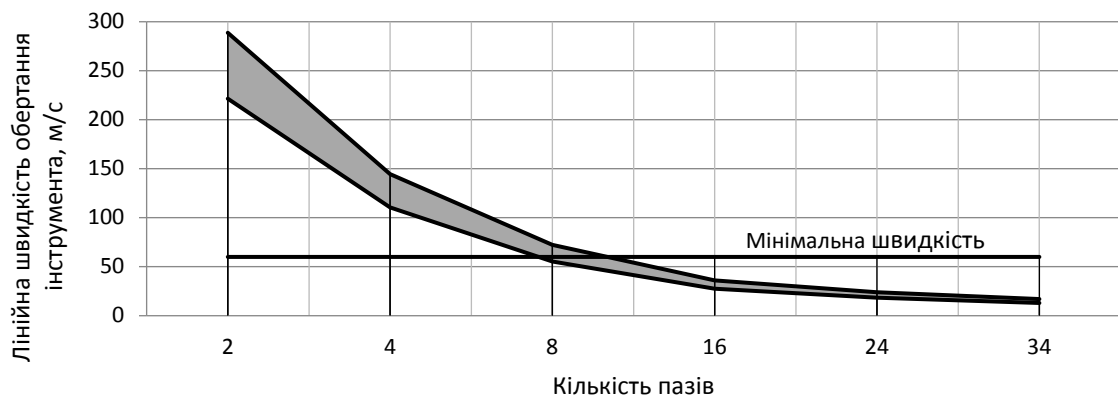


Рисунок 4.30 – Залежність лінійної швидкості обертання інструмента від кількості пазів при яких можливе явище резонансу

Для дослідження стійкості пружної системи верстата була побудована АФЧХ розімкнутої системи. Отримана АФЧХ не охоплює точку з координатами  $(-1; i0)$ , тобто замкнена система стійка (рис. 4.31).

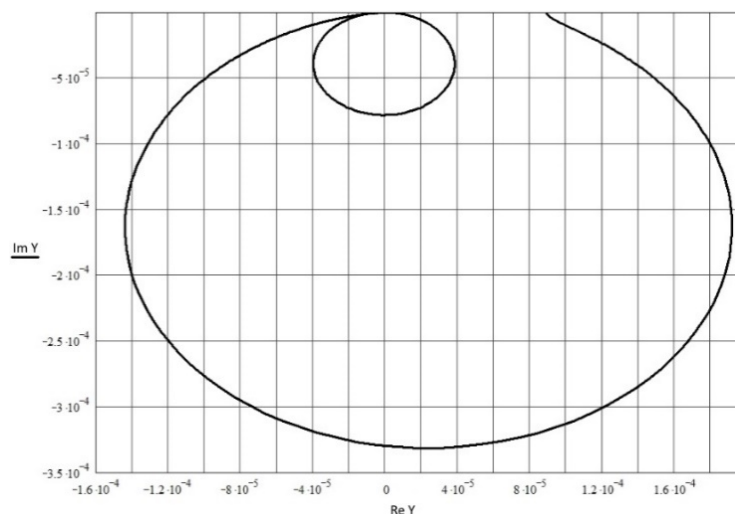


Рис. 4.31 – АФЧХ частотна характеристика розімкнутої системи

#### 4.4. Математична модель динамічних процесів під час фрикційного зміцнення круглих поверхонь деталей машин

Для дослідження динамічних процесів, які проходять під час технологічної операції фрикційного оброблення круглих поверхонь розробляємо розрахункову схему пружної системи верстата, яка представляє собою багатомасову модель (рис .4.32). Для цього верстат розбивається на ряд вузлів, кожен з яких представляє собою окрему масу. Крім цього визначається деталь або вузол, який приймається як деталь з умовно безмежною масою до якої «прив'язуються» уся решта кількість маси. Як деталь з умовно безмежною масою прийнята станина верстата до якої «прив'язані» усі решта маси. Розрахункова схема пружної системи верстата є тримасовою моделлю. Взаємозв'язок між окремими масами описуються пружними і демпфуючими зв'язками. Ударні навантаження, які виникають між оброблюваною поверхнею деталі та робочою поверхнею інструмента (горизонтальні) змодельовані за допомогою контактної жорсткості ( $c_7$ ) та демпфування енергії ( $\mu_7$ ) локального пружно-пластичного деформування поверхні деталі [261 – 265, 288].

Позначення які використовуються у дані моделі:  $\omega_2$  і  $\omega_3$  – кутова швидкість обертання інструмента та деталі, відповідно (рад/с);  $x_1, y_1$  – горизонтальні та вертикальні переміщення спеціального пристрою (м);  $x_2, y_2$  – горизонтальні та вертикальні переміщення інструмента (м);  $x_3, y_3$  – горизонтальні та вертикальні переміщення стола верстата (м);  $m_1$  – маса спеціального пристрою (кг);  $m_2$  – маса інструмента (диска) (кг);  $m_3$  – маса оброблювальної деталі (кг);  $c_1$  і  $c_2$  – жорсткість супорта верстата у горизонтальній і вертикальній площині, відповідно (Н/м);  $c_3$  і  $c_4$  – жорсткість спеціального пристрою у горизонтальній і вертикальній площині, відповідно (Н/м);  $c_5$  і  $c_6$  – жорсткість шпинделя верстата у горизонтальній і вертикальній площині, відповідно (Н/м);  $c_7$  – контактна жорсткість між оброблювальною деталлю та інструментом (Н/м);  $\mu_1$  і  $\mu_2$  – коефіцієнт демпфування супорта

верстата у горизонтальній і вертикальній площині, відповідно (Нс/м);  $\mu_3$  і  $\mu_4$  – коефіцієнт демпфування спеціального пристрою у горизонтальній і вертикальній площині, відповідно (Нс/м);  $\mu_5$  і  $\mu_6$  – коефіцієнт демпфування шпинделя верстата у горизонтальній і вертикальній площині, відповідно (Нс/м);  $\mu_7$  – коефіцієнт демпфування між інструментом і деталлю (внутрішнє затухання) (Нс/м);  $F_T$  – сила тертя між деталлю та інструментом (Н) [271–278].

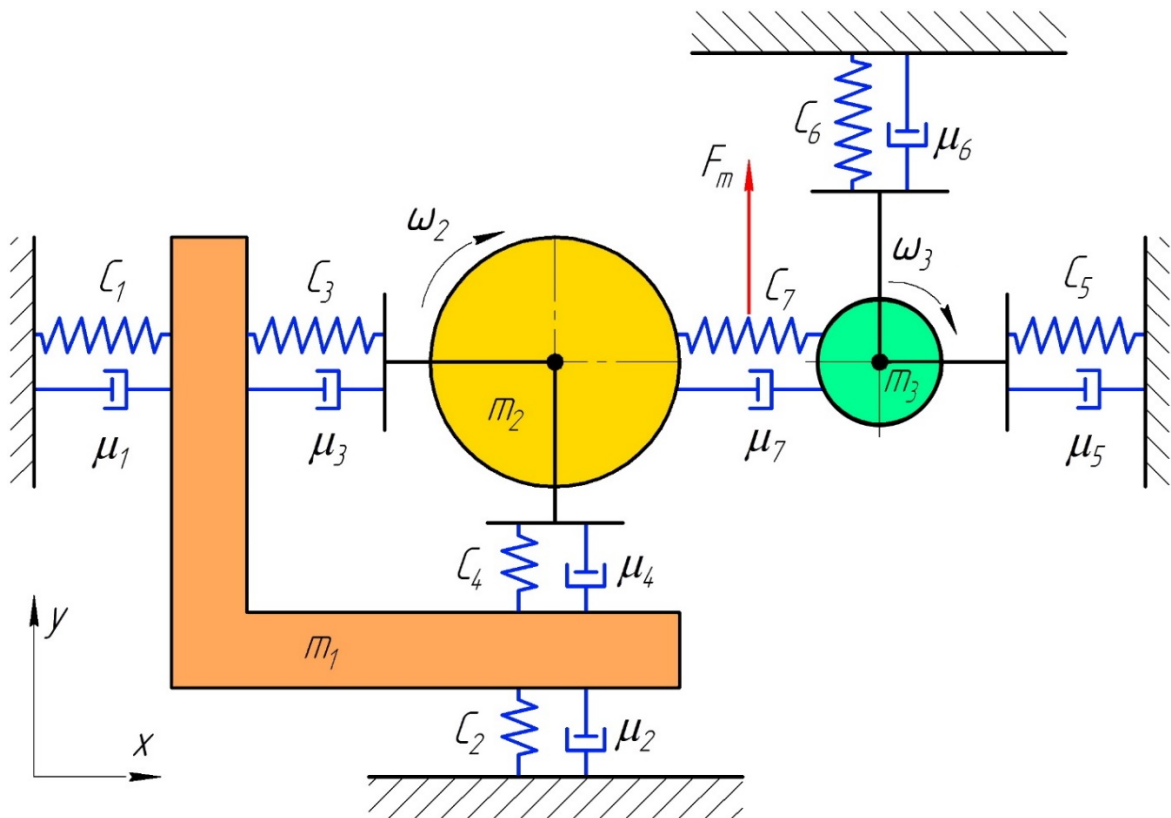


Рисунок 4.32 – Розрахункова схема токарного верстата

Для механічної системи токарного верстата можна виділити шість узагальнених координат, які характеризують можливі рухи пристрою, інструмента та деталі у горизонтальній і вертикальній площинах. Як узагальнені координати прийнято відповідні лінійні переміщення пристрою, інструмента та деталі, а також обертання інструмента та деталі (рис. 4.33).

Узагальнені координати  $q_{i,j}$  в нашому випадку будуть (де  $i = 1, 2, 3$  – номер маси,  $j = 1, 2$  – номер координати):

- для пристрою масою  $m_1$ :  $q_{11} = x_1$ ;  $q_{12} = y_1$ .

- для інструмента масою  $m_2$ :  $q_{21} = x_2$ ;  $q_{22} = y_2$ .

- для деталі (заготовка) масою  $m_3$ :  $q_{31} = x_3$ ;  $q_{32} = y_3$ .

Диференціальні рівняння, які описують рух системи, побудовані на основі рівнянь Лагранжа другого роду, мають вигляд відповідно до рівняння (4.1). Також при формуванні математичної моделі приймемо такі самі припущення як і при попередні математичні моделі [275–278].

Тоді узагальнена сила, яка визначається відношенням віртуальних робіт сил  $\sum \delta A(F_k)$ , що діють на кожний елемент до приросту певної узагальненої координати  $\delta q_{i,j}$  для відповідних мас будуть мати вигляд:

$$Q_{i,j} = \frac{\delta A_{i,j}}{\delta q_{i,j}} \quad (4.32)$$

Тоді, для спеціального пристрою узагальнена сила буде мати вигляд:

$$Q_{x_1} = \frac{N \cdot \delta x_1}{\delta x_1} = N; \quad Q_{y_1} = 0. \quad (4.33)$$

Для інструмента:

$$Q_{x_2} = \frac{N \cdot \delta x_2}{\delta x_2} = N; \quad Q_{y_2} = f \frac{(N - N_{23}) \cdot \delta y_2}{\delta y_2} = f(N - N_{23}). \quad (4.34)$$

Для деталі:

$$Q_{x_3} = \frac{N \cdot \delta x_3}{\delta x_3} = N; \quad Q_{y_3} = f \frac{(N - N_{23}) \cdot \delta y_3}{\delta y_3} = f(N - N_{23}). \quad (4.35)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя між інструментом і деталлю;

$N$  – сила нормального притиску інструмента до деталі, яка формується через переміщення  $x_0$  супорта у напрямку деталі (поперечна подача на токарному верстаті), тобто:

$$N = c_x^* \cdot (x_0 - \Delta x), \quad (4.36)$$

де  $x_0$  – переміщення супорта у напрямі до деталі, коли гладка поверхня інструмента контактує з оброблювальною поверхнею деталі, тобто за допомогою даного переміщення формується взаємна сили притиску;

$\Delta x$  – величина, яка зменшує взаємне переміщення інструмента до деталі через не перебування двох їх центрів обертання на одній площині, і формується при взаємному вертикальному переміщенні (рис. 4.32);

$c_x^*$  – приведена жорсткість системи у горизонтальному напрямі:

$$\frac{1}{c_x^*} = \frac{1}{c_1 + c_3} + \frac{1}{c_5 + c_7}. \quad (4.37)$$

Якщо деталь та інструмент при обробленні отримують взаємне вертикальне переміщення, тоді  $a_w \leq R_2 + R_3$ , а значення  $\Delta x$  розраховуємо за наступним відношенням:

$$\Delta x = (R_2 + R_3) - \sqrt{(R_2 + R_3)^2 - \Delta y^2}. \quad (4.38)$$

$$\Delta y = y_3 - y_2$$

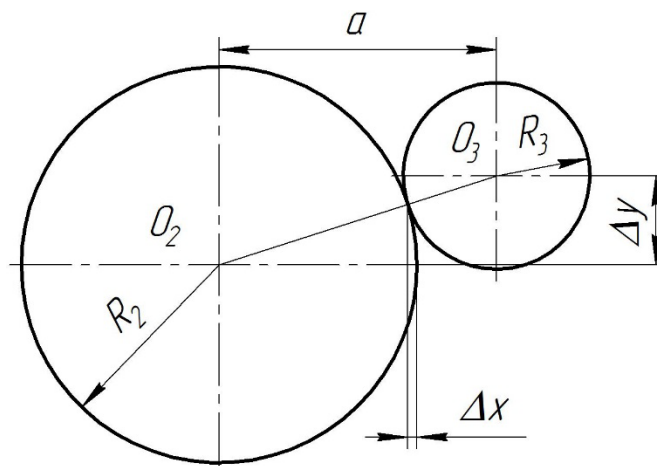


Рисунок 4.33 – Можливе формування величини  $\Delta y$  через взаємне вертикальне переміщення тіл

Формування сили притиску, як вже описувалося вище, відбувається через переміщення супорта у напрямі до оброблювальної деталі за рахунок передачі гвинт-гайка на величину  $x_0$ , яку приймаємо постійною під час

оброблення (глибина різання при точінні на токарному верстаті). Завдяки геометрії інструмента (чергуванні гладкої поверхні з пазом) відбувається зменшення сили притиску між інструментом та деталлю на величину переміщення  $x_{23}$ .

$$x_{23} = \begin{cases} 0 & \text{при } \omega t = (0 \dots \varphi_{\text{гл.}}) + \frac{2\pi}{n} \cdot m \\ R - R \cdot \cos \omega t & \text{при } \omega t = \left( \varphi_{\text{гл.}} \dots \frac{\varphi_{\text{паз.}}}{2} \right) + \frac{2\pi}{n} \cdot m \\ (R - R \cdot \cos \omega t) - \left( R - R \cdot \cos \left( \frac{\varphi_{\text{сер.}} - \varphi_{\text{гл.}}}{2} \right) \right) & \\ \text{при } \omega t = \left( \frac{\varphi_{\text{паз.}}}{2} \dots \varphi_{\text{гл.}} \right) + \frac{2\pi}{n} \cdot m & \end{cases} \quad (4.39)$$

$$m = 0, 1, 2 \dots n - 1$$

Нормальна сила змінюється залежно від перебування у контакті гладкої поверхні інструмента чи паза на периферії інструмента з оброблювальною поверхнею, тоді аналітичні залежності відповідних узагальнених сил  $Q_{i,j}$  матимуть вигляд:

$$\begin{aligned} Q_{y_1} &= 0; & Q_{y_2} &= F_T = f(N - N_{23}); \\ Q_{x_1} &= N; & Q_{x_1} &= N_{23}; \\ |Q_{x_2}| &= |-Q_{x_3}|; \\ |Q_{y_2}| &= |-Q_{y_3}|. \end{aligned} \quad (4.40)$$

де,  $N_{23}$  – сила, що зменшує силу нормального притиску інструмента до деталі, яка формується через переміщення  $x_{23}$  інструмента через відповідну геометрію його периферії:

$$N_{23} = c_x^* \cdot x_{23}, \quad (4.41)$$

Кінетичну енергію системи визначатимемо як суму доданків, які враховують прямолінійний рух спеціального пристрою, інструмента та деталі у вертикальній і горизонтальній площинах, а також обертальний рух інструмента та деталі:

$$T = \frac{m_1(\dot{x}_1 + \dot{y}_1)^2}{2} + \frac{m_2(\dot{x}_2 + \dot{y}_2)^2}{2} + \frac{m_3(\dot{x}_3 + \dot{y}_3)^2}{2}. \quad (4.42)$$

Знайдемо відповідні похідні від виразу кінетичної енергії, які входять у ліві частини рівнянь Лагранжа 2-го роду:

- для спеціального пристрою:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{11}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} = m_1 \dot{x}_1; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{12}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} = m_1 \dot{y}_1; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_1} \right) = m_1 \ddot{x}_1; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} \right) = m_1 \ddot{y}_1; \end{aligned} \quad (4.43)$$

- для інструмента:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{21}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} = m_2 \dot{x}_2; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{22}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_2} = m_2 \dot{y}_2; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_2} \right) = m_2 \ddot{x}_2; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_2} \right) = m_2 \ddot{y}_2; \end{aligned} \quad (4.44)$$

- для деталі:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{31}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3} = m_3 \dot{x}_3; \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{32}} = \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_3} = m_3 \dot{y}_3; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_3} \right) = m_3 \ddot{x}_3; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_3} \right) = m_3 \ddot{y}_3; \\ \frac{\partial T}{\partial x_i} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y_i} = 0. \end{aligned} \quad (4.45)$$

Потенціальна енергія в системі накопичується у відповідних пружних елементах. Для її знаходження використаємо наступну залежність:

$$\begin{aligned} \Pi = \frac{c_1 \cdot x_1^2}{2} + \frac{c_3(x_1 - x_2)^2}{2} + \frac{c_7(x_2 - x_3)^2}{2} + \frac{c_5 \cdot x_3^2}{2} + \frac{c_2 \cdot y_1^2}{2} \\ + \frac{c_4(y_1 - y_2)^2}{2} + F_t(y_2 - y_3) + \frac{c_6 \cdot y_3^2}{2}. \end{aligned} \quad (4.46)$$

Знайдемо відповідні похідні від виразу потенціальної енергії, які



входять у ліві частини рівнянь Лагранжа 2-го роду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Pi}{\partial x_1} &= c_1 x_1 + c_3 x_1 - c_3 x_2; & \frac{\partial \Pi}{\partial y_1} &= c_2 y_1 + c_4 y_1 - c_4 y_2; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial x_2} &= -c_3 x_1 + c_3 x_2 + c_7 x_2 - c_7 x_3; & \frac{\partial \Pi}{\partial y_2} &= -c_4 y_1 + c_4 y_2; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial x_3} &= -c_7 x_2 + c_7 x_3 + c_5 x_3; & \frac{\partial \Pi}{\partial y_3} &= c_6 y_3. \end{aligned} \quad (4.47)$$

Дисипативну функцію  $\Phi$  для системи, вважаючи, що розсіювання енергії прямо пропорційне швидкості, розраховуємо за таким виразом:

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{\mu_1 \cdot \dot{x}_1^2}{2} + \frac{\mu_3 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2)^2}{2} + \frac{\mu_7 (\dot{x}_2 - \dot{x}_3)^2}{2} + \frac{\mu_5 \cdot \dot{x}_3^2}{2} + \frac{\mu_2 \cdot \dot{y}_1^2}{2} \\ &\quad + \frac{\mu_4 (\dot{y}_1 - \dot{y}_2)^2}{2} + \frac{\mu_6 \cdot \dot{y}_3^2}{2}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} &= \mu_1 \dot{x}_1 + \mu_3 \dot{x}_1 - \mu_3 \dot{x}_2; & \frac{\partial \Phi}{\partial y_1} &= \mu_2 \dot{y}_1 + \mu_4 \dot{y}_1 - \mu_4 \dot{y}_2; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} &= -\mu_3 \dot{x}_1 + \mu_3 \dot{x}_2 + \mu_7 \dot{x}_2 - \mu_7 \dot{x}_3; & \frac{\partial \Phi}{\partial y_2} &= -\mu_4 \dot{y}_1 + \mu_4 \dot{y}_2; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} &= -\mu_7 \dot{x}_2 + \mu_7 \dot{x}_3 + \mu_5 \dot{x}_3; & \frac{\partial \Phi}{\partial y_3} &= \mu_6 \dot{y}_3. \end{aligned} \quad (4.48)$$

Математична модель, яка описує динаміку механічної системи верстата [288, 289]:

$$\left\{ \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 x_1 + c_3 x_1 - c_3 x_2 + \mu_1 \dot{x}_1 + \mu_3 \dot{x}_1 - \mu_3 \dot{x}_2 &= Q_{x_1} \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_3 x_1 + c_3 x_2 + c_7 x_2 - c_7 x_3 - \mu_3 \dot{x}_1 + \mu_3 \dot{x}_2 + \mu_7 \dot{x}_2 - \mu_7 \dot{x}_3 &= Q_{x_2} \\ m_3 \ddot{x}_3 - c_7 x_2 + c_7 x_3 + c_5 x_3 - \mu_7 \dot{x}_2 + \mu_7 \dot{x}_3 + \mu_5 \dot{x}_3 &= Q_{x_3} \\ m_1 \ddot{y}_1 + c_2 y_1 + c_4 y_1 - c_4 y_2 + \mu_2 \dot{y}_1 + \mu_4 \dot{y}_1 - \mu_4 \dot{y}_2 &= Q_{y_1} \\ m_2 \ddot{y}_2 - c_4 y_1 + c_4 y_2 + F_t - \mu_4 \dot{y}_1 + \mu_4 \dot{y}_2 &= Q_{y_2} \\ m_3 \ddot{y}_3 + c_6 y_3 - F_t + \mu_6 \dot{y}_3 &= Q_{y_3} \end{aligned} \right. \quad (4.49)$$

Початкова сила притиску інструмента до деталі коли контакт відбувається гладкою частиною інструмента:

$$F_0 = x_0 \cdot c_x^* \quad (4.50)$$

Початкові умови:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i|_{t=0} &= 0, \quad \dot{y}_i|_{t=0} = 0, \\ x_1|_{t=0} &= \frac{F_0}{c_1 + c_3}, \quad x_2|_{t=0} = \frac{F_0}{c_1 + c_3 + c_7}, \\ x_3|_{t=0} &= \frac{F_0}{c_1 + c_3 + c_5 + c_7}, \\ y_1|_{t=0} &= 0, \quad y_2|_{t=0} = 0, \quad y_3|_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (4.51)$$

Моделювання взаємодії інструмента з деталлю здійснено за допомогою контактної жорсткості та демпфуванням енергії локального пружно-пластичного деформування. Тому додатково вводиться умова перевірки наявності взаємного контакту інструмента з деталлю. Тобто, якщо інструмент матиме переміщення у протилежний напрям від деталі, тому контактна жорсткість та демпфування будуть відсутні

$$\text{Якщо } x_3 - x_2 < 0, \quad \text{тоді } c_7 = 0, \quad \mu_7 = 0. \quad (4.52)$$

#### 4.5. Імітаційна модель динамічних процесів під час фрикційного зміцнення круглих поверхонь деталей машин

Моделювання динамічних процесів технологічної операції фрикційного оброблення циліндричних поверхонь виконано за допомогою математичного пакета MATLAB-Simulink. Цей пакет дає змогу здійснити перевірку будь-яку ланку модельованого процесу та перевірити достовірність самого процесу.

Моделювання процесу, так як і процесу оброблення плоских поверхонь, виконано з використанням інструмента у якого присутні поперечні пази, які почергово з однаковим коловим кроком чергуються з гладкою поверхнею інструмента. Для побудови імітаційної моделі розроблено її блок-схему та

описано необхідний алгоритм роботи (рис. 4.34) [282, 283].

Алгоритм імітаційної моделі стартує з блоку вводу даних (блок 2), таких як: параметри інструмента (колова швидкість, початкове переміщення супорта, яке задає силу притиску, діаметр, кількість пазів, розмір пазів, маса спеціального пристрою, який встановлено на супорті верстата), параметрів верстата (коефіцієнта жорсткості елементів, коефіцієнта дисипації, маси шпинделя і маси деталі) та параметрів для моделювання самого процесу (кількість розрахункових обертів інструмента, яка задає час моделювання). Отримавши вхідні дані у блоці 3 розраховуємо час моделювання для циклу, який сформований у блоці 4. Кожний оберт інструмента рівний  $2\pi$ , то слід після кожного повного оберту здійснювати переписування значень повороту від 0 до  $2\pi$ , за дану операцію відповідає блок 5 та 6. Так, як периферія інструмента має пази, то слід чітко визначити їх перебування під час обертання, для цього запропоновано цикл (блок 7), який залежно від кількості пазів проводить перевірку геометрії інструмента. За допомогою (початкового) переміщення супорта токарного верстата у горизонтальному напрямі формуємо постійну силу притиску інструмента до оброблювальної деталі, а геометрія інструмента послаблює дану силу у момент проходження паза, тому дуже важливо є записати перехід між гладкою поверхнею інструмента і першою половиною паза, а також між другою половиною паза та наступною гладкою поверхнею інструмента. За гладку частину відповідає блок 8 та 9 відповідно до яких виконується розрахунок сили при контакті гладкої частини у блоці 13. Визначення паза проводиться у два етапи, пошук першої і окремо другої частини паза. Перша частина паза (блок 10 і 11) у якій сила притиску (переміщення лінії контакту) спадає і визначається блоком 14, та друга частина паза (блок 12), де сила притиску виростає і визначається блоком 15 та 20. Отже, знайшовши сили притиску, необхідно провести перевірку значення початкового переміщення до параметра  $\Delta R$  (див. рис. 4.5), яке виконується у блоці 16 і 17 (перевірка часткового розвантаження зони контакту). Також

необхідно провести перевірку повного розвантаження контакту, тобто коли величина переміщення супорта менша за параметр  $\Delta R$  і сила притиску відсутня, тобто початкове переміщення має протилежний напрям, то необхідно при перетині нуля значення сили залишати на нульові позначці, за дану дію відповідає блок 18 та 19. Черговою важливою перевіркою є визначення наявності контакту між деталлю та інструментом під час процесу обробки (тобто такі умови де інструмент та деталь отримали взаємно протилежний рух), за дану перевірку відповідає блок 23, 24 і 25, у яких при відсутності контакту проходить переприсвоєння значень контактної жорсткості та контактного демпфування. Сила тертя, яка залежить від сили притиску інструмента до деталі та наявності даної сили розраховується у блоці 26.

Провівши всі необхідні попередні розрахунки та перевірки у блоці 21 та 22 представлено диференціальні рівняння переміщення спеціального пристрою, інструмента та деталі. Отримані дані заносяться у матрицю, а цикл задає наступний крок у часі рівний кроку інтегрування. Після виходу з циклу 4 відбувається повне представлення даних у виді графіків та матриць із відповідними значеннями, та збереження інформації у відповідних форматах файлів.

Використавши логіку, яка подана у блок-схемі розроблена імітаційна модель, яка складається із трьох частин: перша частина – блок схема (рис. 4.35) розроблена у Simulink, друга частина – графічний інтерфейс (рис. 4.36) та третя частина – код, який поєднує дані частини, відповідає за змінні та формує графічну інформацію для представлення на екрані та подальшого її зберігання у відповідні формати файлів.

Для легкої зміни вихідних параметрів для імітаційної моделі розроблено графічний інтерфейс на п'ять зон: інформація про інструмент (сила притиску, розміри інструмента, кількість пазів, кутова швидкість, маса), інформація про верстат (коефіцієнти жорсткості та демпфування), маси (елементів верстата) та елементи керування відображенням інформації.

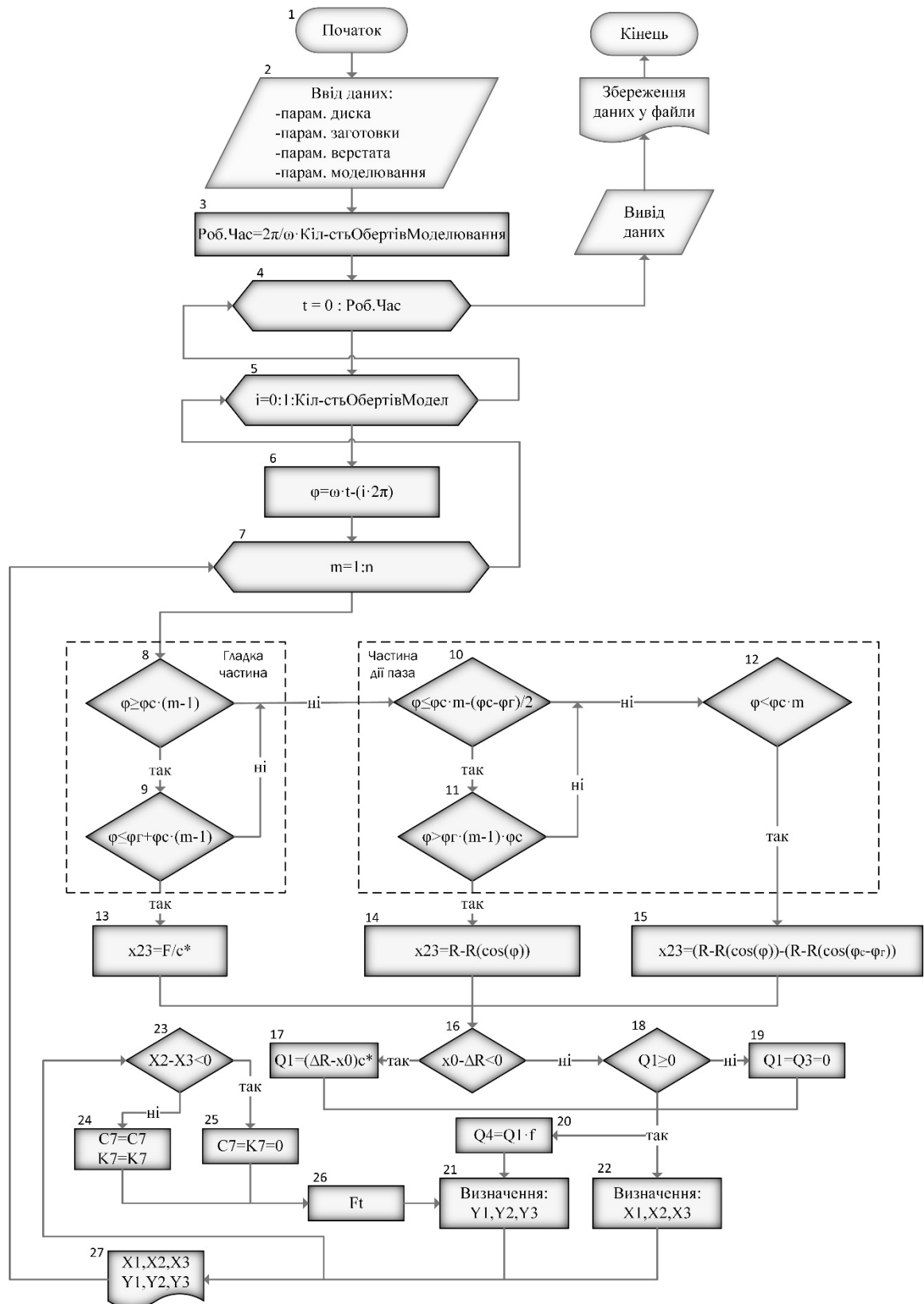


Рисунок 4.34 – Блок-схема імітаційної моделі процесу фрикційної обробки циліндричних поверхонь

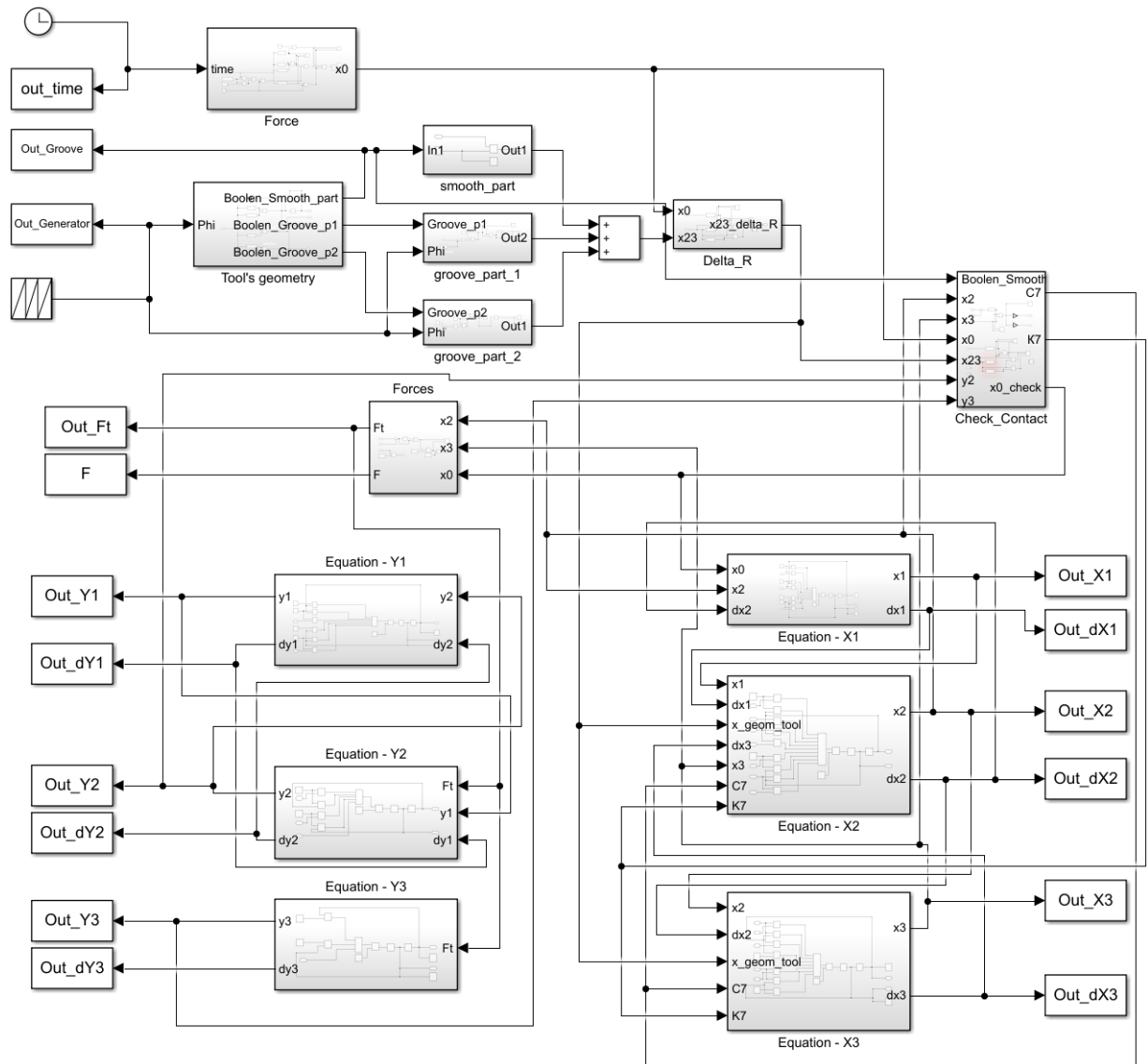


Рисунок 4.35 – Імітаційна схема фрикційного оброблення циліндричних поверхонь виконана у MATLAB-Simulink

Для легкої зміни вихідних параметрів для імітаційної моделі розроблено графічний інтерфейс на п'ять зон: інформація про інструмент (сила притиску, розміри інструмента, кількість пазів, кутова швидкість, маса), інформація про верстат (коефіцієнти жорсткості та демпфування), маси (елементів верстата) та елементи керування відображенням інформації.

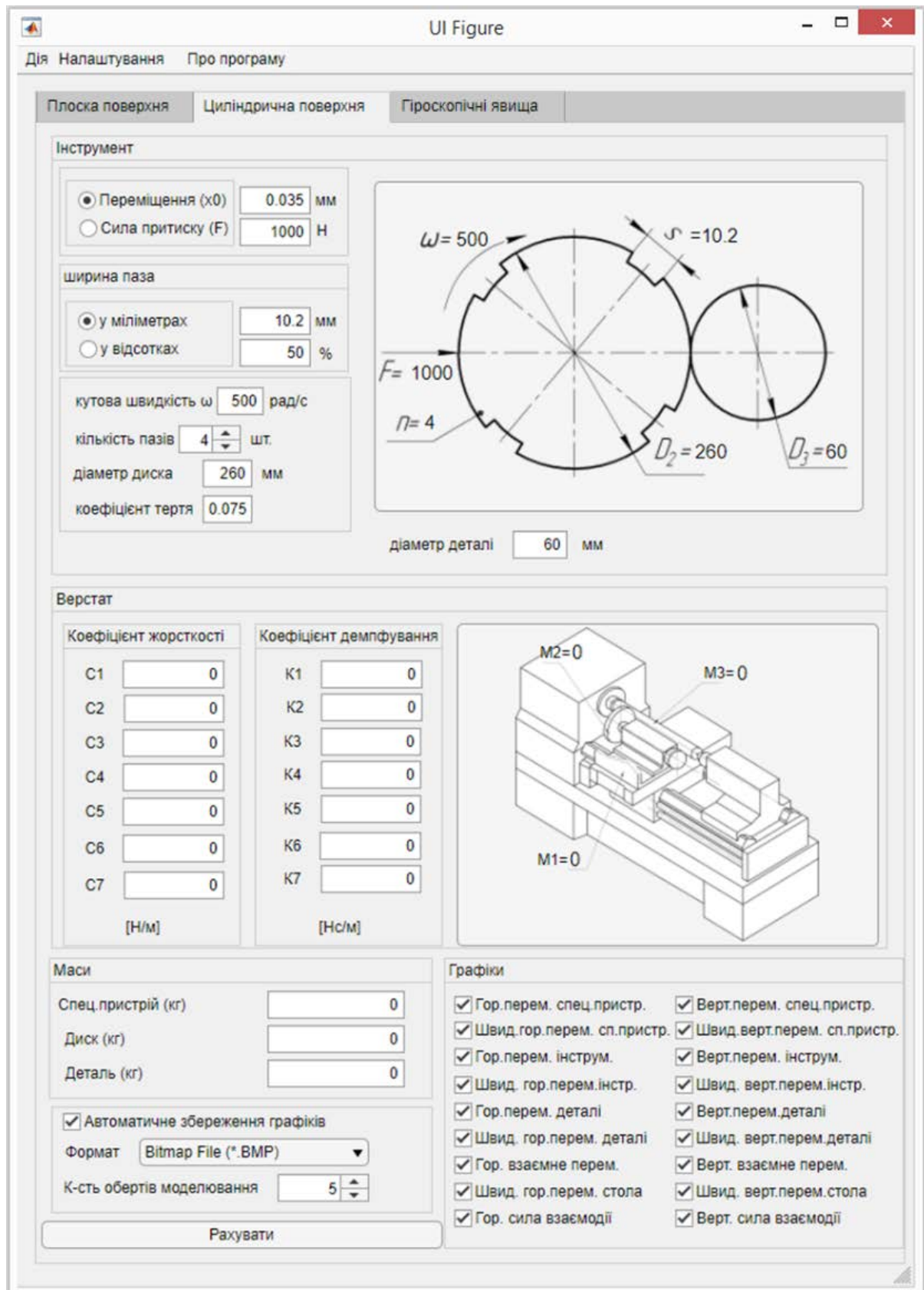


Рисунок 4.36 – Інтерфейс імітаційної моделі для моделювання динамічних процесів

Блок-схема даної моделі (див. рис. 4.35) загалом складається з 14 підблоків, а саме: генератора обертів, блоків геометрії інструмента, перевірки контакту, блоків вертикальних та горизонтальних переміщень спеціального пристрою для зміцнення циліндричних деталей, інструмента та деталі.

Перевірка моделі на адекватність виконується при наступних параметрах: кількість пазів  $n = 4$ , величина дії гладкої поверхні  $\varphi_r = 0,25\pi$ ; величина дії паза  $\varphi_p = 0,25\pi$ , тобто сегмент рівний  $\varphi_c = 0,5\pi$ ; сила притиску інструмента до деталі  $F = 500H$ ; діаметр інструмента  $D = 260$  мм; кутова частота обертання шпинделя  $\omega = 100$  рад/с, а розв'язок диференціальних рівнянь виконаємо методом Рунге-Кутта. Також зменшимо значення коефіцієнтів жорсткості кожного елемента на однакову величину для більш наглядного представлення числових розрахунків процесу. Генерування кута повороту інструмента та визначення розташування паза у часі виконано з використанням таких самих операторів як і для плоских деталей (див. рис. 4.8).

Силу притиску задаємо за допомогою переміщення у горизонтальному напрямі супорт на якому закріплено спеціальний пристрій для зміцнення циліндричних поверхонь, тобто сила притиску є сталою при контакті гладкої частини інструмента з деталлю, але при проходженні паза над зоною обробки відбувається послаблення сили притиску. Отже, у зоні контакту інструмент додатково задає переміщення відповідно до своєї геометрії (рис. 4.12.). Але у початковий момент часу моделювання, сам притиск інструмента відбувається у два етапи, підвід до контакту та лінійне наростання сили до її робочого значення.

Блок визначення горизонтального переміщення інструмента представлено на рис. 4.37, а вертикального переміщення на рис.4.38. Усі блоки даної моделі, які змодельовані відповідно до диференціальних рівнянь (4.49) представлені у додатку (М).



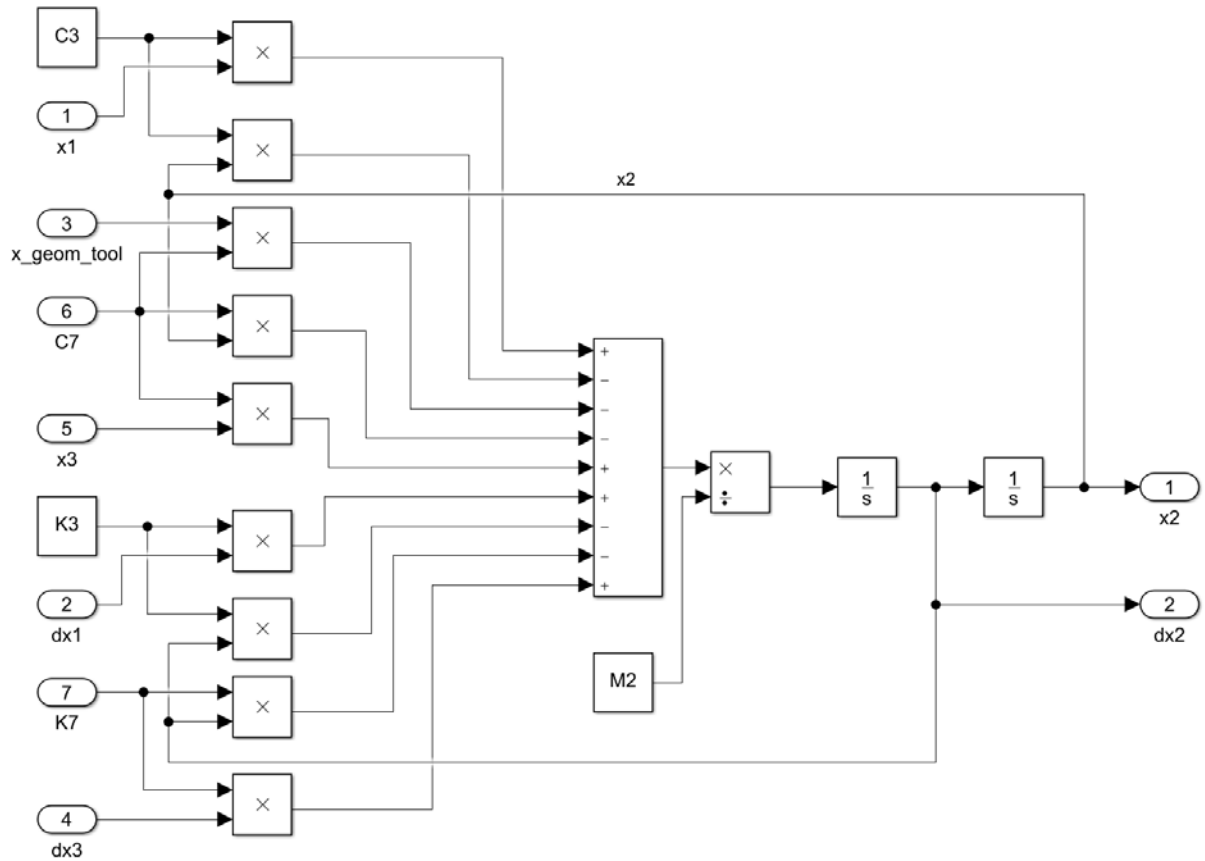


Рисунок 4.37 – Блок імітаційної моделі для визначення переміщення та швидкості переміщення інструмента у горизонтальній площині

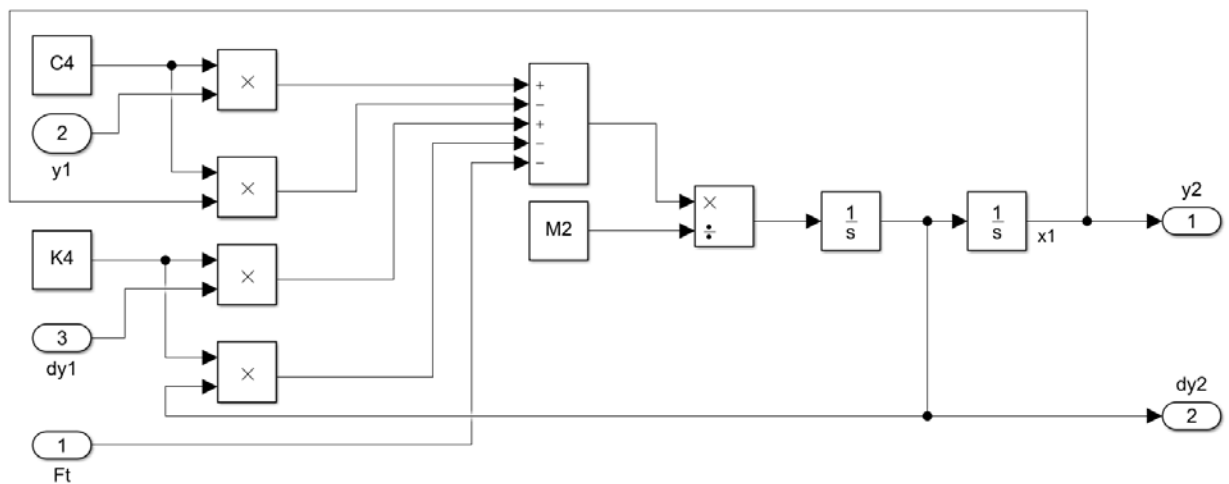


Рисунок 4.38 – Блок імітаційної моделі для визначення переміщення та швидкості переміщення інструмента у вертикальній площині

Чисельні розв'язки переміщень у горизонтальній площині представлено на рис. 4.39, та швидкості переміщень у горизонтальній площині представлені на рис. 4.40. Продовж дії першого сегмента (гладка поверхня інструмента та паз) ( $\varphi = \pi/4$ , рад;  $t = 0,01571$ , с), спеціальний пристрій, шпindelна бабка та інструмент знаходяться у стані спокою, в даний момент відсутня сила притиску. Наступні три сегменти ( $\varphi = \pi/2 \dots 2\pi$ ) змодельовані таким чином щоб зона контакту інструмент-деталь отримала розрахункову силу притиску, яка рівна  $F = 0 \dots 500H$ . При вході у контакт другого сегмента ( $\varphi = \pi/4$ , рад;  $t = 0,01571$ , с) відбувається початок дії сили притиску і кожна досліджувана маса отримує переміщення, спеціальний пристрій та інструмент переміщуються у додатному напрямку, а оброблювальна деталь у від'ємному. Також при проходженні паза у зоні контакту відбувається втрата сили притиску, тобто розвантаження зони контакту і досліджувані маси отримують переміщення у протилежний рух у напрямку вихідного положення. Після отримання повного значення сили притиску коливання стабілізуються і отримують постійний характер з однаковою амплітудою та частотою. Для наявності чергування гладкої поверхні інструмента та паза на графіку додатково штрихова крива, де умовно за «0» позначено розташування у часі гладкої частини, а за « $2 \cdot 10^{-6}$ » – паз інструмента (рис.4.39 в). Отже, з характеру переміщень можна зробити висновок, що вони відповідають процесу оброблення і є адекватними, також швидкості горизонтальних переміщень досліджуваних мас відповідають переміщенням. Переміщення інструмента у вертикальному напрямі (рис. 4.41) викликане силою тертя, яка залежить від сили притиску інструмента до деталі і є змінною під час процесу оброблення. Після проходження гладкої частини відбувається часткове розвантаження зони, так як над зоною контакти перебуває паз (зменшена сила контакту), а при входженні у контакт нової гладкої поверхні інструмента відбувається різке довантаження контакту, що явно відображено на графіках вертикального переміщення, тобто відбувається удар.

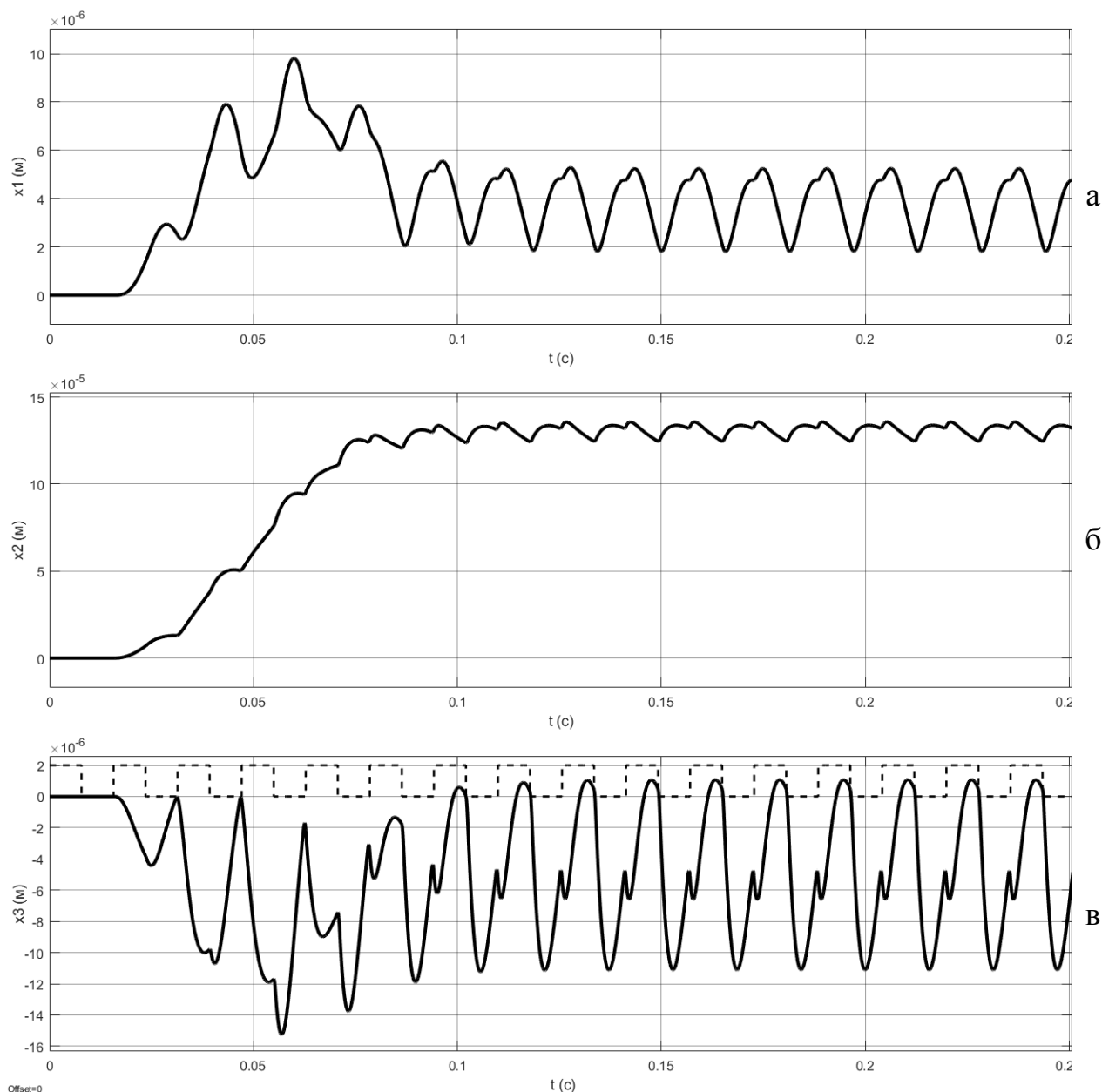


Рисунок 4.39 – Чисельні розв’язки переміщень спеціального пристрою (а), інструмента (б) та деталі (в) у горизонтальній площині

Швидкість переміщення інструмента у вертикальному напрямі представлено на рис. 4. 42.

Швидкість переміщення спеціального пристрою у горизонтальному напрямі є не високою у порівнянні за швидкість переміщення інструмента та деталі. Тому, чим більше буде взаємне протилежне переміщення у горизонтальному інструмента та деталі перед зіткненням, тим вищою буде швидкість зіткнення, та інтенсивніше проходитиме процес зсувного

деформування поверхневого шару деталей машин. Також отримавши чисельні розв'язки переміщення кожної маси, можна отримати відповідні реакції даних мас відносно сили притиску, яка діє у зоні контакту.

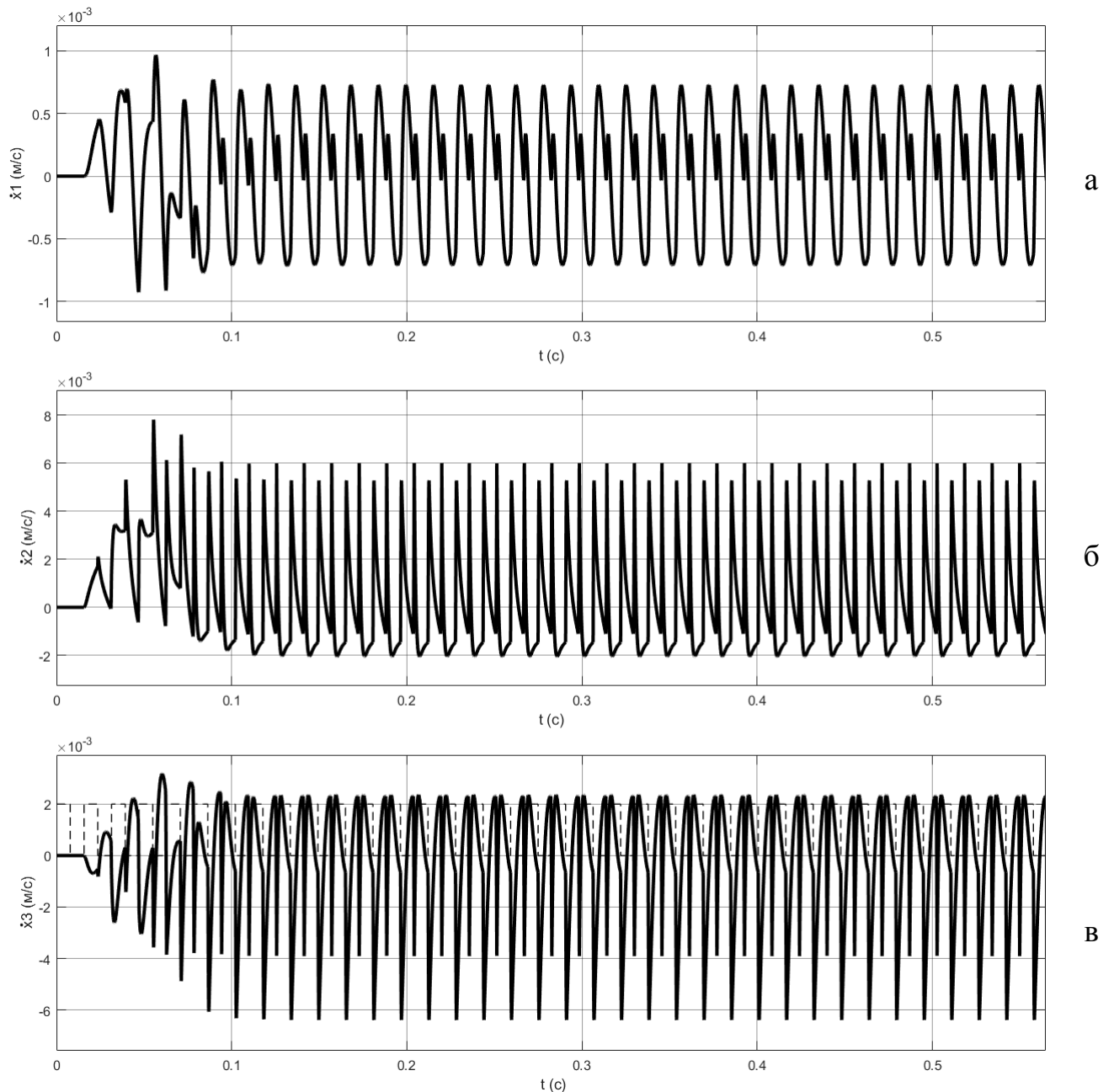


Рисунок 4.40 – Чисельні розв'язки швидкостей переміщень спеціального пристрою (а), інструмента (б) та деталі (в) у горизонтальній площині

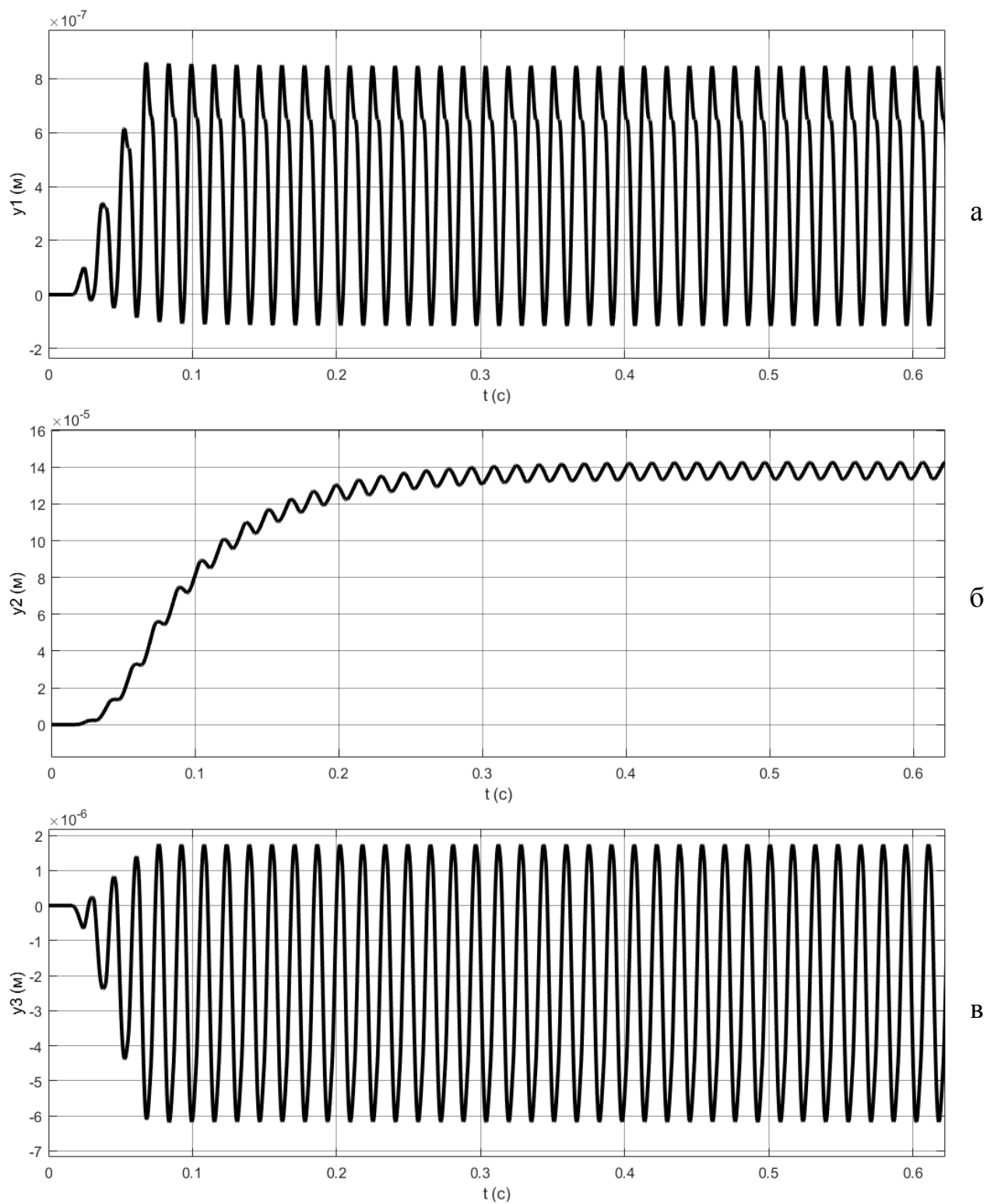


Рисунок 4.41 – Чисельні розв’язки переміщень спеціального пристрою (а), інструмента (б) та деталі (в) у вертикальній площині

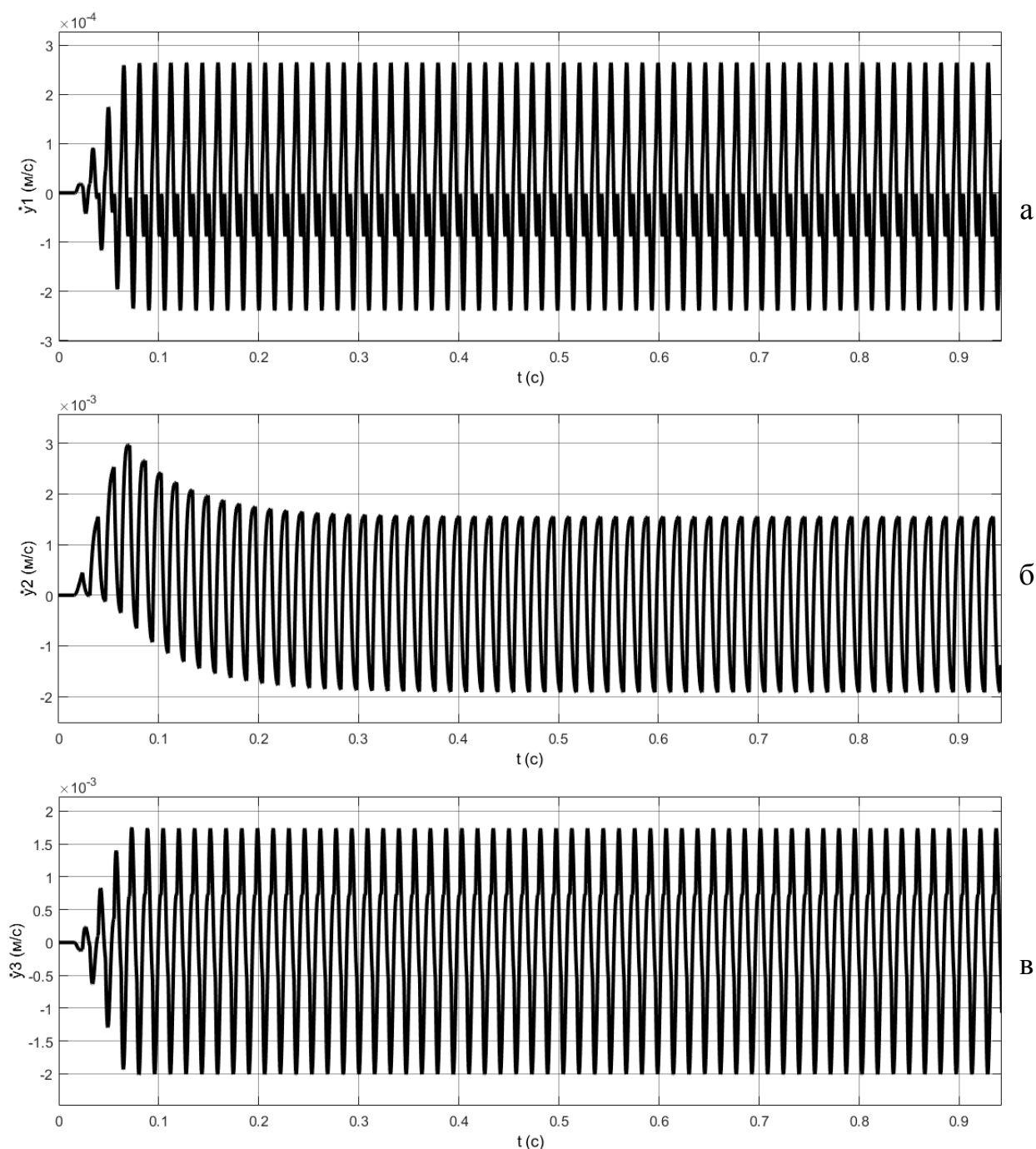


Рисунок 4.42 – Чисельні розв’язки швидкостей переміщень спеціального пристрою (а), інструмента (б) та деталі (в) у вертикальній площині

Розроблена динамічна модель пружної системи верстата дає змогу визначити вертикальні та горизонтальні переміщення та швидкості спеціального пристрою, інструмента та деталі, а також реакції кожної маси відносно суміжної маси.

Чисельні розв'язки переміщень виконані для наступних параметрів: кількість пазів  $n = 16$ , ширина паза – 4 мм; сила притиску інструмента до деталі  $F = 500\text{H}$ ; діаметр інструмента  $D = 260$  мм; кутова частота обертання шпинделя  $\omega = 500$  рад/с.

Переміщення у горизонтальному напрямі  $x_1, x_2, x_3$  відповідної маси отримують усталений характер та однакову частоту після того як величина  $x_0$  буде рівна робочому переміщенні (рис. 4.43), тобто сформується повне робоче значення сили притиску (повний контакт інструмента з оброблювальною поверхнею деталі після плавного підведення інструмента), швидкість переміщення інструмента у горизонтальному напрямі представлено на рис. 4.44. Переміщення інструмента у вертикальному напрямі (рис. 4.45) викликане силою тертя, яка залежить від сили притиску інструмента до деталі і є змінною під час процесу оброблення, також вертикальне переміщення інструмента має не великий вплив на силу притиску через перебування двох їх центрів обертання на одній площині, і формується при взаємному вертикальному переміщенні (див.рис. 4.33). Швидкість переміщення інструмента у вертикальному напрямі представлено на рис. 4.46. Важливим параметром дослідження є реакція, яка виникає у зоні контакту під час процесу оброблення і представлена на рис. 4.47.

Моделювання процесу фрикційного оброблення циліндричних поверхонь деталей машин виконано при декількох ширинах паза та силах притиску (рис. 4.48 та рис. 4.49).

На формування нанокристалічного шару великий вплив має високочастотні деформації малих значень амплітуди. При аналізі отриманого чисельного розв'язку переміщень системи з використанням різних значень сили притиску та ширини паза можна стверджувати, що суттєвий вплив на величину амплітуди удару інструмента по деталі має значення ширини паза, при збільшенні ширини паза зростає значення різниці між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції, яка виникає у зоні оброблення між

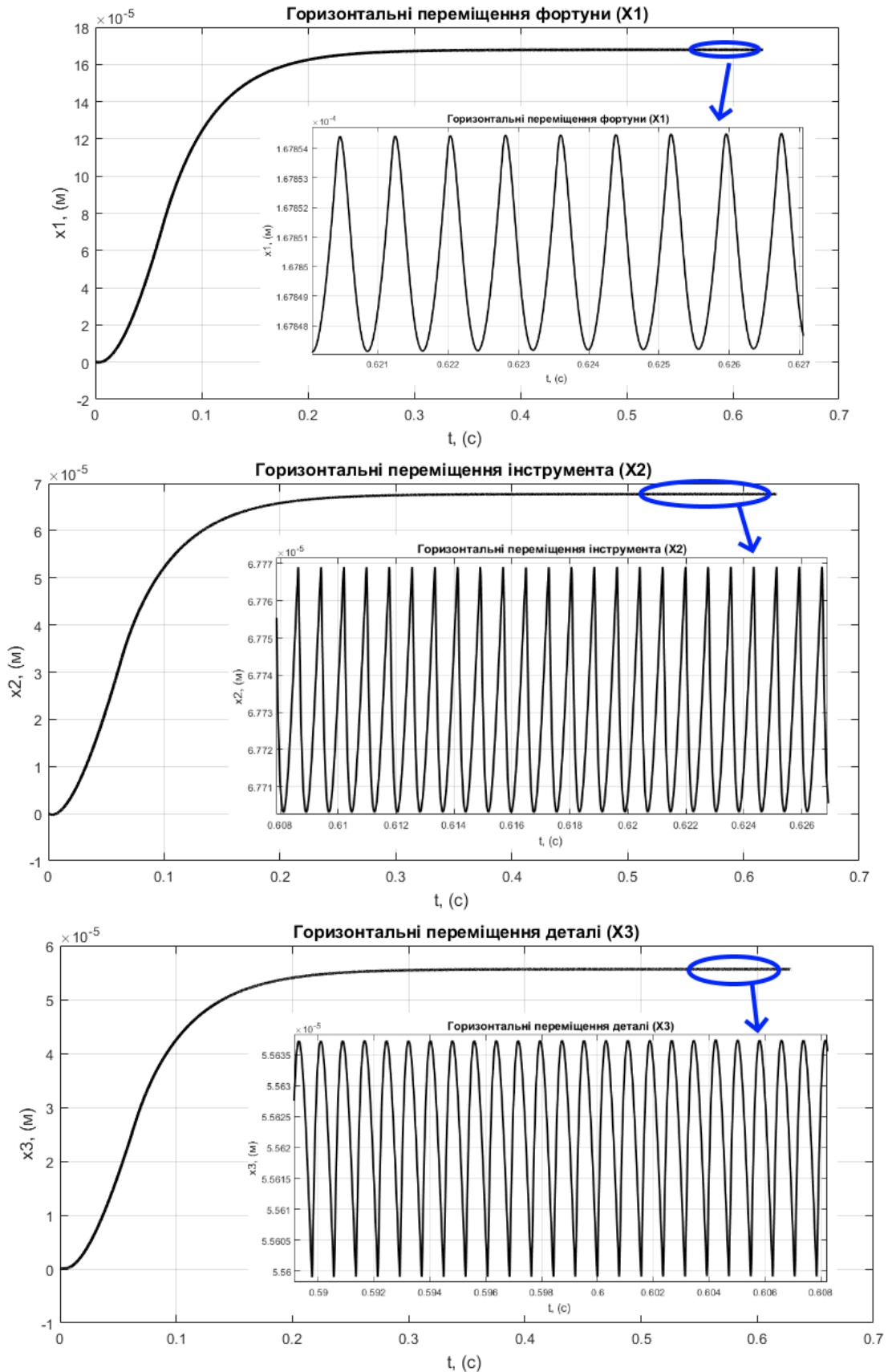


Рисунок 4.43 – Переміщення у горизонтальному напрямі: а – спеціального пристрою; б – інструмента; в – деталі



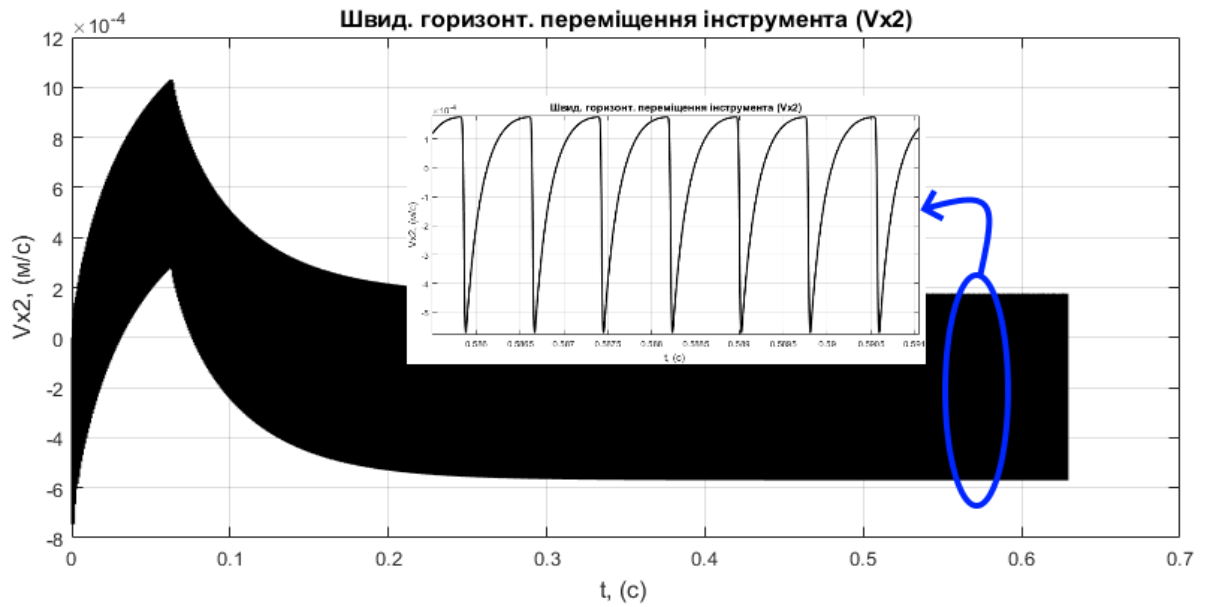


Рисунок 4.44 – Швидкість переміщень інструмента у горизонтальному напрямі

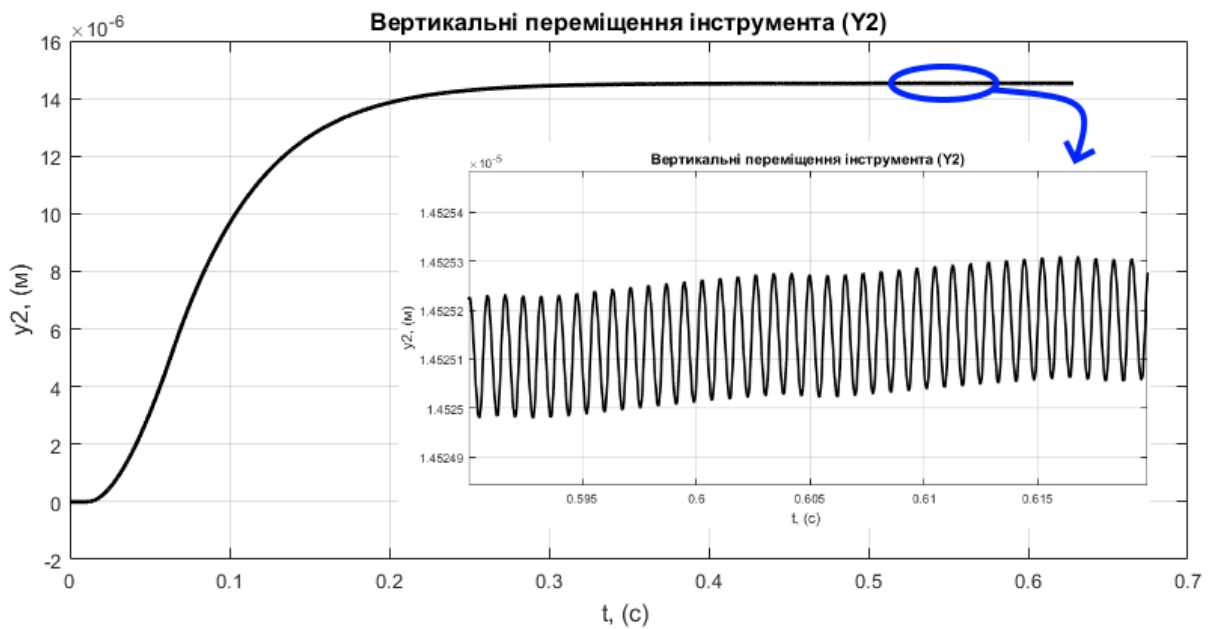


Рисунок 4.45 – Переміщення інструмента у вертикальному напрямі

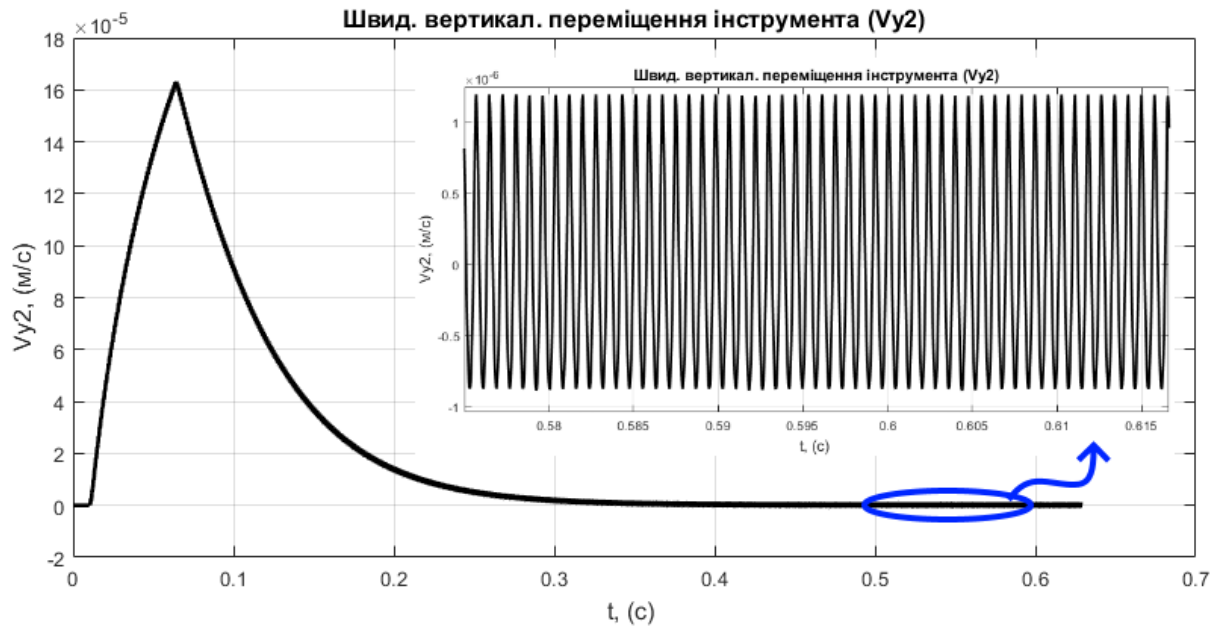


Рисунок 4.46 – Швидкість переміщення інструмента у вертикальному напрямі

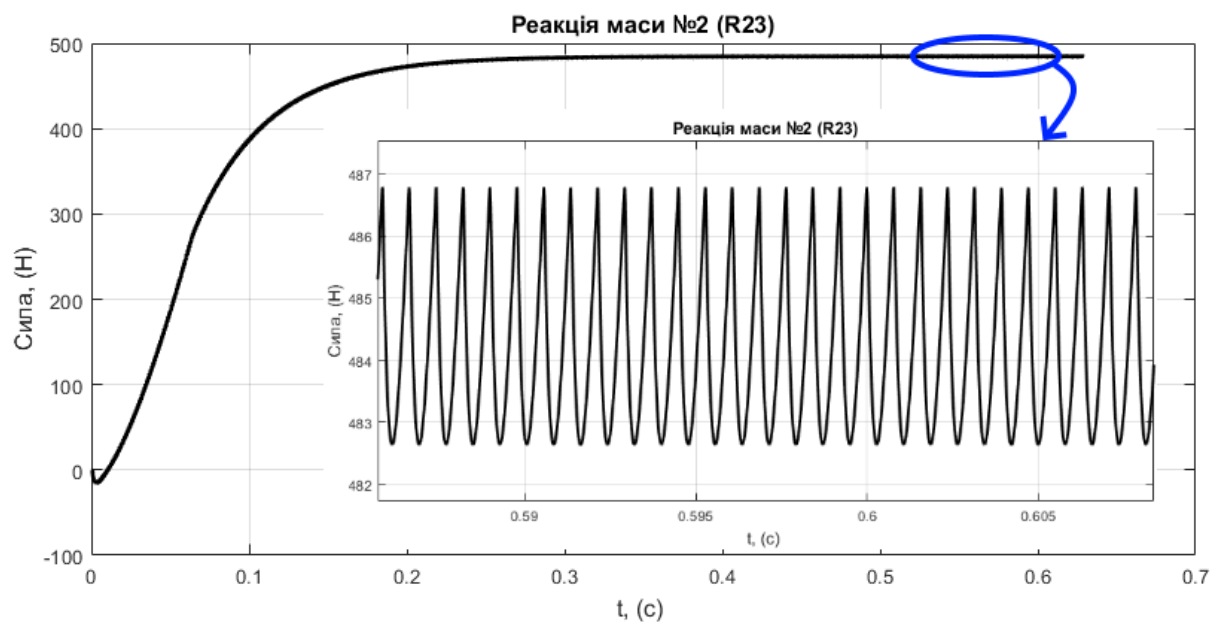


Рисунок 4.47 – Сила взаємодії інструмента з деталлю

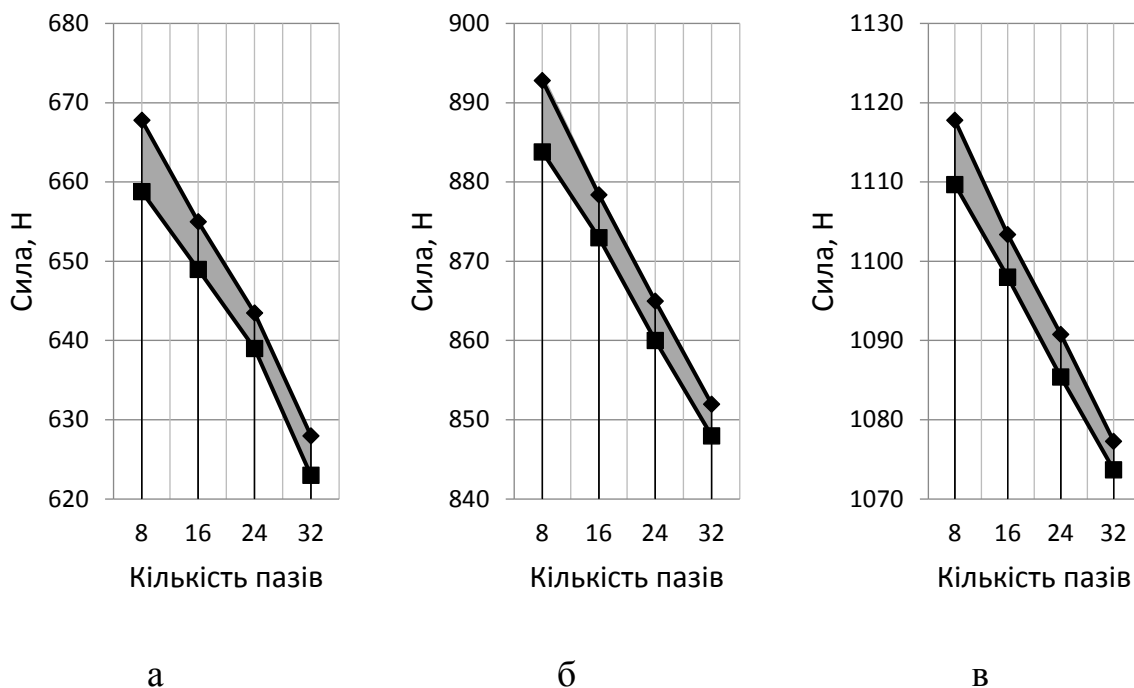


Рисунок 4.48 – Значення амплітуди сили взаємодії у зоні контакту при ширині паза 4 мм: а – сила притиску 750 Н; б – сила притиску 1000 Н; в – сила притиску 1250 Н

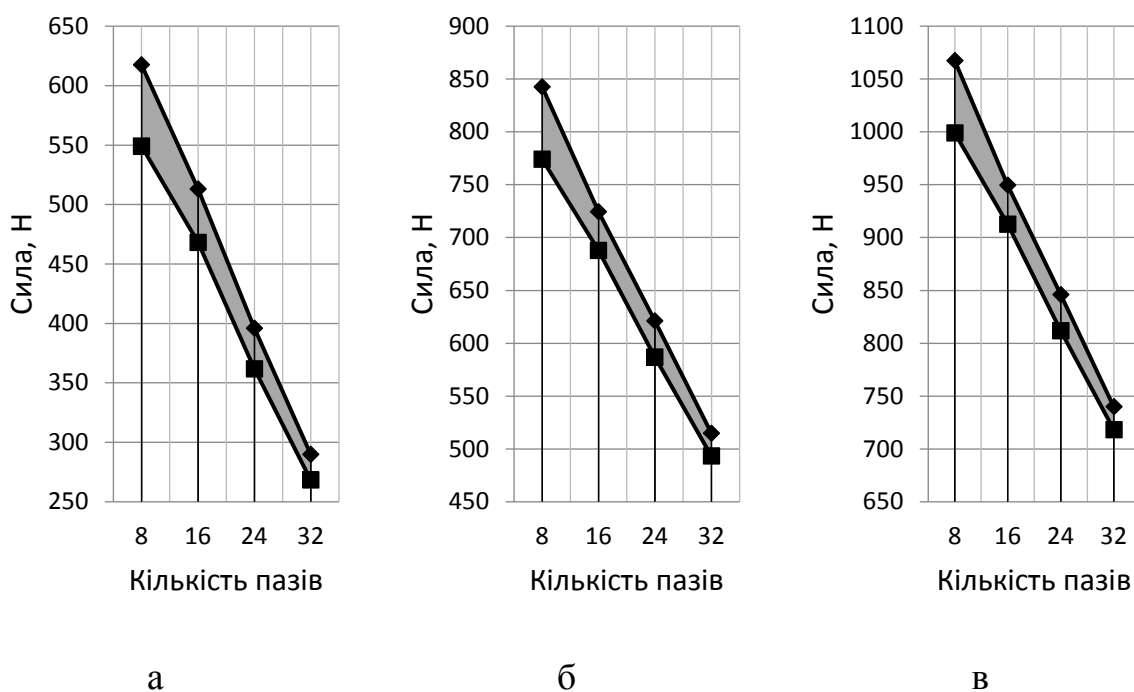


Рисунок 4.49 – Значення амплітуди сили взаємодії у зоні контакту при ширині контакту 8 мм: а – сила притиску 750 Н; б – сила притиску 1000 Н; в – сила притиску 1250 Н

інструментом та оброблювальною деталлю, при використанні інструмента з пазом, в якого ширина паза рівна 4 мм, силі притиску 750 Н і кількістю пазів на периферії інструмента, яка рівна 8 шт., значення різниці між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції рівне 9 Н, а при ширині паза, яка складає 8 мм, то різниця між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції у 7,5 разів вища і складає 68 Н (рис. 4.50). Але при збільшені кількості пазів на периферії інструмента величина різниці між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції зменшується і наприклад, при такій самі сили притиску інструмента до деталі з кількістю пазів 24 шт. і шириною паза 4 мм різниця амплітуд буде рівна 4,5 Н, а при ширині паза 8 мм різниця амплітуд буде мати значення 38 Н. Також слід відзначити, що величина різниці між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції є однакою при використанні однієї ширини інструмента при різних силах притиску.

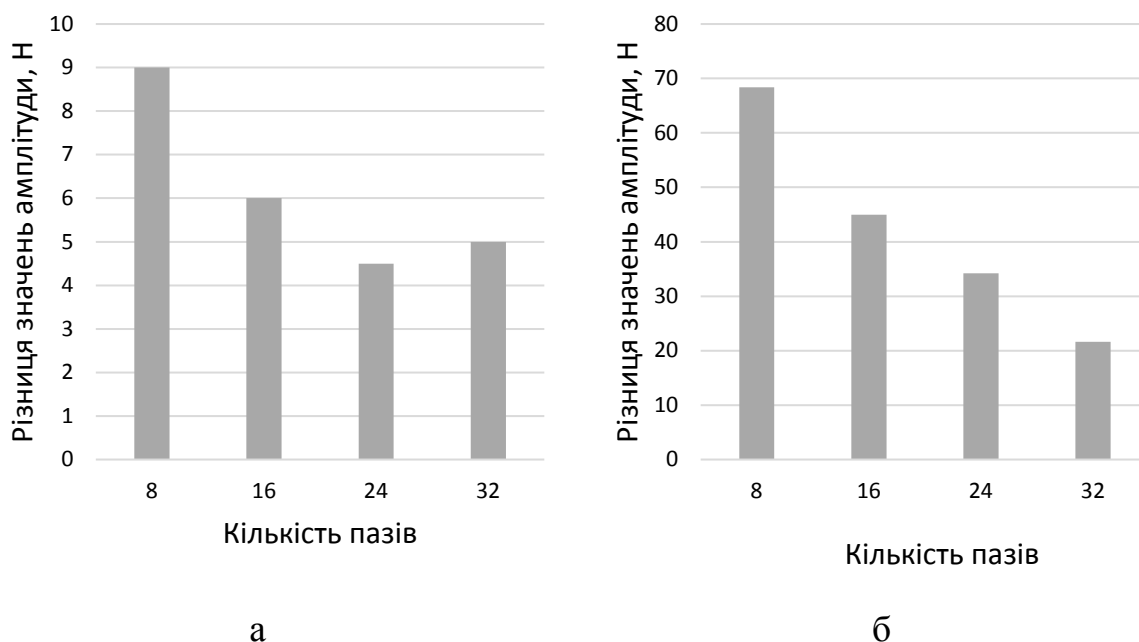


Рисунок 4.50 – Різниця між максимальними значеннями амплітуди: а – ширина паза 4 мм; б – ширина паза 8 мм

Тобто, якщо величина переміщення інструмента до деталі, яка формує силу притиску, є більшою за величину  $\Delta R$  (рис.4.4), то різниця між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції буде однаковою при різних силах притиску, але однакої ширині паза.

#### **4.6. Амплітудно-частотна характеристика процесу фрикційного зміцнення плоских деталей машин**

У процесі лезового оброблення поверхонь деталей машин для покращання параметрів якості оброблюваних поверхонь намагаються зменшити динамічні процеси у зоні різання. Під час фрикційної обробки для покращання формування якісного зміцненого шару навпаки збільшуються коливні процеси у зоні обробки.

Визначення АЧХ процесу фрикційної обробки будемо проводити на основі раніше записаних диференціальних рівнянь (4.49), які описують пружну систему токарного верстата з встановленим спеціальним пристроєм для виконання операції фрикційного зміцнення циліндричних поверхонь деталей машин [290].

Пружна системи верстата збурюється за рахунок почергової зміни гладкої поверхні інструмента та пазу ( $n$ ) з оброблювальною деталлю, які знаходяться у взаємному контакті (див. рис. 4.32). Розглядаємо випадок, коли співвідношенням гладкої частини інструмента до паза один до одного. Так, як співвідношення колової швидкості інструмента  $\omega_2$  є на декілька порядків вище, тому коловою швидкістю деталі  $\omega_3$  нехтуємо. Приймаємо, що коливальна система буде збурюватися за законом:

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t), \quad (4.53)$$

де  $\omega$  – колова швидкість інструмента, на якому знаходяться пази ( $n$ ).

Отже, збурення коливальної системи буде мати наступний вигляд:

$$\omega = \omega_2 \cdot n. \quad (4.54)$$

Щоб провести дослідження впливу кількості пазів на робочій частині інструмента на динамічні характеристики процесу фрикційного оброблення проведемо аналіз системи з допомогою частотних характеристик. Тому, силу збурення подаємо як  $\bar{F}_0 e^{i\omega t}$  а результат шукатимемо у вигляді  $\bar{X}_1 e^{i\omega t}$ ,  $\bar{X}_2 e^{i\omega t}$ ,  $\bar{X}_3 e^{i\omega t}$ ,  $\bar{Y}_1 e^{i\omega t}$ ,  $\bar{Y}_2 e^{i\omega t}$  та  $\bar{Y}_3 e^{i\omega t}$ , де  $i = \sqrt{-1}$  – комплексна одиниця;  $\bar{F}_0$  – амплітуда комплексної змінної сили збурення;  $\bar{X}_1$ ,  $\bar{X}_2$ ,  $\bar{X}_3$ ,  $\bar{Y}_1$ ,  $\bar{Y}_2$  та  $\bar{Y}_3$  – комплексні амплітуди.

Підставивши комплексні величини в систему (4.45) та поділивши ліві та праві частини отриманих рівнянь на  $e^{i\omega t}$  отримаємо систему:

- у горизонтальній площині:

$$\begin{aligned} m_1 \bar{X}_1 \omega^2 + c_1 (\bar{X}_1 - \bar{X}_0) + c_3 (\bar{X}_1 - \bar{X}_2) + i\omega \mu_1 \bar{X}_1 + i\omega \mu_3 (\bar{X}_1 - \bar{X}_2) &= 0 \\ m_2 \bar{X}_2 \omega^2 + c_3 (\bar{X}_2 - \bar{X}_1) + c_7 (\bar{X}_2 - \bar{X}_3) + i\omega \mu_3 (\bar{X}_2 - \bar{X}_1) + \\ + i\omega \mu_7 (\bar{X}_2 - \bar{X}_3) &= F \end{aligned} \quad (4.55)$$

$$m_3 \bar{X}_3 \omega^2 + c_7 (\bar{X}_3 - \bar{X}_2) + c_5 \bar{X}_3 + i\omega \mu_7 (\bar{X}_3 - \bar{X}_2) + i\omega \mu_5 \bar{X}_3 = -F$$

- у вертикальній площині:

$$\begin{aligned} -m_1 \bar{Y}_1 \omega^2 + c_2 \bar{Y}_1 + c_4 (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) + i\omega \mu_2 \bar{Y}_1 + i\omega \mu_4 (\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) &= 0 \\ -m_2 \bar{Y}_2 \omega^2 + c_4 (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1) + i\omega \mu_4 (\bar{Y}_2 - \bar{Y}_1) - F \cdot f &= 0 \\ -m_3 \bar{Y}_3 \omega^2 + c_6 \bar{Y}_3 + i\omega \mu_6 \bar{Y}_3 + F \cdot f &= 0 \end{aligned} \quad (4.56)$$

Використовую математичний пакет *Mathcad* проводимо символний розв'язок систем рівнянь (4.56) та (4.57) та знаходимо модулі комплексних амплітуд  $X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2$  та  $Y_3$ . Через громіздкий вигляд рівнянь модулів

комплексних амплітуд у статті не подаються. На основі аналізу отриманої АЧХ пружної системи (4.55), представленої на рис. 4.51, отримуємо значення частот збурення при яких виникає резонанс у системі. Так, резонанс спеціального пристрою, який закріплений на супорті верстата відбувається при  $\omega = 3650\text{c}^{-1}$ , а інструмента –  $\omega = 3750\text{c}^{-1}$ . Розрахунки частот ударних навантажень визначено для інструмента на робочій поверхні якого є один паз.

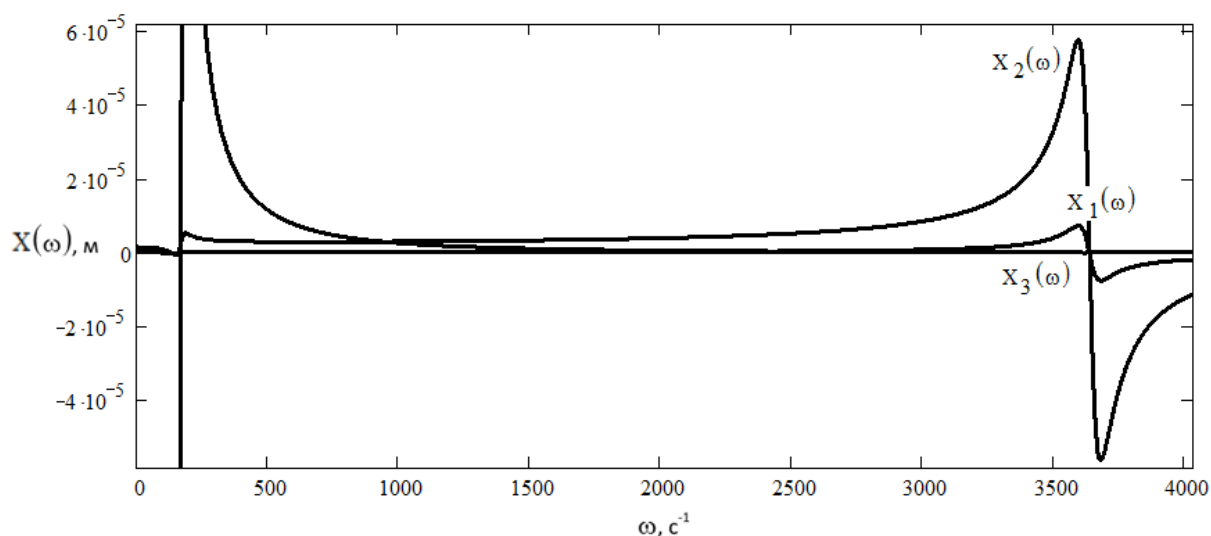


Рис. 4.51 – Графік амплітудно частотної характеристики технологічної системи

Для визначення небезпечних частот обертання інструмента при перервній фрикційній обробці циліндричних поверхонь і кількості нарізаних пазів на робочій частині інструмента при яких може виникнути резонанс, побудували графічну залежність виникнення резонансу від кількості пазів (рис. 4.52).

З отриманої залежності випливає, що при збільшенні кількості пазів на робочій частині інструмента явище резонансу пружної системи можна тримати при швидкостях, що є меншими за мінімальну швидкість. Мінімальна швидкість під час якої проходить процес фрикційного зміцнення складає 60 м/с. При такій швидкості резонанс можливий, якщо на робочій поверхні інструмента буде 7-11 пазів. Тому для нормальної роботи інструмента необхідно, щоб на робочій частині інструмента було не менше 12 пазів.

Інструмент буде працювати при нормальних умовах коливань на частотах які є зміщені вправо відносно резонансу системи (див. рис. 4.52).

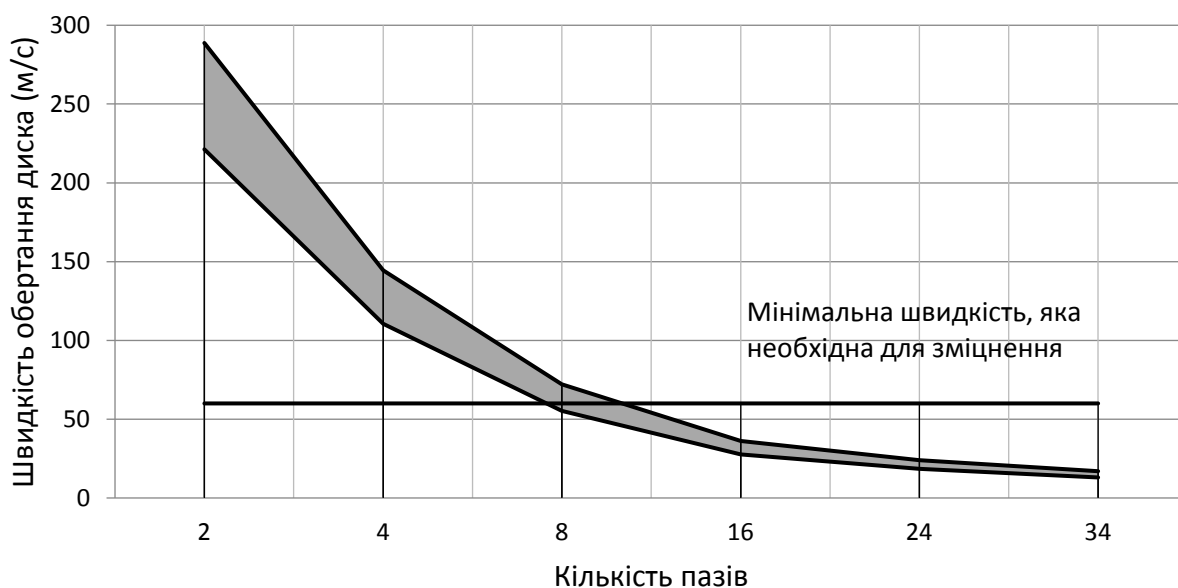


Рисунок 4.52 – Залежність частот виникнення резонансу від кількості пазів

#### 4.7. Експериментальні дослідження балансу жорсткості верстата

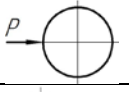
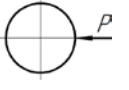
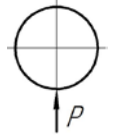
Методика експериментального визначення балансу жорсткості верстатів подана у розділі 2. Для токарного верстата, традиційної компоновки, пружні переміщення основних вузлів визначаються за схемою розташування індикаторів, яка подана на рис. 2.30, а для плоскошліфувального верстата подано на рис.2.31. Результати визначення податливості, для відповідного вузла, в точках встановлення індикаторів для токарного верстата наведено в табл. 4.1., а для плоскошліфувального верстата у табл. 4.2

За даними, які подано у табл. 4.1 та табл. 4.2 з врахуванням виразу (2.5) можна визначити баланс податливості, який визначає відсоток переміщень окремих вузлів верстата відносно сумарного зміщення осей шпинделя та



спеціального пристрою для зміцнення (для токарного верстата) та відносно шпинделя та стола верстата (для плоскошліфувального верстата).

Таблиця 4.1 – Значення податливості  $\Delta r_{\text{пр}i}$  в точках розташування індикаторів та їх коефіцієнти впливу  $K_{\text{пр}i}$  для токарного верстата

Схеми навантаження		Номер індикатора									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$\Delta r_{\text{пр}i} \times 10^{-3}$ мм/Н	6,27	0,32	2,161	0,51	0,23	0	0,171	0,17	0,2	0,2
		6,12	0,33	3,46	0,07	0,45	0	0,16	0,46	0,27	0,23
	$K_{\text{пр}i}$	-	1,655	0,651	1,52	0,53	-	1,29	0,61	0,65	1,17
	$\Delta r_{\text{пр}i} \times 10^{-3}$ мм/Н	6,45	0,56	5,97	0,73	0,01	0	0,04	0,76	0,01	0,18
		5,68	0,58	5,7	0,35	0,46	0	0,06	0,08	0,047	0,185
	$K_{\text{пр}i}$	-	1,66	0,65	1	0,63	-	1,24	0,6	0,6	1,18

Провівши аналіз балансу податливості пружної системи токарного верстата можна зробити висновок, що найбільшу податливість має зафіксований оправкою спеціальний пристрій в опорах – близько 70% від всієї податливості системи (рис. 4.3). Сумуюча жорсткість верстата в напрямі на спеціальний пристрій (точка 1, рис. 2.2, а), яка визначає точність обробки, (відповідно табл. 4.2) складає 15,89 Н/мкм.

Провівши аналіз балансу податливості пружної системи токарного верстата можна зробити висновок, найбільш податливою ланкою пружної системи верстата є шпиндельний вузол (від 28% до 50% сумарних переміщень) (рис. 4.3). Сумуюча жорсткість верстата в напрямі на стіл (точка 1, рис. 2.2, а), складає 41,1 Н/мкм.

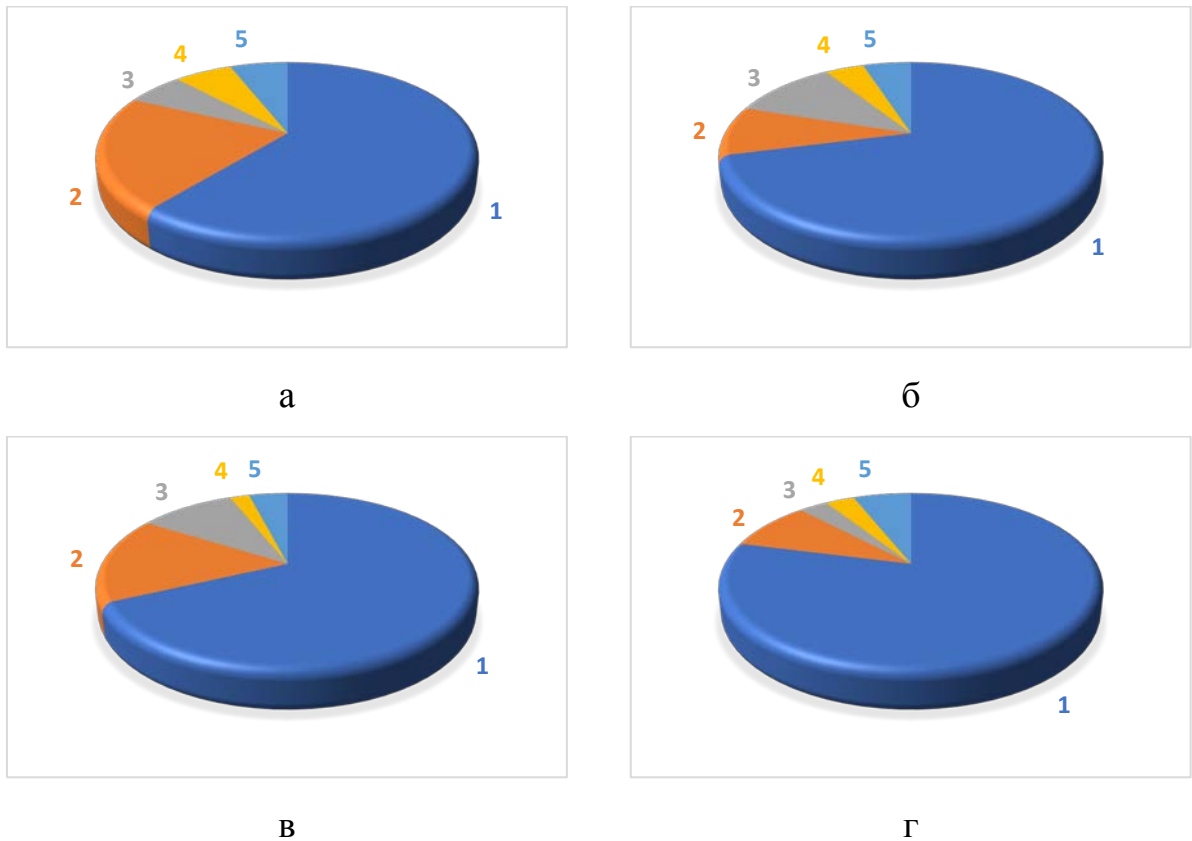
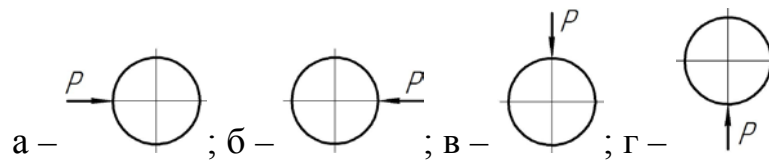


Рисунок 4.53 – Баланс податливості пружної системи токарного верстата, де: 1 – спеціальний пристрій; 2 – супорт; 3 – станина; 4 – шпиндельна бабка; 5 – шпиндель.



Таблиця 4.3 – Значення податливості  $\Delta r_{прi}$  в точках розміщення індикаторів для плоскошліфувального верстата

Схеми навантаження		Індикатори							
		2	3	4	5	6	7	8	9
	$\Delta r_{прi} \times 10^{-3}$ мм/Н	5,06	1,22	24,37	0,71	0,24	0,2	0,45	1,51
		4,27	0,91	17,22	0,41	0,1	0,12	0,41	1,42
	$\Delta r_{прi} \times 10^{-3}$ мм/Н	4,0	0,4	29,39	1,89	0,94	0,65	0,41	1,92
		4,9	0,8	22,41	1,69	0,29	0,21	1,12	1,0

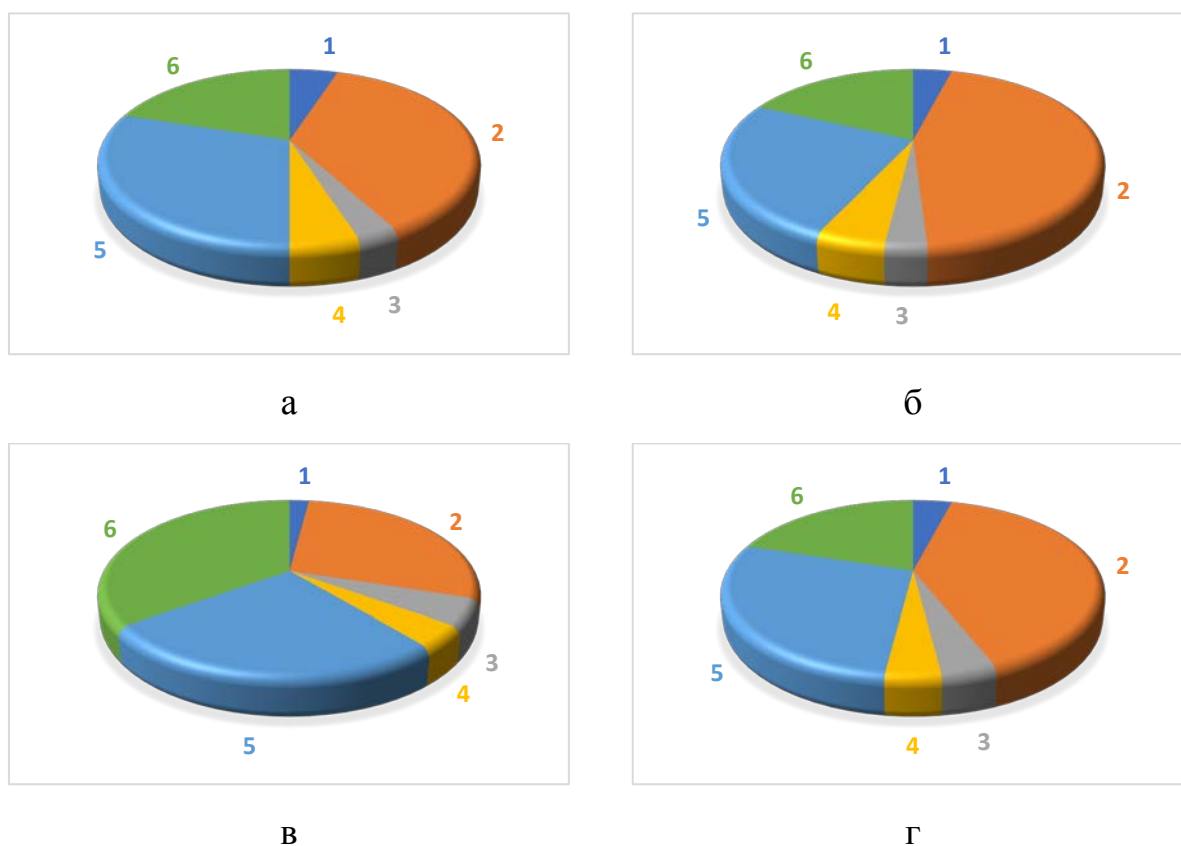
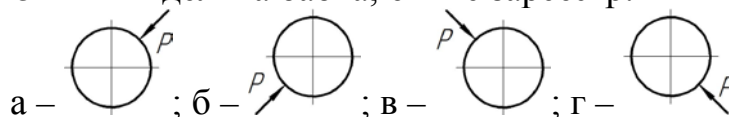


Рисунок 4.54 – Баланс податливості пружної системи шліфувального верстата, де: 1 – задня опора; 2 – передня опора; 3 – стіл; 4 – станина; 5 – шпиндельна бабка; 6 – не зареєстр.



Баланс податливості пружної системи верстата подано у % від загального переміщення

#### 4.8. Коефіцієнт в'язкого опору

Методика визначення коефіцієнта в'язкого опору подана у розділі 2. Процес фрикційного зміцнення проводили на двох типах верстатів (плоскошліфувальному та токарно-гвинторізному верстатах), і коефіцієнт в'язкого опору подано окремо для кожного верстата. Давач закріплювався на

тих вузлах, значення який необхідне для математичних моделей, що подані в даному розділі.

Для визначення значення коефіцієнта в'язкого опору для стола плоскошліфувального верстата відповідно до представленої методики у розділі 2, акселерометр закріплено на магнітній плиті горизонтально, тобто давач у такому положенні фіксує вертикальні переміщення (рис. 4.55). Удар молотком з комплекту даного обладнання здійснено вертикально. Запис вхідного сигналу здійснено у програмі “LabView SignalExpress” отриманого з АЦП.

Вхідний сигнал у середовищі Mathcad за допомогою швидкого перетворення Фур'є перетворено у дійсний сигнал, який подано на рис. 4.56. З дійсного сигналу вибираємо перші два додатні максимальні значення амплітуди і відповідно до них знаходимо логарифмічний декремент загасання. Отримавши значення логарифмічний декремент загасання згідно формули (2.2) визначаємо коефіцієнт в'язкого опору. Аналогічно, для всіх інших елементів здійснюємо вимірювання і значення заносимо у табл.4.4 та табл.4.5.

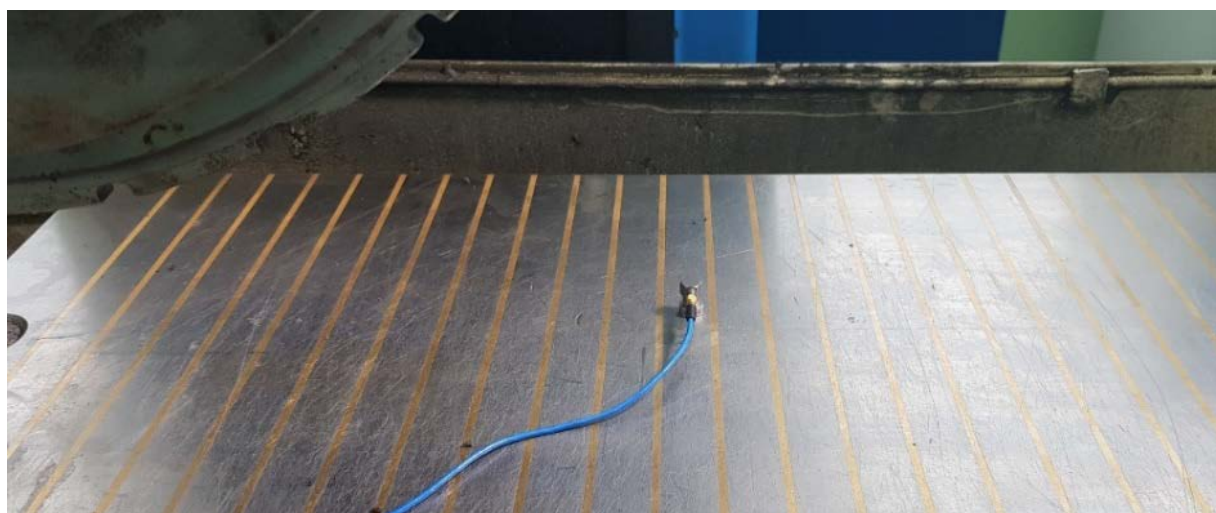


Рисунок 4.55 – Акселерометр для визначення логарифмічного декременту загасання

Значення коефіцієнта в'язкого опору для плоскошліфувального верстата у таблиці 4.1, а значення для токарно-гвинторізного верстата подано у табл. 4.2.

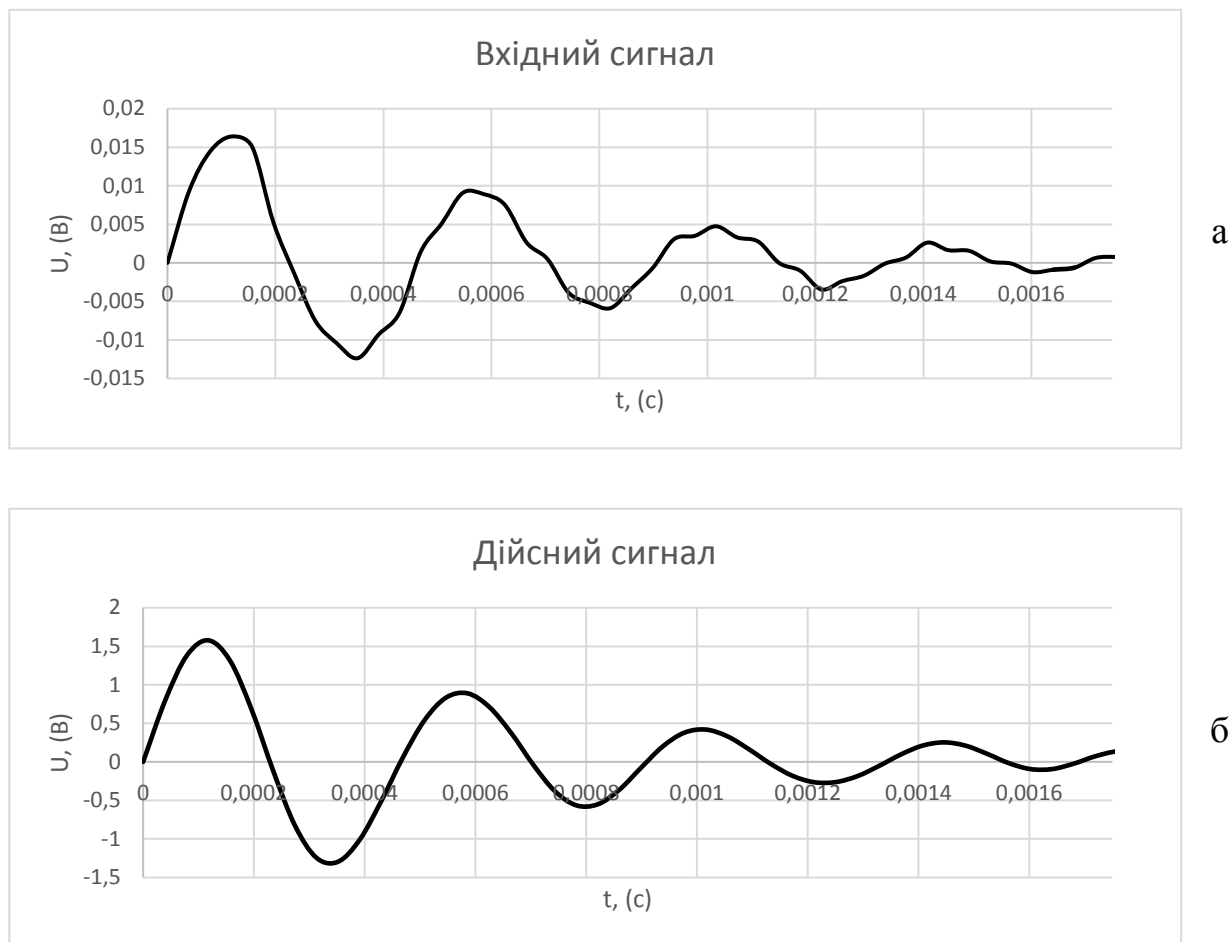


Рисунок 4.56 – Вхідний сигнал (а) та дійсний сигнал (б) отриманого акселерометром, який закріплено на магнітні плиті (вертикальний напрям)

Таблиця 4.4 – Значення коефіцієнта в'язкого опору для плоскошліфувального верстата

№	Назва	$T, c$	$\frac{A_i}{A_{i+1}}$	$\mu, \frac{Hc}{M}$
<b>Шліфувальний верстат</b>				
1	Стіл верстата – Вертикальний напрям	0,000469	1,787	500000
2	Стіл верстата – горизонт. напрям	0,000547	1,361	250000
3	Шпиндельний вузол – Вертикальний напрям	0,000742	1,72	75000
4	Шпиндельний вузол – горизонт. напрям	0,001133	1,485	50000
5	Шпиндельна бабка – Вертикальний напрям	0,000781	1,359	250000
6	Шпиндельна бабка – горизонт. напрям	0,000753	1,203	150000

Таблиця 4.5 – Значення коефіцієнта в'язкого опору для токарно-гвинторізного верстата

№	Назва	$T, c$	$\frac{A_i}{A_{i+1}}$	$\mu, \frac{Hc}{M}$
Токарний верстат				
1	Супорт – горизонт. напрям	0,000541	1,357	230000
2	Супорт – вертикальний напрям	0,000454	1,781	450000
3	Шпindelний вузол пристр. – гориз. напр.	0,001133	1,478	45000
4	Шпindelний вузол пристр. – верт. напрям	0,000738	1,68	65000
5	Шпindelний вузол верст. – гориз. напрям	0,001133	1,485	50000
6	Шпindelний вузол верст. – верт. напрям	0,000738	1,71	70000

#### 4.9. Гіроскопічні явища при фрикційному обробленні

Здійснення процесу фрикційного оброблення потребує високих температур у зоні контакту, які формуються за допомогою швидкісного тертя інструмента по поверхні деталі. Цей процес як зазначалося виконується на обладнанні з модернізацію основного приводу, або встановленням спеціального пристрою, тобто у будь-якому випадку відбувається підвищення частоти обертання шпинделя у 2 і більше разів.

Інструмент для виконання процесу фрикційного оброблення виготовляється металевим, тобто є важчим за абразивний. При виготовленні інструмента необхідно забезпечити його точність, а це є досить складне завдання, тому перед його встановленням на верстат необхідно провести його статичне балансування. Забезпечити динамічне балансування інструмента на універсальному шліфувальному верстаті чи на спеціальному пристрої для фрикційної оброки циліндричних поверхонь також є складно. Крім того інструмент на свої периферії має пази для збільшення зсувного деформування,

а також при процесі фрикційного оброблення сили взаємодії у зоні контакту інструмент-деталь є значно більшими за сили, які виникають під час процесу шліфування. Отже, дія нормальної складової сили взаємодії при процесі зміцнення викривляє вісь шпинделя верстата.

Систему шпindel-інструмент розглядаємо як гіроскоп, який здійснює обертання на великих швидкостях. Так як статичне балансування проходить на спеціальному пристрою за методом балансування на «ножах», то до кінця провести балансування не можливо і при високій частоті обертання шпинделя з інструментом проходить їх прецесійний рух та виникає гіроскопічне явище [271–278].

Площина інструмента немає абсолютної перпендикулярності до осі обертання, тобто має невеликий кут нахилу, також центр мас інструмента немає абсолютного збігу з віссю обертання. При такому виникають гіроскопічні моменти та сили, які періодично додатково змінюють навантаження на опори шпиндельного вузла верстата чи спеціального пристрою для зміцнення циліндричних поверхонь деталей. Тому також слід розглянути обертання шпинделя під дією статичного і динамічного дисбалансу.

Статичний дисбаланс формує зміщення центра інерції шпинделя відносно геометричної осі обертання, а динамічний дисбаланс формується за рахунок нахилу головної осі інерції твердого тіла відносно до геометричної осі обертання [275, 291].

Як зазначалося раніше інструмент притискається до деталі з певним силою, яка розкладаємо на тангенціальну та радіальну складові (поперечна складова має найменше значення тому її вплив незначний, яким можна знехтувати). Шпindel, обертається з постійною кутовою швидкістю  $\omega$  навколо осі симетрії, на якому встановлений інструмент загальною масою  $m_2$  та здійснює обертання на двох пружних опорах  $A$  і  $B$ , де коефіцієнт жорсткості лівої опори рівний  $c_A$  і правої  $c_B$ , а відстань між цими опорами рівна  $l$

(рис. 4.57).

Диференціальні рівняння, які описують рух системи побудовані на основі рівнянь Лагранжа, мають вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} = Q_{q_j} \quad (4.57)$$

де  $q_j$  – приймають значення  $y_1, x_1, y_2, x_2$ ;

$T$  – кінетична енергії системи;

$\Pi$  – потенціальна енергії системи;

$Q_{q_i}$  – узагальнені сили, що відповідають обраним узагальненим координатам  $x_i$  та  $y_i$ .

Для запису рівнянь, перш за все, необхідно вибрати нерухому систему координат  $xuz$  таким чином щоб її початок співпадав з лівою опорою  $A$  (найбільш віддалена опора від прикладання сили) у стані рівноваги (див. рис. 4.57). При наданні шпинделю довільного переміщення, тоді координати лівої опори позначимо  $x_A, y_A$ , а координати правої опори  $x_B, y_B$ , також координати центра ваги  $x_C, y_C$ . Зміна координат  $z_A, z_B, z_C$  не враховуємо так як ці величини значно менші за координати  $x$  та  $y$ . Запис рівнянь, які визначатимуть розташування шпинделя будемо за допомогою кутів  $\gamma$  і  $\beta$  [292, 293].

Під час процесу фрикційного зміцнення відбувається відхилення осі обертання шпинделя, тоді торцева площина інструмента отримує нахил до осі за рахунок дії на шпиндель сил, які виникають у зоні контакту інструмент-деталь. Також приймаємо, що центр мас шпинделя відстає від геометричної осі обертання на величину  $e$ , головна вісь інерції з цією віссю утворює кут  $\delta$ , а вісь  $\eta$  і вектор  $O'_A A'$  утворює кут  $\varepsilon$ , площина у якій лежить кут  $\delta$  і площина  $zx$ , утворюють кут  $(\omega t - \varepsilon)$  [294, 295].



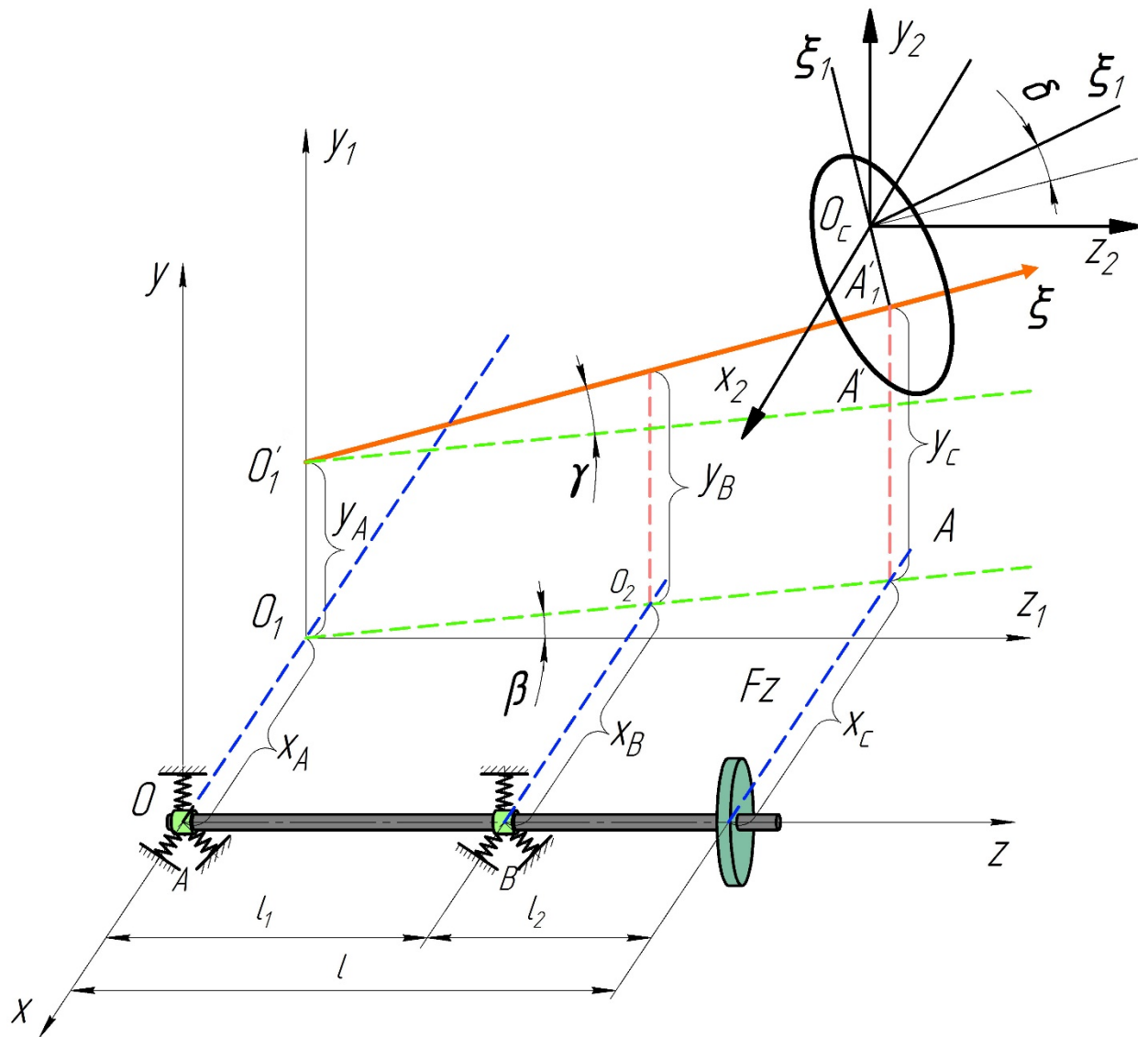


Рисунок 4.57 – Схема розташування шпинделя в нерухомій системі координат  $xuz$

Координати центра інерції шпинделя та кути, які визначають положення осі шпинделя [295]:

$$x_C = x + e \cdot \cos(\omega t) = x_B \frac{l_1}{l} - x_A \frac{l_2}{l} + e \cdot \cos(\omega t)$$

$$y_C = y + e \cdot \sin(\omega t) = y_B \frac{l_1}{l} - y_A \frac{l_2}{l} + e \cdot \sin(\omega t)$$

(4.58)

$$\beta_1 = \beta + \delta \cos(\omega t - \varepsilon) = \frac{x_B - x_A}{l} + \delta \cos(\omega t - \varepsilon);$$

$$\gamma_1 = \gamma + \delta \sin(\omega t - \varepsilon) = \frac{y_B - y_A}{l} + \delta \sin(\omega t - \varepsilon);$$

$$\beta = \frac{x_B - x_A}{l};$$

$$\gamma = \frac{y_B - y_A}{l};$$
(4.59)

де,  $x, y$  – координати точки геометричної осі обертання шпинделя, яка лежить на перетині цієї осі із площиною, що перпендикулярна до осі обертання та проходить через центр інерції;

$x_C, y_C$  – координати центра інерції;

$\beta, \gamma$  – кути між проекціями геометричної осі шпинделя відповідно на площину  $zx$  і віссю  $z$ , на площину  $zy$  і віссю  $z$ ;

$\beta_1, \gamma_1$  – аналогічні кути, які утворені проекціями головної центральної осі шпинделя.

Реакції в опорах визначаються за наступними відношеннями (рис. 4.58):

$$Ry_1 = c_A y_A, \quad Ry_2 = c_B y_B$$

$$Rx_1 = c_A x_A, \quad Rx_2 = c_B x_B$$
(4.60)

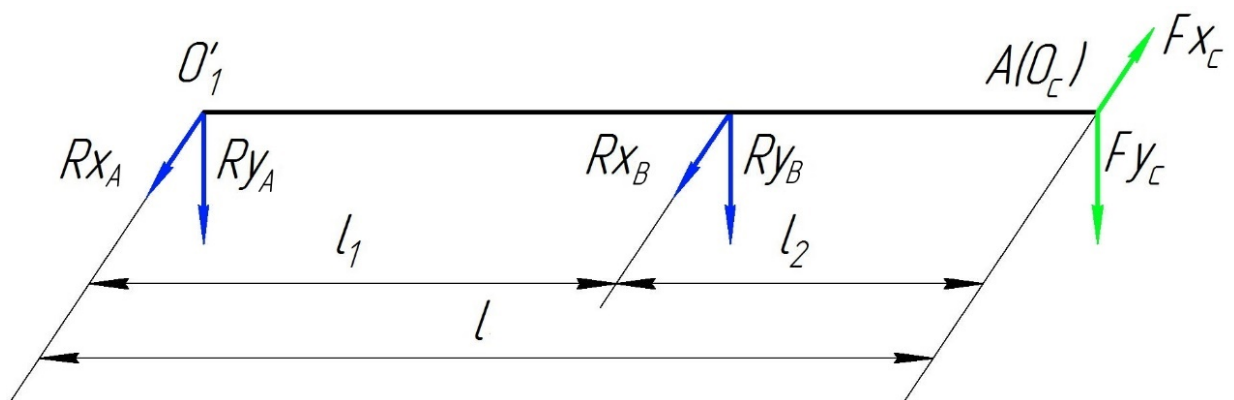


Рисунок 4.58 – Схема дії сил на шпиндель

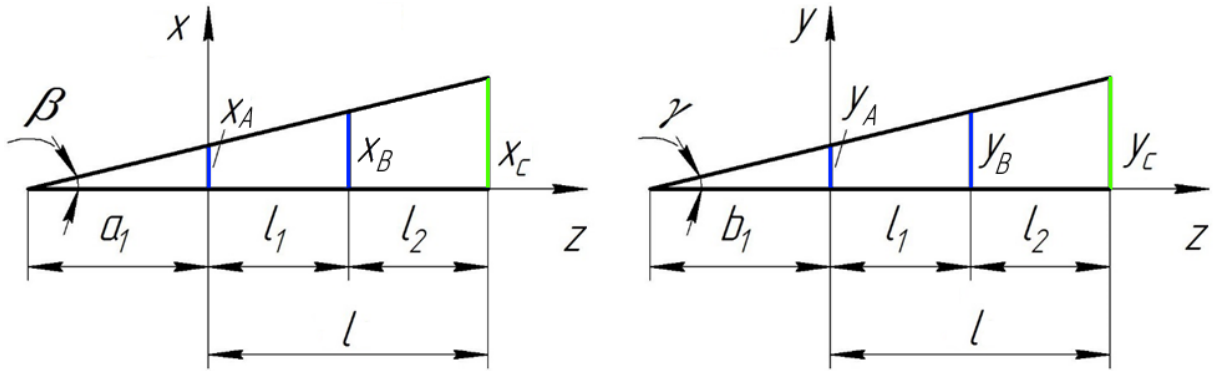


Рисунок 4.59 – Схема розташування шпинделя в нерухомій системі координат  $xuz$

Задаємо напрям осей рухомих координат відповідно до головних центральним осям інерції валу і знайдемо проекції кутової швидкості на ці осі:

$$\begin{aligned} \omega_{z1} &= \omega + \dot{\beta}_1 \sin(\gamma_1) \approx \omega + \dot{\beta} \gamma - \delta \omega \sin(\omega t - \varepsilon) \gamma + \\ &+ \dot{\beta} \delta \sin(\omega t - \varepsilon) = \omega + \frac{(\dot{x}_B - \dot{x}_A)(y_B - y_A)}{l} - \\ &- \delta \omega \frac{(y_B - y_A)}{l} \sin(\omega t - \varepsilon) + \delta \frac{(\dot{x}_B - \dot{x}_A)}{l} \sin(\omega t - \varepsilon); \end{aligned} \quad (4.61)$$

$$\omega_{x1} = -\dot{\gamma}_1 = -\dot{\gamma} - \delta \omega \cos(\omega t - \varepsilon) - \frac{\dot{y}_B - \dot{y}_A}{l} - \delta \omega \cos(\omega t - \varepsilon);$$

$$\omega_{y1} = -\dot{\beta}_1 \cos(\gamma_1) = \dot{\beta} - \delta \omega \sin(\omega t - \varepsilon) \frac{\dot{x}_B - \dot{x}_A}{l} - \delta \omega \sin(\omega t - \varepsilon).$$

Потенціальна енергія системи рівна:

$$\Pi = \frac{c_A(x_A^2 + y_A^2)}{2} + \frac{c_B(x_B^2 + y_B^2)}{2} + F_x(x_B - x_A) + F_y(y_B - y_A) \quad (4.62)$$

Кінетична енергія валу відповідно до теореми Кенінга рівна сумі кінетичної енергії центра інерції валу, враховуючи у ньому відповідну масу всієї системи, та кінетичну енергію валу у його відносному русі навколо

центра інерції:

$$T = \frac{m_2(\dot{x}_C^2 + \dot{y}_C^2)}{2} + \frac{A\omega_{z1}^2}{2} + \frac{B(\omega_{x1}^2 + \omega_{y1}^2)}{2} \quad (4.63)$$

Підставивши у рівняння 4.61 значення проекції швидкості центра інерції і кутової швидкості отримаємо:

$$\begin{aligned} T = & \frac{m_2}{2l^2} [(\dot{x}_B l_1 - \dot{x}_A l_2 + e\omega l \sin(\omega t))^2 + (\dot{y}_B l_1 - \dot{y}_A l_2 + e\omega l \cos(\omega t))^2] \\ & + \frac{A}{2} \left[ \omega + \frac{(\dot{x}_B - \dot{x}_A)(y_B - y_A)}{l} - \delta\omega \frac{(y_B - y_A)}{l} \sin(\omega t - \varepsilon) \right. \\ & \left. + \delta \frac{(\dot{x}_B - \dot{x}_A)}{l} \sin(\omega t - \varepsilon) \right] + \\ & + \frac{B}{2} \left[ \left( \frac{\dot{y}_B - \dot{y}_A}{l} + \delta\omega \cos(\omega t - \varepsilon) \right)^2 + \left( \frac{\dot{x}_B - \dot{x}_A}{l} - \delta\omega \sin(\omega t - \varepsilon) \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (4.64)$$

Знайдені значення потенціальної та кінетичної енергії підставимо у рівняння Лагранжа

$$\begin{aligned} & \frac{m_2}{l^2} (\ddot{x}_B l_1 - \ddot{x}_A l_2)(-l_2) - A\omega \frac{\dot{y}_B - \dot{y}_A}{l^2} - B \frac{\ddot{x}_B - \ddot{x}_A}{l^2} + c_A x_A + \\ & + m_2 \frac{l_2}{l} e\omega^2 \cos(\omega t) + B \frac{\delta\omega^2}{l} \cos(\omega t - \varepsilon) - A \frac{\delta\omega^2}{l} \cos(\omega t - \varepsilon) - \frac{F_x}{l} = 0; \\ & \frac{m_2}{l^2} (\ddot{x}_B l_1 - \ddot{x}_A l_2) l_1 + A\omega \frac{\dot{y}_B - \dot{y}_A}{l^2} + B \frac{\ddot{x}_B - \ddot{x}_A}{l^2} + c_B x_B - \\ & - m_2 \frac{l_1}{l} e\omega^2 \cos(\omega t) - B \frac{\delta\omega^2}{l} \cos(\omega t - \varepsilon) + A \frac{\delta\omega^2}{l} \cos(\omega t - \varepsilon) + \frac{F_x}{l} = 0; \\ & \frac{m_2}{l^2} (\ddot{y}_B l_1 - \ddot{y}_A l_2)(-l_2) + A\omega \frac{\dot{x}_B - \dot{x}_A}{l^2} - B \frac{\ddot{y}_B - \ddot{y}_A}{l^2} + c_A y_A + \\ & + m_2 \frac{l_2}{l} e\omega^2 \sin(\omega t) + B \frac{\delta\omega^2}{l} \sin(\omega t - \varepsilon) - A \frac{\delta\omega^2}{l} \sin(\omega t - \varepsilon) - \frac{F_y}{l} = 0; \end{aligned} \quad (4.65)$$

$$\frac{m_2}{l^2} (-\ddot{y}_A l_2 + \ddot{y}_B l_1) l_1 - A \omega \frac{\dot{x}_B - \dot{x}_A}{l^2} + B \frac{\dot{y}_B - \dot{y}_A}{l^2} + c_{BYB} -$$

$$-m_2 \frac{l_1}{l} e \omega^2 \sin(\omega t) - B \frac{\delta \omega^2}{l} \sin(\omega t - \varepsilon) + A \frac{\delta \omega^2}{l} \sin(\omega t - \varepsilon) + \frac{F_y}{l} = 0.$$

Моменти інерції шпинделя та інструмента:

$$A = \frac{m_{\text{шп}} R_{\text{шп}}^2}{2} + \frac{m_{\text{ін}} R_{\text{ін}}^2}{2}$$

$$B = m_{\text{шп}} \left( \frac{R_{\text{шп}}^2}{4} + \frac{l_2^2}{3} \right) + m_{\text{ін}} \left( \frac{R_{\text{ін}}^2}{4} + \frac{(l + l_2)^3 - l_2^3}{3l_2} \right) \quad (4.66)$$

де,  $R_{\text{інс}}$  – радіус інструмента;

$R_{\text{шп}}$  – радіус шпинделя;

Моделювання траєкторії руху кінця шпинделя під дією гіроскопічних явищ, які діють на прецесійний рух шпинделя верстата виконаємо на основі диференціальних рівнянь (4.65). Найперше моделювання слід провести при холостому ході, тобто без прикладання сили притиску інструмента до деталі при кутовій швидкості  $\omega = 200 \dots 700 \text{ с}^{-1}$ . Отже, при збільшенні кутової швидкості обертання інструмента радіус кола траєкторії, який описує кінець шпинделя зменшується, так як виникають гіроскопічні моменти при збільшенні швидкості обертання інструмента, що стабілізують шпиндель (рис. 4.60).

Моделювання сили притиску будемо виконувати у три етапи: холостий хід, підвід інструмента (лінійне нарощування сили притиску до робочих значень) та сам робочий хід. Також, моделювання процесу будемо виконувати для інструмента з поперечними пазами, тому необхідно врахувати геометрію периферії інструмента (рис. 4.61).



Рисунок 4.60 – Прецесійний рух шпинделя у холостому ході без навантаження

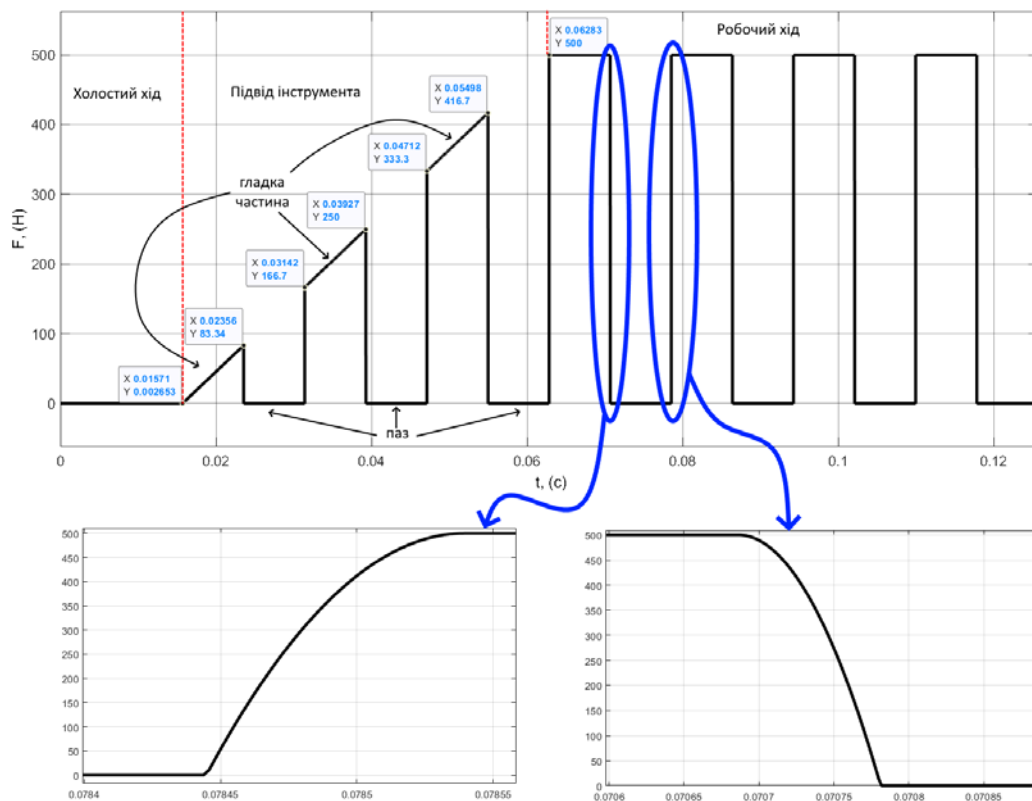


Рисунок 4.61 – Сила притиску інструмента до деталі з врахуванням геометрії інструмента

При плавному нарощенні сили після холостого обертання траєкторія руху кінця шпинделя під дією гіроскопічних явищ, які діють на прецесійний рух шпинделя верстата описує радіус траєкторії, який плавно збільшується (рис.4.62а), але отримавши постійну силу притиску, яка змінюється від геометрії інструмента (друга частина першого оберту і всі наступні оберти), кінець шпинделя описує еліпс (рис. 4.62б).

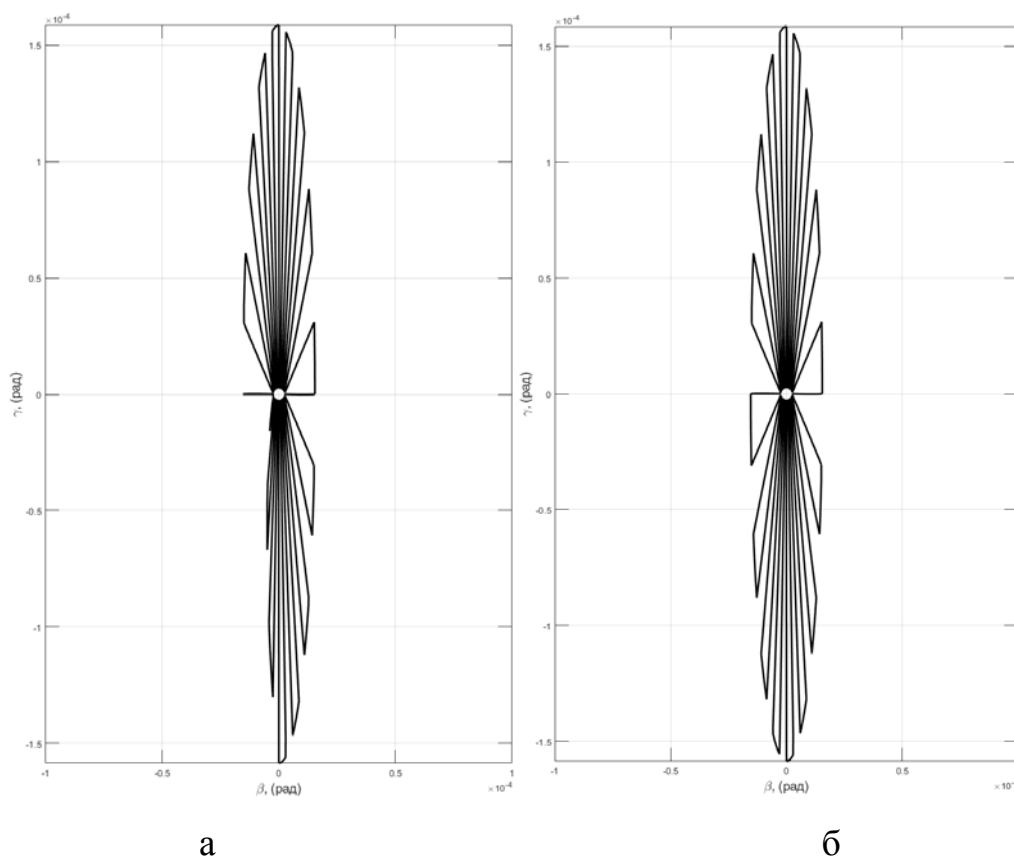


Рисунок 4.62 – Траєкторія руху кінця шпинделя

Моделювання прецесійного руху шпинделя верстата при фрикційному обробленні здійснюємо зі зміною кутової швидкості  $\omega = 300 \dots 700 \text{ с}^{-1}$  та з постійною силою притиску, яка рівна  $F = 1000 \text{ Н}$  (рис. 4.63а). При збільшенні кутової швидкості більший радіус еліпса, який описує кінець шпинделя зменшується. А при моделюванні прецесійного руху шпинделя верстата при фрикційному обробленні зі зміною сили притиску  $F = 500 \dots 1500 \text{ Н}$  та з постійною кутовою швидкістю  $\omega = 500 \text{ с}^{-1}$ , можна зробити висновок, що при

збільшені сили притиску більший радіус еліпса, який описує кінець шпинделя збільшується (рис. 4.63б).

На основі аналізу даних моделювання побудовані графіки переміщення кінця шпинделя при зміні кутової швидкості та сили притиску інструмента до деталі з врахуванням дії гладкої частини інструмента та проходженням пазу над зоною контакту (рис. 4.64).

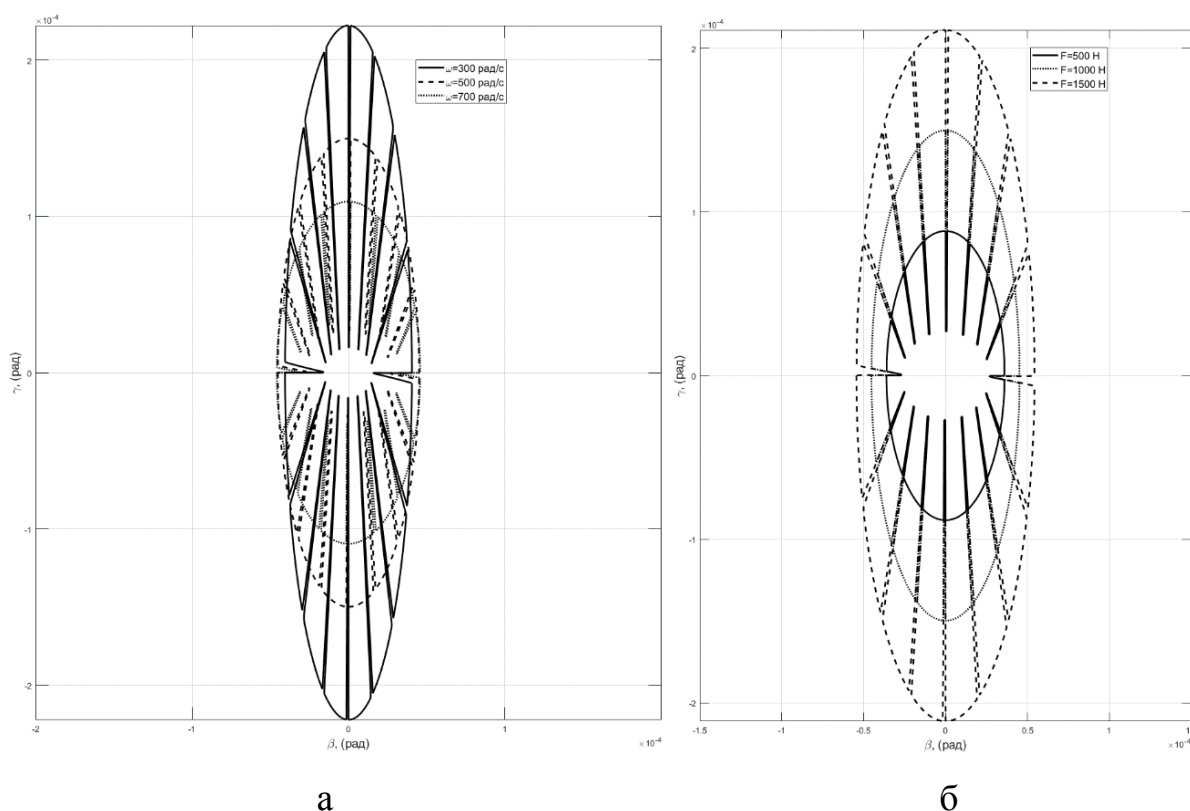


Рисунок 4.63 – Траєкторія руху кінця шпинделя: а – при зміні кутової швидкості і силі притиску  $F = 1000 \text{ H}$ , б – при зміні сили притиску і сталі кутовій швидкості  $\omega = 500 \text{ c}^{-1}$

Отримані дані траєкторії переміщення двох кінців шпинделя, які описують еліпс під час фрикційного оброблення, під дією гіроскопічних явищ, що діють на прецесійний рух шпинделя верстата виконаємо візуалізацію по трьох координатах (рис. 4.65).



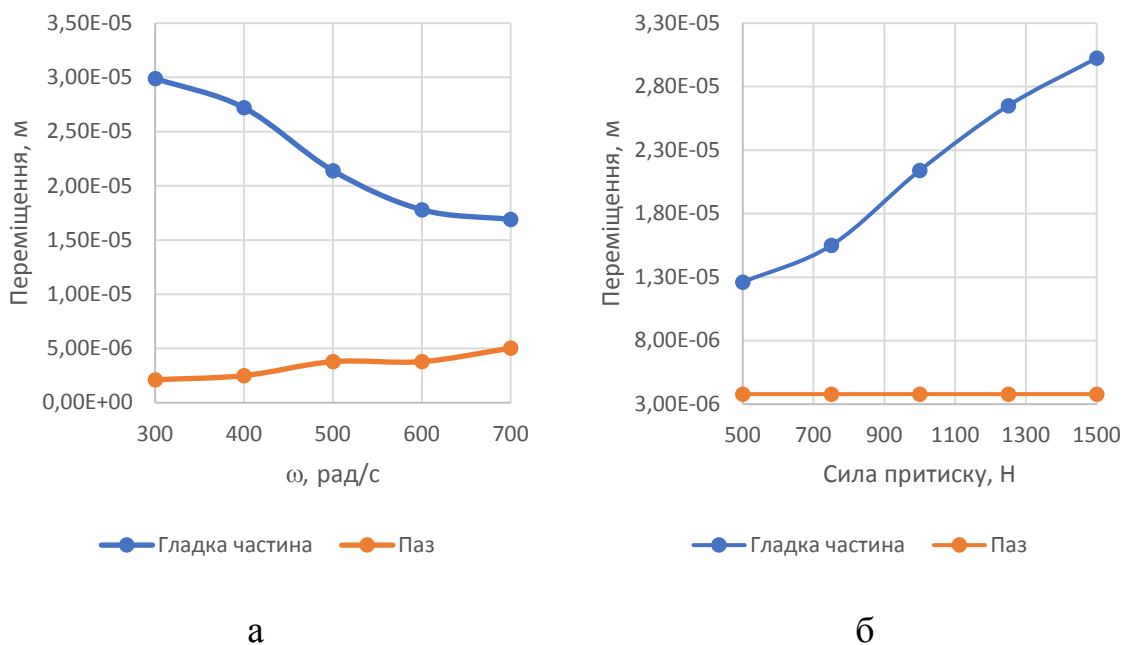


Рисунок 4.64 – Залежність переміщення кінця шпинделі від: а – зміни кутової швидкості, б – зміни сили притиску інструмента до деталі

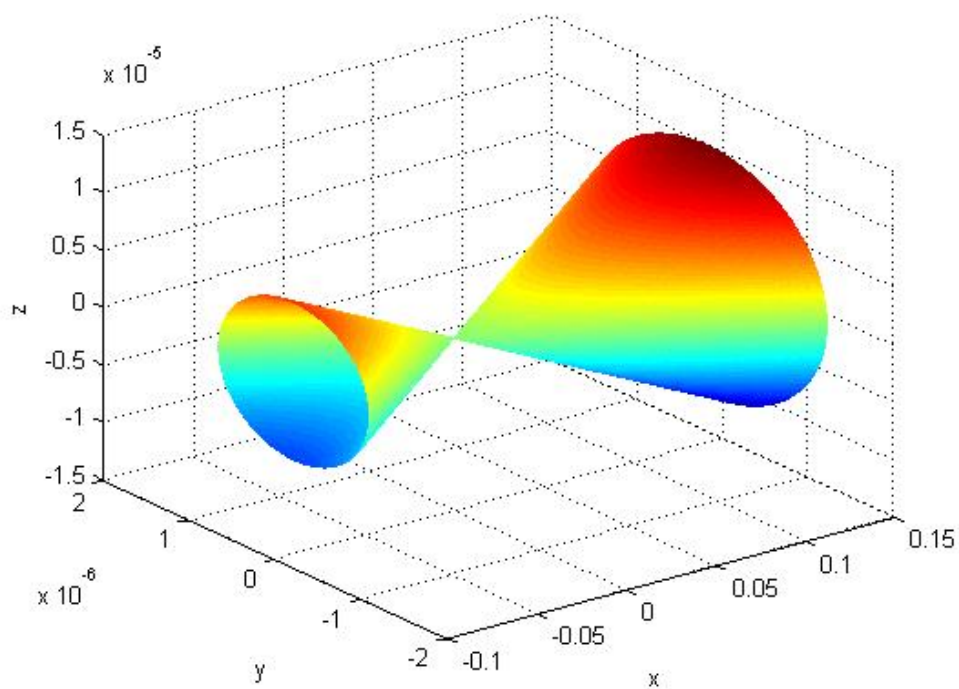


Рисунок 4.65 – 3D зображення траєкторії переміщення шпинделя

## Висновки до розділу 4

1. Розроблена математична модель тримасової коливальної системи процесу перервного фрикційного оброблення плоских поверхонь деталей машин;
2. Розроблена математична модель тримасової коливальної системи процесу перервного фрикційного оброблення циліндричних поверхонь деталей машин;
3. Розроблена імітаційна модель динамічних процесів перервного фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин у пакеті MATLAB-Simulink з єдиним графічним інтерфейсом GUI;
4. Визначено на основі розв'язку імітаційної моделі частоту ударних навантажень зони оброблення інструментом, що має на робочій частині пази, ширина та кількість яких змінна при моделюванні.
5. Розроблена математичні та імітаційні моделі у середовищі Mathcad визнання АЧХ процесу перервного фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин. Визначено кількість пазів, які розташовані на периферії інструмента, що вводять динамічну систему у явище резонансу (для плоскошліфувального верстату – 7...12 пазів; для токарного верстата – 8...10 пазів);
6. Експериментально визначено баланс жорсткості плоскошліфувального та токарного верстатів;
7. Експериментально визначено коефіцієнт в'язкого опору для плоскошліфувального та токарного верстатів;
8. Розроблена математична та імітаційна модель гіроскопічних явищ при фрикційному перервному обробленні при холостому та робочому ходах.

## РОЗДІЛ 5

### ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ФРИКЦІЙНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЗМІЦНЕНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

#### 5.1 Структура, глибина і мікротвердість зміцнених поверхневих шарів

Фрикційне оброблення відноситься до методів поверхневого зміцнення з використанням висококонцентрованих потоків енергії. Потік енергії формується під час тертя інструмента по оброблюваній деталі. При цьому проходить одночасне швидкісне зсувне деформування металу оброблюваної поверхні та поверхневого шару. Швидкість нагрівання складає порядку  $10^5$ - $10^6$  K/c. За дуже короткий час поверхневі шари металу оброблюваних деталей нагріваються до температур, які перевищують точки фазових перетворень ( $A_{c3}$ ). Товщина нагрітого шару металу є невеликою і при відведенні джерела теплової енергії його охолодження проходить з дуже великими швидкостями внаслідок відведення тепла у глибину металу деталі. Швидкість такого охолодження є наближено у  $10^3$  рази більшою, у порівнянні зі звичайним гартуванням. Під час звичайного гартування фіксується нерівноважний стан та відповідна структура металу, яка утворилася за рахунок дифузійних процесів, які протікають під час повільного нагрівання. Під час високошвидкісного нагрівання і охолодження часу для формування відповідних структур і фаз є недостатньо. Під час високошвидкісного охолодження поверхневих шарів зафіксується такий стан металу, при якому із твердого розчину окремі фази не встигають виділитися або таке виділення не повністю завершується. Під час охолодження з високою швидкістю розігрітого заліза до високих температур фіксується  $\gamma$ -фаза. Формування мартенситу відбувається за рахунок того, що вуглець переходить у тетраедричні пори  $Fe_\alpha$ , або залишається у розчині. При таких швидкостях охолодження він не встигає сформуватися як цементитні утворення. У

сформованій структурі концентрація вуглецю є значно більшою за концентрацію, яка властива точці мартенситного перетворення [148, 154, 156]. У поверхневих шарах металу деталей формується специфічний структурно-напружений стан металу - білий шар з нанокристалічною структурою.

Фізико-механічні властивості зміцнених білих шарів з нанокристалічною структурою, в основному, залежать від вмісту в них вуглецю. Проведені дослідження показали, що зі збільшенням кількості вуглецю в сталях збільшується кількість залишкового аустеніту, а також карбідної фази. Що сприяє збільшенню товщини та твердості поверхневого зміцненого шару. Для покращання властивостей поверхневого зміцненого шару використовується насичення та легування його різними хімічними елементами, складовими технологічних середовищ. Основу технологічних середовищ, здебільшого, складає мінеральна олива з низькою в'язкістю. У деяких випадках можна використовувати звичайну водопровідну воду. Використовуючи мінеральну оливу як технологічне середовище під час фрикційного оброблення, у поверхневих шарах формуються збільшена густина дислокацій, яка впливає на процеси масопереносу і сприяє збільшенню вмісту вуглецю. До технологічного середовища для наугличення на основі мінеральної оливи додавали відходи виробництва поліетилену марки Г (ТУ 6-05-36-9-79). Поліетилен володіє антифрикційними властивостями, добре розчиняється у мінеральній оливі, покращує ефективність технологічного середовища за рахунок підвищення адгезійної міцності його до металу оброблюваної поверхні, а також утворює продукти термомеханічної деструкції полімеру середовища для формування активного атомарного вуглецю. Продукти, які утворилися під час деструкції полімеру, адсорбуються на оброблюваній ювенільній поверхні, понижують поверхневу енергію, що полегшує процес деформування.

Здатність технологічного середовища насичувати поверхневий шар металу залежить від його хімічного складу, вмісту різних компонентів. Так, насичувальна здатність вуглицем залежить від вмісту у ньому відходів

поліетилену, а саме низькомолекулярного поліетилену. Найбільш ефективним є середовище з вмістом відходів поліетилену біля 10 %. Під час насичення поверхневих шарів вуглець, в основному, розташовується межами зерен, що значно впливає на формування зміцнених білих шарів з нанокристалічною структурою.

Для покращання фізико-механічних та експлуатаційних властивостей деталей проводили мікролегування азотом та міддю. Азотування проводили під час фрикційного оброблення з використанням як технологічне середовище 10 % водяний розчин амінілу (ТУ-6-00-5743167-106-90). Під час фрикційного оброблення у зоні контакту інструмента з оброблюваною поверхнею проходить термодеструкція, розкладання технологічного середовища на складові хімічні елементи та масоперенос їх у поверхневі шари металу.

Як технологічне середовище під час фрикційного оброблення використовували мінеральну оливу, мінеральну оливу з полімервмісними добавками, водопровідну воду, водяний розчин амінілу. Останнє середовище використовується під час мікролегування поверхневого шару азотом. Усі технологічні середовища, що використовуються під час оброблення містять водень. Для дослідження впливу на формування зміцнених шарів проводили фрикційне оброблення без використання технологічного середовища, а також попередньо наводнені зразки.

Під час фрикційного оброблення проходить локальне нагрівання зони контакту інструмент-деталь за рахунок високошвидкісного тертя робочої поверхні інструмента по оброблюваній поверхні деталі. Розміри зони контакту залежать від форми оброблюваної поверхні, розмірів робочої поверхні інструмента та деталі, пружних характеристик матеріалу оброблюваної деталі, складових сил взаємодії, які виникають у зоні контакту під час оброблення, режимів оброблення. Час одиничного контакту і кількість проходів інструмента по оброблюваній поверхні залежать від режимів оброблення, а також співвідношення ширини робочої частини інструмента до величини поперечної подачі.

На формування структурно-напруженого стану металу суттєво впливають режими фрикційного оброблення, використовуване технологічне середовище, матеріал, форма робочої частини зміцнювального інструмента, метод подачі технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь та інші чинники.

Поверхневий шар під зоною контакту інтенсивно нагрівається до високих температур, а після переміщення інструмента із зони контакту інтенсивно охолоджується. У ньому виникають великі градієнти температури та напружень. На оброблюваній поверхні деталі адсорбуються молекули технологічного середовища, яке подається у зону оброблення. Під дією високошвидкісного тертя у зоні контакту інструмент-деталь технологічне середовище розкладається на складові хімічні елементи. Також проходить інтенсивне виділення водню за рахунок трибодеструкції водневмісних технологічних середовищ. За рахунок інтенсивного тертя на оброблюваній поверхні деталі у зоні контакту інструмент-деталь видаляються оксидні плівки і утворюються ювенільні (чисті) поверхні. Під час тертя між контактуючими поверхнями деталей виникають великі електричні і електроємні явища внаслідок яких проходять процеси руйнування молекул води, оливи і утворення атомів водню, кисню, вуглецю та інших елементів. Проходить дифузія водню у деформований шар. Швидкість дифузії збільшується, зі зростанням градієнту температур і напружень [296, 297].

Під час фрикційного оброблення технологічне середовище подається у зону оброблення методом поливу. За рахунок високошвидкісного обертання інструмента навколо його робочої частини формується повітряна оболонка, яка утруднює попадання технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь. Для забезпечення подачі технологічного середовища у зону контакту розроблено конструкцію інструмента для подачі технологічного середовища безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь через його корпус. На робочій поверхні інструмента знаходяться пази, у які виходять радіальні отвори, через які технологічне середовище подається безпосередньо

у зону контакту інструмента з оброблюваною поверхнею зразка. Технологічне середовище подається на ювенільні (чисті) поверхні, які виникають у зоні контакту інструмента з оброблюваною поверхнею. За рахунок тертя інструмента по оброблюваній поверхні з неї усуваються усі оксиди, адсорбовані частинки з зовнішнього середовища, тобто отримується фізично чиста поверхня, zdeформована, нагріта до температур вище 1000 °С, проходять на ній і під нею у поверхневому шарі фазові і структурні зміни, подрібнюється структура. Така поверхня є дуже активною, тому при попаданні безпосередньо на неї технологічного середовища процеси масопереносу складових хімічних елементів його пришвидшуються.

Після трибодеструкції технологічного середовища водень перебуває у дифузійно-активній формі (іонній) і розчиняється у кристалічній ґратці металу поверхневого шару. Концентрація водню досягає рівноважного стану, яка залежить від температури, напружень, електричних і магнітних полів, що виникають у зоні оброблення. Ця форма водню є зворотною і вона не впливає на крихкість сталі [298, 299].

Відомо, що водень у металі негативно впливає на працездатність деталей машин, за рахунок водневого окрихчення. Водневе окрихчення сталей відбувається за рахунок водню який є у молекулярному стані і він знаходиться у дефектах кристалічної решітки. Наводнення поверхневого шару металу під час процесу тертя немає спільних рис з водневою крихкістю ні за джерелами наводнювання, ні за інтенсивністю і характером розподілу водню в металі [300].

Також відомо, що водень позитивно впливає на протікання технологічних процесів поверхневого оброблення деталей машин (пластичне деформування, різання тощо), підвищуючи продуктивність та якість оброблених поверхонь. Під час взаємодії водню з металом проходить ослаблення взаємозв'язків між поверхневими атомами металу, що сприяє створенню позитивного градієнта властивостей міцності від поверхні у

глибину металу. Такий градієнт властивостей у поверхневому шарі зменшує коефіцієнт тертя, а також полегшує процеси формоутворення робочих поверхонь деталей під час різання та обробленні тиском [301, 302].

Для проведення модельних досліджень впливу параметрів фрикційного оброблення на формування зміцненого шару, його властивостей використовували зразки, виготовлені з армко-заліза.

Металографічні дослідження показали, що під час фрикційного оброблення з використання різних технологічних середовищ зразків з армко-заліза у його поверхневому шарі формується зміцнений нанокристалічний шар різної товщини і твердості.

При застосуванні як технологічне середовище мінеральної оливи в зоні контакту відбувається розкладання її на атомарний вуглець та водень, які дифундують у поверхневі шари деталі і сприяють формуванню зміцненого шару. На формування якісного зміцненого шару, в основному, впливає вуглець, який дифундує з технологічного середовища. Товщина шару складала біля 15-20 мкм (рис. 5.1).

При застосуванні як технологічне середовище води джерела дифузії вуглецю з технологічного середовища немає, але тим не менш зміцнений шар формується. Його товщина є найменшою і складала біля 15-20 мкм. Для формування зміцненого шару вуглець може дифундувати у поверхневий шар металу зразка з поверхні оброблюваного інструмента. Під час використання як технологічне середовище мінеральну оливу з полімервмісними добавками зміцнений шар має більшу товщину (50-60 мкм), у порівнянні зі обробленням з використанням мінеральної оливи. Зміцнений шар найбільшої товщини отримано під час оброблення з використанням як технологічного середовища мінеральної оливи з полімервмісними добавками і подачею технологічного середовища через корпус інструмента безпосередньо у зону контакту інструмент – оброблювана поверхня зразка. Товщина шару складала біля 30-40 мкм. Під час оброблення зразків з армко-заліза без використання технологічного середовища зміцнений шар не значної товщини (до 5 мкм)



формується перервним,.

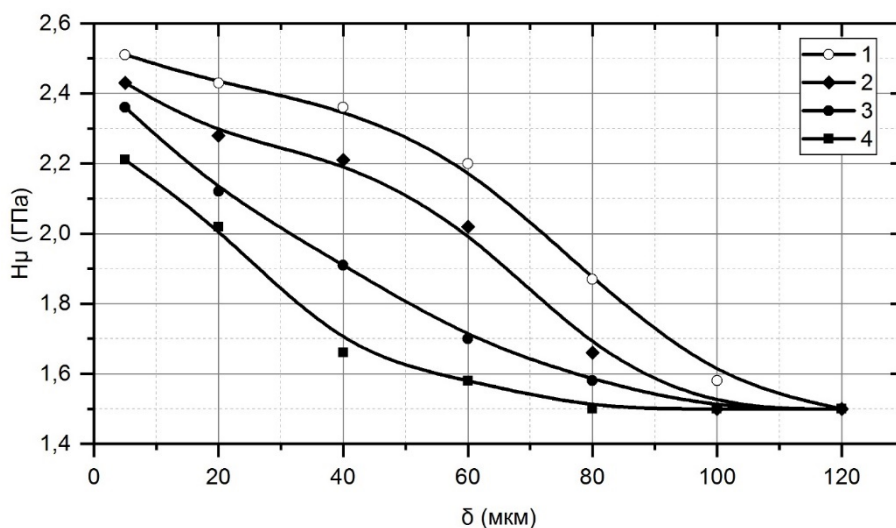


Рисунок 5.1 – Мікротвердість армко-заліза з використанням різних середовищ: 1 – мінеральна олива з полімервмісними добавками і подачею середовища безпосередньо у зону контакту; 2 – мінеральна олива з полімервмісними добавками; 3 – мінеральна олива; 4 – вода

Дослідження мікротвердості зразків з армко-заліза після фрикційного оброблення із застосуванням різних технологічних середовищ показали, що найбільше значення мікротвердості (2,51 ГПа) отримано біля обробленої поверхні після використання як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками і внутрішньою подачею технологічного середовища безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь. Дещо менша мікротвердість (2,43 ГПа) отримано після використання мінеральної оливи. Технологічне середовище у зону оброблення подавали методом поливу. Найменша мікротвердість отримана після оброблення з використанням як технологічне середовище води. Після фрикційного оброблення армко-заліза без технологічного середовища мікротвердість обробленого шару незначно відрізняється від вихідної структури.

Під час попадання макромолекул та частинок полімерів полімервмісних добавок у зону контакту проходить їх деструкція за головними зв'язками і утворюються вільні радикали. Деструкція полімерів протікає при

температурах нижчих, ніж рідких вуглеводнів. Фрагменти макромолекул на ювенільних поверхнях оброблюваного металу утворюють хімічні зв'язки з залізом, марганцем, хромом та нікелем. Особливість деструкції полімерів полягає в тому, що при підвищених температурах відбувається ланцюгова деполімеризація фрагментів полімерів і утворюються сітки ненасичених вуглецевих зв'язків та атомарний вуглець, а також виділяється активний водень [303, 304].

Використання полімервмісних добавок до мінеральної оливи як технологічне середовище під час фрикційного оброблення сприяє значному збільшенню товщини і мікротвердості поверхневого шару. Найбільший вплив на формування зміцненого шару має подача технологічного середовища безпосередньо у зону контакту. Під час оброблення середовище розкладається на складові хімічні елементи (атомарний вуглець, водень і інші), які дифундують у поверхневий шар. У складі полімервмісних добавок окрім вуглецю ще містяться компоненти, які під дією високих температур та тисків розкладаються, активують поверхню, зменшують поверхневу енергію та при цьому виділяється активний водень.

Під час фрикційного оброблення сталі 20 у нормалізованому стані при застосуванні мінеральної оливи як технологічне середовище зміцнений (білий) шар формується тонким, товщиною не більше 30-40 мкм (рис. 5.2). Вмісту вуглецю у сталі 20 є недостатньо для проведення об'ємної термічної обробки деталей, виготовлених з даної сталі. Але під час фрикційного оброблення у поверхневих шарах металу зразків формується зміцнений шар. На формування зміцненого білого шару впливає технологічне середовище і метод подачі його у зону оброблення [305].

При додаванні полімервмісних добавок до мінеральної оливи товщина білого шару різко зростає і складає 80-100 мкм. Зміцнений шар найбільшої товщини і мікротвердості отримується при використанні як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками і подачею технологічного середовища безпосередньо у зону контакту. Він отримується

рівномірним по всій довжині, товщина складає 110-130 мкм.

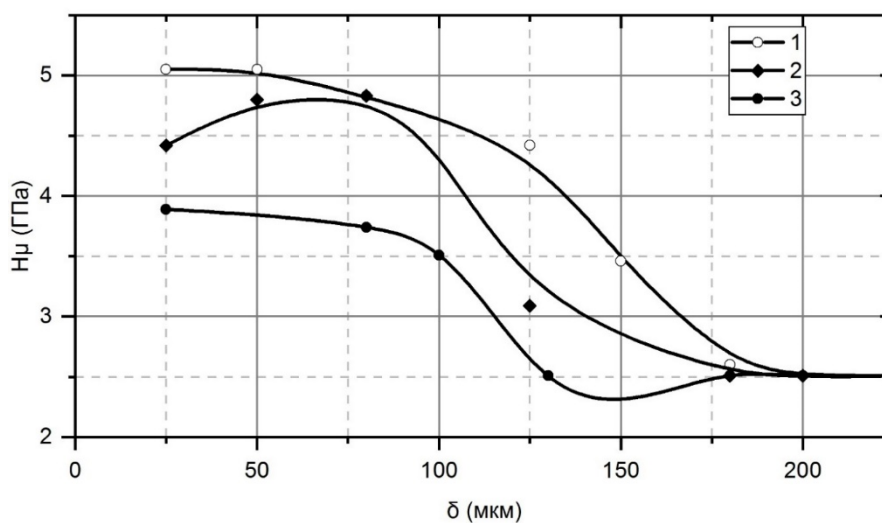


Рисунок 5.2 – Мікротвердість сталі 20 із використанням різних середовищ: 1 – мінеральна олива з полімервмісними добавками і подачею середовища безпосередньо у зону контакту; 2 – мінеральна олива з полімервмісними добавками; 3 – мінеральна олива

Суттєво впливає в процесі фрикційного оброблення на мікротвердість сталей 20 застосування як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками, а також метод подачі технологічного середовища у зону обробки. Так, мікротвердість білого шару, отриманого на сталі 20 із використанням мінеральної оливи з полімервмісними добавками, складає 4,6-4,8 ГПа, мінеральної оливи з полімервмісними добавками і подачею середовища безпосередньо у зону контакту – 5,0 ГПа, а застосуванні мінеральної оливи – 3,2 ГПа при твердості 2,6 ГПа основної структури.

На формування зміцненого шару впливають різні характеристики процесу оброблення: параметри форма робочої поверхні інструмента (напрямок пазів, їх кількість і розміри), технологічне середовище і метод його подавання у зону оброблення або контакту [306, 307].

Проведені дослідження показали, що форма робочої поверхні значно впливає на формування зміцненого шару під час фрикційного оброблення. Дослідження проводили на зразках, виготовлених зі сталі 40X після гартування і низького відпуску. Дослідження проводили під час фрикційного

оброблення інструментами з гладкою робочою частиною, з прямими і різнонаправленими пазами на робочій частині та з хвилеподібною робочою частиною. Як технологічне середовище використовувалось мінеральна олива з полімервмісними добавками і подавали його у зону оброблення методом поливу та безпосередньо у зону контакту через корпус інструмента. Отримані результати показали що, зміцнений шар найменшої товщини отримується під час фрикційного оброблення інструментом з гладкою робочою частиною і складає 130-150 мкм (рис. 5.3). Використання інструмента з пазами значно підвищує товщину зміцненого шару, особливо з різнонаправленими. Товщина зміцненого шару збільшується до 300-320 мкм (технологічне середовище подавали у зону оброблення методом поливу). Шар ще більшої товщини отримано під час оброблення з подачею технологічного середовища безпосередньо у зону контакту (400-420 мкм). Зміцнений шар дещо меншої товщини отримується під час фрикційного оброблення інструментом з хвилеподібною робочою частиною і подачею технологічного середовища безпосередньо у зону контакту, яка складала 370-390 мкм.

Під час фрикційного оброблення інструментом з хвилеподібною робочою частиною зміцнений шар отримується меншої товщини, аніж після оброблення інструментом з різнонаправленими пазами, але ми маємо більшу продуктивність процесу оброблення. Ширина смуги, яка є хвилеподібною має майже таку саму ширину як робоча частина інструмента з прямими або різнонаправленими пазами, але загальна ширина робочої частини інструмента є значно більшою. Оброблення проходить з більшими подачами, тому у даному випадку отримуємо більшу продуктивність процесу оброблення, але отримуємо меншу товщину зміцненого шару. Під час дослідження впливу форми робочої частини використовували інструмент однаковою шириною робочої частини рівною 8 мм, кількість і ширина пазів була однаковою і становила 24 пази і 9 мм відповідно. Зовнішній діаметр робочої частини інструмента під час проведення експериментальних досліджень у всіх випадках становив 240 мм. Як технологічне середовище використовувалось

мінеральна олива з полімервмісними добавками і подавали його у зону оброблення методом поливу та безпосередньо у зону контакту.

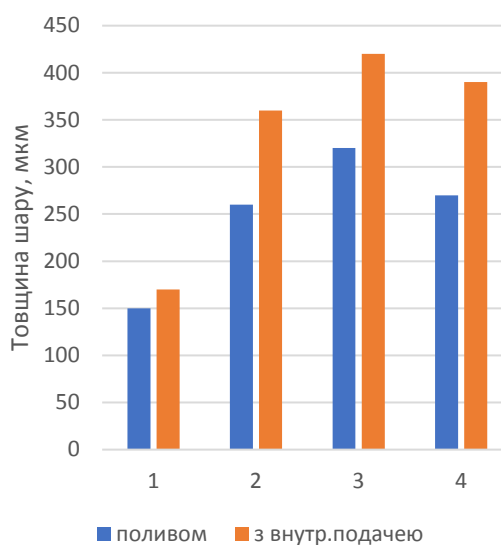


Рисунок 5.3 – Залежність товщини зміцненого шару, отриманого після оброблення інструментом з різною робочою частиною: 1 – гладка; 2 – з поперечними пазами; 3 – з різнонаправленими пазами; 4 – хвилеподібна

Дослідження також показали, що зі збільшенням кількості пазів від 16 до 24 товщина зміцненого шару збільшується. Інструмент використовували з поперечними пазами з однаковою шириною пазів, яка становила 9 мм, з використанням як технологічне середовище мінеральну оливу з полімервмісними добавками і подавали його у зону оброблення методом поливу та безпосередньо у зону контакту. Після фрикційного оброблення інструментом з гладкою робочою частиною товщина зміцненого шару становила 140-150 мкм.

Під використання інструмента з 16 пазами на робочій поверхні і подачі середовища безпосередньо у зону контакту товщина зміцненого шару становила вже 270-290 мкм. Після оброблення інструментом з 24 пазами товщина зміцненого шару збільшилась до 350-360 мкм. Наступне збільшення кількості пазів до 32 приводить до зменшення товщини зміцненого шару до 320-330 мкм (рис. 5.4). Інструмент використовували з однаковою шириною пазів яка становила 9 мм. Інструмент використовували з поперечними пазами.

Як технологічне середовище використовувалось мінеральна олива з полімервмісними добавками і подавали його у зону оброблення методом поливу та безпосередньо у зону контакту. На робочій частині інструмента діаметром 240 мм при ширині пазу 9 мм збільшувати кількість пазів більше 24 є не доцільне, бо товщина зміцненого шару починає зменшуватися. Хоча зі збільшенням кількості пазів збільшується частота ударних навантажень на зону контакту інструмент-деталь під входження чергової гладкої частини в контакт.

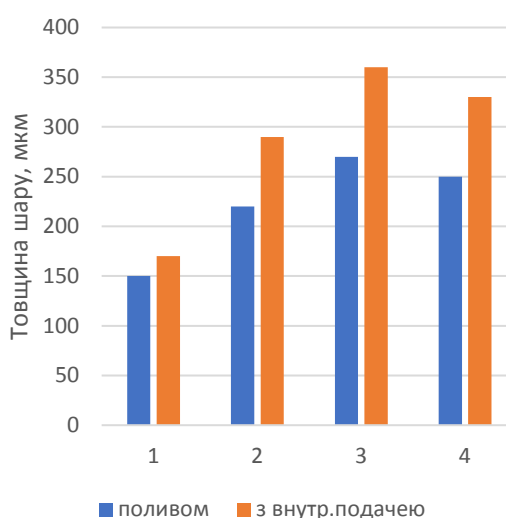


Рисунок 5.4 – Залежність товщини зміцненого шару, отриманого під час фрикційного оброблення інструментом з різною кількістю пазів на робочій частині: 1 – гладка робоча частина; 2 – 16 пазів; 3 – 24 пази; 4 – 32 пази

Проведені експериментальні дослідження показали, що ширина пазів значно впливає на товщину зміцненого шару. Так, під час фрикційного оброблення плоских поверхонь інструментом з зовнішнім діаметром робочої частини інструмента рівним 240 мм з 24 поперечними пазами на робочій частині і подачі технологічного середовища (мінеральна олива з полімервмісними добавками) збільшення ширини пазу від 3 мм до 9 мм приводить до збільшення товщини зміцненого шару від 210-230 мкм до 310-330 мкм. Збільшення ширини пазу до 12 мм приводить до зменшення товщини шару до 280-300 мкм (рис. 5.5). У порівнянні з фрикційним обробленням

інструментом з гладкою робочою частиною товщина зміцненого шару становила лише 140-150 мкм.

Дуже важливим чинником, який впливає на формування зміцненого шару є технологічне середовище, яке використовується під час процесу фрикційного оброблення. Як технологічне середовище, переважно використовується мінеральна олива.

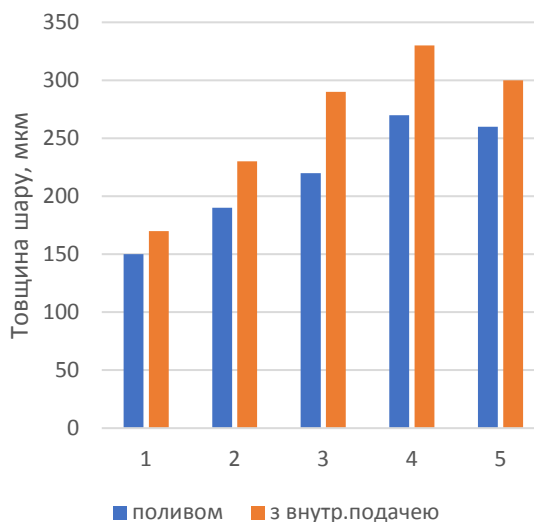


Рисунок 5.5 – Залежність товщини зміцненого шару під час фрикційного оброблення інструментом з різною шириною пазів на робочій частині:

1 – гладка робоча частина; 2 – 3 мм; 3 – 6 мм; 4 – 9 мм; 5 – 12 мм

Мінеральна олива під час оброблення є джерелом вуглецю, який утворюється за рахунок розкладання оливи на хімічні складові. Під час оброблення проходить насичення поверхневого шару металу вуглецем і іншими складовими технологічного середовища. Найбільше на формування якісного зміцненого шару впливає вуглець, а також водень у невеликих концентраціях.

Під час фрикційного оброблення у зону оброблення подається технологічне середовище. Інструмент обертається з великою швидкістю і навколо нього формується повітряна оболонка, яка не дає можливості подавати технологічне середовище у зону контакту інструмент-деталь. Для усунення цього розроблено конструкцію інструмента, який дозволяє

достарчати технологічне середовище безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь. У корпусі інструмента виготовлені радіальні отвори, які виходять у пази і технологічне середовище подається безпосередньо у зону контакту інструмента з оброблюваною поверхнею. За рахунок тертя інструмента по оброблюваній поверхні на ній усуваються адсорбовані частинки, оксиди і інше та поверхня зони контакту стає фізично чистою. При цьому відбувається дифузія вуглецю у поверхневий шар і сприяє збільшенню товщини зміцненого шару.

Експериментальні дослідження впливу методу подачі технологічного середовища у зону обробки проводили методом поливу і безпосередньо у зону оброблення через корпус інструмента. Інструменти мали однакові зовнішній діаметр робочої поверхні рівний 240 мм, нарізані 24 пази шириною 9 мм. При використанні одного інструмента подача технологічного середовища проводилась методом поливу у зону оброблення. Другий інструмент мав виготовлені радіальні отвори, які виходили у пази і технологічне середовище подавали безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь. Як інструмент для порівняння також використовували інструмент з гладкою робочою частиною. Як технологічне середовище використовували мінеральну оливу з полімервмісними добавками.

Проведені експериментальні дослідження показали, що метод подачі технологічного середовища значно впливає на формування зміцненого шару під час фрикційного оброблення. Так, зміцнений шар найбільшої товщини (біля 300 мкм) отримано після фрикційної обробки зразків інструментом з подачею технологічного середовища безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь. Під час оброблення зразків інструментом з пазами і подачею технологічного середовища методом поливу товщина зміцненого шару є меншою і становить 240-250 мкм. Під час зміцнення інструментом з гладкою робочою частиною і подачею технологічного середовища методом поливу товщина зміцненого шару становить лише 150-160 мкм (рис. 5.6).



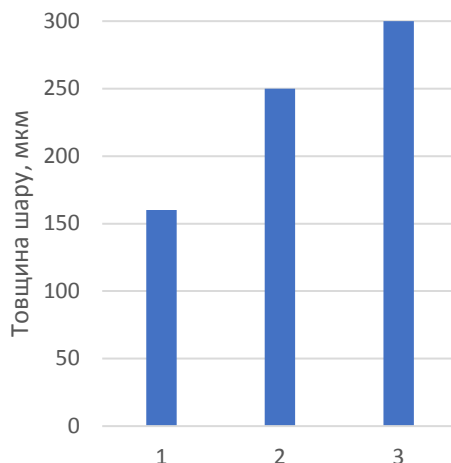


Рисунок 5.6 – Залежність товщини зміцненого шару від методу подачі технологічного середовища у зону оброблення: 1 – оброблення інструментом з гладкою робочою частиною; 2 – подача технологічного середовища методом поливу; 3 – подача технологічного середовища безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь

Побідні результати досліджень отримані під час фрикційного оброблення зразків, виготовлених зі сталі 45 після гартування і низького відпуску. Так, товщина зміцненого білого шару, отриманого після фрикційного оброблення сталі 45 із застосуванням мінеральної оливи складає 130-140 мкм, із застосуванням – мінеральної оливи з полімервмісними добавками – збільшується до 200-220 мкм. У обох випадках технологічне середовище подавали методом поливу, використовуючи систему подавання МОР верстата. Найбільша товщина шару (250-260 мкм) отримується під час оброблення з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками і подачею середовища безпосередньо у зону контакту через корпус інструмента (рис. 5.7). Після фрикційного оброблення сталі 40Х із використанням мінеральної оливи з полімервмісними добавками і подачею технологічного середовища безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь мікротвердість зміцненого шару є найбільшою і складає 9,3 ГПа, з використанням такого ж самого технологічного середовища, але

подачею технологічного середовища методом поливу мікротвердість білого шару також вища у порівнянні з застосуванням при обробленні мінеральною оливою і складає 8,1 ГПа і 7,6 ГПа відповідно, при мікротвердості основної структури рівної 5,1 ГПа (рис. 5.8).

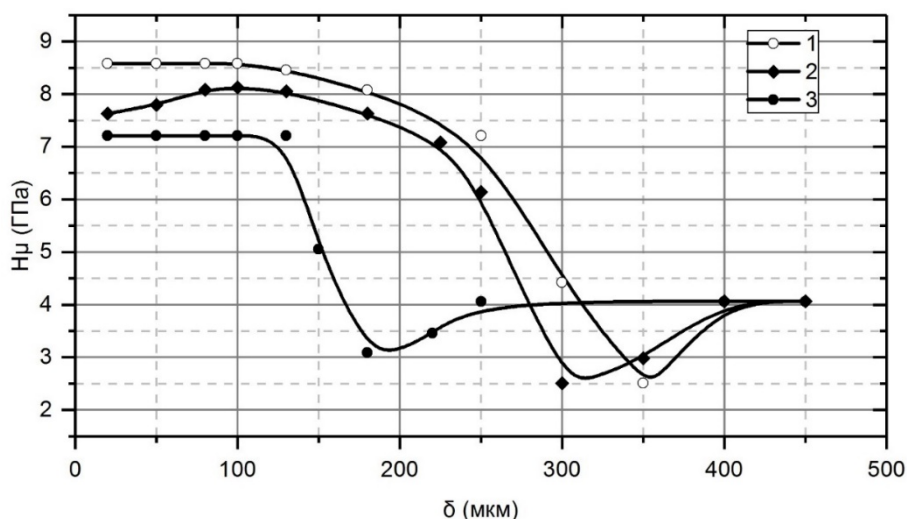


Рисунок 5.7 – Мікротвердість сталі 45 (гартування, низький відпуск) з використанням різних середовищ: 1 – мінеральна олива з полімервмісними добавками і подачею середовища безпосередньо у зону контакту; 2 – мінеральна олива з полімервмісними добавками; 3 – мінеральна олива

Після фрикційного оброблення зразків, виготовлених зі сталей після гартування і низького відпуску стані під зміцненим шаром спостерігається так званий «чорний шар», який має понижену твердість у порівнянні з основною структурою і підвищену травимість.

Застосування в процесі фрикційного оброблення мінеральної оливи з полімервмісними добавками сприяє збільшенню товщини білого шару, його мікротвердості, а також збільшується шар з пониженою твердістю. Шар з підвищеною травимістю і пониженою твердістю утворюється під зміцненим шаром за рахунок відпуску поверхневого шару металу. У даному шарі металу температура потоку теплової енергії різко зменшується і він нагрівається до температур, які є нижчими за точки фазових перетворень. Такого нагрівання є недостатньо для формування зміцненого шару, але достатньо для відпуску

металу основної структури, яка була після гартування і низького відпуску. Виходячи з вище сказаного, утворюється шар металу з пониженою твердістю. Під час фрикційного оброблення зразків, які були після нормалізації такий шар не утворюється (рис. 5.9).

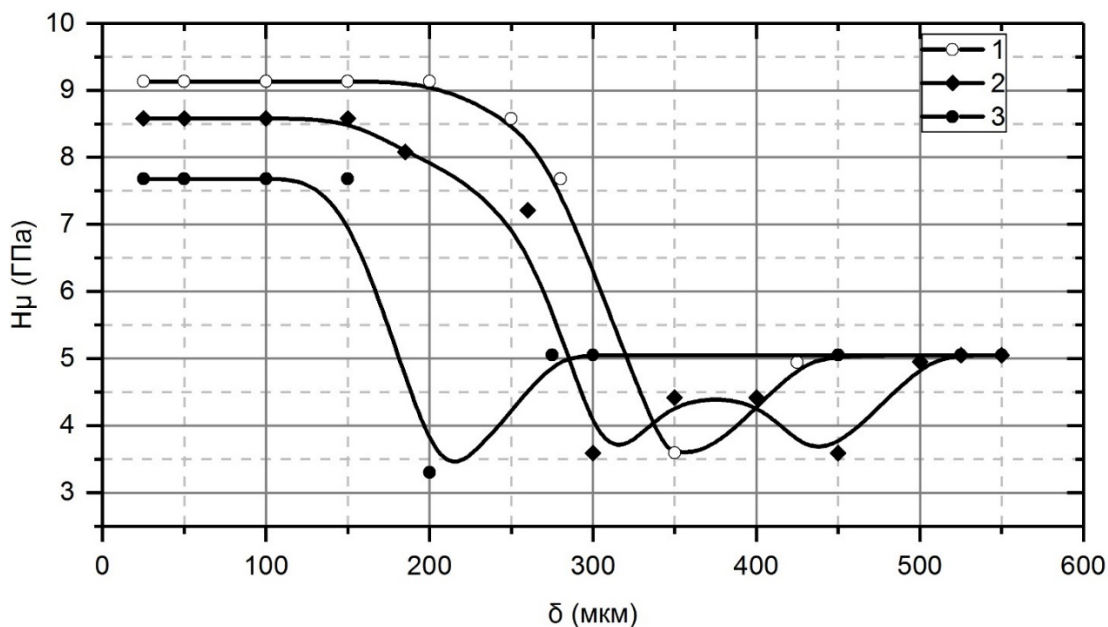


Рисунок 5.8 – Мікротвердість сталі 40X (гартування, низький відпуск) з використанням різних середовищ: 1 – мінеральна олива з полімервмісними добавками і подачею середовища безпосередньо у зону контакту; 2 – мінеральна олива з полімервмісними добавками; 3 – мінеральна олива

Проведені дослідження показали, що на формування зміцненого шару значний вплив має вуглець. Зі збільшенням вмісту вуглецю збільшується товщина зміцненого шару та його мікротвердість.

Водень в металах може знаходитись у різному стані: у формі гідридів; у розчиненому стані; захоплюватися дефектами; входити у склад гідроксиду  $Me(OH)_n$  або води, адсорбованої поверхнею. Водень у металах іонізується і дифундує у вигляді протонів. Під дією слабкого електричного поля атоми водню пересуваються у сторону катоду. У процесах дифузії водню в металах основну роль визначає об'ємна дифузія. Як тільки водень попадає у метал, він іонізується під впливом потенціального поля металу. Водень здатний розчинятися у твердій сталі і дифундувати у її ґратку тільки у вигляді протонів.

На розподіл водню у сталі впливають дефекти її структури.

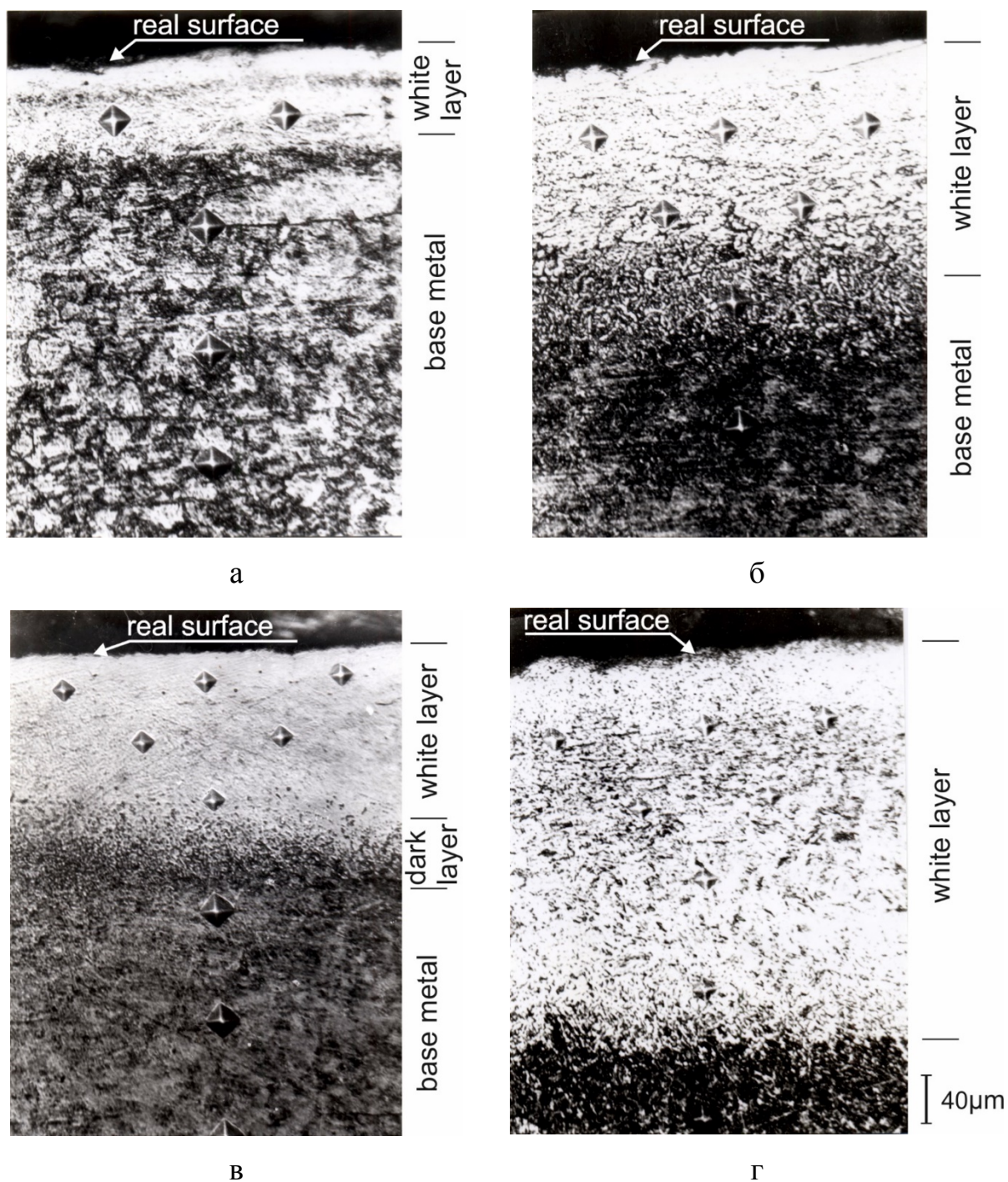


Рисунок 5.9 – Мікроструктура сталі після фрикційного оброблення в різних технологічних середовищах: а – сталь 20 (нормалізація), мінеральна олива; б – сталь 20, мінеральна олива з полімервмісними добавками; в – сталь 45 (гартування, низький відпуск) мінеральна олива; г – сталь 45 (гартування, низький відпуск), мінеральна олива з полімервмісними добавками

Деформування решітки металу і пов'язане з нею підвищення енергетичного рівня, в також розвитком дислокацій і вакансій значно впливає на процес наводнення сталі. Деформування різко збільшує швидкість дифузії водню. Наявність дефектів у кристалах приводить до зміни параметрів розчинення і дифузії водню, виникненню такої аномалії, як зміна форми кінетичної кривої. Збільшення дефектів у сталях запобігає водневому окрихченню.

Формування зміцненого шару суттєво залежить від впливу водню, який є у малих концентраціях. Під час деформування металу на початкових стадіях водень сприяє зародженню і переміщенню дислокацій, понижує енергію дефектів упаковки та напруження текучості матеріалу і збільшує релаксацію напружень, що приводить до пластифікації поверхневого шару [302, 307, 308]. У роботах [297, 298, 309, 310] подано декогезивну концепцію водневого пластифікування металів, яка полягає у тому, що на початкових стадіях деформування водень посилює деформаційні процеси. Це пояснюється декогезивним впливом на послаблення міжатомної взаємодії у кристалічній ґратці та полегшуються умови утворення та переміщення дислокацій, які носіями пластичної деформації.

Вплив водню на формування зміцненого шару проводили на зразках, які були виготовлені зі сталі У8А після гартування і низького відпуску та були попередньо наводнені. Фрикційне оброблення проводили інструментом з поперечними пазами шириною 9 мм з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками. Насичення воднем поверхневого шару зразків проводили електролітичним методом при густині струму  $0,1 \text{ mA/cm}^2$  в 1% розчині  $\text{H}_2\text{SO}_4$  + 2,5 г/л тіосечовини протягом 60 хвилин.

Проведені металографічні дослідження показали, що після фрикційного оброблення наводнених зразків товщина зміцненого шару збільшилась до 380-390 мкм, а мікротвердість збільшилась до 11 ГПа у порівнянні з вихідними (без наводнення) зразками, де товщина шару становила 280-300 мкм, а

мікротвердість – 9,1 ГПа.

Під час фрикційного оброблення інструментом з пазами у поверхневих шарах деталей під зоною контакту інструмент-деталь за рахунок перервного тертя виникають змінні за знаком та величиною деформації, які сприяють дифузії атомів водню у глибину металу. За підвищеної температури та деформацій дифузія водню у металі різко збільшується. Металографічні дослідження показали, що після фрикційного оброблення у поверхневих шарах зразків, виготовлених зі сталей 40ХН та У8А формується зміцнений (білий) шар з нанокристалічною структурою. Товщина і мікротвердість зміцнених шарів залежать від режимів оброблення, форми робочої частини інструмента, вмісту вуглецю у сталі та попередньої термічної обробки зразків.

Після фрикційного оброблення інструментом з гладкою робочою поверхнею зразків виготовлених зі сталі 40ХН, товщина зміцненого шару складала 180-200 мкм, а мікротвердість – 6,8 ГПа при мікротвердості вихідної структури – 5,5 ГПа. Після фрикційної обробки інструментом з різнонаправленими пазами на робочій частині товщина зміцненого шару збільшилась до 200-220 мкм, а мікротвердість – до 7,2 ГПа. Зі збільшенням кількості вуглецю в сталі якість зміцненого шару значно покращується. Найбільш якісний зміцнений шар був отриманий на сталі У8А (гартування і низький відпуск). Як показали дослідження після фрикційного оброблення інструментом з гладкою робочою поверхнею, товщина зміцненого шару досягає 250-280 мкм. Утворений білий шар однорідний з мікротвердістю 9,1 ГПа проти 6,6 ГПа вихідної структури. Зміцнення інструментом з пазами збільшує товщину шару до 300 мкм, а мікротвердість – до 11 ГПа.

Експериментальні дослідження показали, що під час фрикційного оброблення зразків з сірого чавуну СЧ 20 інструментом з поперечними пазами шириною 9 мм і з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками товщина зміцненого шару збільшилась до 160-170 мкм. Твердість зміцненого шару збільшилась до 7,2 ГПа [311].

## 5.2. Перерозподіл хімічних елементів за глибиною зміцненого шару

Під час використання технологічних методів зміцнення поверхневих шарів деталей з використанням висококонцентрованих джерел енергії у них відбувається різке зростання рухливості атомів. Тривалість процесу оброблення є досить коротким, але хімічні елементи переносяться на значні відстані. У процесі таких технологічних методів оброблення встановлена дуже висока (аномальна) швидкість дифузії різних хімічних елементів у поверхневій шарі [31, 33, 45, 53, 102, 103, 172]. Природа таких процесів дифузії не встановлена і не зрозумілий її механізм. Таку дифузію називають масопереносом [103].

Легування поверхневого шару (насичування хімічними елементами) забезпечує збільшення концентрації хімічних елементів у поверхневому шарі металу оброблюваної деталі. У даному випадку можна проводити комплексне легування під час якого здійснюється насичування поверхневого шару відразу декількома хімічними елементами, відповідний вміст і співвідношення їх дозволяють отримати відповідний комплекс властивостей.

У результаті легування суттєво змінюються фізико-хімічні характеристики вихідного металу. Легуючі елементи впливають на температуру плавлення, характер дефектів кристалічної ґратки, на формування зерен і тонкої кристалічної структури, область існування алотропних модифікацій і кінетику фазових перетворень, на дислокаційну структуру і інші властивості сталей.

У більшості випадків під час традиційних процесів поверхневого легування сталей проходить дифузійне насичення хімічними елементами з використанням термічної обробки, в основному, з газового середовища, деколи з обмазок. У результаті хіміко-термічної обробки проходить зміна хімічного складу і структури металу поверхневих шарів деталей. Найбільш широко розповсюдженими процесами є насичення поверхневих шарів вуглецем, азотом, деколи бором, які інтенсивно підвищують зносостійкість

робочих поверхонь пар тертя.

У процесі насичення хімічними елементами поверхневого шару великий вплив має його деформування. Деформування поверхневого шару значно впливає на дифузійні процеси під час оброблення.

Насичення хімічними елементами поверхневих шарів деталей сприяє подрібненню структури, формуванню поверхневих шарів з нанокристалічною структурою та специфічних фізико-механічних та хімічних властивостей, які суттєво впливають на експлуатаційні властивості деталей машин.

Для насичення поверхневого шару металу під час технологічних методів з використанням висококонцентрованих джерел енергії використовують різного роду покриття з елементів, які будуть використані для насичення. Покриття можуть бути нанесені електролітичним та хімічним осадженням, газотермічним напиленням, нанесенням паст, насипанням, з використанням фольги, дроту і інше [103].

Для насичення хімічними елементами з твердих покриттів потрібно поверхневий шар металу розігріти до температур плавлення елементів, якими планується насичування, щоб сформувалися карбіди, оксиди, нітриди тощо. Під час фрикційного оброблення отримання таких температур у поверхневому шарі є не доцільним у зв'язку з можливістю усунення розплавленого шару металу.

У процесі фрикційного оброблення у зону оброблення подається технологічне середовище (рідинне), яке є джерелом хімічних елементів для насичення та для покращання геометричних параметрів оброблюваних поверхонь, а також запобігає процесам схоплювання між контактуючими поверхнями інструмента і деталі. Тому для насичення поверхневого шару металу як технологічне середовище використовуються переважно вуглеводи (мінеральні оливи), молекули яких складаються, в основному, з атомів вуглецю і водню.

Насичення хімічними елементами поверхневого шару проходить, в основному, з технологічного середовища, яке у процесі фрикційного



оброблення під впливом високих температур та тисків розкладається на складові хімічних елементів.

Для підвищення ефективності процесу насичення поверхневого шару металу вуглецем до мінеральної оливи додавали полімервмісні добавки, а саме низькомолекулярний поліетилен. Поліетилен має невисоку термостійкість, легко розпадається з утворенням активних форм вуглецю і водню.

Водень, який виділюється у зоні контакту інструмент-деталь під час процесу різання, сильно впливає на перебудову і розрив міжатомних зв'язків, що понижує міцність металу поверхневого шару [301]. Термодеструкція поліетилену, макромолекули якого складаються з атомів вуглецю і водню, проходить в інтервалі температур 290-350 °С. У процесі різання металів з використанням будь-якого водневовмісного середовища (навіть води) у стружці і оброблюваній поверхні було зареєстровано наявність водню [303]. Концентрація водню в металі під час його оброблення у середовищі з додаванням полімерів приблизно на два порядки більша, ніж у низькомолекулярному. Технологічні середовища з полімерними добавками, пов'язані з зі специфічним термічним розпадом макроланцюгів полімерів. Це дає можливість отримання у зоні різання великої концентрації слабо іонізованого газу, який складається з молекулярного і атомарного водню, а також іонів, радикалів вуглецю [304].

Процеси, які протікають під час різання металів є аналогічними, як під час фрикційного оброблення. У процесі фрикційного оброблення у зоні контакту інструмент виникають температури і тиски, які є більшими, ніж під час процесів різання. Технологічне середовище розкладається на атоми водню та вуглецю, які є дуже активними. На ювенільних поверхнях, які формуються у зоні контакту, проходить насичення поверхневого шару металу у першу чергу вуглецем. Ювенільні поверхні є фізично чистими, мають високу адсорбційну здатність та є каталізаторами дифузійних процесів, Водень, який виділяється у зоні оброблення дифундує у поверхневий шар оброблюваної поверхні, підвищує його пластичність, деформування та інтенсифікує процеси

насичення поверхневого шару вуглецем.

Перерозподіл хімічних елементів у поверхневому шарі зразків визначали за допомогою локальних рентгеноспектральних досліджень, які проводили з використанням мікрозонду MS-46 фірми "CAMECA" (Франція). Визначення хімічного складу проводили за режимами зонду:  $U = 20$  кВ,  $I = 13$  нА. Діаметр електронного променя під час досліджень складав 1 мкм на шліфі, як на поверхні зразка, так і за глибиною. Оброблення отриманих результатів проводилась з використанням прикладної програми *ZOND* [312], яка дозволяє враховувати поправлення на атомний номер хімічного елемента, поглинання і флуоресценцію електронного променя.

Дослідження перерозподілу хімічних елементів під час фрикційного оброблення проводили на армко-залізі. Визначали вплив технологічного середовища, форми робочої частини інструмента та методу подачі технологічного середовища на насичення поверхневого шару металу вуглецем, азотом та міддю. Як технологічне середовище використовували мінеральну оливу, мінеральну оливу з полімервмісними добавками, а також водяний розчин амліну. Інструмент використовували з гладкою робочою поверхнею, з прямими пазами на робочій поверхні. Технологічне середовище подавали у зону оброблення методом поливу, а також безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь через корпус за допомогою радіальних отворів, які виходять у пази.

Проведені дослідження показали, що після фрикційного оброблення зразків з армко-заліза інструментом з гладкою робочою частиною і з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи вміст вуглецю у поверхневому шарі біля поверхні складав 0,62 %. З глибиною вміст вуглецю зменшується і на глибині біля 100 мкм вже не спостерігається. При використанні інструмента з поперечними пазами на робочій частині і використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками вміст вуглецю збільшився до 0,81 %, відповідно

і збільшилась глибина на якій зареєстровано вуглець до 130 мкм. Найбільший вміст вуглецю (0,97 %) біля обробленої поверхні отримано після фрикційного оброблення інструментом з поперечними пазами на робочій частині і подачею технологічного середовища безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь через корпус. Як технологічне середовище використовували мінеральну оливу з полімервмісними добавками. Глибина, на якій виявлено вуглець, становила більше 150 мкм (рис. 5.10).

На процеси насичення поверхневого шару металу суттєво впливає здатність технологічного середовища до деструкції вуглеводнів. Під дією високих температур та тисків у зоні контакту інструмент-деталь проходить розкладання технологічного середовища на складові хімічні елементи, які дифундують у поверхневі шари металу. Вуглець найбільше впливає на формування зміцненого шару, зменшення розміру його зерен. Використовуючи технологічні середовища з полімервмісними добавками збільшуємо кількість вуглецю, який утворюється від процесів деструкції [313].

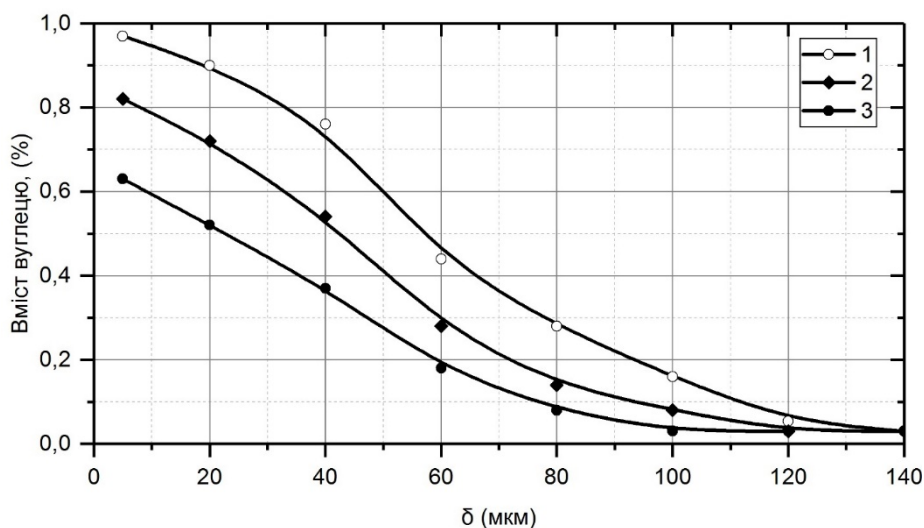


Рисунок 5.10 – Залежність вмісту вуглецю у поверхневому шарі армко-заліза після фрикційного оброблення інструментом з поперечними пазами (1, 2) та з гладкою робочою поверхнею (3) і технологічним середовищем – мінеральна олива (3), мінеральна олива з полімервмісними добавками (1, 2) і подачею методом поливу (2, 3) та безпосередньо у зону контакту (1)

Подібні залежності отримані під час оброблення зразків, виготовлених зі сталі 45 (гартування, низький відпуск) інструментом з пазами на робочій частині з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками і подачею його безпосередньо у зону оброблення.

Проведені дослідження показали, що найменша кількість вуглецю продифундувала після фрикційного оброблення інструментом з гладкою робочою частиною та з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи. Так, вміст вуглецю біля обробленої поверхні складав 1,17 % (рис. 5.11). Зі збільшенням глибини кількість вуглецю зменшується.

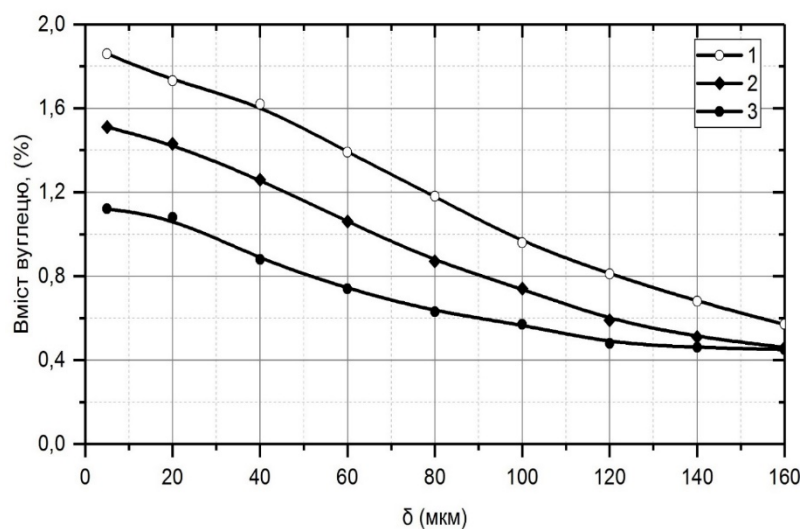


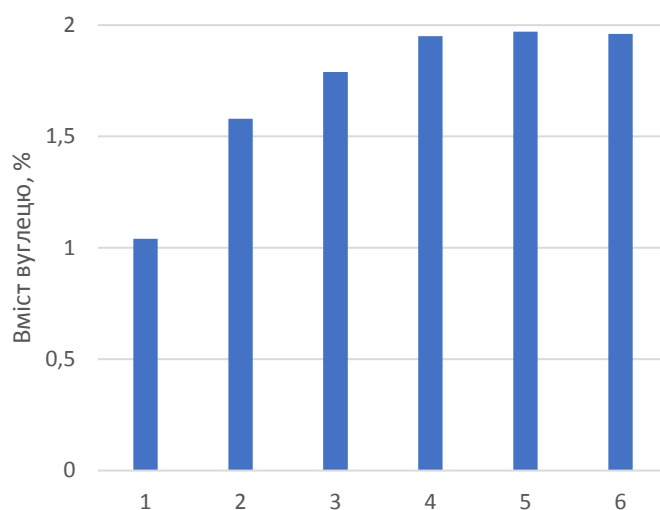
Рисунок 5.11 – Залежність вмісту вуглецю у поверхневому шарі армкозаліза після фрикційного оброблення інструментом з різнонаправленими пазами (1, 2) та з гладкою робочою поверхнею (3) і технологічним середовищем – мінеральна олива (3), мінеральна олива з полімервмісними добавками (1, 2) і подачею методом поливу (2, 3) та безпосередньо у зону контакту (1)

Після фрикційного оброблення інструментом з різнонаправленими пазами на робочій частині і з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками отримано найбільший вміст вуглецю у зміцненому шарі біля оброблюваної поверхні який становив 1,94 %. На процеси насичення вуглецем значно впливає деформування зони

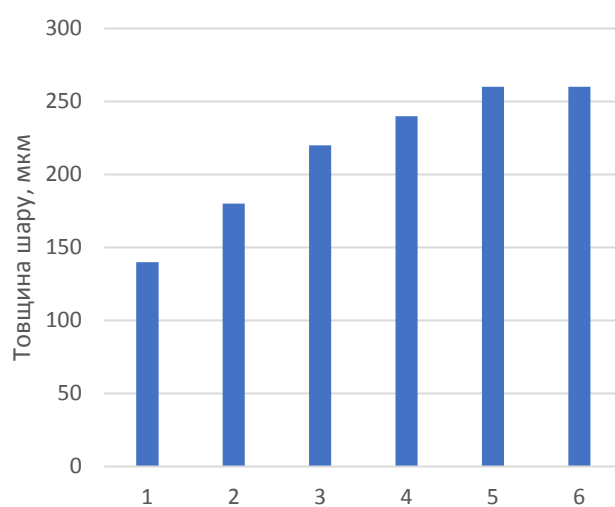
оброблення. Використання інструмента з пазами збільшує ступінь деформування поверхневого шару металу. У попередньо деформованому металі значно збільшується насичення хімічними елементами поверхневого шару. Проведені дослідження показали, що під час фрикційного оброблення зі збільшенням кількості проходів по одному і тому самому місці збільшується товщина зміцненого шару, його твердість, а також кількість вуглецю, який дифундує з технологічного середовища. Збільшення зазначених параметрів проходить до 4-5 проходів інструмента по оброблюваній поверхні, далі відбувається стабілізація формування зміцненого шару. З подальшим збільшенням кількості проходів параметри зміцненого шару практично не змінюються (рис. 5.12). Це відноситься до оброблення як циліндричних так і плоских поверхонь. Виходячи з цього буде вибиратися рекомендована подача інструмента під час оброблення, яка визначається у залежності від ширини робочої частини інструмента. Під час фрикційного оброблення циліндричних поверхонь поздовжня подача інструмента повинна бути:  $l_p/(4 \dots 5)$  мм/об., а плоских поверхонь –  $l_p/(2 \dots 2,5)$  мм/дв. хід стола верстата ( $l_p$  – ширина робочої частини інструмента). Відповідно збільшиться продуктивність процесу оброблення.

Під час використання інструмента з пазами на робочій поверхні у зоні контакту інструмент-деталь виникають додатково ударні навантаження, які збільшують деформування оброблюваної поверхні, а також поверхневого шару металу. Додавання до мінеральної оливи полімервмісних добавків збільшує джерело вуглецю, який може дифундувати у поверхневий шар металу.

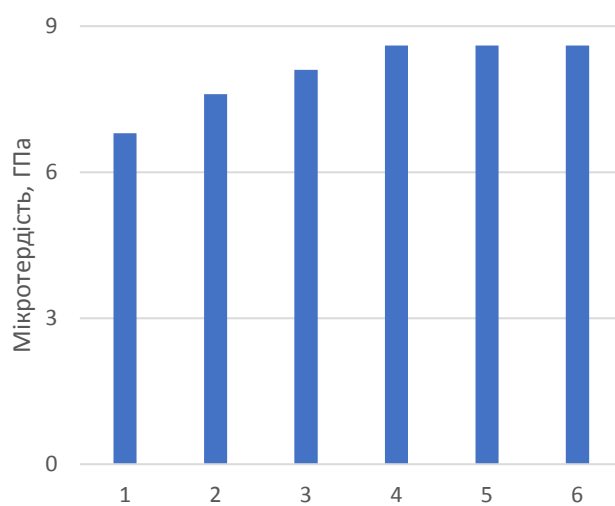
Насичення хімічними елементами зміцненого шару визначається циклічним нагрівом з високим температурним градієнтом та напруженнями, які створюють високі швидкості деформації і градієнти напружень, а також за рахунок фазових перетворень. Такі умови сприяють направленій дифузії хімічних елементів у деформовані шари металу. Деформування металу



а



б



в

Рисунок 5.12 – Залежність вмісту вуглецю (а), товщини (б) та мікротвердості (в) зміцненого шару від кількості проходів інструмента по оброблюваній поверхні

збільшує коефіцієнти дифузії на декілька порядків [115], ніж у стаціонарних умовах. Таке аномальне збільшення швидкості дифузії під час дії концентрованих джерел енергії та імпульсного навантаження поверхневих шарів металу на сьогоднішній день важко пояснити. Можливість поверхневого насичення у процесі фрикційного оброблення і отримання зміцненого шару з нанокристалічною структурою поєднали з покращанням корозійних властивостей за рахунок його азотуванням. Для насичення поверхневого шару азотом використовували як технологічне середовище водяний розчин амліну, яке під дією високих температур розкладається на атоми вуглецю, азоту, водню тощо і які активно взаємодіють з оброблюваною поверхнею і дифундують у деформований поверхневий шар.

Проведені дослідження показали, що після фрикційного оброблення зразків з армко-заліза інструментом з пазами і подачею азотовмісного технологічного середовища безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь вміст азоту біля обробленої поверхні становив 2-2,5 мас.%. З глибиною вміст азоту зменшується і на глибині 50 мкм становив 0,6-0,8 мас.%.

Аналогічні результати отримані під час фрикційного оброблення зразків з сталі 45 (гартування, низький відпуск). У процесі оброблення технологічне середовище подається безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь, де проходить його механо- і термодеструкція. При цьому з технологічного середовища утворюються високоактивні уламки макромолекул, які активно взаємодіють на ювенільних оброблювальних поверхнях, виділяється вуглець, водень, азот, знижують поверхневу енергію, полегшують деформування поверхневого шару і насичують його хімічними елементами.

Розроблена технологія насичення поверхневого шару міддю, яка полягає у масопереносі міді з прутка на робочу поверхню інструмента і з інструмента у поверхневий шар металу зразка. Для її реалізації у захисний кожух для інструмента кріпиться прутком з міді, який притискається до робочої поверхні інструмента. За рахунок високошвидкісного тертя торцевої поверхні прутка по робочій поверхні інструмента у зоні їх контакту виникають високі

температури і мідь розм'якшується і натирається на робочу поверхню інструмента. Далі мідь з робочої поверхні інструмента у зоні контакту інструмент-деталь дифундує у поверхневий шар металу зразка.

Проведені дослідження показали, що після фрикційного оброблення зразків, виготовлених зі сталі 45 (гартування, низький відпуск) біля оброблюваної поверхні вміст міді складав біля 2 мас.% (рис. 5.13). З глибиною вміст міді зменшується і на глибині більше 100 мкм мідь майже не реєструється.

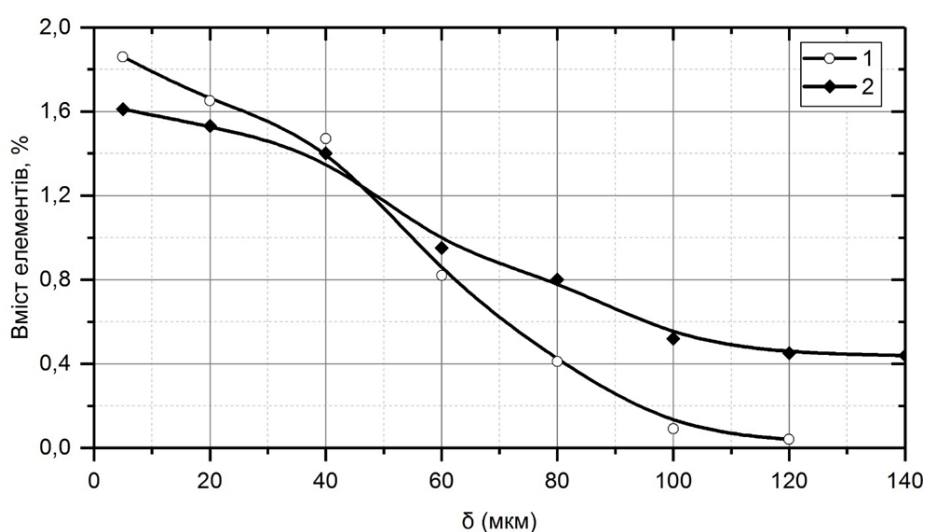


Рисунок 5.13 – Зміна вмісту вуглецю (1) і міді (2) за глибиною зміцненого шару

Зміна хімічного складу поверхневих зміцнених шарів значно залежить від вихідного структурного стану досліджуваних сталей. Збільшення метастабільності сталі вихідних зразків підвищує якість отриманих зміцнених шарів, збільшує вміст насичених хімічних елементів у порівнянні з вихідним металом.

Розроблено технологічні середовища на основі мінеральних олив з додаванням порошків бору, хрому, нікелю для насичення поверхневих шарів металу. Технологічні середовища є джерелом насичення поверхневих шарів металу різними хімічними елементами. Такі технологічні середовища під час фрикційного оброблення забезпечують насичення хімічними елементами поверхневих шарів до 3 %.



Найбільш ефективними під час фрикційного оброблення є технологічні середовища на основі мінеральної оливи з полімервмісними добавками та азотовмісні. Вони забезпечують насичення поверхневих шарів металу вуглецем і азотом. Навуглечення та азотування під час оброблення сприяють формуванню якісних зміцнених поверхневих шарів з нанокристалічною структурою високої твердості і великої товщини та забезпечують підвищення зносостійкості деталей пар тертя.

### **5.3. Фазовий склад поверхневих шарів після зміцнення і легування**

Одним із найпоширеніших способів формування поверхневих нанокристалічних структур є інтенсивна пластична деформація. Таким способом формують об'ємні та поверхневі нанокристалічні структури. Поверхневі нанокристалічні структури формуються технологічно простіше і вони є поширенішими.

Під час інтенсивної пластичної деформації як методу отримання поверхневого зміцненого шару з нанокристалічною структурою мікролокалізація дислокаційних структур проявляє високу залежність від моди деформації зсуву. Кількісна характеристика моди деформації визначається розподілом швидкостей деформації між головними напрямками континуального зсуву і відповідає граничним станам чистого і простого зсуву. Показано, що мода простого зсуву відповідає оптимальній схемі пластичного структуроутворення, в тому числі розвитку висококутових границь і подрібненню і фрагментації структури. Одним із технологічних прийомів реалізації схеми простого зсуву і покращення експлуатаційних властивостей сталей під час фрикційного оброблення є різнонаправлена деформація, яка реалізується з використанням інструмента з різнонаправленими пазами або хвилеподібним профілем на його робочій частині. Використання таких

інструментів дозволяє підвищити продуктивність під час фрикційного оброблення та формувати зміцнений шар з нанокристалічною структурою і рівновісними зернами, які повинні забезпечувати кращі фізико-механічні властивості поверхневих шарів.

У процесі інтенсивного пластичного деформування проходить фрагментація структури до нанорівня. Інтенсивна пластична деформація лімітується зародженням і рухом дислокацій. У свою чергу зародження дислокацій пов'язане із роботою джерела Франка-Ріда.

Простий і надзвичайно ефективний механізм розмноження дислокацій – багатократне поперечне ковзання, яке приводить до утворення дислокаційної лінії великої протяжності, яка переходить із одної паралельної площини в іншу (рис. 5.13). Дислокаційна петля, яка поширюється в площині  $(111)$  г.ц.к. гратки зображена на рис. 5.13а. Частина петлі, яка розташована близько до точки  $M$  має гвинтову орієнтацію. Стикаючись із перешкодою вона починає зісковзувати у площину  $(\bar{1}11)$  (рис. 5.13б) поперечного ковзання. Далі вона переходить із площини  $(\bar{1}11)$  у атомну площину, яка є паралельною до початкової площини ковзання (рис. 5.13в). Часте повторення процесу представленого вище називається багатократним поперечним ковзанням. Таке ковзання призводить до утворення дислокаційної лінії, яка має велику протяжність, а також переходить із однієї паралельної площини в іншу (рис. 5.13в) [314]. Використовуючи зазначені подвійні поперечні ковзання сприяють утворенню джерел Франка-Ріда. При такому ковзанні полегшується зародження дислокацій і відповідно полегшується фрагментація структури.

Виходячи із цього використовується інструмент з різнонаправленими пазами на робочій частині, який реалізує різнонаправлену (з різними модами) деформацію для формування поверхневої нанокристалічної структури. Такий інструмент дозволяє сформувати структуру з меншим розміром зерен і відповідно вищою густиною дислокацій та більшою глибиною зміцненого поверхневого шару. Крім цього знижується шорсткість поверхні. Полегшені

умови генерування дислокацій і фрагментації структури повинні знижувати сили під час оброблення та відповідно енергетичні затрати на формування наноструктури.

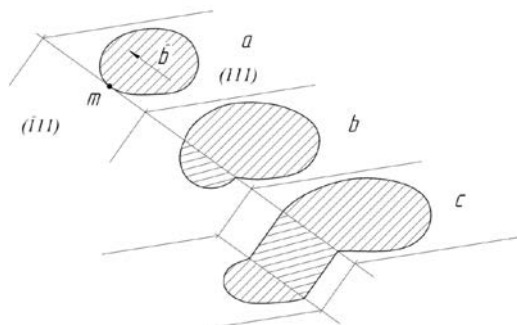


Рисунок 5.14 – Поперечне і подвійне поперечне ковзання петлі змішаної дислокації в г.ц.к. гратці

Фазовий склад поверхневих шарів і величину зерна сталей вивчали на дифрактометри-дифрактографі ДРОН-3 у  $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванні ( $U = 30$  кВ,  $I = 20$  мА) з кроком  $0,05^\circ$  та експозицією у точці 4 с. Обробляли дифрактограми, використовуючи пакет програмного забезпечення CSD [315]. Рентгенограми ідентифікували за картками картотеки JCPDS-ASTM [316]. Розмір зерна на поверхні визначали рентгенівським методом за півшириною піків.

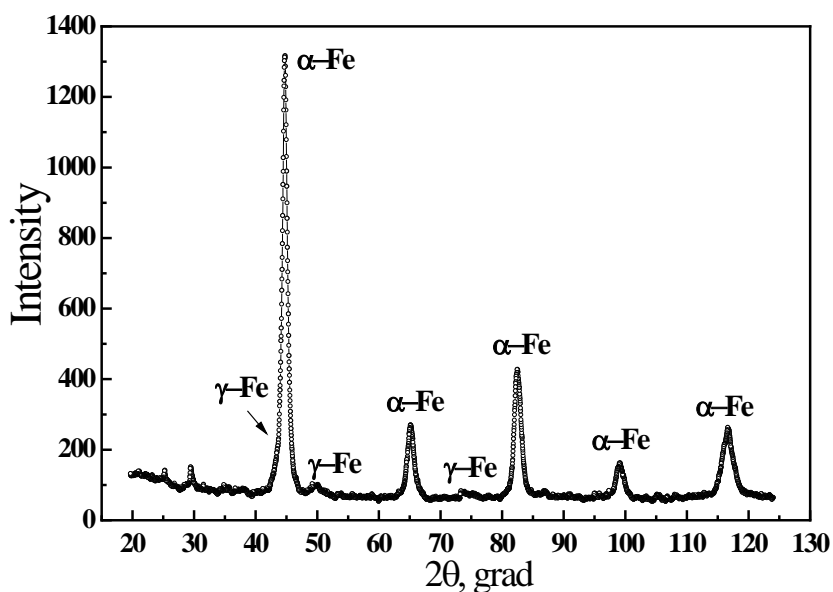
У результаті фрикційного оброблення інструментом з гладкою робочою частиною отримано мартенситну структуру та мартенситно-аустенітну структуру після оброблення інструментом з різнонаправленими пазами. Величина зерна  $\alpha$ -фази складає у першому випадку 10,7 нм та 8,7 нм – у другому. Якщо після оброблення інструментом з гладкою робочою частиною спостерігаємо тільки сліди  $\gamma$ -фази, то різнонаправлена деформація веде до збільшення її кількості до 1,23 % (ваг.). Відповідно мікротвердості відрізняються незначно, однак глибина за обробки інструментом з пазами суттєво збільшується.

Рентгенограми сталі після фрикційного оброблення різними кругами дещо відрізняються (рис. 5.14). Якщо після оброблення інструментом з

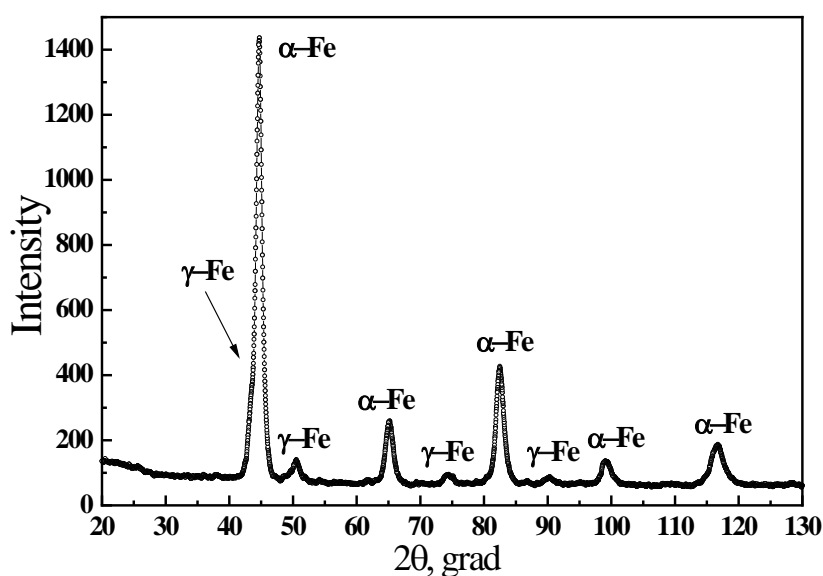
гладкою робочою частиною спостерігаємо тільки сліди  $\gamma$ -фази, тоді після оброблення інструментом з різнонаправленими пазами (ширина пазу становила 9 мм) вона вже чіткіше проявляється до 1,23 мас.% ( $B(111) = 0,719$ ;  $B(311) = 1,234$ ;  $L = 16,4 \pm 1,2$  нм;  $\varepsilon = 0,1$  %;  $\rho = 1,3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>;  $a = 3,6073$  нм;  $X_\gamma = 3,2$  %). Лінії мартенситу є також інтенсивніші за різнонаправленої деформації. Мартенситна фаза формується після оброблення обох зразків інструментами з різною робочою поверхнями, але в останньому випадку відносна деформація ґратки  $\varepsilon$  зростає, а розміри зерен  $L$  зменшуються. Різнонаправлена деформація сприяє формуванню наноструктури та фазоутворенню (табл. 5.1, табл. 5.2)

Дослідження фізико-механічних властивостей проводили на плоских зразках зі сталей 40Х і 65Г. Для визначення механічних властивостей сталей за розтягу використовували плоскі зразки товщиною 1,6 мм (рис. 5.15), поверхні  $A$  і  $B$  яких зміцнювали фрикційним обробленням. Брали до уваги, що властивості поверхнево зміцнених зразків будуть тільки частково відображати ефект поверхневого оброблення. Для зменшення градієнту твердості та властивостей за перетином зразків їх попередньо гартували і відпускали за температури 500°C. Після термічної обробки поверхні  $A$  і  $B$  шліфували електрокорундовим кругом, а потім проводили фрикційне оброблення інструментами з різною робочою частинами.

Для вивчення текстури зерен визначали інтенсивності у двох напрямках, а саме у напрямі деформації вздовж вектора швидкості обертання зміцнювального інструмента і перпендикулярно до нього. Вивчали залежність інтенсивності дифракційного максимуму (110)  $\alpha$ -Fe від кута повороту площини зразка відносно брегівського положення. Брегівське положення є таким положенням площини зразка, в якому нормаль до площини утворює кут ( $90^\circ - \theta$ ) з напрямком первинного та розсіяного променів. На початку експерименту детектор розсіяного випромінювання встановлювали в положення  $2\theta = 44,8^\circ$ , яке відповідає відбиванню від площини (110). Кут повороту зразка ( $\alpha$ ) вимірюється відносно брегівського положення, для якого



а



б

Рисунок 5.15 – Фрагменти дифрактограм зразків зі сталі 40X після фрикційного оброблення інструментами: а – з гладкою робочою поверхнею; б – з різнонаправленими пазами

$\alpha = 0^\circ$ . Змінюючи кут  $\alpha$  у від'ємну сторону, вимірювали залежність інтенсивності максимуму (110) від кута повороту  $I(\alpha)$ . Отримані значення  $I(\alpha)$  нормували на інтенсивність розсіяння максимуму (110) нетекстурованого еталона (карбонільне залізо) в тих же експериментальних умовах. Нормовану інтенсивність розсіяння (полюсну густину) розраховували за формулою:

$$I^*(\alpha) = I(\alpha)/I_e(\alpha)$$

де –  $I_e(\alpha)$  – інтенсивність розсіяння нетекстурованим еталонном.

Таблиця 5.1 – Рентгеноструктурні параметри  $\alpha$ -фази поверхневого шару сталі 40X після фрикційного оброблення інструментами з гладкою робочою поверхнею (1) і з різнонаправленими пазами (2)

№	$B(110)$	$B(310)$	$L, \text{ нм}$	$\varepsilon, \%$	$\rho, 10^{13} \text{ см}^{-2}$	$a, \text{ нм}$
1	0,682	1,552	$10,7 \pm 0,8$	0,077	0,48	0,28654
2	0,873	1,807	$8,6 \pm 0,6$	0,086	0,65	0,28642

Таблиця 5.2. – Мікроструктурні параметри  $\gamma$ -фази в зразку сталі X40, обробленим кругом з нахиленими пазами.

$N$	$B_{(111)}$	$B_{(311)}$	$L, \text{ нм}$	$\varepsilon, \%$	$\rho, 10^{13} \text{ см}^{-2}$	$a, \text{ нм}$	$X_\gamma, \%$	$p, \%$ ( <i>mass.</i> )
2	0.719	1.234	$16.4 \pm 1.2$	0.100	0.31	3.6073	3.2	1.23

Традиційні механічні властивості розтягу визначали на зразках (рис. 5.16) за швидкості переміщення активного захвату 0,5 мм/хв.

Глибина зміцненого шару на сталях 40X і 65Г становила біля 200 мкм, мікротвердість сталі 40X була 8,4 ГПа, а 65Г – 9,6 ГПа за товщини зразка 1,6 мм. Тобто зміцнений шар з нанокристалічною структурою за перетином займає біля 25 % робочого перетину зразка. Структура на сталі 65Г була мартенситно-аустенітна, а на 40X – ферито-аустенітна. Величина зерна на сталі 40X була 62 нм, а на сталі 65Г – 40 нм.

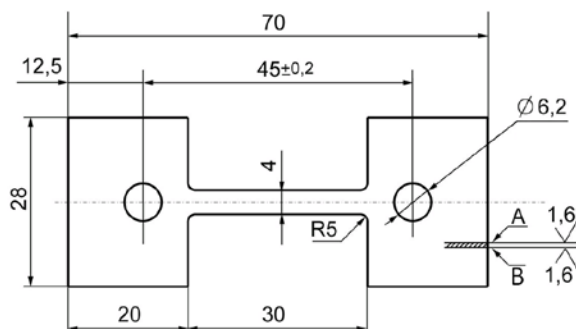


Рисунок 5.16 – Зразок для визначення механічних властивостей сталей за розтягом

Границя міцності зміцненого композиту на сталі 40Х змінюється незначно, однак зразки оброблені з використанням інструментів, що реалізують різнонапрявлену деформацію мають дещо вищу міцність. У той же час границя текучості композиту підвищується майже вдвічі (рис. 5.17). Попередня термообробка до і після фрикційного оброблення підвищує характеристики міцності, що є очікуваним для цих показників. Відносне видовження всіх зразків з поверхневою нанокристалічною структурою дуже низьке що є характерно для нанокристалічних структур на відміну від відносного звуження. Воно згідно критерію Консідера викликане чутливістю наноматеріалів до раннього шийкоутворення і пов'язане з ростом границі текучості при подрібненні зерен. Для нанокристалічних структур отриманих фрикційним обробленням це пов'язане з її переходом у процесі формування на стадію розвинутої пластичної деформації, коли колективні моди еволюції дислокаційного ансамблю викликають у матеріалі не тільки трансляційні зсуви, а і пластичні розвороти.

Сильновзаємодіючі дислокації викликають ротаційні моди пластичності, носіями яких є часткові дисклінації [317]. Вони є носіями ротаційних мод пластичності і в цей же час – це потужне і дуже специфічне джерело внутрішніх далекодіючих напружень.

У процесі випробувань деформація зсувом є дуже утруднена через високу густину дислокацій і можливі тільки пластичні розвороти, що і підтверджують характеристики пластичності, а саме відносне видовження дуже мале і відносне звуження велике і навіть перевищує цей показник для вихідного стану. Автори [314, 317, 318] підтверджують це стверджуючи, що вплив розміру зерна на відносне звуження є результатом впливу дислокаційної субструктури. Якщо стінки чарунок є бар'єрами для росту тріщини, то чим менше розмір чарунки, тим важче росту тріщині і тим більшою буде величина відносного звуження. Після відпуску нанокристалічних структур за 500 °С напруження в ґратці суттєво зменшуються і відносне звуження підвищується до рівня вихідного стану навіть дещо вище за використання хвилеподібного

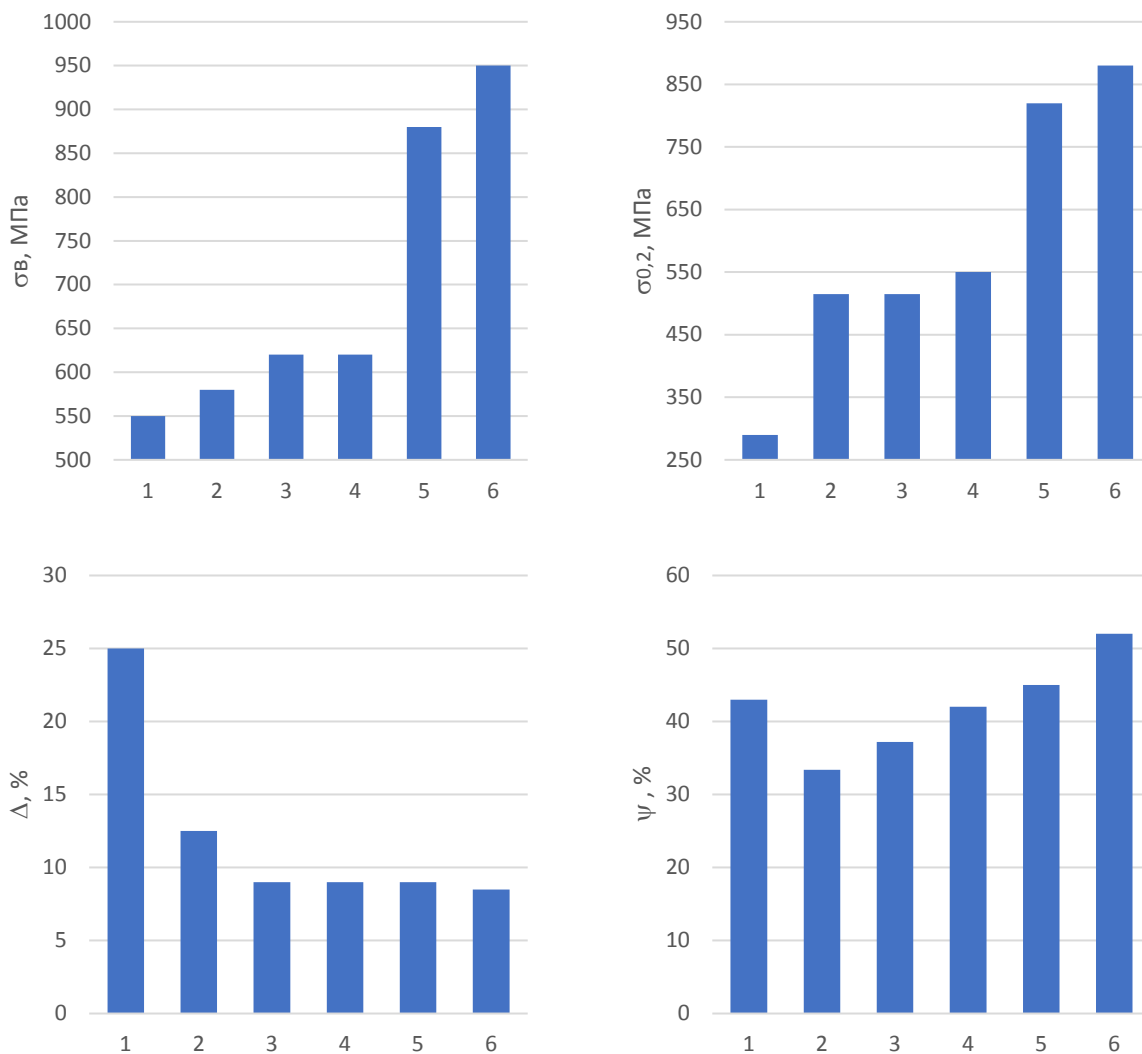


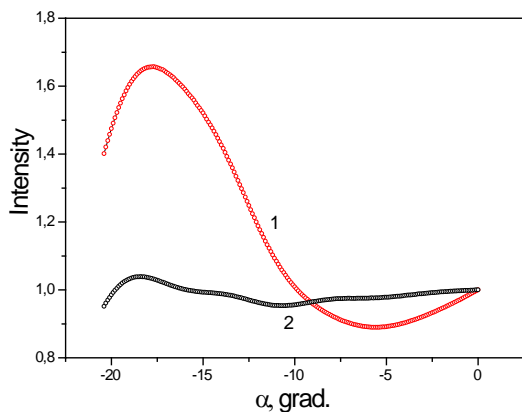
Рисунок 5.17 – Зміна механічних властивостей поверхневих НКС на сталі 40Х залежно від моди деформації після фрикційного оброблення інструментом з робочою частиною: 1 – вихідний стан; 2 – гладкою; 3, 5 – різнонаправленими пазами; 4, 6 – хвилеподібною; 5, 6 – подача технологічного середовища безпосередньо у зону контакту

інструмента. Підвищення характеристик міцності та пластичності за використання інструментів з різнонапрямленою деформацією можна пояснити формуванням нанокристалітів з рівновісною структурою. Електронною мікроскопією на просвіт через складну дифракційну картину це показати складно, тому рентгенівським методом визначали текстуру кристалітів у двох напрямках за використання трьох типів інструмента.

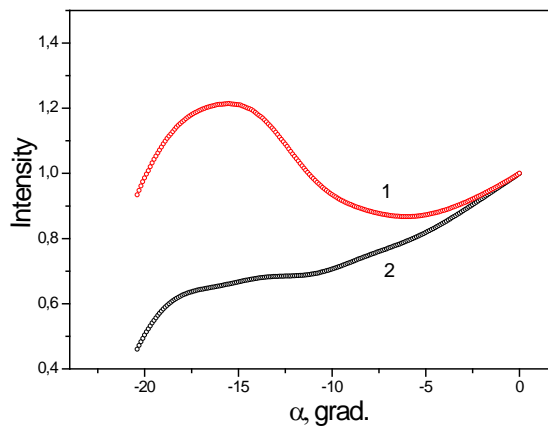
На рис. 5.18 наведені результати проведених вимірювань інтенсивності



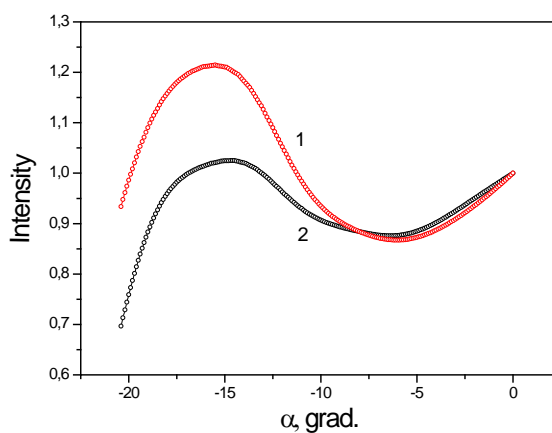
для сталі 40Х, обробленій інструментами трьох типів. На рис. 5.18а наведена залежність нормованої інтенсивності від кута повороту для сталі, обробленій прямим кругом.



а



б



в

Рисунок 5.18 – Залежність нормованої інтенсивності дифракційного максимуму (110)  $\alpha$ -Fe сталі 40Х від кута повороту площини зразка, фрикційне оброблення інструментом з робочою частиною: а – гладкою, б – хвилеподібною, в – різнонаправленими пазами. (1 – вісь гоніометра паралельна напрямку деформації, 2 – вісь гоніометра перпендикулярна напрямку деформації).

Крива 1 вимірювалась в положенні зразка, для якого вісь гоніометра (вертикальний напрямок) була паралельною до напрямку деформації зразка.

Відповідно, крива 2 відповідає перпендикулярній орієнтації напрямку деформації відносно осі гоніометра. Як видно з рис. 5.18а, крива 1 характеризується чітко вираженим максимумом в інтервалі кутів повороту  $\alpha = 15-18^\circ$ . У даному положенні інтенсивність максимуму (110) значно перевищує її значення в брегівському положенні ( $\alpha = 0^\circ$ ).

Тому, можна вважати, що паралельно площині поверхні зразка орієнтуються кристалографічні площини, нормалі до яких утворює кути приблизно  $15-18^\circ$  з нормаллями до площин  $\{110\}$ .

Іншими словами, спостерігається переважаюча орієнтація зерен (анізотропія)  $\alpha$ -фази в певних кристалографічних напрямках. В той же час, крива 2 практично не зазнає змін відносно кутового положення зразка, що підтверджує анізотропний розподіл розмірів зерен. Подібний характер залежностей  $I^*(\alpha)$  спостерігається для зразка зі сталі 40Х, обробленої інструментом з хвилеподібною робочою частиною (рис. 5.18б). На кривій 1 спостерігається максимум на тих же кутах повороту зразка.

Слід відзначити певні зміни в залежності  $I^*(\alpha)$  для перпендикулярної орієнтації зразка (крива 2), зокрема збільшення інтенсивності розсіяння в брегівському положенні ( $\alpha = 0^\circ$ ), що свідчить про переважаючу орієнтацію площин  $\{110\}$  паралельно поверхні зразка. У той же час, у зразку обробленому інструментом з різнонаправленими пазами (рис. 5.18в) криві 1 та 2 виявляють однакову залежність від кута повороту зразка. Оскільки обидві криві відповідають взаємно перпендикулярним орієнтаціям зразка відносно осі гоніометра, можна припустити що в даному випадку розподіл розмірів зерен  $\alpha$ -фази має рівновісний характер.

Зміна механічних властивостей композиту сталі 65Г має подібний характер (рис. 5.19). Однак міцність зразків оброблених прямим інструментом дещо знижується, що можна пояснити наявністю цементиту імовірно по границях зерен. Обробка інструментами з різнонаправленою деформацією підвищує міцність композиту, причому інструмент з різнонаправленими пазами підвищує її набагато більше і це добре пояснюється рентгенівськими

дослідженнями текстури (рис. 5.19б) на якому інтенсивності у двох взаємно перпендикулярних напрямках добре співпадають що свідчить про рівновісну структуру кристалітів.

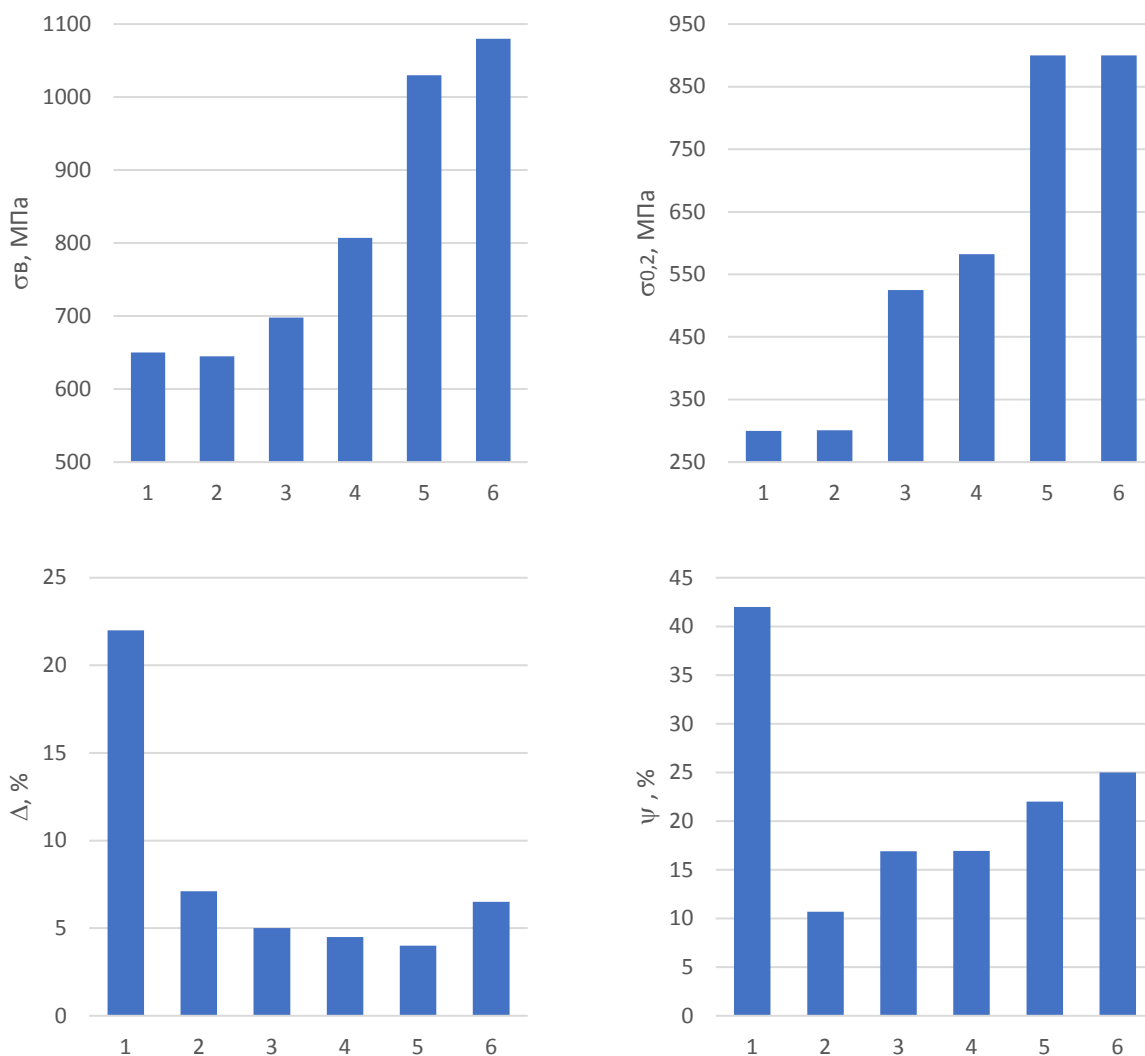


Рисунок 5.19 – Зміна механічних властивостей поверхневих НКС на сталі 65Г залежно від моди деформації, фрикційне оброблення інструментом з робочою частиною: а – гладкою, б – хвилеподібною, в – різнонаправленими пазами. (1 – вісь гоніометра паралельна напрямку деформації, 2 – вісь гоніометра перпендикулярна напрямку деформації).

Границя текучості суттєво підвищується за використання різнонаправленої деформації. Очевидно текстура кристалітів є визначальнішою за наявність цементиту. Відпуск 500 °С як і для сталі 40Х

підвищує границю текучості. У цьому випадку зерна є з підвищеною рівноважністю та значно нижчими напруженнями в гратці. Відносне видовження порівняно зі сталлю 40X суттєво нижче, а відпуски його підвищують значніше як для сталі 40X що очевидно пов'язане зі значнішим пониженням напружень у гратці хоча значення їх для обох сталей майже однакові.

Відносне звуження має майже однакову поведінку як і для сталі 40X, однак їх значення є нижчі що очевидно пов'язане з мартенситною структурою кристалітів та наявністю цементиту по границях зерен.

Залежність інтенсивності максимуму (110) від кута повороту зразка в сталі 65Г (рис. 5.20) виявляє дещо інший характер. Так в зразку сталі 65Г, обробленій прямим кругом (рис. 5.20а), в обох положеннях зразка максимум  $I^*(\alpha)$  спостерігається у положенні  $\alpha = 0^\circ$ , що вказує на переважаючу орієнтацію площин  $\{110\}$  паралельно поверхні зразка. В зразку, обробленому інструментом з хвилеподібною робочою частиною (рис. 5.20б), на кривих 1 та 2 помітні максимуми при кутах  $\alpha \approx 15-18^\circ$ . Інтенсивність даних максимумів значно менша, ніж у брегівському положенні, однак можна стверджувати про зміну розподілу орієнтацій зерен (виявляються групи зерен з орієнтаціями відмінними від  $\{110\}$ ). В зразку, обробленому кругом з різнонаправленими пазами (рис. 5.20в), на кривій 1 спостерігається максимум на вказаних кутах повороту, інтенсивність якого є близькою до інтенсивності в положенні  $\alpha = 0^\circ$ . У той же час на кривій 2 максимальна інтенсивність (110) спостерігається тільки при  $\alpha = 0^\circ$ , що вказує на анізотропію розподілу зерен.

Границя текучості суттєво підвищується за використання різнонаправленої деформації. Очевидно текстура кристалітів є більш визначальною за наявність цементиту. Відпуск  $500^\circ\text{C}$  як і для сталі 40X підвищує границю текучості. У цьому випадку зерна є з підвищеною рівноважністю та значно нижчими напруженнями в гратці. Відносне видовження порівняно зі сталлю 40X суттєво нижче, а відпуски його підвищують значніше як для сталі 40X що очевидно пов'язане зі значнішим

пониженням напружень у гратці хоча значення їх для обох сталей майже однакові. Відносне звуження має майже однакову поведінку як і для сталі 40X, однак їх значення є нижчі що очевидно пов'язане з мартенситною структурою кристалітів та наявністю цементиту по границях зерен.

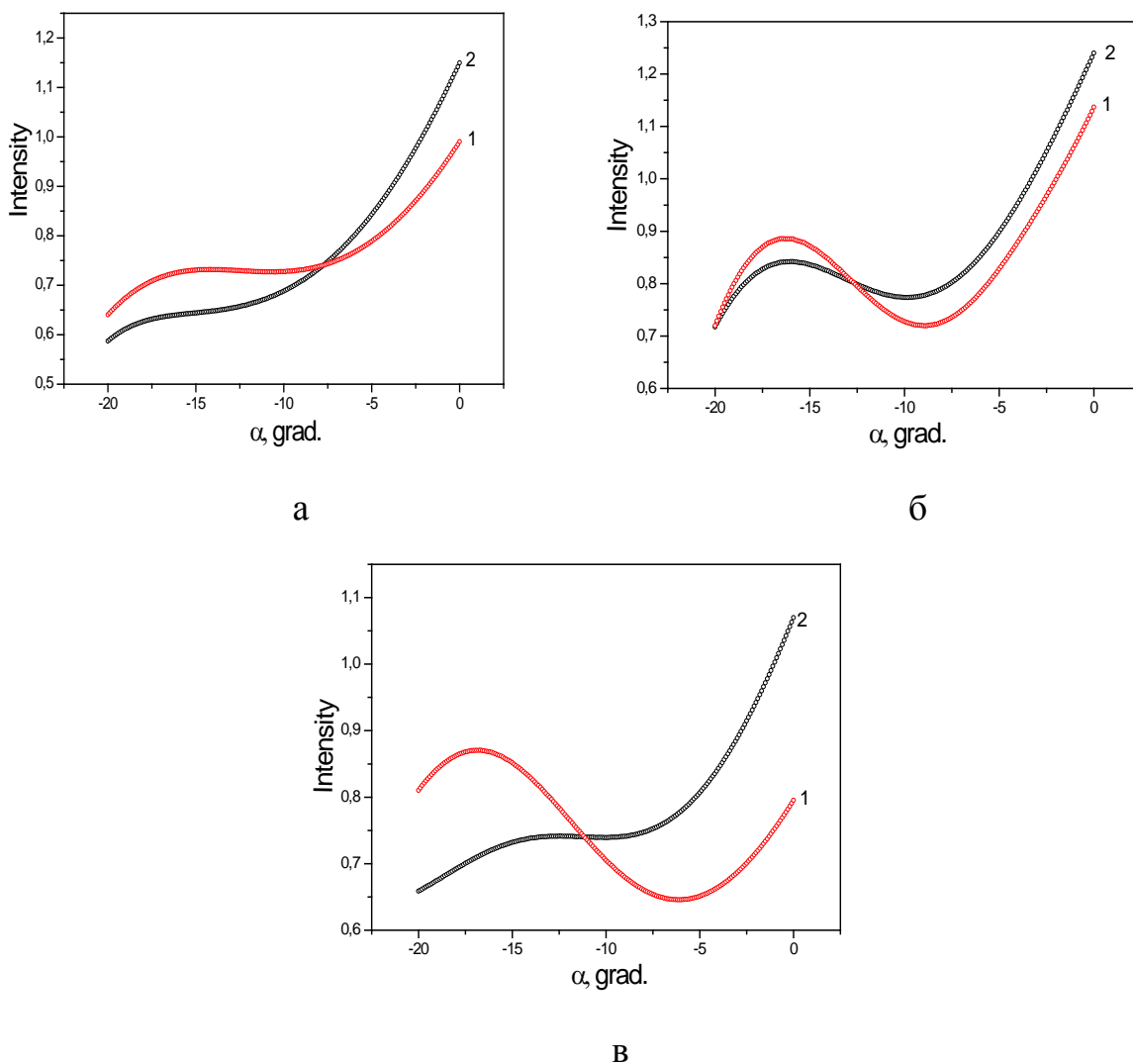


Рисунок 5.20 – Залежність нормованої інтенсивності дифракційного максимуму (110)  $\alpha$ -Fe сталі Г65 від кута повороту площини зразка, фрикційне оброблення інструментом з робочою частиною: а – гладкою, б – хвилеподібною, в – різнонаправленими пазами. (1 – вісь гоніометра паралельна напрямку деформації, 2 – вісь гоніометра перпендикулярна напрямку деформації).

Можна стверджувати, що мода деформації в процесі інтенсивної пластичної деформації під час фрикційного оброблення має суттєвий вплив на механічні властивості поверхневих нанокристалічних структур. Поверхневий шар з нанокристалічною структурою отриманий різнонаправленою деформацією знижує відносне видовження в тому числі (текстурована структура сприятливіша) та підвищує відносне звуження.

#### **5.4. Залишкові напруження у зміцнених поверхневих шарах**

Руйнування від втомних пошкоджень є одним із найпоширеніших режимів руйнування металевих конструкцій, яке розглядається як взаємодія між структурою, деформаціями та станом металу, а особливо поверхневого шару. Уникнення або затримка пошкоджень деталей, на які діють циклічні навантаження, є важливим питанням, яке повинне вирішуватися на стадії проектування та виготовлення деталей машин [319, 320].

Залишкові напруження, які формуються у поверхневих шарах деталей у процесі їх виготовленні відносяться до одних з найважливіших параметрів якості поверхневих шарів деталей. Так, залишкові напруження стиску у поверхневих шарах деталей машин підвищують опір втомну, контактному руйнуванню, а напруження розтягу – навпаки, понижують. [321].

Досліди показали, що під час фрикційного оброблення форма робочої поверхні інструмента значно впливає на характер розподілу залишкових напружень за глибиною зміцненого шару. Так, під час оброблення зразків зі сталі 40ХН (гартування і низький відпуск) виникають залишкові напруження стиску. Після зміцнення інструментом з пазами на робочій частині залишкові напруження залягають на більшу глибину і є більшими за величиною, у порівнянні з напруженнями, які сформувалися після оброблення інструментом з гладкою робочою поверхнею. Найбільша величина залишкових напружень

формується біля поверхні. Зі збільшенням глибини залишкові напруження зменшуються, далі змінюють знак і переходять у напруження розтягу. Слід відмітити, що зміна знаку напружень проходить по основному металу на глибині більшій, ніж зміцнений шар (рис. 5.21).

Після фрикційного оброблення зразків, виготовлених зі сталі У8А (гартування і низький відпуск) спостерігається така ж картина як і під час оброблення зразків зі сталі 40ХН. У поверхневих шарах зразків зі сталі У8А формується зміцнений шар більшої товщини, відповідно зростають і залишкові напруження за величиною ( $\sigma_{\text{зал}} = -1$  ГПа) і глибиною залягання.

При фрикційному зміцненні з використанням інструмента з пазами на робочій частині проходить інтенсивне зсувне знакозмінне деформування поверхневого шару металу, яке поширюється на більшу глибину, аніж при зміцненні інструментом з гладкою робочою частиною. Тому і збільшується залишкові напруження за величиною і глибиною залягання. Найбільші значення залишкових напружень отримано після оброблення інструментом з різнонаправленими пазами шириною 9 мм.

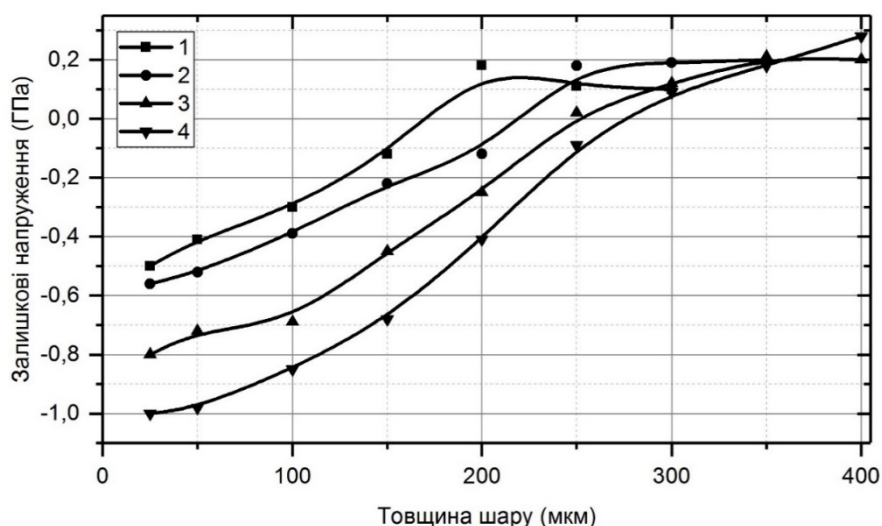


Рисунок 5.21 – Розподіл залишкових напружень після фрикційного оброблення зразків зі сталі 40ХН (гартування і низький відпуск) (1, 2) та сталі У8А (гартування і низький відпуск) (3, 4) інструментом з гладкою робочою частиною (1, 3) та з пазами на робочій частині (2, 4)

Дослідження показали, що під час фрикційного зміцнення застосовуване технологічне середовище суттєво впливає на характер перерозподілу залишкових напружень першого роду. Так, при зміцненні плоских зразків зі сталі 45 (гартування і низький відпуск) виникають залишкові напруження стиску (рис. 5.22). Під час застосування мінеральної оливи з полімервмісними добавками вони поширюються на більшу глибину і більші за величиною. Біля поверхні вони невеликі за величиною, але із збільшенням глибини напруження зростають, переходять через максимум, а потім зменшуються. Така ж картина спостерігається і при зміцненні зразків зі сталі У8А після гартування і низького та високого відпуску. Найбільші напруження виникають на зразках після гартування і низького відпуску, дещо менші після зміцнення зразків після гартування і високого відпуску.

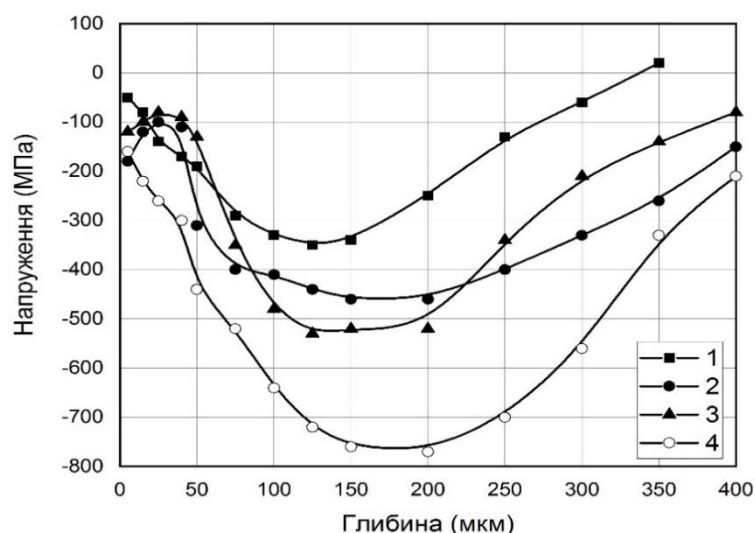


Рисунок 5.22 – Залишкові напруження першого роду, отримані на сталі 45 (а) (гартування і низький відпуск) та сталі У8А (б) (гартування і високий відпуск – 1, 2), (гартування і низький відпуск – 3, 4) після фрикційного оброблення: 1, 3 – у мінеральній оливі; 2, 4 – у мінеральній оливі з полімервмісними добавками

Характер зміни залишкових напружень отриманих на циліндричних зразках є відмінним від зміни залишкових напружень, отриманих після зміцнення плоских зразків (рис. 5.23). Так, після фрикційної обробки зразків, виготовлених зі сталі 45 (гартування і низький відпуск) залишкові напруження



є найбільшими біля оброблюваної поверхні. Зі збільшенням глибини напруження зменшуються. Глибина залягання напружень стиску є більшою, ніж товщина зміцненого шару. Поблизу поверхні спостерігаються напруження стиску, які потім переходять у напруження розтягу. Цей перехід розташований за межею білого шару по основному металу. Після обробки з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи залишкові напруження є меншими за значеннями і глибиною залягання, ніж як після обробки з мінеральною оливою і полімервмісними добавками, але характер розподілу напружень є подібний.

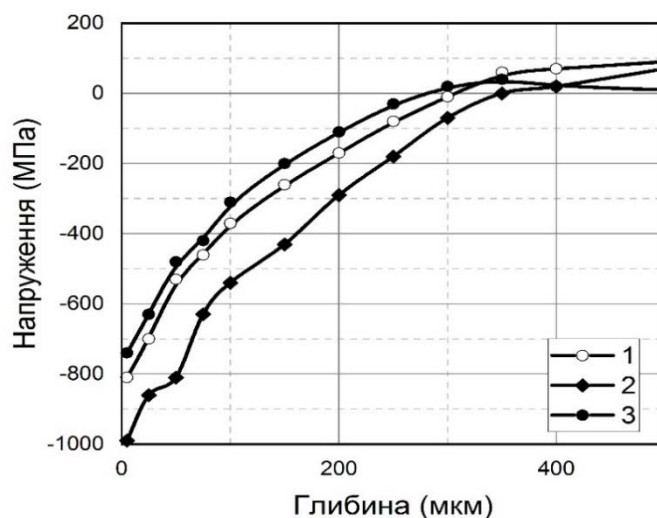


Рисунок 5.23 – Залишкові напруження першого роду, отримані на сталі 45 (гартування і низький відпуск) після фрикційного зміцнення: 1 – у мінеральному маслі; 2 - у мінеральній оливі з полімервмісними добавками; 3 – після зміцнення і витримки 1,5 року.

Для з'ясування впливу часу витримки на зміну залишкових напружень зміцнені зразки витримували в приміщенні лабораторії протягом 1,5 року. Після досліджень було встановлено, що час витримки приводить до незначної зміни залишкових напружень, характер їх розподілу зберігається. Це дозволяє заключити про високу стабільність напруженого стану зміцнених білих шарів з нанокристалічною структурою.

### 5.5. Термодинамічний стан металу поверхневих зміцнених шарів

Термодинамічний стан металу поверхневих зміцнених шарів, отриманих зміною його хімічного і фазового складу можна оцінити, за мікротермо-е.р.с., яка виникає під час контакту нагрітого індентора, виготовленого з вольфраму та металом поверхневого шару. Величину мікротермо-е.р.с. визначали під час контакту гарячого вольфрамового індентора з досліджуваним матеріалом. Вольфрамовий індентор має стабільні фізичні і хімічні характеристики при температурах (50-150 °С), достатню твердість для отримання гострозагостреної голки, малу теплопровідність. Визначення мікротермо-е.р.с. проводили з використанням мікротвердоміра, на якому замість штока з алмазною пірамідкою встановлено вольфрамовий стержень діаметром 2 мм, кінець якого загострено на гостро (радіус кінця  $\approx 2$  мкм), з нагрівачем. Вольфрамовий індентор нагрівається до температури  $65 \pm 5$  °С. Температуру індентора контролювали за допомогою платинової пластини. Термо-е.р.с. нагрітого вольфраму відносно платини становить  $E_{W-Pt} = 11,2$  мкВ/К. Температуру вольфрамового індентора визначали вимірюючи термо-е.р.с. платини  $E_{Pt}$  за формулою  $T = \frac{E_{Pt}}{E_{W-Pt}}$ . Температуру вольфрамового індентора визначали перед і після кожного заміру.

Чим структура металу є у врівноваженому стані, чим менше у досліджуваній структурі вуглецю, тим значення термо-е.р.с. по відношенню до вольфраму буде переміщатися у позитивну сторону. Якщо досліджувана структура має більший вміст вуглецю, знаходиться у нерівноваженому стані, є більші внутрішні напруження, змінений фазовий склад, то у такому випадку значення термо-е.р.с. буде зсуватися у негативну сторону.

Проведені експериментальні дослідження показали, що найбільше значення мікротермо-е.р.с. отримано на зразках, виготовлених зі сталі, яка має малу кількість вуглецю (сталь 20), метал якої знаходиться у рівноважному стані (після відпалу). Збільшення вуглецю у досліджуваних сталях (сталь

40ХН, У8А), а також термічна обробка (гартування і низький відпуск) зсуває величину мікротермо-е.р.с. у негативну сторону.

Після фрикційного оброблення мікротермо-е.р.с. поверхневого шару зсувається в негативну сторону, що вказує на збільшення вуглецю у ньому та зміну його фазового складу (збільшення кількості залишкового аустеніту).

Досліди показали, що мікротермо-е.р.с. зміцненого нанокристалічного білого шару значно менша, ніж вихідного металу. Величина мікротермо-е.р.с. білого шару, отриманого на сталі У8А, знижується в негативну сторону набагато більше, ніж білого шару на сталі 40ХН (рис. 5.24) [322].

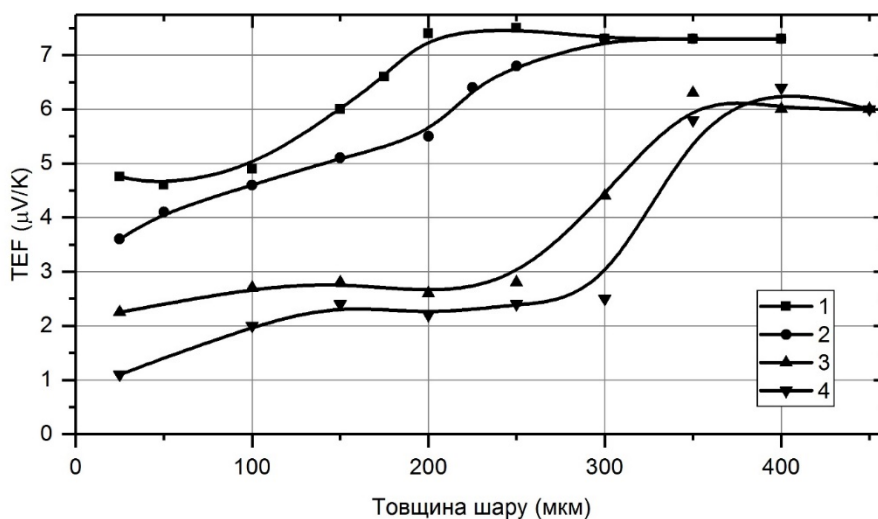


Рисунок 5.24 – Зміна мікротермо-е.р.с. після фрикційного оброблення зразків зі сталі 40ХН (гартування і низький відпуск) (1, 2) та сталі У8А (гартування і низький відпуск) (3, 4) інструментом з гладкою робочою частиною (1, 3) та з пазами на робочій поверхні (2, 4)

Як показали дослідження, після фрикційного оброблення інструментом з пазами (шириною 9 мм) отримані значення мікротермо-е.р.с. зміцнених поверхневих шарів, отриманих як на сталі 40ХН так і на сталі У8А є меншими у порівнянні зі значеннями отриманими у поверхневих шарах після фрикційного оброблення інструментом з гладкою частиною.

Зміна величини мікротермо-е.р.с. як вихідної сталі, так і зміцненого шару повністю корелює з мікротвердістю, фазовим складом, зі зміною вмісту вуглецю та залишкового аустеніту.

## 5.6 Топографія та шорсткість оброблених поверхонь

Експлуатаційні властивості деталей машин залежать від параметрів якості контактуючих поверхонь і поверхневого шару, які визначаються геометричними (макровідхилення, хвилястість, шорсткість) і фізичними та механічними (мікротвердість, залишкові напруження, структура, текстура) характеристиками та взаємним розташуванням мікронерівностей на контактуючих поверхнях [323, 324]. Вказані параметри залежать від технології обробки поверхонь деталей і складання виробів [325, 326].

Контактна взаємодія поверхонь деталей визначає фактичну площу контакту, контактну жорсткість, величину локальних напружень, умови утворення оливної плівки та інші фактори, які впливають на експлуатаційні характеристики деталей машин. На контактну взаємодію суттєво впливають мікрогеометрія, фізичні та механічні характеристики контактуючих поверхонь, такі як фактична площа контакту, яка залежить від форми і розмірів одиничних виступів та їх розподілу (крива несучої здатності), максимального тиску та характеру контакту [325, 327, 328].

Експериментальні дослідження топографії зміцненої поверхні проводили на профілографі «*Talyskan 150*» фірми «*Taylor Hobson*». Сканували зони розміром 6×6 мм та 4×4 мм на оброблених поверхнях зразків алмазною голкою з радіусом при вершині 0,2 мкм. Швидкість переміщення голки складала 3000 мм/хв, крок – 5 мкм. Оброблення отриманих результатів проводили з використанням прикладної програми «*Digital Surf MountainsLab Premium 8.2*». Програма дозволяє розгорнути скановану криволінійну поверхню у плоску. За допомогою даної програми будували 3D-модель сканованої поверхні, профілі хвилястості та шорсткості у поздовжньому та поперечному напрямках, гістограми розподілу площ за виступами і впадинами, гістограми площ точкових виступів і западин, параметри кривої несучої здатності поверхні з визначенням площ та об'ємів виступів та западин та спектрів повторюваності піків на сканованих поверхнях з визначенням

величини, кроку та кутів нахилу піків виступів, параметрів ізотропії оброблюваних поверхонь та інше [329, 330].

Фрикційну обробку поверхонь зразків проводили інструментами з різними робочими поверхнями, а саме: з гладкою поверхнею, з поперечними пазами, з різнонаправленими пазами та з хвилеподібною поверхнею. Як технологічне середовище використовували мінеральну оливу з поверхнево активними полімервмісними добавками

Параметри мікрогеометрії оброблюваних поверхонь та властивостей поверхневого шару металу формуються за рахунок протікання складних фізично-хімічних процесів при активній взаємодії матеріалів у зоні обробки.

Оброблювана поверхня отримується як результат накладання неточностей профілю інструмента, траєкторій переміщення робочої поверхні інструмента по оброблюваній поверхні деталі. На формування хвилястості і шорсткості обробленої поверхні впливають геометричні параметри та коливання системи ВПД верстата [325, 331].

Дослідження топографії оброблених поверхонь показали, що параметри стереометрії оброблених поверхонь зразків суттєво залежать від форми робочих поверхонь інструмента, режимів фрикційної обробки тощо.

Аналіз отриманих топографій оброблених поверхонь після фрикційної обробки інструментами з різними робочими частинами показав, що на оброблених поверхнях вирізняються сліди переміщення з поперечною подачею інструмента-диска. З досягненням на оброблюваній поверхні в зоні одиничного контакту інструмента зі зразком максимальної температури, яка становить біля 1000-1200 °С. За такої температури міцність матеріалу поверхневого шару знижується і під дією сили притискання метал витискається в сторону від зони контакту, що створює певні напливи на оброблюваній поверхні.

При використанні інструмента з гладкою робочою поверхнею зсувне деформування металу на оброблюваній поверхні відбувається тільки в

напрямку обертання інструмента. Формування параметрів якості обробленої поверхні відбувається за рахунок тертя інструмента в одному напрямку по контактуючій поверхні деталі.

Аналіз топографії обробленої поверхні фрикційною обробкою інструментом з гладкою робочою поверхнею показав, що висота піків на деформованій поверхні складає до  $10\ \mu\text{m}$  (рис. 5.23). Оброблена поверхня має чітко виражені піки, які є характерними для поперечної подачі інструмента.

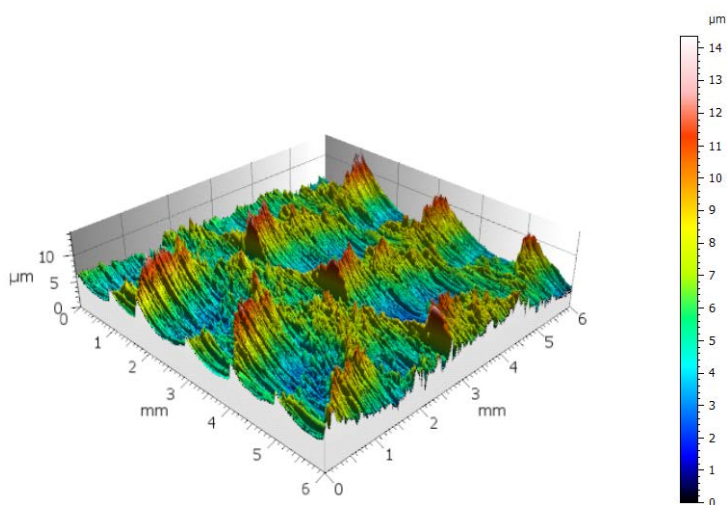


Рисунок 5.23 – Топографія обробленої поверхні після фрикційної обробки інструментом з гладкою поверхнею

Хвилястість поверхні після обробки є різною у поздовжньому і поперечному напрямках. У поперечному напрямку до напрямку обробки висота хвилястості складає біля  $7\ \mu\text{m}$  і крок біля  $2\ \text{mm}$ , який є рівним величині поперечної подачі інструмента. У поздовжньому напрямку – хвилястість чітко не виявлена. Висота профілю складає також біля  $9\ \mu\text{m}$ , крок є нечітким (рис. 5.24). Під час фрикційної обробки інструментом з гладкою робочою частиною проходить постійний контакт інструмента з оброблюваною поверхнею. У зоні їх контакту проходить нагрівання металу зразка до температур, близьких до температур плавлення. У таких умовах поверхневий шар металу розм'якшується і величина коефіцієнта тертя зменшується, що

приводить до переміщення інструмента з певними затримками, що можна, у певній мірі, відслідкувати на оброблених поверхнях зразків.

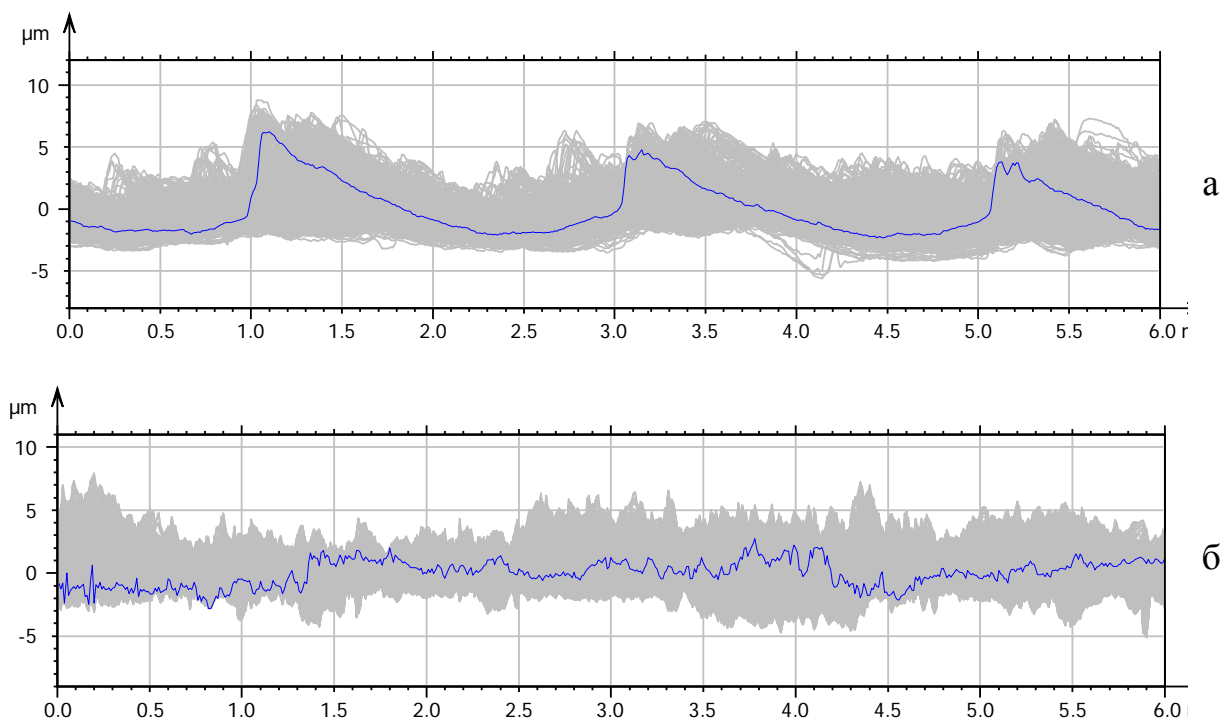


Рисунок 5.24 – Хвилястість обробленої поверхні у поперечному (а) і поздовжньому (б) напрямках після фрикційної обробки інструментом з гладкою поверхнею

Гістограма розподілу виступів на обробленій поверхні показує яку площу займають виступи різної висоти. Найбільшу площу займають піки середньої висоти, яка складає біля 4,5-7 мкм. Їх площа на одиничній поверхні становить 12-14 пікс/мм<sup>2</sup>. Виступи з малою висотою, 3-4,5 мкм, займають незначну площу. Вона становить від 1 пікс/мм<sup>2</sup> до 4 пікс/мм<sup>2</sup> і поступово зростає. Високі виступи, більші від середніх, висотою від 7 мкм до 10 мкм, займають достатню площу яка є співрозмірною з площею виступів середньої висоти. Зі збільшенням висоти виступів, більше ніж 9 мкм, площа їх значно зменшується і складає від 8 пікс/мм<sup>2</sup> до 3 пікс/мм<sup>2</sup>. Виступи великої висоти, більше 11 мкм займають невелику площу, менше ніж 2 пікс/мм<sup>2</sup> і зі збільшення висоти їх площа зменшується до 0,25 пікс/мм<sup>2</sup> (рис. 5.25).

Ізотропія оброблюваної поверхні показує напрям розташування виступів, їх інтенсивність відносно різних кутів нахилу до базової поверхні.

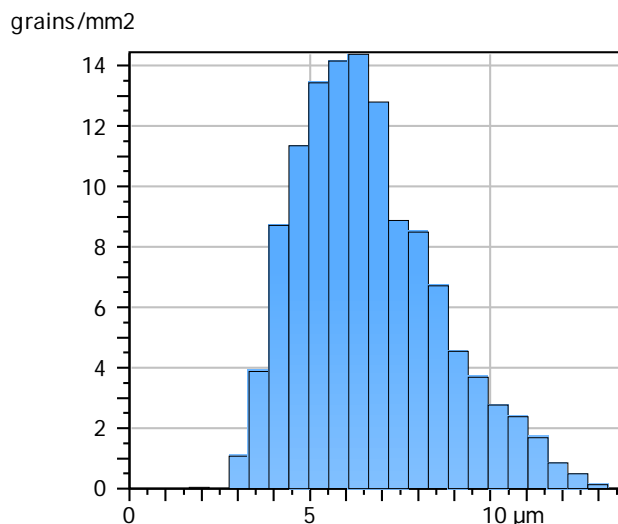


Рисунок 5.25 – Гістограма виступів на обробленій поверхні після фрикційної обробки інструментом з гладкою поверхнею

Аналіз ізотропії показав, що напрям виступів на оброблюваній поверхні є найбільшим під кутом  $1,998^\circ$  та  $176,5^\circ$ . Дещо меншим є нахил виступів шорсткості поверхні є під кутом  $11,96^\circ$ . Загальна ізотропія складає 51,25 % (рис. 5.26).

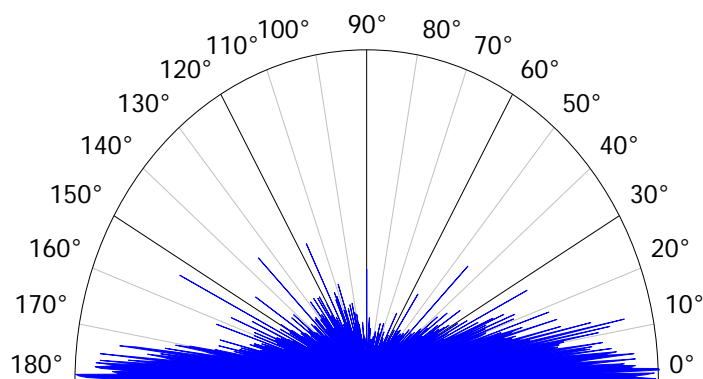


Рисунок 5.26 – Ізотропія виступів на обробленій поверхні після фрикційної обробки інструментом з гладкою поверхнею

Стереометричні параметри досліджуваної обробленої поверхні представляються як сукупність кривих, які описують висоти і впадини профілів і виступають як неперіодичні сигнали [332, 333]. Усереднена густина спектру потужності характеризує частоту появи певних виступів на досліджуваній поверхні. Визначає довжину хвилі, яка має найбільшу появу і її амплітуду, тобто висоту піків, а також описує стан обробленої поверхні у



цілому [334, 335].

Після обробки інструментом з гладкою робочою поверхнею довжина хвилі спектру профілю становить 0,7512 мм, а амплітуда – 0,2178  $\mu\text{m}$ . Домінантна довжина хвилі становить 0,1218 мм, максимальна амплітуда – 0,8962  $\mu\text{m}$  (рис. 5.27).

Після фрикційної обробки інструментом з поперечними пазами на його робочій частині аналіз топографії показав, що виступи на обробленій поверхні більш рівномірно розподілені, ніж після обробки інструментом з гладкою поверхнею. Висота виступів на деформованій поверхні складає до 10 мкм (рис. 5.28). Після обробки інструментом з поперечними пазами на його робочій частині на деформованій поверхні спостерігаються сліди від переміщення інструмента з поперечною подачею.

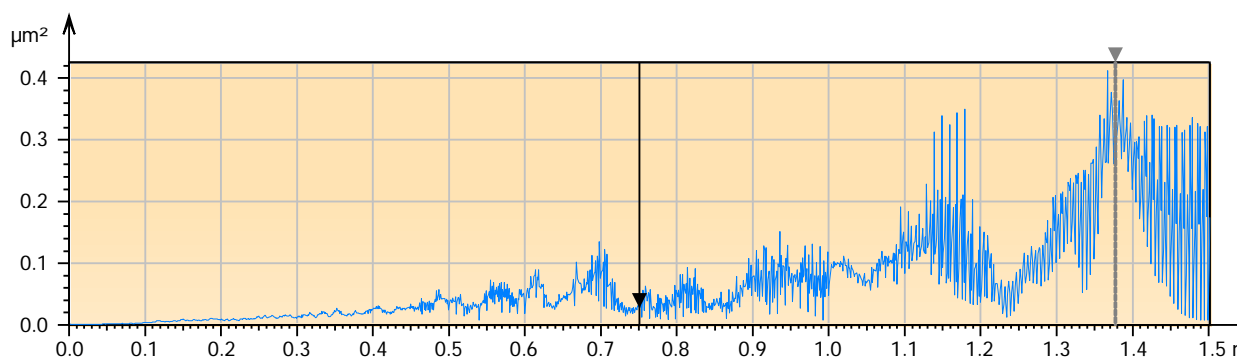


Рисунок 5.27 – Усереднена густина спектру потужності виступів на профілі поверхні після інструментом з гладкою робочою поверхнею

Під час обробки інструментом з поперечними пазами на робочій частині при проходженні над зоною обробки пазу проходить розрив між контактуючими поверхнями інструмента і зразка. Під час входження чергової гладкої частини проходить ударне навантаження оброблюваної поверхні. Воно залежить від кількості пазів і їх ширини на робочій частині інструмента. Висота піків дещо зменшується у порівнянні з обробкою інструментом з гладкою робочою поверхнею.

Хвилястість поверхні після обробки у поздовжньому і поперечному напрямках є подібною до обробки інструментом з гладкою робочою частиною.

У поперечному напрямку до обробки висота хвилястості складає біля 6 мкм і крок біля 2 мм. Крок хвилястості відповідає поперечній подачі під час фрикційної обробки. У поздовжньому напрямку хвилястість чітко не виявлена. Висота профілю складає також біля 5 мкм, крок є нечітким (рис. 5.29).

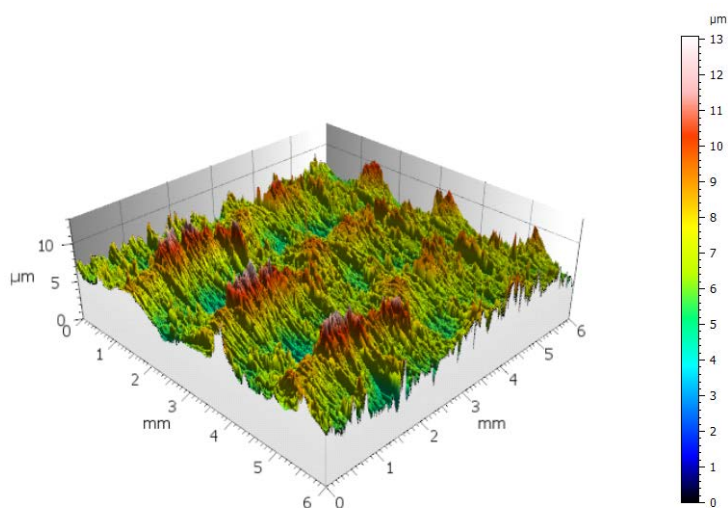


Рисунок 5.28 – Топографія обробленої поверхні після фрикційної обробки інструментом з поперечними пазми на робочій поверхні

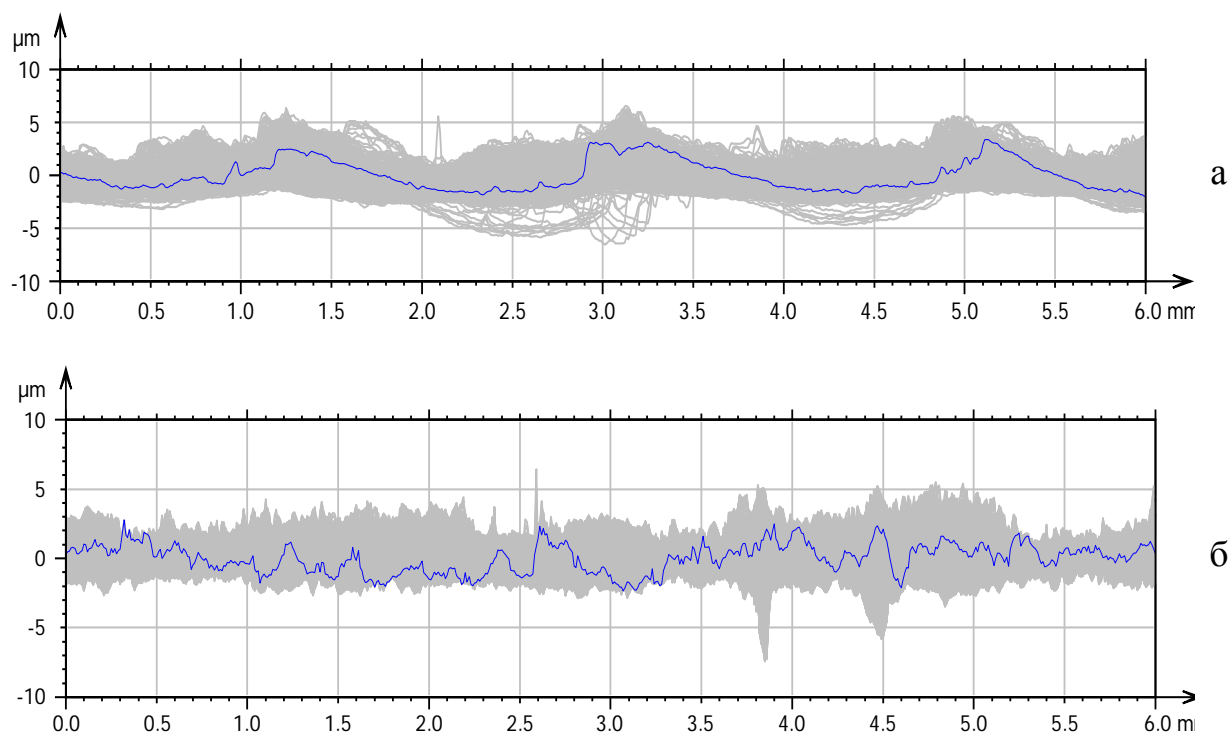


Рисунок 5.29 – Хвилястість обробленої поверхні у поперечному (а) і поздовжньому (б) напрямках після фрикційної обробки інструментом з поперечними пазми на його робочій поверхні

Під час обробки інструментом з поперечними пазами на робочій частині у зоні контакту інструмента з оброблюваною поверхнею діють зсувне деформування у напрямку обертання інструмента, а також додаткове ударне деформування. На величину хвилястості і розподілу виступів залежить кількість і ширина пазів, які є на робочій частині інструмента.

Аналіз гістограми розподілу виступів на обробленій поверхні показав, що найбільша кількість піків є середньої висоти, яка складає біля 5,5-8 мкм, і їх площа на одиничній поверхні є найбільшою і становить 15-25 пікс/мм<sup>2</sup>. Малі виступи висотою 4,5-5,5 мкм займають незначну площу, яка становить від 2,5 пікс/мм<sup>2</sup> до 7 пікс/мм<sup>2</sup> і поступово зростають. Високі виступи, більші від середніх, висотою від 7,5 мкм до 11,5 мкм займають невелику площу у порівнянні з площею виступів середньої висоти. Зі збільшенням висоти виступів площа їх значно зменшується від 8 пікс/мм<sup>2</sup> до 1 пікс/мм<sup>2</sup> (рис. 5.30).

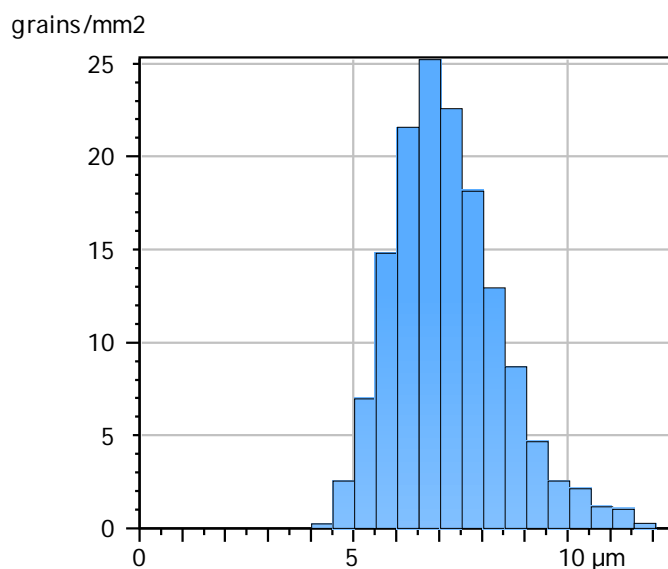


Рисунок 5.30 – Гістограма виступів на обробленій поверхні після фрикційної обробки інструментом з поперечними пазами на його робочій поверхні

Після обробки інструментом з поперечними пазами на його робочій частині оброблена поверхня має більш рівномірний розподіл виступів середньої висоти. Почергове проходження гладкої частини і пазу робочої поверхні інструмента через зону контакту інструмент-деталь сприяє

покращанню формуванню виступів приблизно однакової висоти.

Ізотропія оброблюваної поверхні інструментом з поперечними пазами на робочій частині показує, що напрям виступів є напрямлений переважно в одну сторону і найбільші становлять  $2,244^\circ$  і  $7,502^\circ$ . У другу сторону направлений під кутом  $176,7^\circ$ , але вони є менш інтенсивними. Загальна ізотропія складає 23,08 % (рис. 5.31).

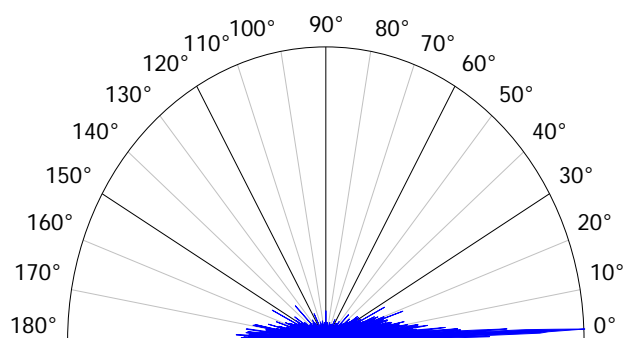


Рисунок 5.31 – Ізотропія виступів на обробленій поверхні після фрикційної обробки інструментом з поперечними пазами на робочій поверхні

Після обробки інструментом з поперечними пазами довжина хвилі є аналогічною, як у попередньому випадку, і становить 0,7512 мм. Амплітуда хвилі спектру є значно меншою і рівна 0,1375 мкм. Домінантна довжина хвилі є дещо меншою, ніж після обробки інструментом з гладкою робочою поверхнею і дорівнює 1.1179 мм, а максимальна амплітуда є меншою майже у 2,5 рази і дорівнює 0,3732 мкм (рис. 5.32).

У випадку використання інструмента з різнонаправленими пазми на робочій частині зсувне деформування металу на оброблюваній поверхні відбувається не тільки у напрямку обертання інструмента, а також у напрямку перпендикулярному до напрямку обертання зі змінним знаком. Додаткове осцилююче деформування виникає за рахунок дії різнонаправлених пазів. Також зона одиничного контакту сприймає ударне навантаження від переміщення над зоною обробки нахиленого пазу. При цьому дія ударного навантаження є дещо меншою, ніж при використанні інструмента з

поперечними пазми.

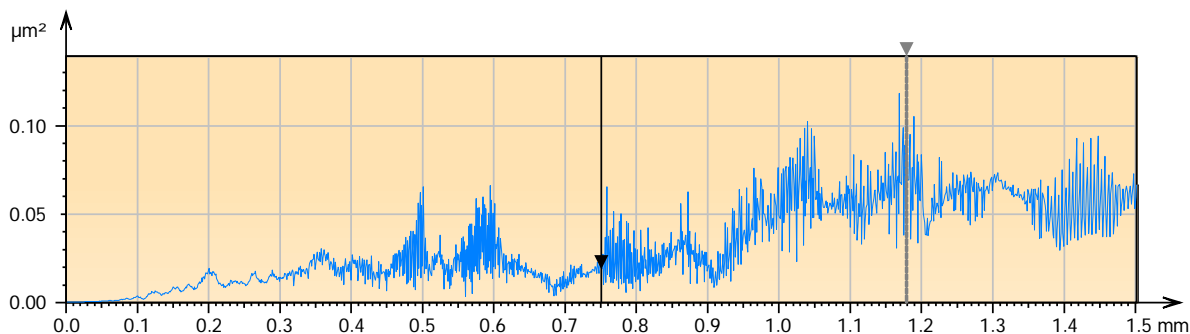


Рисунок 5.32 – Усереднена густина спектру потужності виступів на профілі поверхні після фрикційної обробки інструментом з поперечними пазми на робочій поверхні

Формування параметрів якості обробленої поверхні (профіль, хвилястість, шорсткість) проходить за рахунок тертя гладкої частини інструмента та різнонаправленого переміщення крайки нахилоного пазу по контактуючій поверхні деталі. Аналізуючи топографії обробленої поверхні інструментом з різнонаправленими пазми на робочій поверхні можна сказати, що розташування виступів є більш рівномірне у порівнянні з обробкою попередніми інструментами. Висота піків нерівностей складає менше 15 мкм (рис. 5.33).

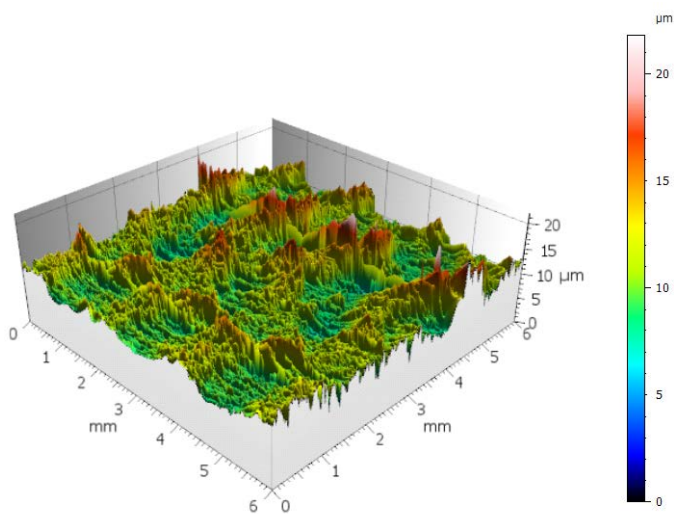


Рисунок 5.33 – Топографія обробленої поверхні після фрикційної обробки інструментом з різнонаправленими пазми на робочій поверхні

Хвилястість поверхні у поперечному напрямку є більш вираженою у порівнянні з поздовжнім напрямком (рис. 5.34). У поперечному напрямку до напрямку обробки висота хвилястості складає біля 5 мкм. У даному випадку крок є змінним і складає біля 1,5 мм та є меншим за величину поперечної подачі, з якою проводили процес фрикційної обробки зразків. У поздовжньому напрямку хвилястість немає чіткого виявлення кроку. Формування параметрів якості обробленої поверхні під час оброблення інструментом з різнонаправленими пазами відбувається за рахунок складного руху деформування зони контакту інструмент-деталь.

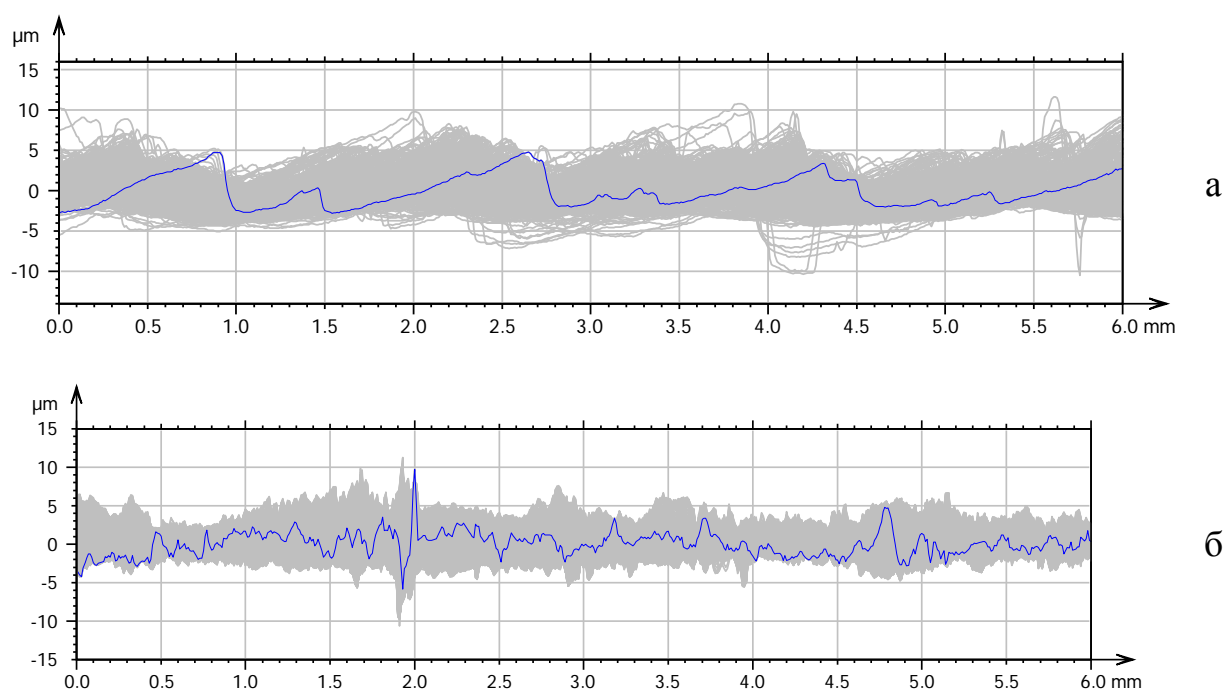


Рисунок 5.34 – Хвилястість обробленої поверхні у поперечному (а) і поздовжньому (б) напрямках після фрикційної обробки інструментом з різнонаправленими пазами на його робочій поверхні

Зона контакту деформується у напрямку, який співпадає з напрямком обертання інструмента, а також попеременно у напрямку перпендикулярному до напрямку обертання. Крім того під час проходження попеременно переміщення крайки гладкої частини у поперечному напрямку через зону контакту. Із-за складного деформування металу у різні сторони у зоні контакту інструмент-деталь проходить формування оброблюваної поверхні.

Аналіз гістограми виступів на обробленій поверхні показав, що виступи з малою висотою (до 8 мкм) займають площу від 0,25 пікс/мм<sup>2</sup> до 7,5 пікс/мм<sup>2</sup>, середньої висоти (від 8 мкм до 13 мкм) – від 8 пікс/мм<sup>2</sup> до 13,5 пікс/мм<sup>2</sup>. Площа, яку займають виступи великої висоти (більше 13 мкм) різко зменшується до 0,1 пікс/мм<sup>2</sup> (рис. 5.35).

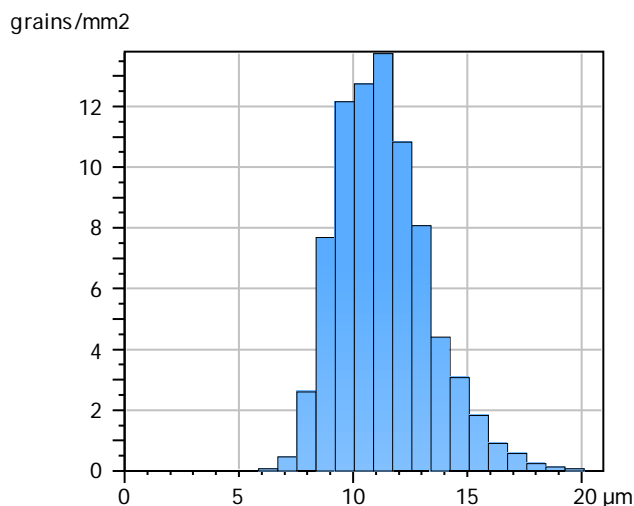


Рисунок 5.35 – Гістограма виступів на обробленій поверхні після фрикційної обробки інструментом з різнонаправленими пазами на його робочій поверхні

Ізотропія оброблюваної поверхні інструментом з різнонаправленими пазами на робочій частині показує, що напрям виступів у більшому ступені напрямлений в одну сторону і найбільші становлять 1,118° і 6,749°. У протилежну сторону виступи направлені під кутом 176,1°, але їх інтенсивність є значно меншою. Загальна ізотропія складає 44,92 % (рис. 5.36).

Після обробки інструментом з різнонаправленими пазами довжина хвилі є аналогічною, як у попередніх випадках, і становить 0,7512 мм. Амплітуда хвилі спектру є значно меншою і рівна 0,3869 мкм. Домінантна довжина хвилі є дещо меншою, ніж після обробки інструментом з гладкою робочою поверхнею і дорівнює 1,348 мм, а максимальна амплітуда є меншою майже у 5 разів і дорівнює 1,475 мкм (рис. 5.37).

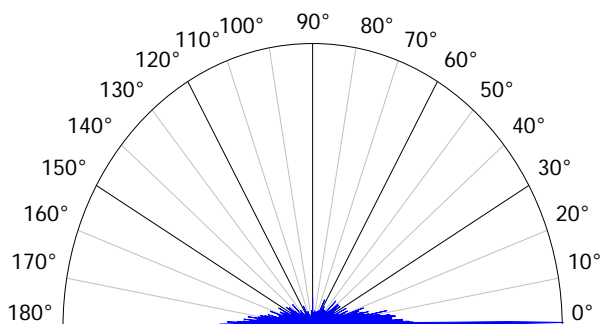


Рисунок 5.36 – Ізотропія виступів на обробленій поверхні після фрикційної обробки інструментом з різнонаправленими пазами на робочій поверхні

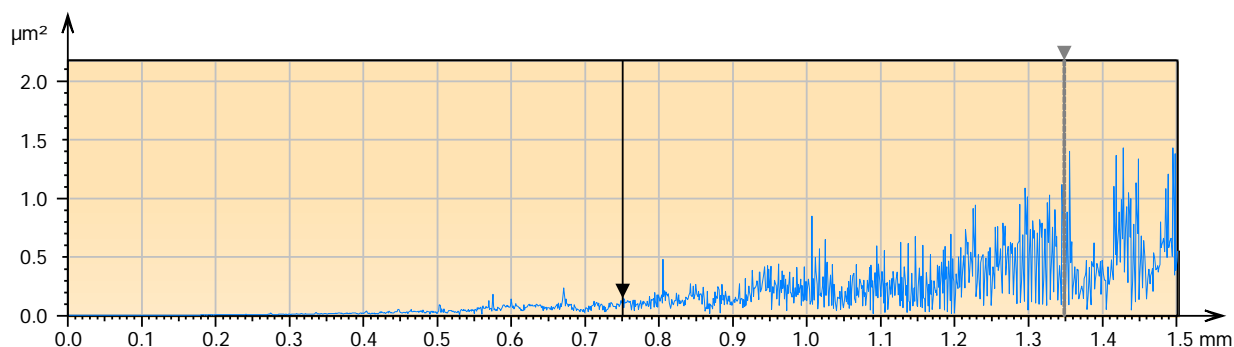


Рисунок 5.37 – Усереднена густина спектру потужності виступів на профілі поверхні фрикційної обробки інструментом з різнонаправленими пазами на робочій поверхні

Аналіз топографії обробленої поверхні інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею показав, що висота піків складає не більше 13 мкм. Оброблена поверхня має піки, які більш рівномірно розташовані по поверхні (рис. 5.38).

Під час фрикційної обробки інструментом з хвилеподібною робочою частиною формування топографії оброблюваної поверхні залежить від особливостей її деформування. Хвилеподібна поверхня робочої частини інструмента своєю зоною контакту є увесь час у безпосередньому контакті з оброблюваною поверхнею під час обробки. Ширина робочої частини є меншою за загальну ширину диска інструмента. Зона контакту, ширина якої



відповідає ширині робочої поверхні диска, рухається по оброблюваній поверхні за синусоїдою. Ширина оброблюваної поверхні відповідає загальній ширині диска за один оберт заготовки під час обробки циліндричних деталей або один подвійний прохід під час обробки плоских поверхонь. Формування обробленої поверхні проходить під час поєднання зсувного деформування за напрямом обертання інструмента та за синусоїдальним напрямом. Крім того проходить навантаження і нагрівання та розвантаження і охолодження оброблюваної поверхні деталі.

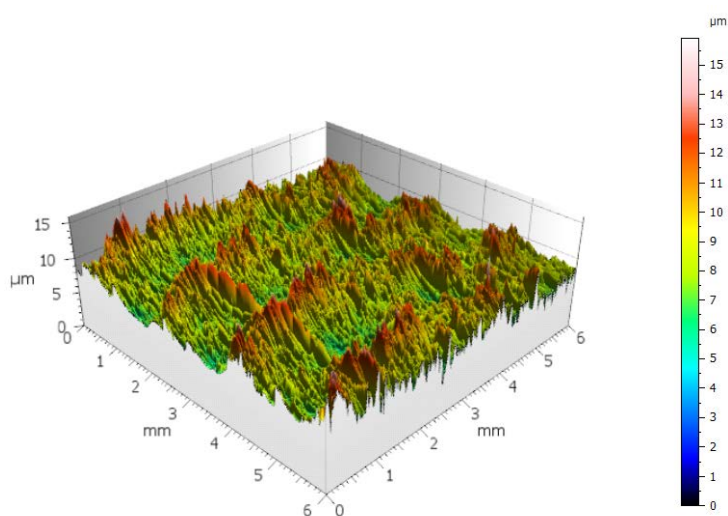


Рисунок 5.38 – Топографія обробленої поверхні після фрикційної обробки інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею

Хвилястість поверхні, як у поперечному напрямку, так і у поздовжньому напрямках є не чітко вираженою у порівнянні з обробкою іншими інструментами. У поперечному напрямку чіткість є більш вираженою у порівнянні з поздовжнім напрямком. У поперечному напрямку до напрямку обробки висота хвилястості складає біля 3-4 мкм. У даному випадку крок є змінним і складає 1,5-2 мм та є доволі меншим за величину поперечної подачі, з якою проводили процес фрикційної обробки зразків. У поздовжньому напрямку хвилястість немає чіткого виявлення кроку, вона більше відновиться до параметрів шорсткості (рис. 5.39). Формування параметрів якості обробленої поверхні під час оброблення інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею відбувається за рахунок складного руху деформування

зони контакту інструмент-деталь. Зона контакту деформується у напрямку, який співпадає з напрямком обертання інструмента, а також за синусоїдою. Складне деформування металу у різні сторони у зоні контакту інструмент-деталь формує відповідний профіль оброблюваної поверхні.

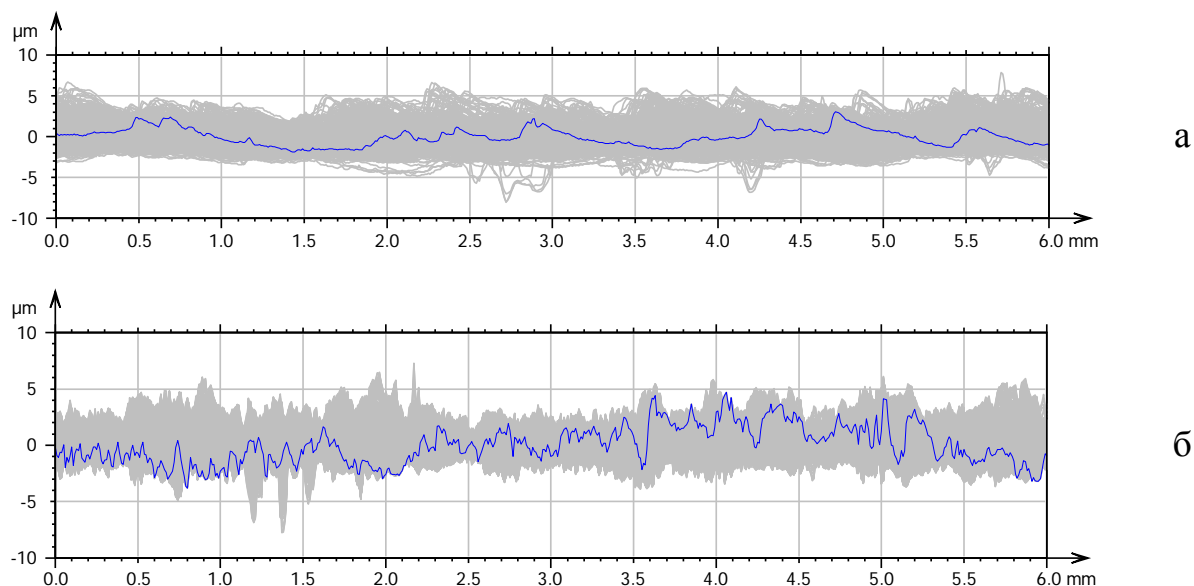


Рисунок 5.39 – Хвилястість обробленої поверхні у поперечному (а) і поздовжньому (б) напрямках після фрикційної обробки інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею

Аналіз гістограми виступів на обробленій поверхні показав, що виступи з малою висотою (до 8 мкм) займають площу до 17 пікс/мм<sup>2</sup>, середньої висоти (від 8 мкм до 10 мкм) – від 17 пікс/мм<sup>2</sup> до 22,5 пікс/мм<sup>2</sup>. Площа, яку займають виступи великої висоти (більше 10 мкм) різко зменшується від 8 пікс/мм<sup>2</sup> до 0,1 пікс/мм<sup>2</sup> (рис. 5.40). На даній оброблюваній поверхні переважають виступи середньої висоти.

Ізотропія оброблюваної поверхні інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею показує, що напрям виступів, як і після обробки інструментом з різнонаправленими пазами, у більшому ступені напрямлений в одну сторону і найбільші становлять 1,109° і 6,205°. У протилежну сторону виступи направлені під кутом 175,5°, але їх інтенсивність є значно меншою. Загальна ізотропія складає 29,10 % (рис. 5.41).

Після обробки інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею

довжина хвилі є аналогічною, як у попередніх випадках, і становить 0,7512 мм. Амплітуда хвилі спектру є значно меншою і рівна 0,1872 мкм. Домінантна довжина хвилі є дещо меншою, ніж після обробки інструментом з гладкою робочою поверхнею і дорівнює 1,348 мм, а максимальна амплітуда є меншою майже у 5 разів і дорівнює 1,012 мкм (рис. 5.42).

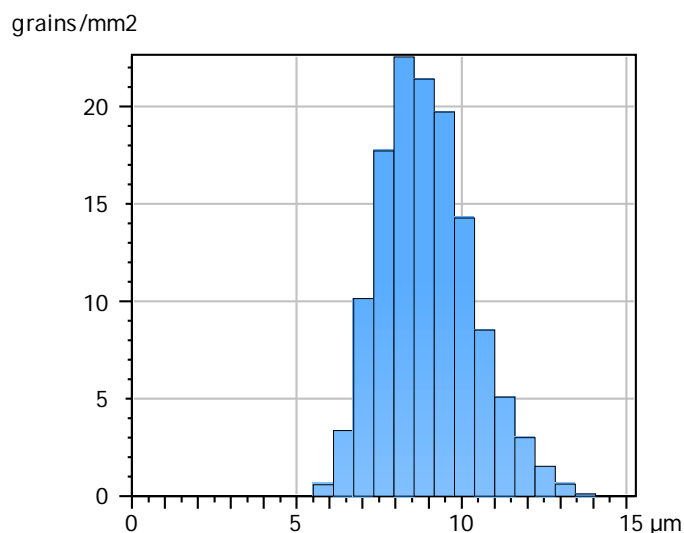


Рисунок 5.40 – Гістограма виступів на обробленій поверхні після фрикційної обробки інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею

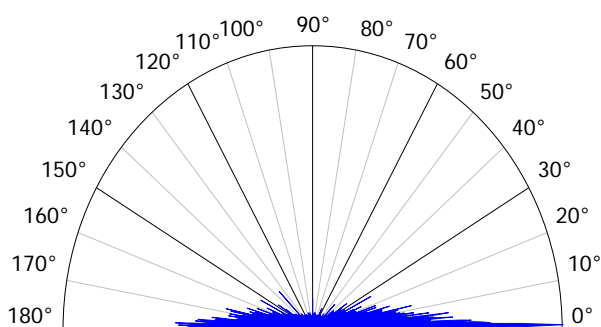


Рисунок 5.41 – Ізотропія виступів на обробленій поверхні після фрикційної обробки інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею

Усереднена густина спектру розподілу потужності виступів на досліджуваних поверхнях оцінює періодичність виступів з однаковим періодом. Виступи з малою частотою характеризують процес обробки, під час якого виникають додаткові вібрації [329]. Аналізуючи густине спектру розподілу виступів на оброблених поверхнях можна відмітити, що при

зміцненні інструментом з хвилеподібною робочою частиною площа спектрів є найнижчою у порівнянні з решта інструментами. Піки спектрів при обробці інструментами з пазми на робочих частинах є подібними. Обробка інструментами з пазми (поперечними чи різнонаправленими) приводить до додаткових коливань системи за рахунок ударних навантажень. Тим не менш, найбільше піків зареєстровано під час обробки, використовуючи інструмент з гладкою робочою поверхнею.

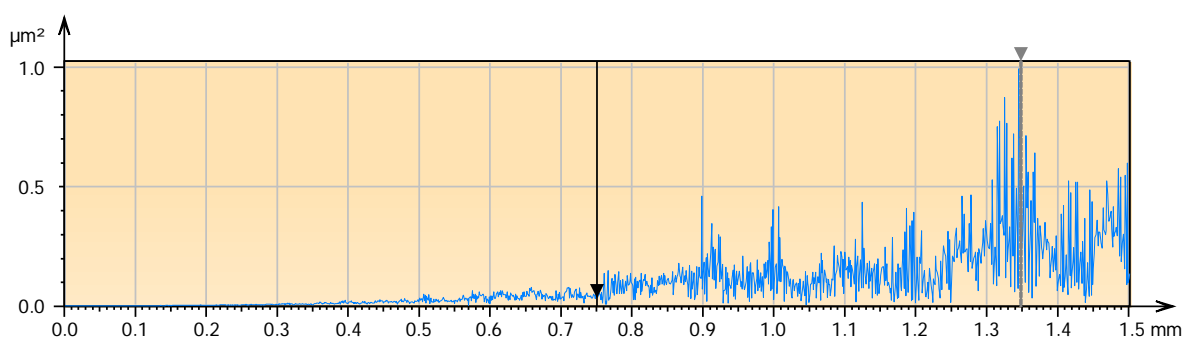


Рисунок 5.42 – Усереднена густина спектру потужності виступів на профілі поверхні після фрикційної обробки інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею

Одним з важливих параметрів якості обробленої поверхні, який визначає стереометричні параметри, є її несуча здатність. Дана крива характеризує поведінку розглядуваної поверхні у процесі тертя. Вона визначає реальну площу поверхні, яка є на різній глибині спотвореного (деформованого) профілю. Січні площини проведені на певних глибинах, дозволяють визначити реальну площу контакту поверхонь, а також визначити об'єм, який займає матеріал металу та порожнечу. На основі отриманих результатів будуються криві несучої здатності оброблених поверхонь [329, 334, **Помилка! Джерело посилання не знайдено.**].

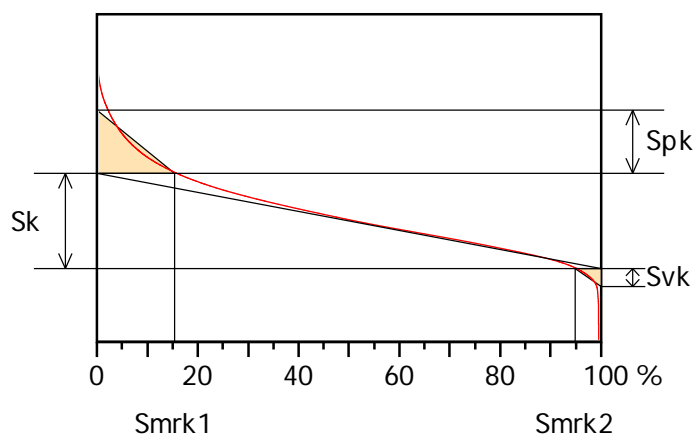
На кривій несучої здатності поверхні є три характерні ділянками: перша – ділянка виступів з великою висотою, які зношуються під час припрацювання контактуючих поверхонь пари тертя; друга – ділянка виступів середньої висоти, які є основою профіля та визначають несучу здатність поверхні,

впливає на довговічність досліджуваної поверхні у процесі тертя та величину допустимого зношування пари у цілому; третя – ділянка впадин, глибина яких характеризує можливість утримувати оливи на поверхні. За кривою несучої здатності поверхні оцінюються процеси припрацювання та зношування контактуючих поверхонь пар тертя. Оцінюється як площа так і об'єм оливних кишень, у яких може знаходитись і утримуватись олива, що є дуже важливим чинником у процесі тертя (рис. 5.43).

Після фрикційної обробки інструментом з різною формою робочої частини визначали висоту виступів  $Spk$  на кривій несучої здатності, величину нахилу кривої  $Sk$ , глибину впадин  $Svk$  (рис. 5.44). Також визначали величину об'єму піків  $Vmp$  на досліджуваній поверхні несучої здатності, об'єму матеріалу  $Vmc$  у досліджуваній поверхні, об'єм порожнин  $Vvc$  над досліджуваною поверхнею та об'єм порожнин  $Vvv$  у досліджуваній поверхні.

Проведені дослідження показали, що параметр кривої несучої здатності поверхонь, який визначає кут нахилу кривої є найменшим. Цей параметр впливає на стабілізований період роботи пари тертя. Чим менше значення цього кута, тим більшу довговічність має дана поверхня, що підтверджено експериментальними дослідження на зношування. Нахил кривої під меншим кутом показує, що реальна площа контакту поверхні є більшою, відповідно буде меншим питома навантаження у зоні тертя. За таких умов буде зменшуватися температура на контактуючих поверхнях пари тертя і відповідно буде зменшуватися інтенсивність зношування контактуючих тіл, що приведе до збільшення довговічності пари тертя.

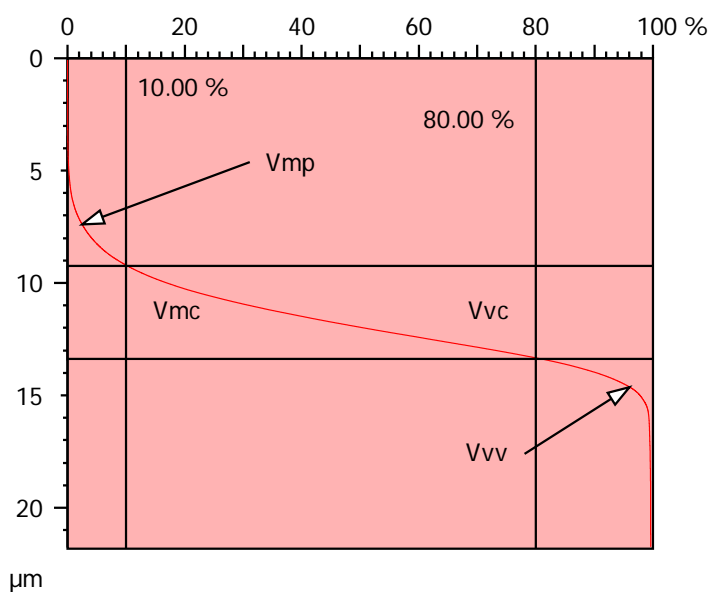
Іншим важливим параметром кривої несучої здатності є площа і об'єм впадин на досліджуваній поверхні. Ці впадини служать для утримування оливи на контактуючих поверхнях під час тертя з мащенням. Чим більший об'єм таких впадин, тим більша кількість оливи може у них зберігатися і забезпечити подачу оливи у зону тертя, щоб не утворилося недостатньої кількості мастила та процес тертя перейшов у тертя без мащення, що є дуже небажаним [334].



Форма робочої поверхні	Параметри				
	Sk, $\mu\text{m}$	Spk, $\mu\text{m}$	Svk, $\mu\text{m}$	Smrk1, %	Smrk2, %
гладка	4,178	2,773	0,7822	15,42	94,84
поперечний паз	2,828	1,765	0,9821	14,74	92,09
різнонаправлений паз	2,525	2,647	1,247	14,01	92,93
хвилеподібна	3,279	1,836	0,974	13,55	91,84

Рисунок 5.43 – Загальний вигляд кривої несучої здатності та параметри кривої після фрикційної обробки поверхонь інструментом з різною робочою частиною

Аналіз проведених досліджень топографії після фрикційної обробки інструментами з різними формами робочих поверхонь також показав, що на формування параметрів якості оброблених поверхонь подача технологічного середовища у зону оброблення не суттєво впливає. Подача технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь методом поливу, коли технологічне середовище подається ззовні за і збоку зони контакту, або через корпус інструмента безпосередньо у зону не значно змінює параметри стереометрії оброблених поверхонь. Як показали дослідження подача технологічного середовища суттєво впливає на формування властивостей поверхневого шару металу оброблюваних поверхонь.



Форма робочої поверхні	Параметри, мм <sup>3</sup> /мм <sup>2</sup>			
	V <sub>mp</sub>	V <sub>mc</sub>	V <sub>vc</sub>	V <sub>vv</sub>
гладка	0,0001296	0,001537	0,002479	0,0001178
поперечний паз	0,0000835	0,00103	0,001627	0,0001121
різнонаправлений паз	0,0001255	0,001618	0,002515	0,0001586
хвилеподібна	0,0000886	0,001185	0,001786	0,0001231

Рисунок 5.44 – Загальний вигляд кривої змінання матеріалу та параметри кривої після фрикційної обробки поверхонь інструментом з різною робочою частиною

### 5.7 Дослідження складових сили дії у зоні контакту інструмент-деталей

Фрикційне оброблення за кінематикою процесу подібне до шліфування (плоского або круглого). Для забезпечення нормальної роботи обладнання на якому реалізується оброблення необхідно знати силові параметри, які виникають в зоні контакту інструмент-деталь та діють на опори та спряжені деталі. Силу, яка діє у зоні контакту інструмент-деталь можна розкласти на

три складові: тангенціальну  $P_z$ , нормальну  $P_y$  та поперечну  $P_x$  [269, 280].

Фрикційне оброблення циліндричних поверхонь проводили на зразках, виготовлених зі сталі 40ХН (гартування і низький відпуск). Діаметр досліджуваних зразків становив 20 мм, довжина – 150 мм. Оброблення проводили на модернізованому токарно-гвинторізному верстаті моделі 16К20, на якому замість різцетримача був встановлений спеціальний пристрій з автономним приводом інструмента.

Досліджувані зразки кріпили в нерухомих центрах динамометрів, які були встановлені у внутрішній конічний отвір шпинделя верстата (конус Морзе № 6) та конусний отвір задньої бабки (конус Морзе № 5). Крутний момент обертання шпинделя передавали на досліджуваний зразок за допомогою повідкового патрона [337].

Як технологічне середовище під час фрикційно-зміцнювальної обробки використовували мінеральну оливу з полімервмісними добавками.

У процесі проведення досліджень реєстрували складові сили нормальну  $P_y$  і тангенціальну  $P_z$ , які діють у зоні контакту інструмент-деталь, під час фрикційного оброблення зразків.

Проведені експериментальні дослідження з визначення складових сили, яка діє у зоні контакту інструмент-деталь під час фрикційного оброблення циліндричних поверхонь показали, що них значно впливають режими оброблення, форма робочої поверхні інструмента (розміри пазів, їх напрям), технологічне середовище. Під час оброблення циліндричних поверхонь поздовжню складову сили  $P_x$ , яка діє у зоні контакту інструмент-деталь вздовж осі оброблюваного зразка, визначити є складно. У процесі оброблення циліндричні зразки кріпляться у центрах і підтискається задньою бабкою. Сила затиску є досить великою і не співмірною з величиною поздовжньої складової, яка виникає під час оброблення. Поздовжню складову сили дії у зоні контакту інструмент-деталь під час оброблення циліндричних деталей не враховували.

Проведені дослідження показали, що під час фрикційного оброблення



циліндричних зразків, виготовлених зі сталі 40ХН (гартування і низький відпуск) інструментом з поперечними пазами на робочій поверхні при використанні як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками зі збільшенням глибини притискання  $t$  нормальна  $P_y$  та тангенціальна  $P_z$  складові сили різко зростають (рис. 5.45).

Під час фрикційного оброблення з поздовжньою подачею  $S = 0,3$  мм/об. і глибині втискання інструмента до оброблюваної поверхні  $t = 0,1$  мм збільшення частоти обертання деталі не значно впливає на величину складових сили дії, які виникають у зоні контакту інструмент-деталь. Так, нормальна складова  $P_y$  сили дії була в діапазоні від 380 Н до 520 Н, а тангенціальна складова  $P_z$  змінювалась від 28 Н до 39 Н. Зі збільшенням глибини притискання інструмента до оброблюваної поверхні зразка та частоти обертання деталі складові сили дії, які виникають у зоні контакту інструмент-деталь суттєвого збільшуються. Так, при збільшенні глибини притискання від 0,1 мм до 0,3 мм та при частоті обертання деталі  $n = 40$  об/хв нормальна складова сили дії  $P_y$  збільшилась від 390 Н до 680 Н, а тангенціальна складова сили  $P_z$  зросла від 29 Н до 48 Н. Також під час збільшення частоти обертання деталі до 80 об/хв відбувається збільшення нормальної складової сили  $P_y$  від 520 Н до 1170 Н, а тангенціальної складової  $P_z$  – від 39 Н до 70 Н.

Подальше збільшення величини притискання  $t$  є небажаним, тому, що починають інтенсивно зростати складові  $P_y$  та  $P_z$  сили дії, які виникають у зоні контакту інструмент-деталь. У процесі тривалого оброблення на таких режимах можливе значне збільшення робочої температури при якій будуть працювати підшипники шпиндельного вузла верстата та шпинделя автономного приводу інструмента. Що приводить до погіршення умов мащення підшипників і, як результат, підвищення їх зношування та в кінцевому варіанті можливе їх заклинювання.

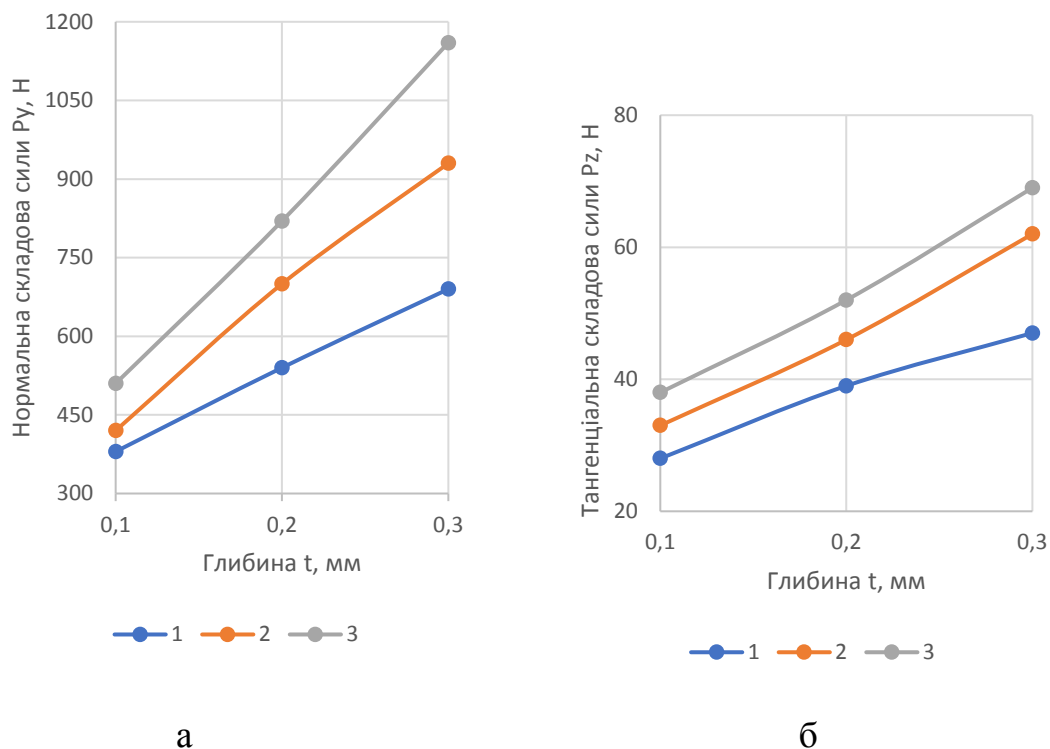


Рисунок 5.45. Залежність складових сили дії нормальної  $P_y$  (а) та тангенціальної  $P_z$  (б) в зоні контакту інструмент-деталь від глибини притискання  $t$  під час оброблення сталі 40ХН ( $S = 0,3$  мм/об.): 1 –  $n_{det} = 40$  об/хв; 2 –  $n_{det} = 63$  об/хв; 3 –  $n_{det} = 125$  об/хв.

Збільшення значень поздовжньої подачі  $S$  інструмента відносно оброблюваної деталі приводить також до значного збільшення нормальної  $P_y$  та тангенціальної  $P_z$  складових сили дії в зоні контакту інструмент-деталь (рис. 5.46).

Вплив величини поздовжньої подачі  $S$  проявляється значно більше на складові сили дії зі збільшення значень частоти обертання деталі  $n_{det}$  та притискання  $t$ . Так, під час оброблення з частотою обертання деталі  $n_{det} = 40$  об/хв та величиною притискання  $t = 0,2$  мм зі збільшенням величини поздовжньої подачі від  $S = 0,3$  мм/об до  $0,9$  мм/об нормальна складова  $P_y$  сили дії, яка виникає у зоні контакту інструмент-деталь, збільшилась від 490 Н до 640 Н, а тангенціальна складова  $P_z$  – від 39 Н до 48 Н. У процесі оброблення з частотою обертання деталі рівною  $n_{det} = 80$  об/хв та величиною притискання  $t = 0,3$  мм зі збільшенням значень поздовжньої подачі  $S$  отримуємо ще більше

зростання складових сили дії  $P_y$  та  $P_z$ . Нормальна складова сили збільшується від  $P_y = 770$  Н до 1160 Н, а тангенціальна – від  $P_z = 61$  Н до 75 Н.

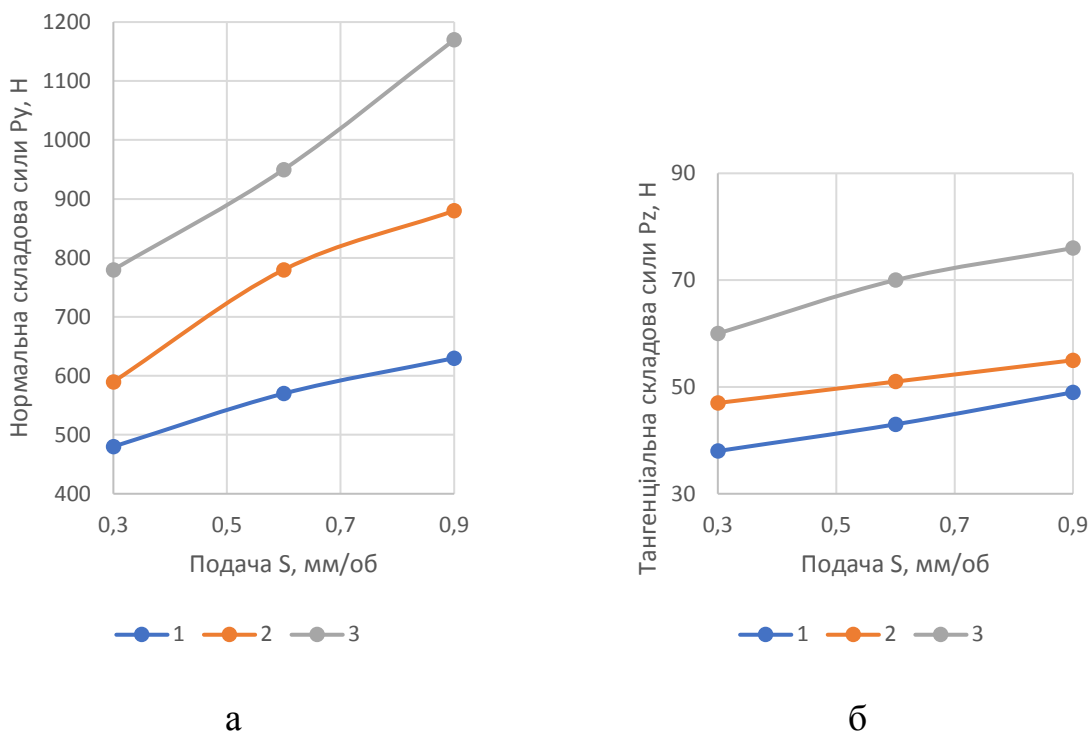


Рисунок 5.46 – Залежність складових нормальної  $P_y$  (а) та тангенціальної  $P_z$  (б) сили дії у зоні контакту від поздовжньої подачі  $S$  під час оброблення сталі 40ХН: 1 –  $n_{дет} = 40$  об/хв;  $t = 0,2$  мм; 2 –  $n_{дет} = 63$  об/хв;  $t = 0,2$  мм; 3 –  $n_{дет} = 125$  об/хв;  $t = 0,3$  мм.

Наступне збільшення частоти обертання деталі  $n_{дет}$ , приводить до ще більшого впливу режимів оброблення на нормальні  $P_y$  та тангенціальні  $P_z$  складові сили дії, які виникають у зоні контакту інструмент-деталь (рис. 5.47). Під час оброблення з невеликими величинами поздовжньої  $S$  подачі та притискання  $t$ , а саме –  $S = 0,3$  мм/об та  $t = 0,1$  мм зі збільшенням величини частоти обертання деталі від  $n_{дет} = 40$  об/хв до 80 об/хв складові сили дії не значно зростають. У даному випадку нормальна складова сили збільшується від  $P_y = 470$  Н до 720 Н, а тангенціальна – від  $P_z = 37$  Н до 54 Н.

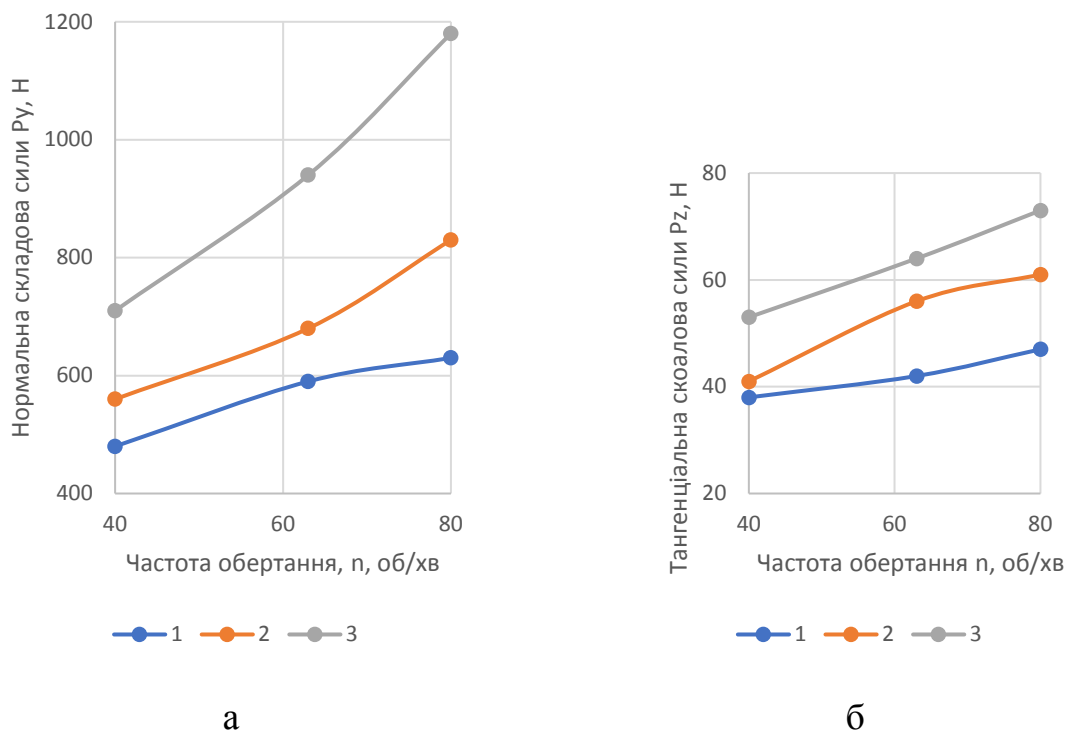


Рисунок 5.47 – Залежність нормальної  $P_y$  (а) та тангенціальної  $P_z$  (б) складових сили дії від частоти обертання деталі  $n_{дет}$  під час оброблення сталі 40ХН: 1 –  $S = 0,3$  мм/об;  $t = 0,1$  мм; 2 –  $S = 0,6$  мм/об;  $t = 0,2$  мм; 3 –  $S = 0,9$  мм/об;  $t = 0,3$  мм.

У процесі оброблення з граничними значеннями поздовжньої подачі  $S$  та притискання  $t$ , які приймаються для даних умов фрикційного оброблення сталей ( $S = 0,9$  мм/об,  $t = 0,3$  мм), при збільшенні частоти обертання деталі від  $n_{дет} = 40$  об/хв до 80 об/хв збільшення величини нормальної складової сили дії у зоні контакту інструмент-деталь складає від  $P_y = 720$  Н до 1190 Н відповідно. У даному випадку маємо майже 2-х кратне збільшення нормальної складової сили дії. Збільшення тангенціальної складової сили є не таким різким, як збільшується нормальна складова, і складає  $P_z = 54$  Н та 74 Н відповідно.

Збільшення режимів оброблення, а саме глибини притискання інструмента до оброблюваної поверхні, поздовжньої подачі інструмента та частоти обертання деталі, призводить до зростання як нормальних, так і тангенціальних складових сил дії, які з'являються у зоні контакту інструмент-деталь.

Зміни режимів та параметрів оброблення різно впливають на формування джерела теплової енергії, його інтенсивність та утворення зміцненого поверхневого шару. Зі збільшенням частоти обертання деталі  $n_{дет}$  час, який характеризує тривалість одиничного контакту інструмента з оброблюваною поверхнею деталі, зменшується. Цей час визначає величину температури до якої можуть нагрітися поверхневі шари оброблюваної деталі. Зі зменшенням часу поверхневі шари металу деталі будуть нагріватися до нижчих температур і, відповідно, зменшиться глибина прогрівання металу і зменшиться товщина утвореного зміцненого шару. З іншого боку зі збільшенням частоти обертання деталі у процесі фрикційного оброблення нормальна складова  $P_y$  сили дії у зоні контакту буде різко збільшуватися. Це приведе до більших навантажень на підшипники шпиндельних вузлів верстата і автономного приводу інструмента.

Фрикційне оброблення плоских поверхонь проводили на зразках, виготовлених зі сталі 40ХН (гартування і низький відпуск) на модернізованому плоскошліфувальному верстаті. Розміри зразків були 20×40×100 мм. Досліджувані зразки кріпили у спеціальному динамометрі фірми «Kistler». Як технологічне середовище використовували мінеральну оливу з полімервмісними добавками.

Інструмент для фрикційного оброблення плоских поверхонь був збірний. Вставки з робочими поверхнями є змінними, використовували вставку, виготовлену з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т з поперечними пазами на робочій поверхні. Зовнішній діаметр робочої поверхні інструмента становив 240 мм. На робочій частині (ширина 7-8 мм) вставки були виготовлені 24 пази шириною 9 мм. Конструкція інструмента дозволяла подавати технологічне середовище через радіальні пази, які були виконані у корпусі інструмента і виходять у паз на робочій поверхні вставки інструмента. Це дозволяє подавати технологічне середовище безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь.

Проведені дослідження показали, що під час фрикційного оброблення сталі 40ХН (гартування і низький відпуск) складові сили  $P_x$ ,  $P_y$  та  $P_z$  дії у зоні контакту інструмент-деталь зі збільшенням режимів оброблення збільшуються (рис. 5.48). Найменше значення зареєстровано у поперечній складовій  $P_x$  сили дії. Вона виникає за рахунок відтискання інструмента вздовж осі його обертання.

Найбільше значення отримано для нормальної складової  $P_y$  сили дії у зоні контакту інструмент-деталь. Нормальна складова сили характеризує значення сили з якою інструмент притискається до оброблюваної поверхні деталі.

Тангенціальна складова  $P_z$  сили дії визначає силу опору під час ковзання робочої поверхні інструмента по оброблюваній поверхні деталі. За значеннями даної складової сили дії визначається величина густини теплового потоку, який виникає в зоні контакту інструмент-деталь.

Визначення складових сил дії у зоні контакту інструмент-деталь проводили змінюючи величину притискання інструмента до оброблюваної поверхні, яка задавалася величиною вертикальної подачі шліфувального круга за лімбом плоскошліфувального верстата. Під час оброблення задавали цю подачу в межах від 0,15 мм до 0,35 мм.

Швидкість переміщення стола верстата приймали в межах від 2 м/хв до 6 м/хв. Збільшувати швидкість переміщення стола верстата не варто, так як зменшується час одиничного контакту інструмента з оброблюваною поверхнею, що не дозволяє прогріти на значну глибину поверхневий шар.

На основі проведених експериментальних досліджень було встановлено, що під час проходження інструментом 4-5 разів по одному і тому ж місці формується зміцнений шар найбільшої товщини і його мікротвердість більше не зростає. Також не збільшується кількість легуючих елементів у поверхневому шарі. Величину поперечної подачі було вибрано з вище вказаної умови. На величину подачі впливає ширина робочої поверхні інструмента. У

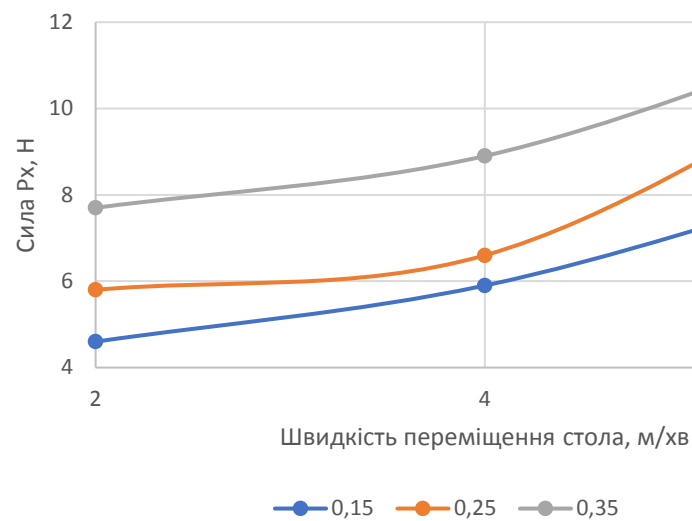
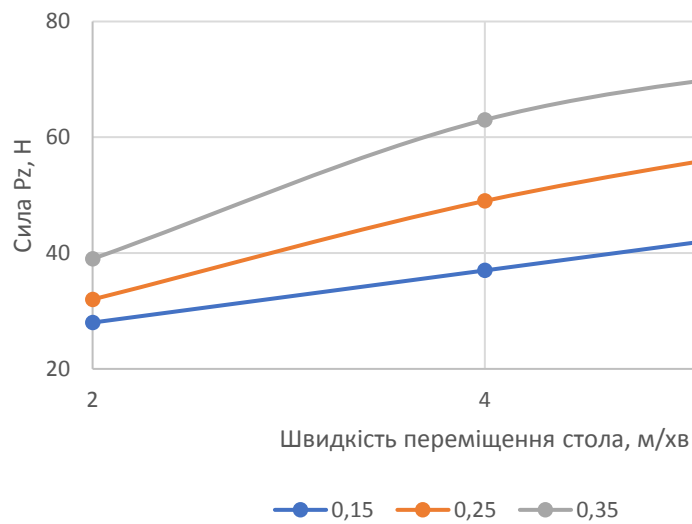
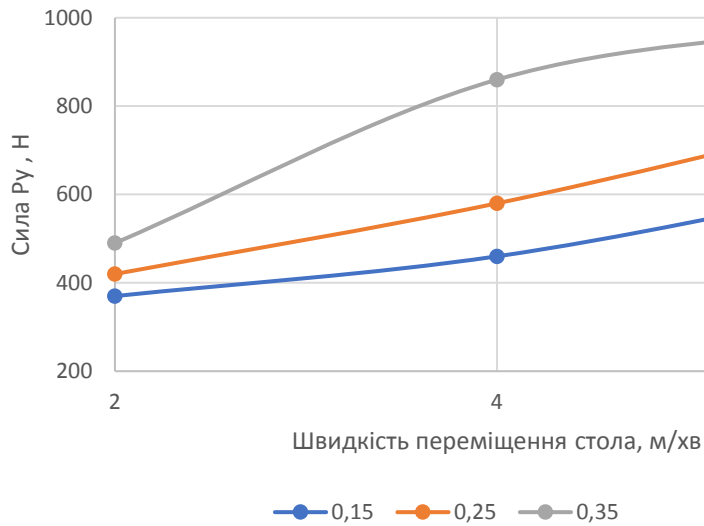


Рисунок 5.48 – Залежності складових сили дії  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  у зоні контакту інструмент-деталь під час фрикційного оброблення зразків зі сталі 40Х з поперечною подачею 3 мм/дв.хід

даному випадку прийнято поперечну подачу інструмента рівну 3 мм/дв.хід стола верстата.

При малих значеннях режимів оброблення складові сил (нормальна  $P_x$ , тангенціальна  $P_y$  і поперечна  $P_z$ ) дії у зоні контакту інструмент-деталь зі збільшенням швидкості переміщення стола верстата не значно збільшуються.

Зі збільшенням режимів оброблення складові сили дії у зоні контакту інструмент-деталь зростають. Найбільше збільшується нормальна складова  $P_y$ . Так при збільшенні глибини притискання до 0,35 мм і швидкості переміщення стола верстата до 6 м/хв вона збільшується майже до 1000 Н. Тангенціальна складова  $P_z$  також збільшується майже до 75 Н. Найменше значення складової сили має поперечна складова  $P_x$ , яка складає лише біля 12 Н.

Значення силових параметрів під час фрикційного оброблення дуже залежать від жорсткості пружної системи верстата на якому проводиться процес оброблення. Чим жорсткіша пружна система верстату, тим збільшувати режими оброблення не варто. Особливо це стосується збільшення величини притискання інструмента до оброблюваної поверхні.

Під час оброблення не варто збільшувати режими оброблення, щоб отримати величину нормальної складової сили дії у зоні контакту інструмент більшу за 1500 Н. У такому випадку будуть зростати температури у підшипниках шпинделя верстата і автономного приводу інструмента.

Збільшення тангенціальної складової  $P_z$  сили є бажаним, бо вона визначає величину густини теплового потоку, який утворюється у зоні контакту інструмент-деталь. Чим більше значення тангенціальної складової тим збільшується інтенсивність нагрівання зони контакту і збільшується товщина зміцненого шару.

За співвідношеннями тангенціальної  $P_z$  і вертикальної  $P_y$  складових сили дії визначали величину коефіцієнт тертя між інструментом та оброблюваною поверхнею зразків в зоні їх контакту під час фрикційного оброблення. Коефіцієнт тертя під час оброблення на прийнятих режимах становить 0,07-0,09.



На основі аналізу записів складових сили дії в зоні контакту інструмент-деталь отримано, що усі вони мають хвильовий характер, подібний за фазою. Амплітуди коливань складових сили дії складають приблизно 0,3-0,4 абсолютної величини складової сили, період коливань складає біля 20-24 мс. Показано, що режими оброблення майже не впливають на період коливань складових сили. Амплітуда коливань складових сили дії в зоні контакту інструмент-деталь є змінною за рахунок нагрівання одиничного контакту до температур, які є близькими до температури плавлення і розм'якшується оброблювана поверхня, що приводить до зменшення коефіцієнта тертя (рис. 5.49).

Характер зміни амплітуди складових сили дії залежить від форма робочої поверхні інструмента.

Для фрикційного оброблення переважно використовують інструменти з гладкою робочою поверхнею. Під час роботи таким інструментом потік теплової енергії у зоні контакту інструмент-деталь формується за рахунок постійного їх тертя.

Для збільшення зсувного деформування та формування імпульсів теплової енергії використовуються інструменти з поперечними та різнонаправленими пазами на їх робочих частинах, а також з хвилеподібною робочою частиною. Пази на робочій поверхні є значно більшими за ширину зону контакту і під час проходження над зоною контакту повністю розвантажуються зона контакту. Під час входження нової гладкої частини у зоні контакту виникають додаткові ударні навантаження.

Застосування інструмента з пазами приводить до зменшення складових сили дії у зоні контакту, але збільшується динамічна складова навантажень на опори шпиндельних вузлів та інших спряжених деталей та вузлів верстата.

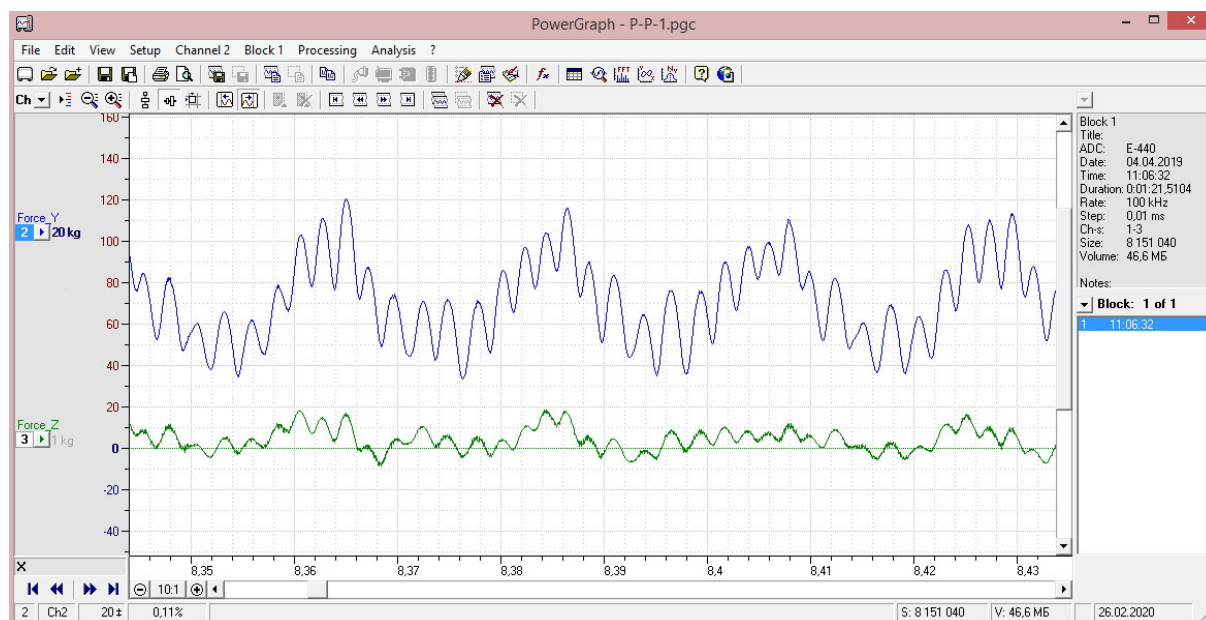
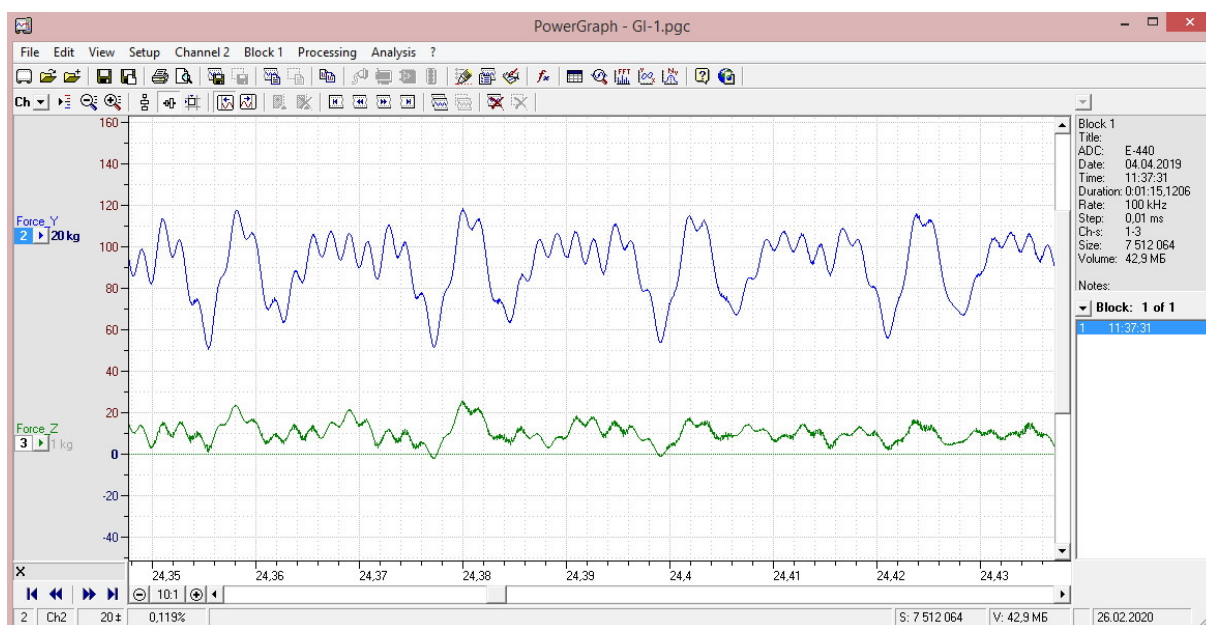


Рисунок 5.49 – Фрагмент запису складових сили взаємодії  $P_y$ ,  $P_z$  у зоні контакту інструмент-деталь у процесі фрикційного зміцнення сталі 40Х інструментом з гладкою робочою частиною (а) та з поперечними пазами на робочій частині (б)

## 5.8 Точність поверхонь після фрикційного оброблення

Під час фрикційного оброблення у зоні контакту інструмент-деталь виникають високі температури і напруження. Як показали проведені дослідження, поверхневий шар зразків нагрівається до температур в межах 900-1100 °С, напруження складають 1,5-4 МПа. Розміри оброблюваних поверхонь зменшується за рахунок пониження міцності поверхневого шару і часткового усунення металу зони контакту. Усе це впливає на точність оброблюваних поверхонь. Фрикційне оброблення застосовується як фінішна операція обробки деталей машин, тому точність виготовлення робочих поверхонь повинна бути забезпечена відповідним чином.

На величину усунення металу з оброблюваних поверхонь впливають температурно-силові параметри, які утворюються у зоні контакту і залежать від режимів оброблення та фізико-механічних властивостей металу оброблюваних деталей.

Експериментальні дослідження точності поверхонь проводили під час фрикційного оброблення циліндричних зразків, виготовлених зі сталі 40ХН (гартування, низький і високий відпуски). Фрикційне оброблення проводили на модернізованому токарно-гвинторізному верстаті 16К20 з спеціальним пристроєм з автономним приводом інструмента. Інструмент був виготовленим зі сталі 12Х18Н10Т діаметром 240 мм з поперечними пазами (ширина 9 мм) на робочій частині. Ширина робочої поверхні становила 6 мм. Як технологічне середовище використовували мінеральну оливу з полімервмісними добавками. Технологічне середовище подавали безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь через корпус і радіальні отвори, які виходять у пази.

Проведені експерименти показали, що на величину усадки металу значно впливають режими фрикційного оброблення та структурний стан вихідного металу. Так, збільшуючи величину притискання інструмента до деталі  $t$  величина зменшення розміру деталі (усадка металу) збільшується (рис. 5.50.).

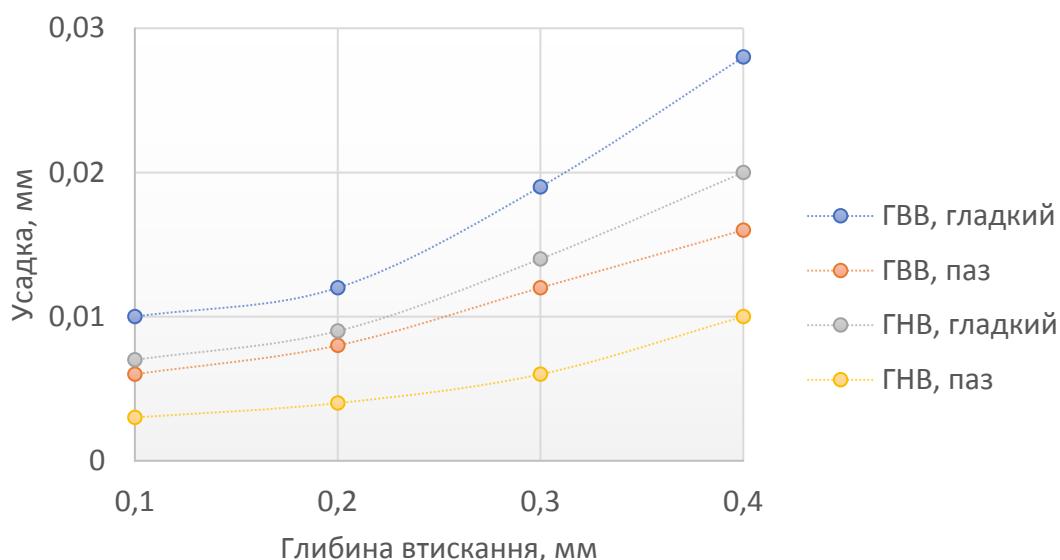


Рисунок 5.50 – Залежність усадки металу зразка (зменшення розміру) від глибини втискання та вихідного структурного стану

Найменша величина усадки отримана під час оброблення величиною притискання  $t = 0,1$  мм і при обробленні вихідної сталі після гартування і низького відпуску. Зі збільшенням величини притискання інструмента до деталі у зоні їх контакту збільшуються температурно-силові параметри, зростає температура та питомі навантаження. Відповідно збільшується і усадка металу, тобто зменшується розмір оброблюваної поверхні.

На величину усадки металу значно впливає вихідний структурний стан металу та форма робочої поверхні інструмента. Найбільша величина усадки металу отримана після фрикційного оброблення зразків, які попередньо пройшли гартування і високий відпуск, інструментом з гладкою робочою частиною. Після оброблення зразків, які попередньо були гартовані з низьким відпуском, інструментом з пазами на робочій частині, мають найменшу усадку металу і відповідно точність таких поверхонь є найкращою. Збільшується товщина зміцненого шару.

При наступному збільшенні величині притискання більше за 0,5 мм величина усадки металу різко зростає, а товщина зміцненого шару збільшується незначно.

Зовсім по іншому на величину усадки металу впливає поздовжня подача (рис. 5.51). Збільшуючи величину поперечної подачі величина усадки металу знижується.

Найбільшу величину усадки металу отримали під час оброблення зразків, які попередньо були попередньо гартвані з високим відпуском, і обробляли з поздовжньою подачею 2 мм/об і більшою інструментом з гладкою робочою поверхнею. Оброблення зразків, які попередньо були гартвані і мали низький відпуск, та обробляли інструментом з поперечними пазами на робочій частині, показали найменшу усадку металу.

На величину усадки металу значно впливає форма робочої поверхні інструмента та метод подачі технологічного середовища у зону оброблення. У даному випадку найменшу усадку металу отримали під час оброблення інструментом з подачею технологічного середовища безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь.

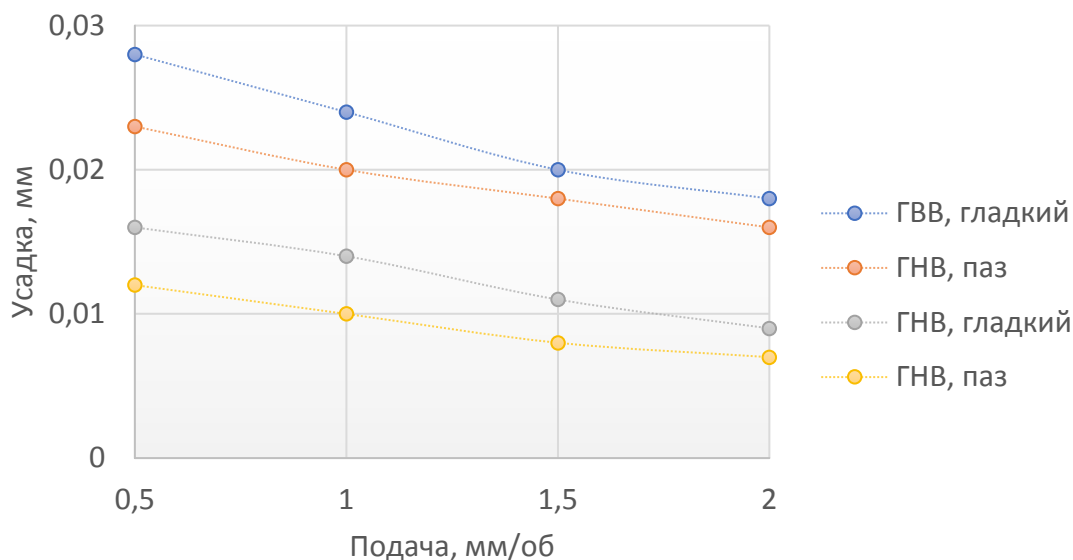


Рисунок 5.51 – Залежність усадки металу зразка (зменшення розміру) від поздовжньої подачі та вихідного структурного стану

Фрикційне оброблення є фінішною операцією технологічного процесу виготовлення робочих поверхонь деталей, на якій формуються як відповідні

стереометричні параметри оброблюваної поверхні так і задані розміри поверхні. На вказані параметри значний вплив мають параметри робочої поверхні інструмента, режими оброблення, структурний стан вихідного матеріалу деталей та метод подачі технологічного середовища у зону оброблення.

### **5.9 Побудова математичної моделі процесу фрикційного оброблення**

Під час фрикційного оброблення важливими параметрами є складові сили дії, які виникають у зоні контакту інструмент-деталь та товщина отриманого зміцненого шару. Вказані параметри залежать від форми робочої поверхні інструмента, режимів оброблення, типу технологічного середовища і методу подачі його у зону оброблення та інше. Математичні моделі товщини шару, складових сили дії, яка виникає у зоні контакту інструмент-деталь будували як поліном другої степені і використовуючи некомпозиційний план другого порядку [241, 242]. Щоб побудувати моделі залежностей, які є нелінійними, використовують композиційні плани другого порядку. Критерієм оптимальності таких планів є рототабельність, яка полягає у інваріантності до повороту осей у факторному просторі. Для побудови планів потрібно провести експерименти згідно плану експерименту, у точках які називаються «зоряними». Значення режимів оброблення у таких точках часто лежать за межами допустимих параметрів обладнання. У випадках якщо відомо, що залежність досліджуваних параметрів може бути нелінійною, тоді варто застосовувати некомпозиційні плани другого порядку (вибірка типу  $3^3$ ). Для реалізації даних планів варіюються фактори на трьох рівнях (-1, 0, +1) [242].

Перевагами некомпозиційних планів: варіювання кожного фактору проводиться на трьох рівнях, наявність великої кількості нулів у рядках плану

(спрощується обчислення коефіцієнтів регресії моделі), використовується менша кількість дослідів порівняно з композиційними рототабельними планами. Некомпозиційні плани одночасно є ортогональними і рототабельними, тому не потрібно вирішувати питання відносно вибору критеріїв оптимальності плану.

Побудова математичних моделей і оброблення результатів експериментальних досліджень проводили з використанням математичного багатофункціонального пакету Mathcad [338].

Під час фрикційного оброблення інструментом з пазами на робочій поверхні у зоні контакту інструмент-деталь формування зміцненого шару відбувається за рахунок поєднання двох процесів. Перший процес полягає у дії висококонцентрованого джерела теплової потоку, яке утворюється від тертя з високими швидкостями гладкої поверхні інструмента по оброблюваній поверхні. Другий процес – це інтенсивне деформування зони контакту інструмент-деталь інструментом з перервною робочою поверхнею. Під час проходження над зоною контакту пазу вона розвантажується. Перестає діяти джерело теплової енергії, поверхневий шар під зоною контакту починає охолоджуватися з великими швидкостями. Частково зменшуються напруження у поверхневому шарі під зоною контакту за рахунок припинення дії сили притискання інструмента до оброблюваної поверхні. У поверхневому шарі продовжують діяти напруження від теплового розширення металу.

Під час входження у контакт чергової гладкої поверхні інструмента з оброблюваною поверхнею у зоні контакту виникає ударне і зсувне деформування металу поверхневого шару. Навантаження у поверхневому шарі різко зростають. Під час фрикційного оброблення інструментом з перервною робочою поверхнею інструмента у зоні контакту інструмент-деталь збільшується динамічна складова навантаження. Динамічна складова навантаження зони контакту сприяє збільшенню товщини зміцненого шару та впливає на зменшення розмірів зерна утвореної структури. Динамічна складова навантаження залежить від ширини і кількості пазів на робочій

поверхні інструмента. Як показали дослідження термопружних процесів під час формування зміцненого поверхневого шару кількість пазів не значно впливає на величину температури, яка виникає на оброблюваній поверхні. Виходячи з конструктивних міркувань було прийнято на робочій поверхні інструмента виготовляти 24 пази.

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що зміцнений шар з нанокристалічною структурою з найбільшою товщиною і твердістю формується під час 4-5 проходів інструмента по одному і тому ж місцю. Також збільшення кількості вуглецю практично стабілізується під час даної кількості проходів. Більша кількість проходів є недоцільною, бо зменшується продуктивність процесу оброблення. Виходячи з цього, величина подачі інструмента відносно оброблюваної поверхні визначається шириною робочої поверхні інструмента.

Під час проведення експериментальних досліджень з визначення складових сили  $P_x$ ,  $P_y$  та  $P_z$  дії інструмента на оброблювану поверхню у їх зоні контакту встановлено, що хімічний склад та вихідна термічна обробка досліджуваних сталей не суттєво впливає на їх значення. Через те, розроблені математичні моделі дозволяють визначати складові сили  $P_y$  та  $P_z$  дії під час фрикційного оброблення вуглецевих, низьколегованих, конструкційних сталей у різному структурному стані (гартування з низьким або високим відпуском) інструментом з прямими або різнонаправленими пазами на його робочій поверхні і використовуючи як технологічне середовище мінеральну оливу з полімервмісними добавками.

Математичні моделі для обчислення складових сили  $P_y$  та  $P_z$  дії у зоні контакту інструмент-деталь під час фрикційного оброблення сталей представляються у вигляді наступних рівнянь:

– рівняння для визначення нормальної складової  $P_y$  сили

$$P_y := 373.5 \cdot v^{0.17-0.07 \cdot \ln(v)} \cdot t^{0.92+0.31 \ln(t)} \cdot \rho^{0.55}, \text{ Н}$$



– рівняння для визначення тангенціальної складової  $P_z$  сили

$$P_z := 52.99 \cdot v^{-0.453+0.18 \cdot \ln(v)} \cdot t^{1.49+0.39 \ln(t)} \cdot \text{ip}^{0.47}, \text{ Н.}$$

Отримані залежності дозволяють обчислити значення складових сили дії, яка виникає під час притискання інструмента до оброблюваної деталі.

На основі побудованих моделей отримали 3-D графіки впливу режимів оброблення, розмірів пазу (ширини) на робочій поверхні інструмента на величину складових сили дії під час оброблення поверхонь деталей машин. Під час експериментальних досліджень використовувався інструмент з 24 пазами і шириною робочої поверхні інструмента 6-7 мм. Прийнята подача інструмента відносно деталі рівна 3 мм/дв.хід, виходячи з того, що інструмент повинен проходити по одному і тому ж місці на оброблюваній поверхні 4-5 разів.

Графічні залежності нормальної складової  $P_y$  сили дії, яка виникає під час притискання інструмента до оброблюваної деталі показано на рис. 5.51.

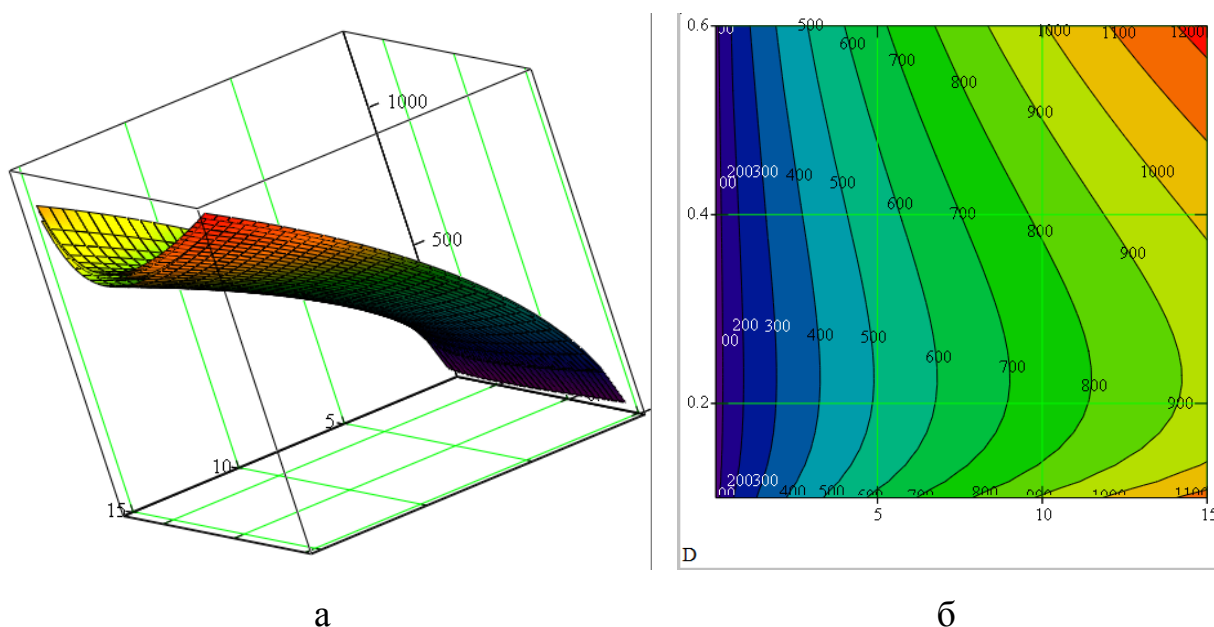


Рисунок 5.51 – 3-D графік поверхні (а) та контурний графік 3-х вимірної поверхні визначення нормальної складової  $P_y$  сили дії, яка виникає під час притискання інструмента до оброблюваної деталі

Графічні залежності тангенціальної складової  $P_z$  сили дії, яка виникає під час притискання інструмента до оброблюваної деталі показано на рис. 5.52.

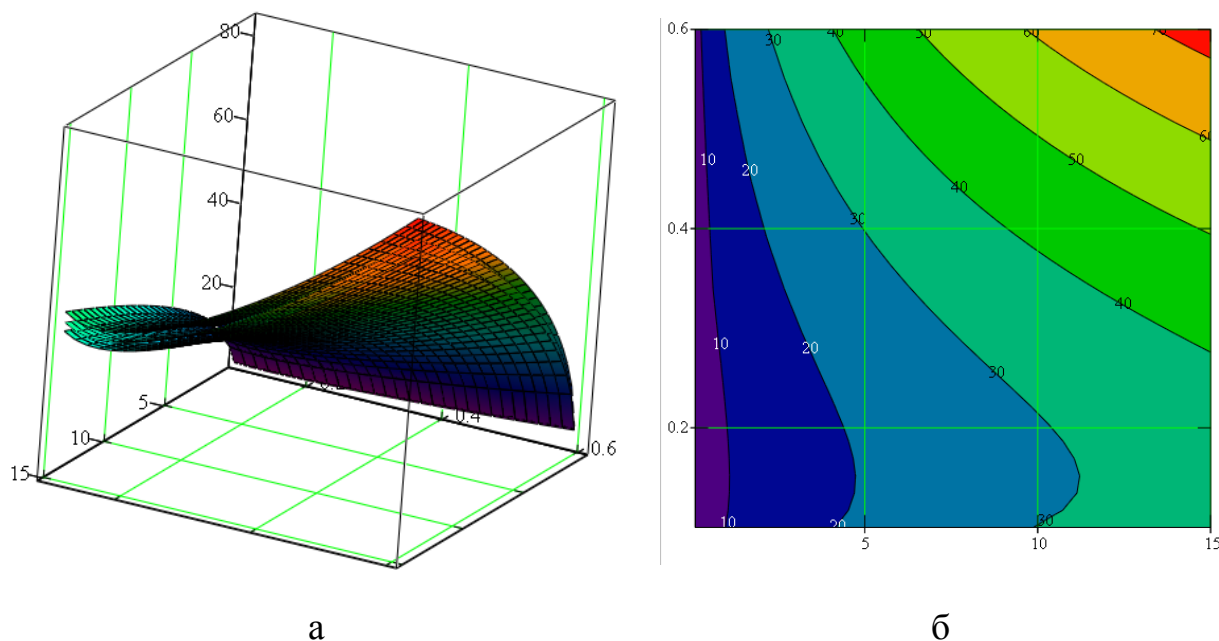


Рисунок 5.52 – 3-D графік поверхні (а) та контурний графік 3-х вимірної поверхні визначення тангенціальної складової  $P_y$  сили дії, яка виникає під час притискання інструмента до оброблюваної деталі

Математична модель отримана для визначення товщини зміцненого шару під час фрикційного оброблення середньовуглецевих сталей, які попередньо гартовані і з низьким відпуском. Інструмент, форма робочої поверхні, діапазон режимів оброблення, використовуване технологічне середовище аналогічне як у моделі для визначення складових сили дії у зоні контакту. На формування зміцненого шару з нанокристалічною структурою впливають вихідний стан матеріалу, а також кількість вуглецю у сталі.

Визначити товщину зміцненого шару можна за рівнянням:

$$\delta = 0,058 \cdot v^{2.02-0.81 \ln(v)} \cdot t^{-5.25-1.78 \ln(t)} \cdot l_p^{1.39}$$

Аналізуючи отримані математичні моделі, можна представити, що зміцнений шар максимальної товщини отримується під час оброблення зі швидкістю переміщення деталі біля 4 м/хв. Розміри пазу значно впливають на

товщину зміцненого шару. Зі збільшенням ширини пазу товщина зміцненого збільшується, досягає найбільшій значень, а потім починає зменшуватися (рис. 5.53).

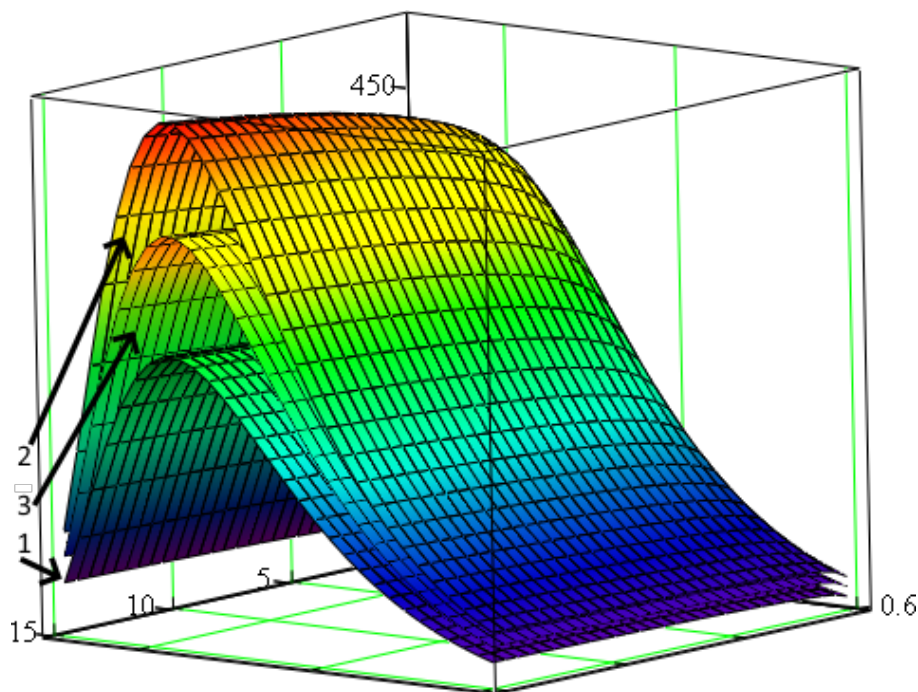


Рисунок 5.53 – 3-D графік поверхні визначення товщини зміцненого шару, який формується під час фрикційного оброблення:

1 –  $V = 2$  м/хв; 2 –  $V = 4$  м/хв; 3 –  $V = 6$  м/хв.

Зміцнений шар з нанокристалічною структурою найбільшої товщини формується під час оброблення інструментом, ширина пазу якого є в межах 8-10 мм. Подальше збільшення ширини пазу є не бажаним, так як зменшується товщина шару. Дані результати узгоджуються з результатами, отриманими під час моделювання параметрів термопружності, які покази, що зі збільшенням ширини пазу більше 8 мм починає зменшуватися температура на оброблюваній поверхні. Використання інструмента з пазом більшої ширини не забезпечує достатньої кількості теплоти для формування зміцненого шару великої товщини.

## Висновки до розділу 5

1. На формування зміцненого шару значно впливає вміст вуглецю у оброблюваних сталях. Зі збільшенням вмісту вуглецю товщина і твердість зміцненого шару значно зростають.

2. Водень, який виділяється у зоні контакту з технологічного середовища за рахунок тертя інструмента по оброблюваній поверхні деталі дифундує у поверхневий шар деталі і значно впливає на формування зміцненого шару.

3. Проведені дослідження показали, що під час фрикційного оброблення зі збільшенням кількості проходів по одному і тому самому місці збільшується товщина зміцненого шару, його твердість, а також кількість вуглецю, який дифундує з технологічного середовища. Збільшення зазначених параметрів проходить до 4-5 проходів інструмента по оброблюваній поверхні, далі відбувається стабілізація формування зміцненого шару. Під час фрикційного оброблення циліндричних поверхонь поздовжня подача інструмента повинна бути:  $l_p/(4 \dots 5)$  мм/об., а плоских поверхонь –  $l_p/(2 \dots 2,5)$  мм/дв. хід стола верстата ( $l_p$  – ширина робочої частини інструмента).

4. Використання під час фрикційного оброблення інструмента з пазами на робочій частині і як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками з подачею його безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь під дією високих температур та тисків проходить їх термодеструкція полімерів з виділенням водню, вуглецю, азоту та інших елементів. На ювенільних поверхнях проходить їх масоперенос у поверхневі шари металу. Максимальний вміст вуглецю біля оброблюваної поверхні на зразків зі сталі 45 дорівнював біля 2 мас. %.

5. Під час фрикційного оброблення інструментом з пазами на робочій частині у поверхневих шарах формуються залишкові напруження стиску. Так, на зразках зі сталі У8А біля обробленої поверхні величина залишкових напружень складала  $\sigma_{зал} = -1$  ГПа. На формування залишкових напружень

суттєво впливають фазові і структурні перетворення, які відбуваються у поверхневих шарах металу під час формування зміцнених білих шарів з нанокристалічною структурою за рахунок високошвидкісного нагрівання і охолодження їх у процесі фрикційного оброблення.

6. Використання інструмента з різнонаправленими пазами на робочій частині під час фрикційного оброблення забезпечує найкращі параметри стереометрії оброблюваних поверхонь.

Проведені дослідження показали, що параметр кривої несучої здатності поверхонь, який визначає кут нахилу кривої є найменшим і при цьому несуча здатність профілю є найкращою.

7. На формування залишкових напружень суттєво впливають фазові і структурні перетворення, які відбуваються у поверхневих шарах металу під час формування зміцнених білих шарів з нанокристалічною структурою за рахунок високошвидкісного нагрівання і охолодження їх у процесі фрикційного оброблення.

## РОЗДІЛ 6

### ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ТА ЛЕГУВАННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ

Надійність роботи деталей машин безпосередньо пов'язана з параметрами якості робочих поверхонь та поверхневих шарів деталей, які характеризується стереометричними параметрами та фізико-хімічними, механічними та структурними властивостями і характеристиками. У процесі експлуатації робочі поверхні деталей машин контактують одна з одною, а також з навколишнім середовищем, деколи агресивним. Параметри якості обробленої поверхні та поверхневого шару суттєво впливають на експлуатаційні властивості деталей машин, а саме на опір втомному руйнуванню, зношуванню, корозійній стійкості та інше [1, 2, 339, 340].

Експлуатаційні властивості деталей машин, в основному, залежать від фізико-хімічних та механічних властивостей поверхневого шару, а також параметрів стану робочих поверхонь деталей, які формуються на фінішних операціях виготовлення деталей. Усі процеси руйнування, які протікають під час експлуатації виробів починаються з поверхні [3, 4, 341].

У процесі зношування деталей машин відбувається руйнуванням поверхневого шару. На контактну взаємодію поверхонь деталей значно впливає фактична площа контакту, контактна жорсткість, значення локальних напружень, умови формування оливної плівки і інші параметри. Зносотривкість і контактна міцність поверхневих шарів, в основному, залежать від параметрів якості шару таких, як його товщина, мікротвердість та величина і знак залишкових макронапружень, структура, текстура, розмір зерна тощо [342, 343, 344].

### 6.1. Зносотривкість при терті ковзання без мащення

Під час тертя без мащення найбільше виявляються властивості матеріалів, які приймають безпосередню участь у процесі, та які пов'язані зі зносотривкістю. Контактуючі поверхні деталей пар тертя діють одна на одну, відбувається безпосередній контакт виступів обох поверхонь. У зоні контакту локалізується енергія, яка впливає на протікання на контактуючих поверхнях хімічних і трибохімічних реакцій. При цьому на них формуються вторинні структури, які за хімічним складом і структурою є відмінними від контактуючих металів деталей пар тертя. Вони складаються, в основному, з оксидів заліза і у більшості випадків сприятливо впливають на процеси зношування. Якісні, суцільні вторинні структури, переважно, запобігають процесам схоплювання між собою контактуючих поверхонь пари тертя. У випадках, коли швидкість формування вторинних структур є вищою, ніж швидкість їх руйнування, знижують величину коефіцієнта тертя, а також зменшують величину зношування пари тертя [343, 344, 345].

Дослідження зносотривкості пари сталь 40ХН – чавун СЧ 20 проводили при терті без мащення за схемою «кільце-кільце» на універсальній установці тертя типу УМТ-1 (рис. 2.17). Зразки, які використовували для досліджень показані на рис. 2.18. Швидкість ковзання змінювали від 0,2 м/с до 4 м/с. Навантаження на зразки регулювали в межах від 0,1 МПа до 1,5 МПа.

Робочі поверхні рухомих зразків, виготовлених зі сталі 40ХН, зміцнювали фрикційною обробкою інструментами з різною формою робочої частини, а саме з гладкою робочою поверхнею, з поперечними та різнонаправленими пазами і з хвилеподібною робочою частиною. Робочі поверхні контрзразків, виготовлених з сірого чавуну СЧ 20, були не зміцнені.

Експериментальні дослідження показали, що опір зношуванню пари сталь 40ХН – чавун СЧ 20 при терті ковзання без мащення суттєво підвищується для усіх пар після фрикційної обробки зразків, виготовлених зі сталі 40ХН (гартування і низький відпуск) з використанням інструментів з

різною робочою частиною (рис. 6.1).

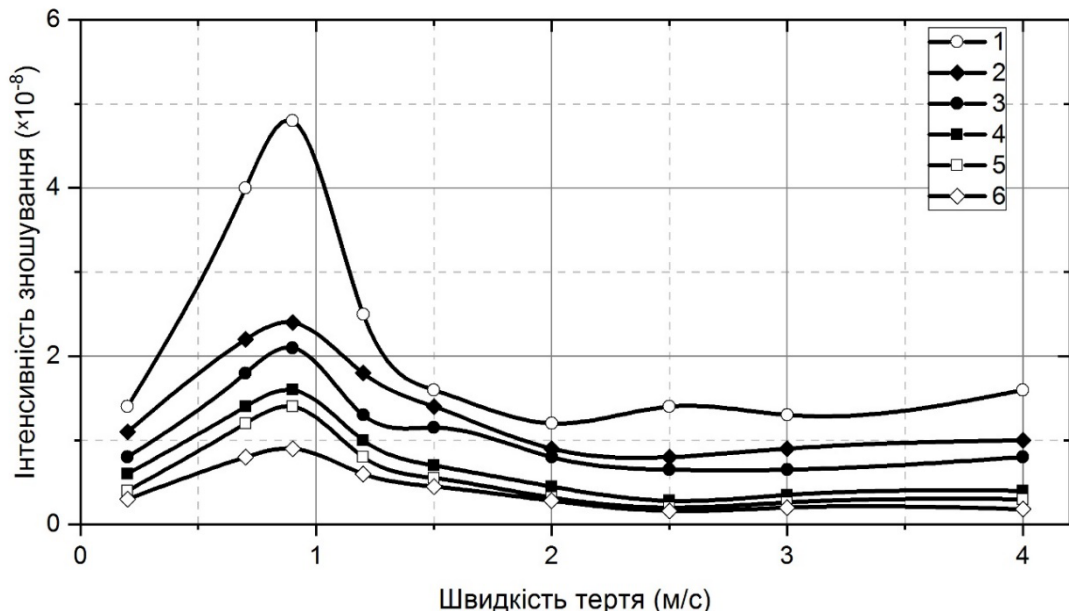
Під час тертя без мащення спочатку зі збільшенням швидкості ковзання інтенсивність зношування усіх досліджуваних пар тертя збільшується. Максимальна величина інтенсивності зношування спостерігається при швидкостях ковзання в межах 0,8-1 м/с. З наступним збільшенням швидкості ковзання інтенсивність зношування пар тертя зменшується.

Зі збільшенням швидкості ковзання пар тертя змінюється механізм окислювального зношування. У залежності від швидкості ковзання формуються різні види оксидів на поверхнях тертя. При малих швидкостях (близько 0,25-0,4 м/с) товщина оксидної плівки, яка є основою вторинних структур, є невеликою і вона швидко руйнується. Швидкість зношування вторинних структур є більшою за швидкість їх утворення. У даному випадку проходить інтенсивне руйнування як вторинних структур та основного металу зразків. Проходить зрізання виступів, у зоні тертя виникають тверді частинки як елементи зношування, які у зону тертя працюють як абразив і сприяють підвищенню інтенсивності зношування деталей пар тертя.

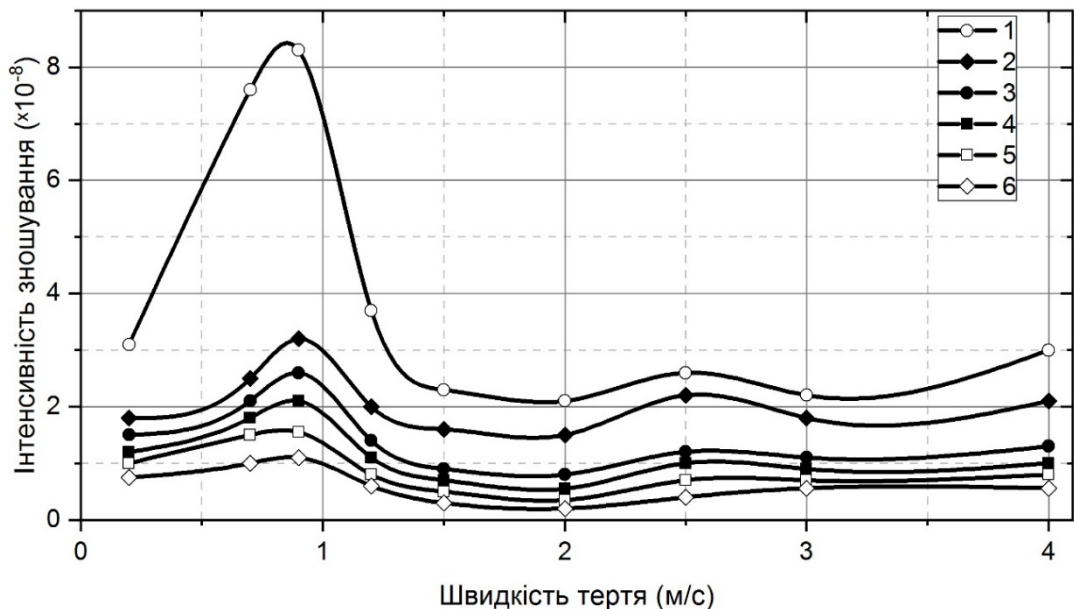
Зі збільшенням швидкості ковзання пари тертя змінюються тип оксидів (різна валентність заліза), умови їх формування та відповідно вторинних структур, які впливають на інтенсивність зношування. Збільшується швидкість формування плівки вторинних структур і зменшується швидкість їх зношування [344].

Максимальний ефект підвищення зносотривкості деталей пар тертя спостерігається після фрикційної обробки інструментами з різною робочою частинами і різними видами подачі технологічного середовища у зону обробки поверхонь ковзання зразків у порівнянні з незміцненою парою при низьких швидкостях ковзання 0,8-1 м/с. Так, підвищення зносотривкості зразків після фрикційної обробки інструментом з гладкою робочою частиною складало біля 2,1 разів у порівнянні з незміцненою парою. Після фрикційної обробки інструментом з поперечними пазми на робочій частині і подачею технологічного середовища у зону обробки методом поливу підвищення





а



б

Рисунок 6.1 – Кінетика зношування пари сталь 40ХН – чавун СЧ20 при терті без мащення зразка (а) та контрзразка (б) після фрикційного зміцнення інструментом ( $P = 1$  МПа): 1 – вихідна; 2 – гладкою робочою частиною; 3 – з поперечним пазом; 4 – з різнонаправленим пазом і подачею технологічного середовища методом поливу; 5 – з різнонаправленим пазом і подачею технологічного середовища через корпус; 6 – з різнонаправленим пазом легуванням міддю

зносотривкості у порівнянні з незміцненою парою складає 2,3 рази. Ще більше

підвищення зносотривкості (3 рази) отримано після фрикційної обробки інструментом з різнонаправленими пазами на робочій частині і подачею технологічного середовища у зону обробки методом поливу. Використання подачі технологічного середовища через корпус інструмента з різнонаправленими пазами на його робочій частині безпосередньо у зону обробки сприяє ще більшому підвищенню зносотривкості зміцненої пари тертя у порівнянні з незміцненою парою. У даному випадку підвищення зносотривкості складає біля 3,5 раз у порівнянні з незміцненою парою. Найбільше підвищення зносотривкості досліджуваної пари отримано після фрикційної обробки інструментом з різнонаправленими пазами на робочій частині з внутрішньою подачею технологічного середовища і легування міддю і складає біля 5,4 разів.

З проведених експериментальних досліджень слідує, що на підвищення зносотривкості пари тертя впливає як напрям деформування під час фрикційної обробки за рахунок зміни напрямку зсувного деформування у зоні контакту інструмент-деталь (використання інструмента з різнонаправленими пазами у порівнянні з інструментом з гладкою робочою частиною, та з поперечними пазами), а також спосіб подачі технологічного середовища (методом поливу або через корпус інструмента безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь). Найкращі результати за зносотривкістю отримані на зразках пари тертя, кільця яких були леговані міддю у процесі фрикційної обробки. При цьому відмітити, що зміцнювали лише рухомий зразок, тобто кільце, контрзразок був незміцнений.

Характер зміни кривих зношування зразків пар тертя зі зміцненим поверхневим білим шаром такий самий, як і незміцненої пари. Інтенсивність зношування пар тертя, у якій зразок зміцненим, є значно меншою у порівнянні з незміцненою парою.

На оброблених поверхнях зразків після їх фрикційної обробки методом месбауерівської спектроскопії зареєстровано велику кількість оксидів (біля 30 %) у шарі товщиною 3-5 мкм. На даних поверхнях у зоні контакту деталей

пар тертя така кількість оксидів сприяють утворенню якісних вторинних структур, які впливають на процес тертя та зношування.

Зі збільшення швидкості ковзання (більше 1 м/с) інтенсивність зношування зменшується для усіх досліджуваних пар тертя. Криві інтенсивності зношування мають хвилеподібний характер. У незміцненої пари воно виражено чіткіше, а у пар тертя після фрикційної обробки – менш виражено.

Під час дослідження пар тертя слід відмітити, що величина інтенсивності зношування контрзразків, які були незміцнені, тільки після шліфування, що працювали у парі зі зміцненими зразками, також зменшилась. Інтенсивність зношування незміцнених контрзразків практично пропорційно зменшувалась, як і зміцнених зразків, що працювали з ними у парі. Фрикційна обробка підвищує зносотривкість пари тертя в цілому під час різних умов тертя. Якщо зміцнити фрикційною обробкою обидві деталі пари тертя, то ефект підвищення зносотривкості зменшується або навіть нівелюється.

Якість отриманого зміцненого білого шару з нанокристалічною структурою впливає на процес тертя та зношування. Вміст вуглецю у зміцненому шарі, розмір зерна структури, рівноважність текстури та інші параметри і властивості зміцненого поверхневого шару визначають зносотривкість пар тертя.

У процесі зношування температура, яка виникає в зоні ковзання, є важливим параметром процесу зношування. Підвищені температури у зоні ковзання можуть приводити до місцевого розм'якшування металу поверхневих шарів деталей пар тертя, а також і до схоплювання. Такі випадки часто супроводжуються заклинюванням з наступною аварійною зупинкою вузла тертя.

Під час терті ковзання без мащення пари сталь 40ХН – чавун СЧ 20 на початкових етапах процесу тертя температура починає різко зростати і приблизно через 20 хв наближається до найбільших значень і далі стабілізується (рис. 6.2). Найбільше значення усталеної температури в зоні

ковзання зареєстровано під час дослідження незміщеної пари і становить приблизно  $120\text{ C}^\circ$ . Під час тертя зразків після фрикційної обробки інструментом з різною формою робочої частини отримано, що температура у зоні ковзання поступово зменшується від  $100\text{ C}^\circ$  (після фрикційної обробки інструментом з гладкою робочою частиною) до близько  $70\text{ C}^\circ$  (після фрикційної обробки з легуванням поверхневого шару міддю).

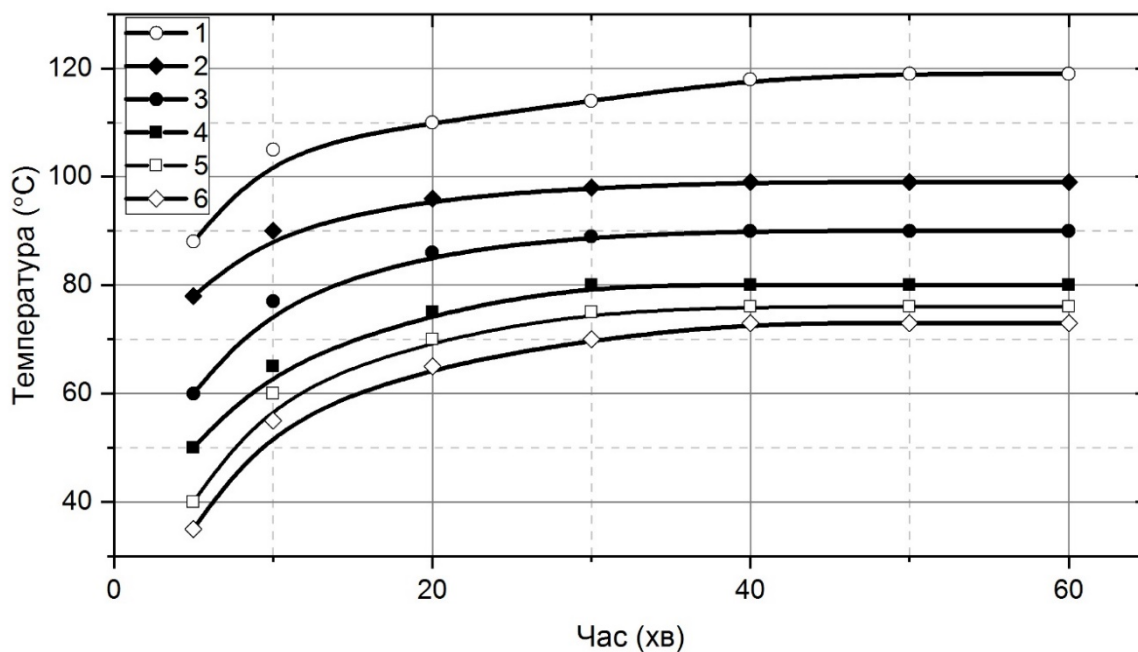


Рисунок 6.2 – Кінетика температури від часу тертя при зношуванні пари сталь 40ХН – чавун СЧ20 при терті без мащення ( $P = 1,2\text{ МПа}$ ): (підписи кривих аналогічно як на рис. 6.1)

Збільшуючи питоме навантаження та швидкість ковзання поверхонь пари тертя температура в зоні їх контакту зростає (рис. 6.3).

Експериментальні дослідження показали, що кінетика величини коефіцієнта тертя відбувається аналогічно як і зміна температури у зоні ковзання.

У початковий період тертя пари величина коефіцієнту тертя різко зростає та досягає максимальної величини, далі процес тертя стабілізується і коефіцієнт тертя дещо знижується (рис. 6.4).

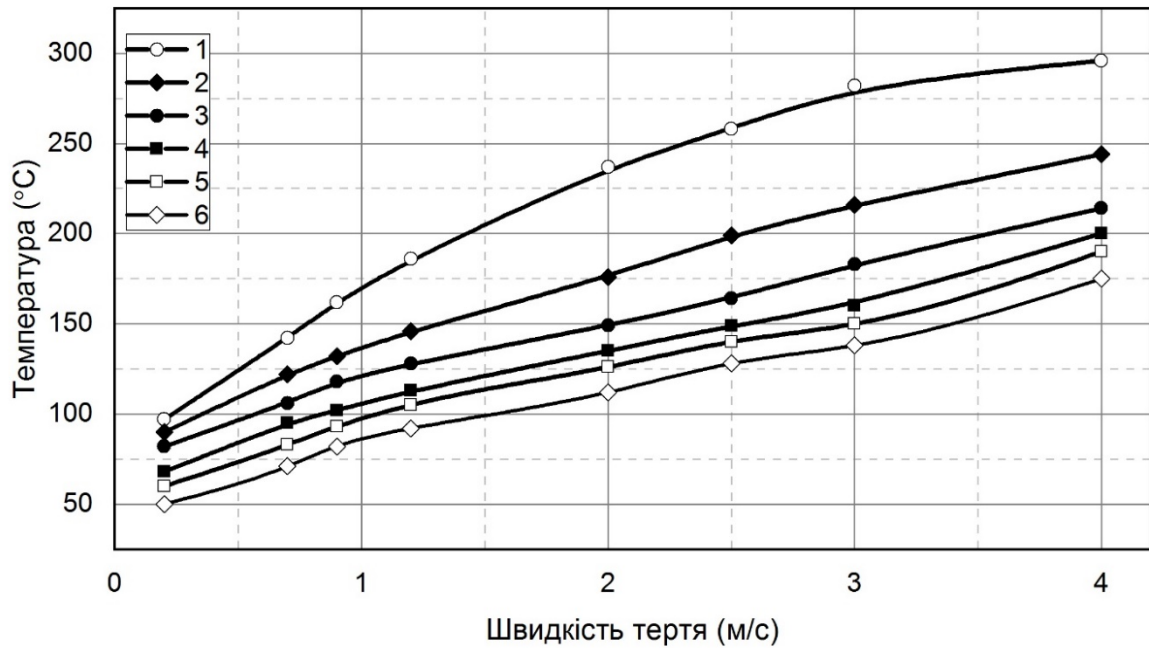


Рисунок 6.3 – Кінетика температури від швидкості тертя при зношуванні пари сталь 40ХН – чавун СЧ20 при терті без мащення ( $P = 1,2$  МПа):  
(підписи кривих аналогічно як на рис. 6.1)

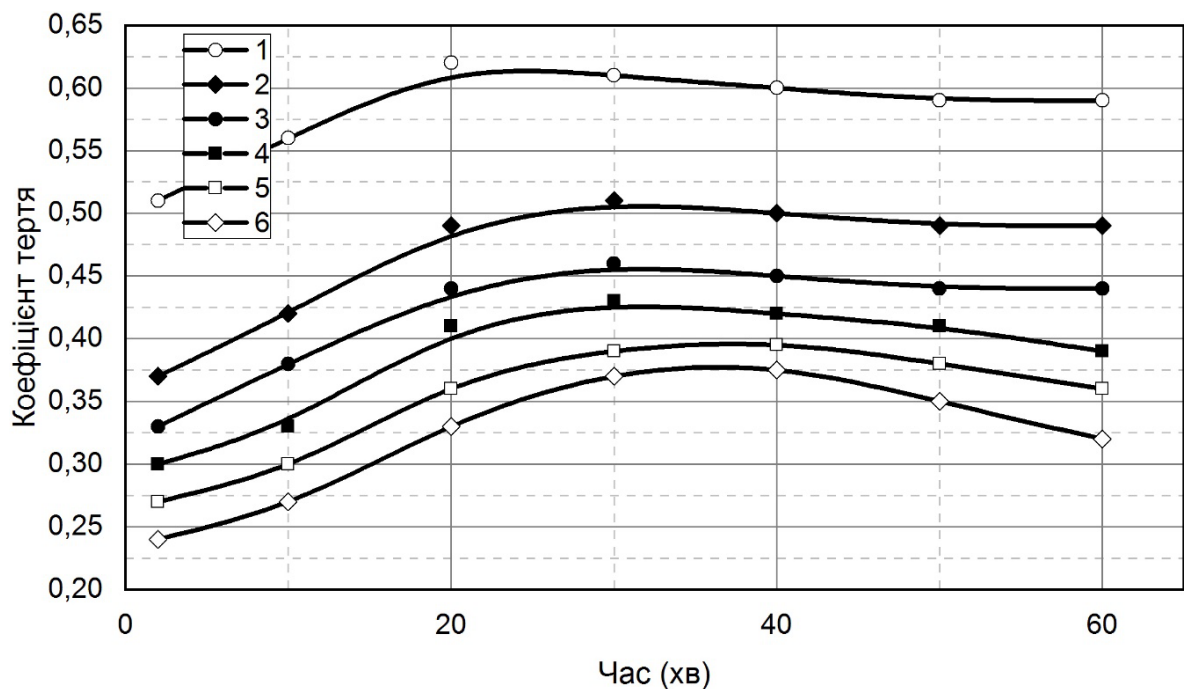


Рисунок 6.4 – Кінетика коефіцієнта тертя від часу тертя при зношуванні пари сталь 40ХН – чавун СЧ20 при терті без мащення зразка (а) та контрзразка (б) ( $P = 1,2$  МПа): (підписи кривих аналогічно як на рис. 6.1)

Вторинні структури на контактуючих поверхнях деталей пар тертя формуються на початкових етапах процесу зношування. У залежності від типу оксиду, швидкості їх формування і руйнування змінюються умови перебігу процесів у зоні контактуючих поверхонь деталей пар тертя. Проходить структурна пристосовуваність контактуючих поверхонь пар тертя. Як наслідок, встановлюється величина коефіцієнта тертя, а також температура у зоні ковзання.

Коефіцієнт тертя у початковий період збільшується за рахунок того, що контактуючі поверхні пари прилягають не по всій площі, а в окремих точках і на плямах контакту виникає високе питоме навантаження, а відповідно і зростає температура.

Величина коефіцієнта тертя залежить від питомого навантаження у зоні контакту деталей пар тертя, яке визначається реальною площею контакту, яка визначається кривою несучої здатності. На параметри кривої несучої здатності суттєво впливає форма робочої поверхні інструмента та метод подачі технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь під час фрикційної обробки.

Збільшуючи питоме навантаження у зоні контакту пари тертя значення коефіцієнту тертя зменшується для усіх досліджуваних пар тертя (рис. 6.5). Зменшення величини коефіцієнта тертя можна пояснити тим, що за даних умов тертя покращуються умови формування вторинних структур, інтенсивніше протікають окислювальні процеси. Збільшення питомого тиску у зоні тертя приводить до підвищення температури на контактних поверхнях деталей пар тертя, яка сприяє утворенню якісних вторинних структур. На кінетику величини коефіцієнта тертя пари сталь – чавун впливають різні фізико-механічні, хімічні властивості та структура матеріалів пар тертя, особливо, наявність графіту у вільному вигляді у чавуні, який виділяється у зоні контакту під час тертя.

Це саме стосується збільшення швидкості ковзання під час тертя. При малих швидкостях ковзання (0,2-0,3 м/с) величина коефіцієнту тертя має

максимальні значення. Зі збільшенням швидкості ковзання (біля 1 м/с) величина коефіцієнту тертя зменшується. З подальшим збільшення швидкості ковзання (в межах від 1 до 2 м/с) величина коефіцієнту тертя збільшується, досягає піку. Наступне збільшення швидкості ковзання приводить до його монотонного зменшення (рис. 6.6).

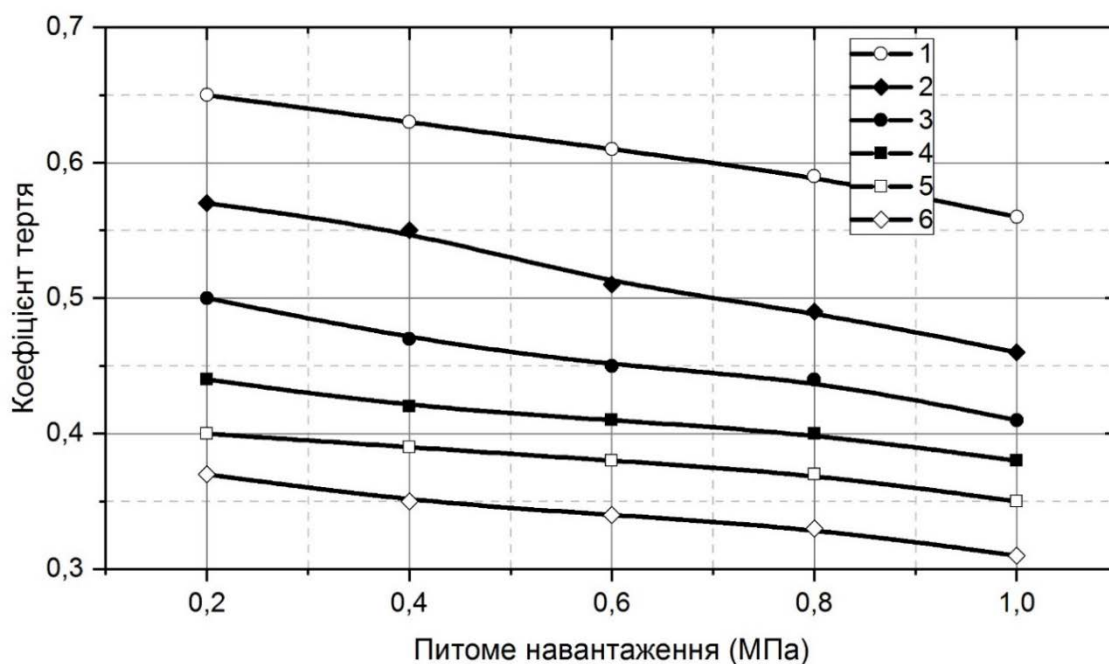


Рисунок 6.5 – Кінетика коефіцієнта тертя від часу тертя при зношуванні пари сталь 40ХН – чавун СЧ20 при терті без мащення зразка (а) та контрзразка (б) ( $P = 1,2$  МПа): (підписи кривих аналогічно як на рис. 6.1)

Аналізуючи отримані криві інтенсивності зношування та величини коефіцієнта тертя в залежності від швидкості ковзання, то найбільші величини коефіцієнтів тертя відповідають значенням швидкостей ковзання під час яких змінюється тип оксиду заліза у вторинних структурах.

Окислювальний тип зношування, який проходить під час тертя без мащення поділяється на декілька стадій, а саме: адсорбція та дифузія атомів кисню на контактуючих поверхнях деталей пар тертя; формування на них вторинних структур та наступне їх руйнування. Адсорбція та дифузія атомів кисню на контактуючих поверхнях та у поверхневих шарах деталей пар тертя є головними і визначальними факторами, які впливають на процес формування

та властивості вторинних структур.

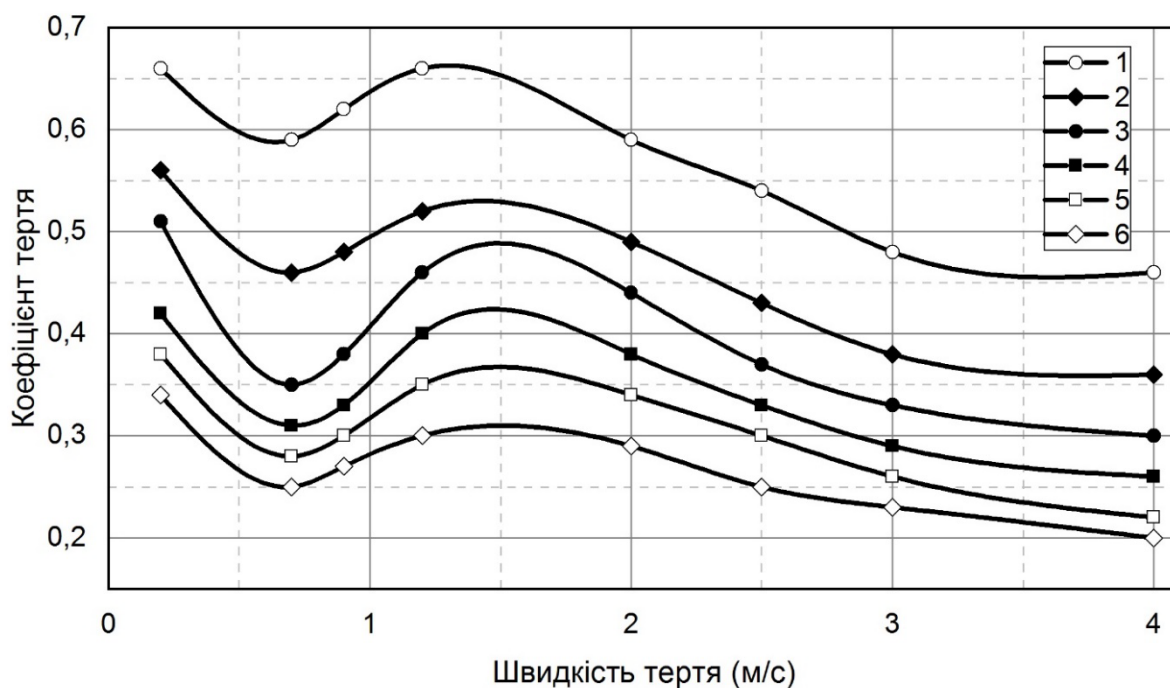


Рисунок 6.6 – Кінетика коефіцієнта тертя від швидкості тертя при зношуванні пари сталь 40ХН – чавун СЧ20 при терті без мащення зразка (а) та контрзразка (б) ( $P = 1,2$  МПа): (підписи кривих аналогічно як на рис. 6.1)

Під час багатократного навантаження і розвантаження та за наявності внутрішніх напружень у вторинних структурах починають зароджуватися і далі розповсюджуватися мікро- і макротріщини. На поверхнях розділення плівок вторинних структур з основним металом відбувається послаблення зв'язків між ними з наступним їх відшаруванням. Швидкість руйнування оксидної плівки залежить від міцності її зчеплення з основним металом, а також від величини контактних напружень у зоні контакту. Зчеплення вторинних структур залежить від співвідношення питомих об'ємів оксиду і основного металу зразка, на поверхні якого формуються вторинні структури. Згідно правила Піллінга-Бедворса чим менше співвідношення питомих об'ємів, тим вищим буде зчеплення вторинних структур з металом контактуючої поверхні деталей пар тертя. Залізо може мати три валентності і у залежності від умов навантаження у зоні контакту деталей пар тертя можуть формуватися наступні оксиди:  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$  та  $Fe_3O_4$ . Співвідношення оксидів



заліза до самого заліза становить: для  $FeO$  – 1,72; для  $Fe_2O_3$  – 2,15 і для  $Fe_3O_4$  – 2,1. У процесі тертя при малих контактних навантаженнях і невеликих швидкостях ковзання вторинні структури складаються, в основному, з оксиду  $Fe_2O_3$ , а при великих питомих навантаженнях і високих швидкостях ковзання з  $Fe_3O_4$  [344].

У процесі тертя без мащення контактуючі поверхні деталей пар тертя безпосередньо дотикаються одна до одної і проходить їх зношування. У такому випадку розрізняють механічне зношування основного металу контактуючих поверхонь (за класифікацією фрикційних зв'язків це когезійне відривання) і зношування оксидних плівок, які формуються на поверхнях ковзання. За Йошімото і Цукізое (Yoshimoto G., Tsukizoe T) представлено, що контактуючих поверхнях повинна бути утворена оксидна плівка певної граничної товщини, швидкість її формування і руйнування є однакові [344].

Швидкість ковзання під час тертя визначає як температуру у зоні контакту так і тип оксидної плівки, яка формується на контактних поверхнях. Під час тертя з малими швидкостями ковзання проходить зношування лише оксидної плівки  $Fe_2O_3$ . При даних умовах тертя товщина оксидної плівки є вищою за критичну. Швидкість формування оксидної плівки є більшою за швидкість її руйнування. Зі збільшенням швидкості ковзання відбувається зношування як оксидної плівки  $Fe_2O_3$  так і основного металу. За таких умов тертя на інтенсивність зношування пари тертя значно впливають фізико-механічні властивості поверхневого шару контактуючих деталей.

При підвищенні швидкості ковзання на поверхні контактуючих тіл температура досягає значень, при яких виникає оксид  $Fe_3O_4$  і починається його зношування, а також частково й основного металу. З подальшим збільшенням швидкості ковзання спостерігається тільки зношування плівки  $Fe_3O_4$  [344].

Процес зношування без мащення пар тертя залежить від процесів, які протікають у тонких поверхневих шарах металу під дією високих локальних деформацій, питомих тисків і температур. Такі процеси змінюють хімічний і фазовий склади, структуру, текстуру поверхневих шарів, впливають на

формування вторинних структур.

Зміцнений нанокристалічний білий шар має набагато вищу твердість, зерна мають менше зерно, змінений хімічний склад, високу густину дислокацій (більше 10 разів), підвищену пластичність, збільшену кількість залишкового аустеніту, ніж основний метал. За рахунок підвищеної густини дислокацій блокується їх переміщення, що у свою чергу, блокує розповсюдження тріщин.

Зміцнений білий нанокристалічний шар ефективно підвищує зносотривкість в умовах коли проходить зношування як оксидної плівки, так і механічне зношування основного металу. За рахунок його специфічних фізико-механічних, хімічних та інших властивостей сповільнюється зношування основного металу поверхневого шару і відповідно зростає зносотривкість пари тертя. В умовах, коли зношування контактуючих поверхонь проходить за рахунок зношування оксидних плівок, підвищення зносотривкості зміцнених пар тертя є меншим, ніж коли проходить зношування як оксидних плівок, так і основного металу.

## **6.2. Зносотривкість при терті ковзання з граничним мащенням**

Розділ поверхонь тертя рідким або консистентним мастилом є одним із методів підвищення зносостійкості. При недостатній подачі мастильного матеріалу спостерігається тертя із граничним мащенням. Під граничним тертям розуміється тертя, при якому тверді тіла відділені один від одного дуже тонким шаром мастила, яке знаходиться під дією молекулярних сил металу [345]. Наявність граничного шару мастила товщиною 0,1-0,5 мкм знижує сили тертя, зменшує зношування у порівнянні з тертям без мащення.

Дослідження показали, що фрикційна обробка також суттєво підвищує опір зношуванню при терті з граничним мащенням (рис. 6.7). При малих

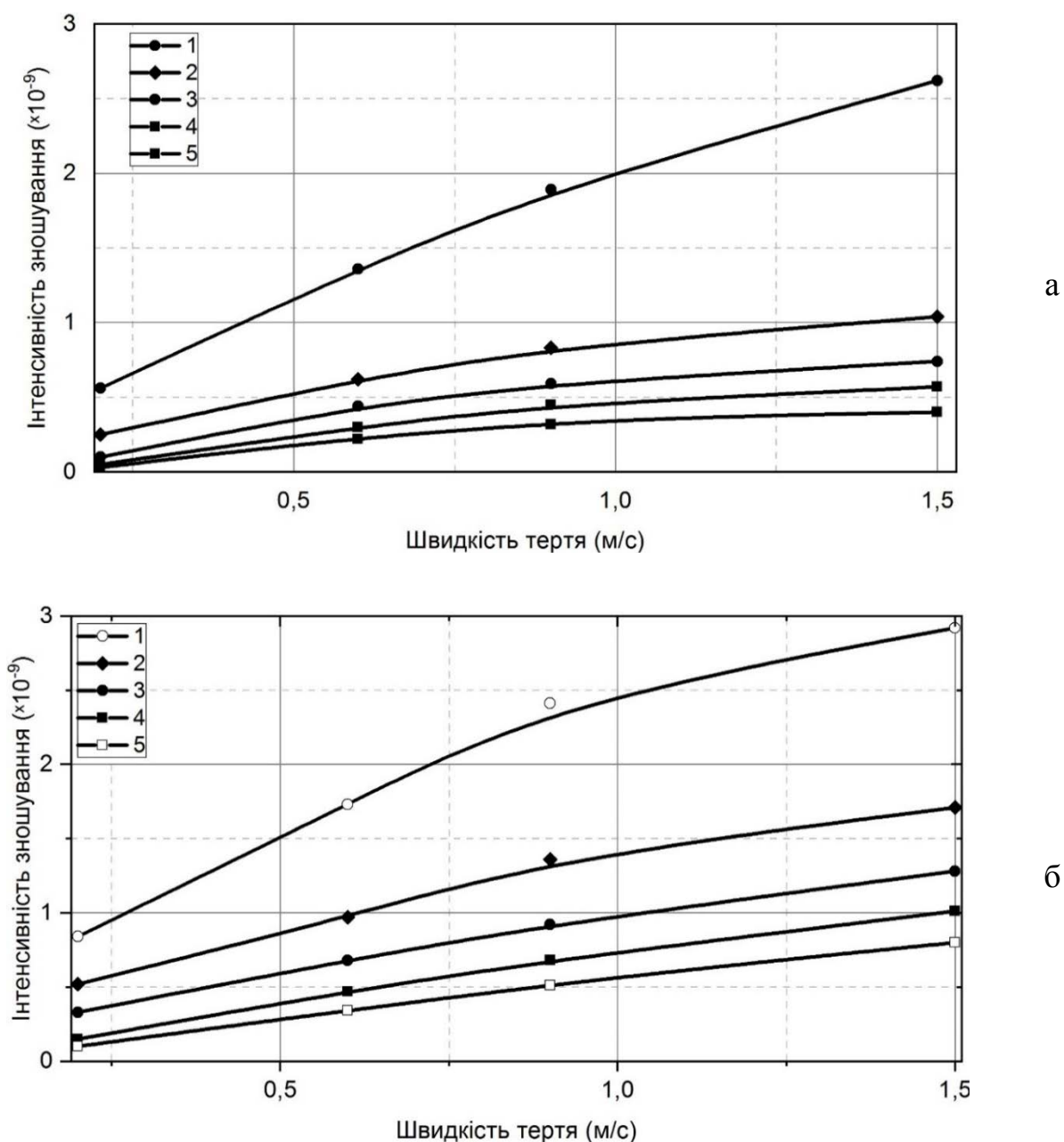


Рисунок 6.7 – Кінетика зношування пари сталь 45 (ГНВ) – чавун СЧ 20 при терті з граничним мащенням зразка (а) та контрзразка (б) ( $P = 1$  МПа) фрикційна обробка, інструмент: 1 – незміцнені; 2 – з гладкою робочою частиною; 3 – з поперечними пазами; 4 – з різнонаправленими пазами і подачею технологічного середовища методом поливу; 5 – з різнонаправленими пазами і подачею технологічного середовища через корпус інструмента

швидкостях ковзанням  $V = 0,2$  м/с підвищення опору зношуванню досягає 2,2-

2,5 разів. Зі збільшенням швидкості ковзання ефект фрикційного зміцнення збільшується. Найбільше підвищення опору зношуванню спостерігається при швидкості ковзання  $V = 1,5$  м/с і складає 2,9-3,2 разів. Зносостійкість зразків після фрикційного зміцнення інструментом з поперечними пазами дещо вища у порівнянні зі зразками зміцненими інструментом з гладкою робочою частиною. Характер зношування незміцнених контрзразків, які працювали у парі зі зміцненими зразками, такий самий, як і зміцнених.

При підвищенні швидкості ковзання більше 1,5 м/с усі пари тертя стають непрацездатними. В останньому випадку основну роль грає температура в зоні тертя (рис. 6.8). При терті зміцнених зразків температура в зоні контакту нижча у порівнянні з незміцненою парою. При досягненні в зоні тертя температури близько  $500^{\circ}\text{C}$  гранична плівка мастильного матеріалу руйнується й починаються процеси схоплювання, подальша робота пари тертя стає неможливою.

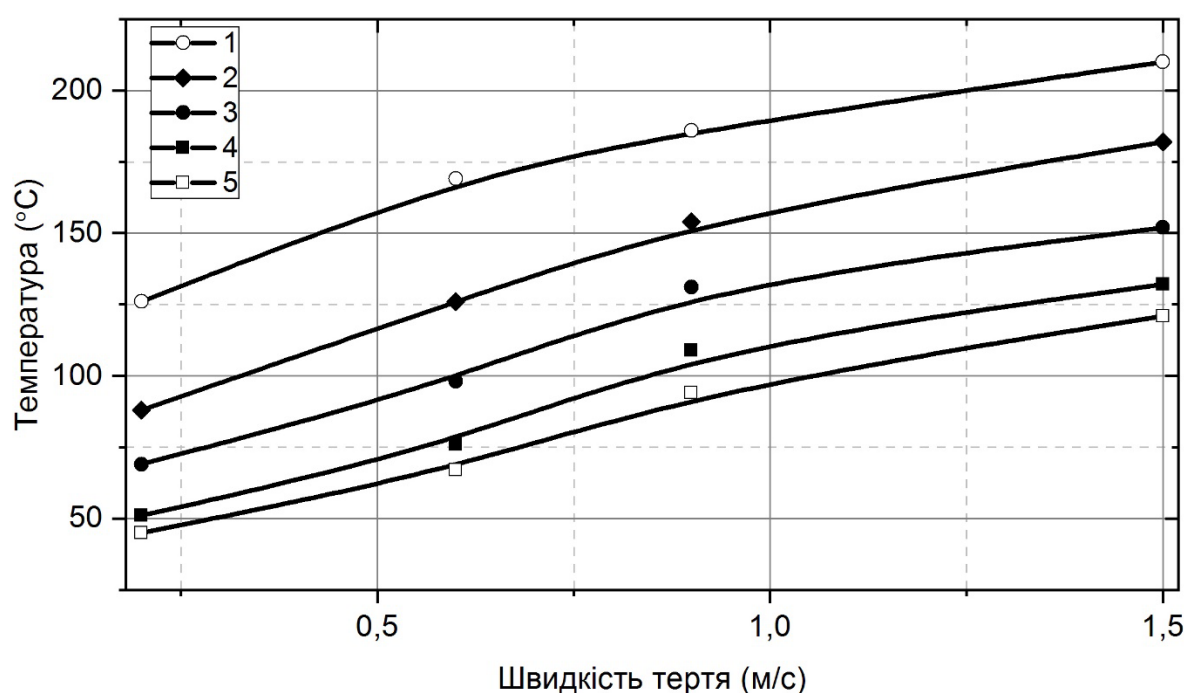


Рисунок 6.8 – Кінетика температури від швидкості тертя при зношуванні пари сталі 45 (ГНВ) – чавун СЧ 20 при терті з граничним мащенням зразка (а) та контрзразка (б) ( $P = 1$  МПа): (підписи кривих аналогічно як на рис. 6.7)

Фрикційна обробка використовуючи інструмент з гладкою робочою частиною суттєво знижує коефіцієнт тертя на всьому діапазоні досліджуваних швидкостей тертя. Застосування у процесі зміцнення зміцненні інструмента з поперечними пазами на робочій частині ще більше знижує коефіцієнт тертя (рис 6.9).

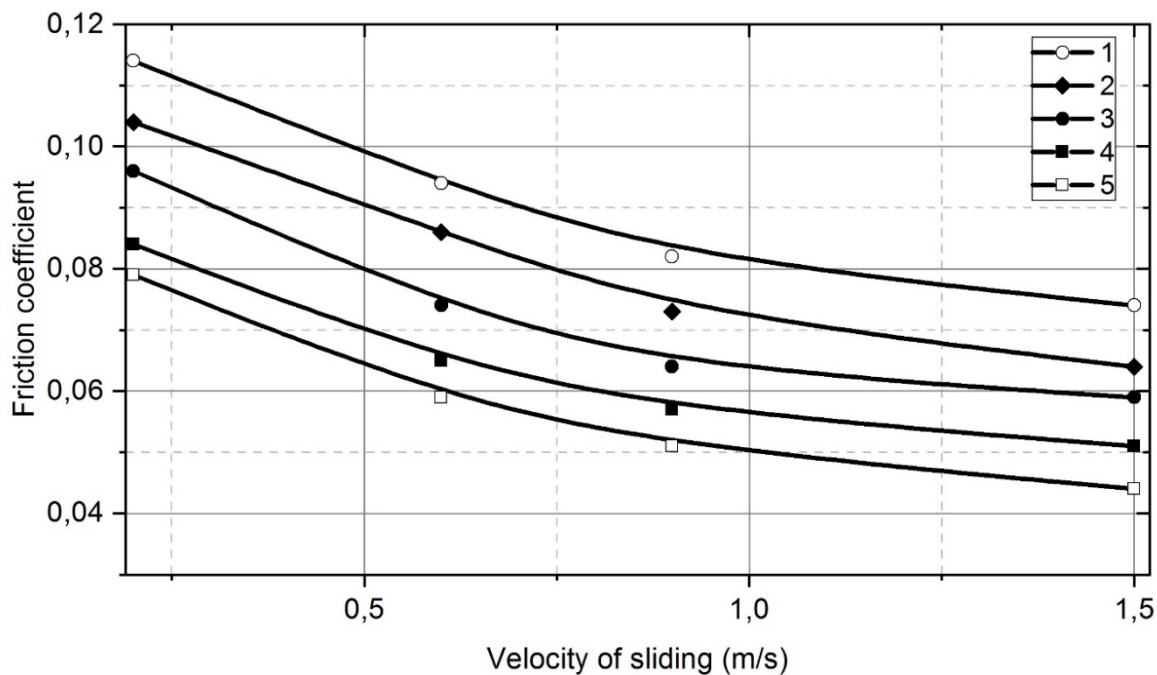


Рисунок 6.9 – Кінетика коефіцієнта тертя від швидкості тертя при зношуванні пари сталь 40ХН (ГНВ) – чавун СЧ 20 при терті з граничним мащенням зразка (а) та контрзразка (б) ( $P = 1$  МПа): (підписи кривих аналогічно як на рис. 6.7)

Усі мастила мають здатність адсорбуватися на металевій поверхні. Змочування поверхні залежить від природи мастильного середовища, поверхневої енергії та шорсткості поверхонь тертя. Молекули мастильного матеріалу орієнтуються перпендикулярно до поверхні тертя, які можна представити у вигляді ворсу. Мастильний матеріал у граничному шарі анізотропний, у тангенціальному напрямку молекулярні шари легко згинаються, при їх великій товщині ковзають один по одному. По нормалі до поверхні тертя вони володіють високим опором стиску.

При терті із граничним мащенням на поверхнях тертя утворюються

вторинні структури, аналогічно як при терті без мащення. Вони складаються, в основному, з оксидів заліза і легуючих елементів, а також із сполук активних елементів мастила з атомами металу. Елементи, які утворюють з матеріалом основи сполуки, можуть дифундувати як із навколишнього середовища, так і з об'єму металу [346].

Мастильні матеріали грають роль екрана, який зменшує поступлення кисню в зону тертя, так як вміст кисню у них значно менший, аніж на повітрі. При терті з відносно низьким рівнем структурно-термічної активації цього кисню є достатньо для протікання трибохімічних реакцій. Коли тертя проходить у важких умовах, рівень структурно-термічної активації сильно зростає, вмісту кисню, який адсорбується на ювенільних поверхнях може бути недостатньо для утворення якісних вторинних структур. Для покращання якості та прискорення утворення вторинних структур до мастила додають присадки, які містять хлор, сірку, фосфор та інші елементи. При терті може проходити також і висхідна дифузія приведених елементів з-під поверхневого шару в зону тертя [347].

При швидкостях тертя інтенсивність зношування як зміцненої так і незміцненої пар є порівняно невеликою. Інтенсивність зношування зміцненої пари є майже у 2 рази меншою, аніж незміцненої. Зі збільшенням швидкості тертя зростає й інтенсивність зношування пар, особливо сильно збільшується інтенсивність зношування незміцненої пари. При терті незміцненої пари з невеликими швидкостями, кисню, який адсорбується на поверхнях тертя є достатньо для утворення якісних вторинних структур. Зі збільшенням режимів тертя вмісту кисню є недостатньо для утворення якісних вторинних структур.

На поверхнях контакту, покритих граничною плівкою мастильного матеріалу, протікає пружна і пластична деформація металу. Опір рухові при ковзанні складається з опору зсуву граничного шару і опору дряпанню поверхонь втисненими об'ємами. На поверхнях контакту, де виникають значна пластична деформація та висока локальна температура, проходить руйнування мастильної плівки. За рахунок рухливості молекул мастильного

матеріалу на поверхнях тертя адсорбція протікає з великою швидкістю, що дозволяє відновлювати суцільність граничної плівки [348, 349].

Працездатність пар тертя при граничному терті обмежується температурою, яка виникає в зоні тертя. На ювенільних поверхнях настає захоплення з вириванням металу й пара стає непрацездатною [350].

### **6.3. Зносотривкість при терті ковзання в оливо-абразивному середовищі**

Під час експлуатації машинобудівного обладнання найбільше погіршення експлуатаційних параметрів робочих поверхонь деталей відбувається за рахунок трибологічних процесів у рухомих вузлах. Зношування пар тертя у оливо-абразивному середовищі є найбільш розповсюджене під час роботи різних вузлів. Забезпечити тертя деталей кінематичних пар у чистій оливі є проблематично, бо у процесі експлуатації у оливу потрапляють продукти зношування, пил та абразив з навколишнього середовища. Фільтри для очищення оливи можуть пропускати тверді частинки дисперсністю менше 8-12 мкм.

Дослідження зносостійкості під час тертя ковзанням у оливо-абразивному середовищі проводили за схемою «вал-вкладка». Швидкість ковзання під час досліджень становила 0,9 м/с, питоме навантаження змінювали від 2 МПа до 6 МПа. Час випробувань пари тертя на одному етапі складав 6 год. Як мащення використовували мінеральну оливу до якої додавали 0,1 % абразиву за масою дисперсністю 10-15 мкм. Оливу з абразивом інтенсивно подавали у зону тертя з використанням спеціальної автономної системи.

Зразки-кільця виготовляли зі сталі 45, 40Х та У8А. Вони були після гартування і низького відпуску (ГНВ) та гартування і високого відпуску

(ГНВ). Зразки-вкладки виготовляли з сірого чавуну після штучного старіння.

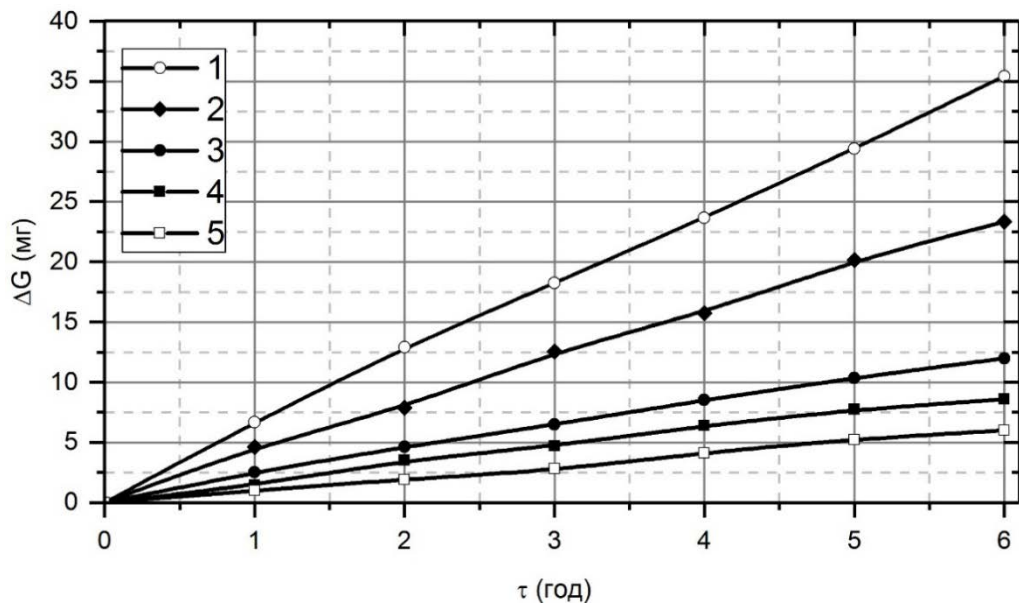
Дослідження показали, що фрикційне оброблення суттєво підвищує опір зношуванню пар сталь-чавун під час тертя у оливо-абразивному середовищі. Так, при випробуваннях на зносостійкість при питомому навантаженні 4,5 МПа і швидкості ковзання 0,9 м/с, величина зношування зміцнених кілець, виготовлених зі сталі 45 після гартування і низького відпуску зменшилася у 2,7 разу, а після високого відпуску - у 3 рази у порівнянні з такими ж незміцненими кільцями. Характерно відмітити, що величина зношування незміцнених вкладок із сірого чавуну, які працювали зі зміцненими кільцями зменшилося також майже у стільки ж разів (рис. 6.10).

Аналогічна картина спостерігається при дослідженні зразків, виготовлених зі сталі У8А у різному структурному стані. Так, опір зношуванню загартованих і низьковідпущених кілець з білим шаром збільшився майже у 2,4 рази, а вкладок, які працювали з ними у парі - у 2,8 разу. Кільця у загартованому і високовідпущеному стані з білим шаром та вкладки, які працювали з ними у парі, мають майже у 3 рази більший опір зношуванню, ніж така ж незміцнена пара тертя (рис. 6.11).

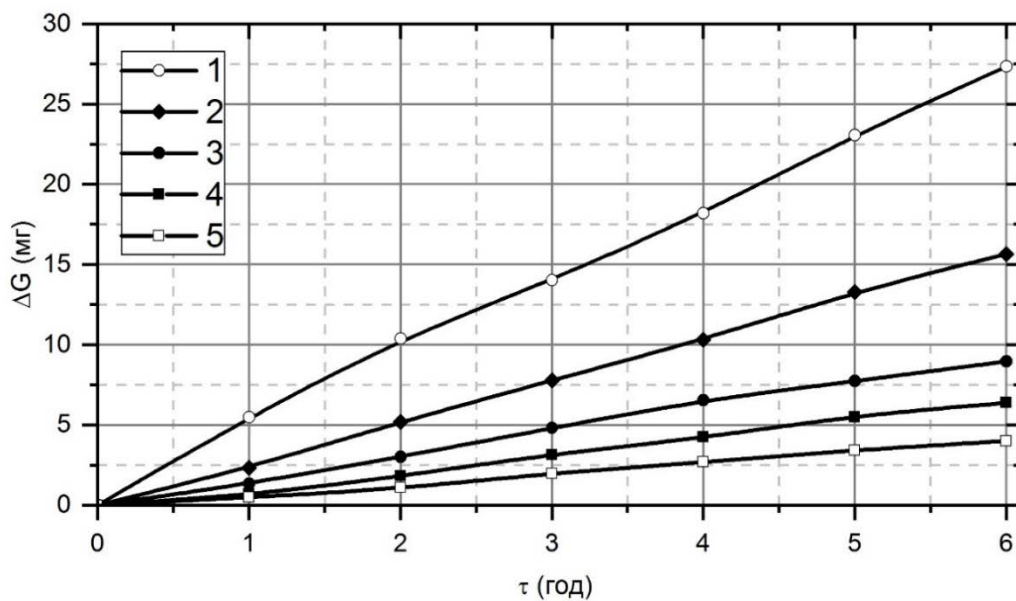
На опір зношуванню суттєво впливає величина питомого навантаження, при якій працює пара тертя. При випробуванні незміцненої пари тертя сталь 40Х - чавун СЧ 20 при збільшенні питомого навантаження від 2 МПа до 4,5 МПа інтенсивність зношування як кільця, так і вкладки зростає. При збільшенні питомого навантаження до 6 МПа інтенсивність зношування пари тертя різко зростає. Інтенсивність зношування зміцненої пари при збільшенні питомого навантаження від 2 МПа до 6 МПа зростає, але не так суттєво як при зношуванні незміцненої пари. Так, при терті зміцненого кільця зі сталі 40Х у загартованому, низьковідпущеному та високовідпущеному станах із питомим навантаженням 2 МПа інтенсивність зношування зменшилась у 2,1-2,2 рази. При збільшенні питомого навантаження до 6 МПа зменшення інтенсивності зношування зміцнених кілець у загартованому, низько - та високовідпущеному станах складала 3,7 і 3,1 разу відповідно у порівнянні з



незміцненою парою (рис. 6.12). Також дослідження показали, що при зміцненні обох тіл пари тертя ефект підвищення зносостійкості нівелюється.

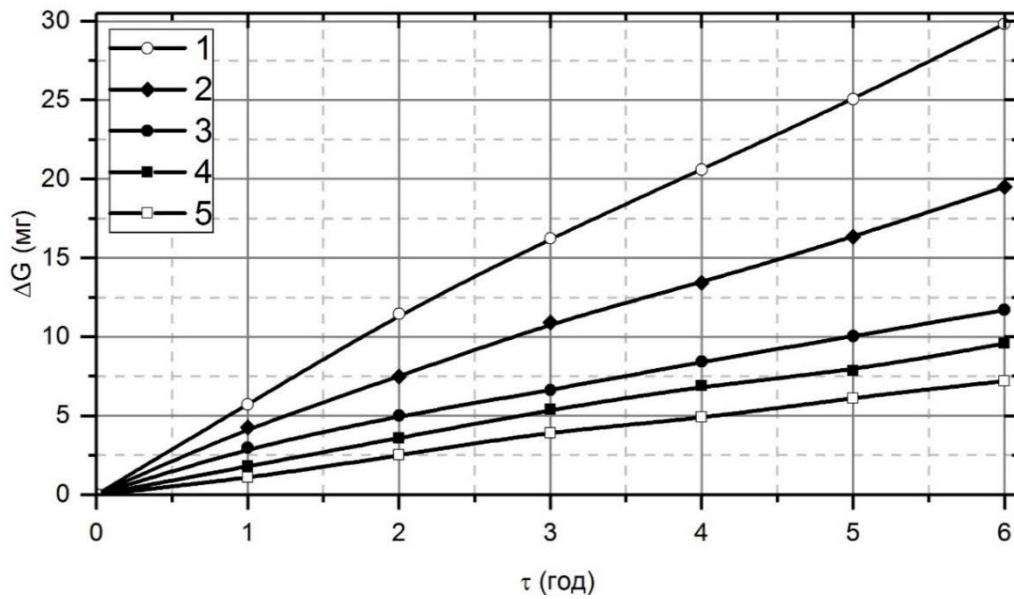


а

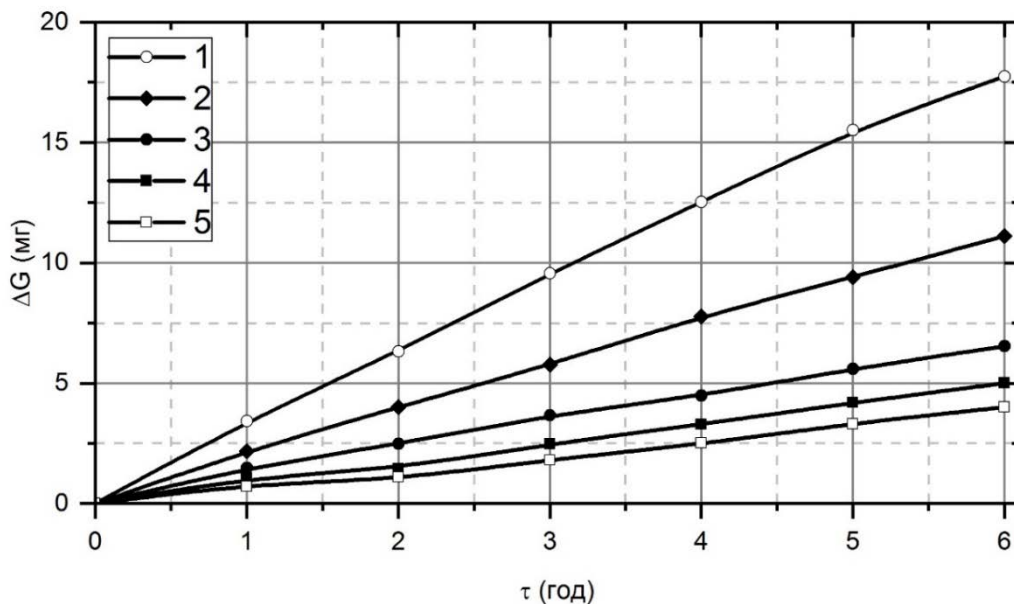


б

Рисунок 6.10 – Кінетика зношування пари сталь 45 - чавун СЧ 20 при терті в оливо-абразивному середовищі кільця (а) та вкладки (б), фрикційна обробка, інструмент з різнонаправленими пазами: 1, 2 – незміцнені; 1, 3 – ГВВ; 2, 4, 5 – ГНВ; 3, 4 – подача технологічного середовища методом поливу; 5 – з внутрішньою подачею технологічного середовища



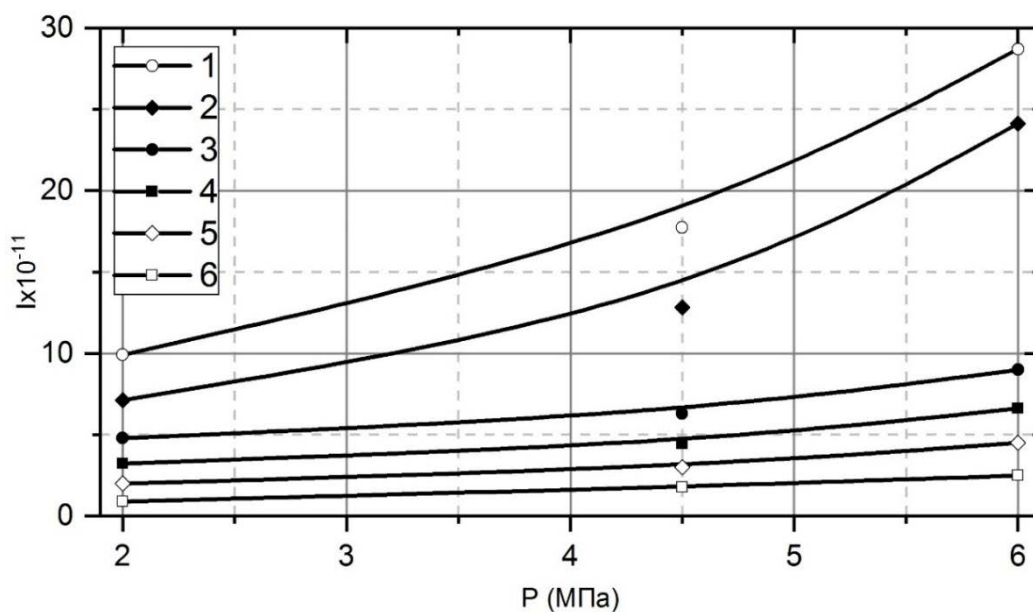
а



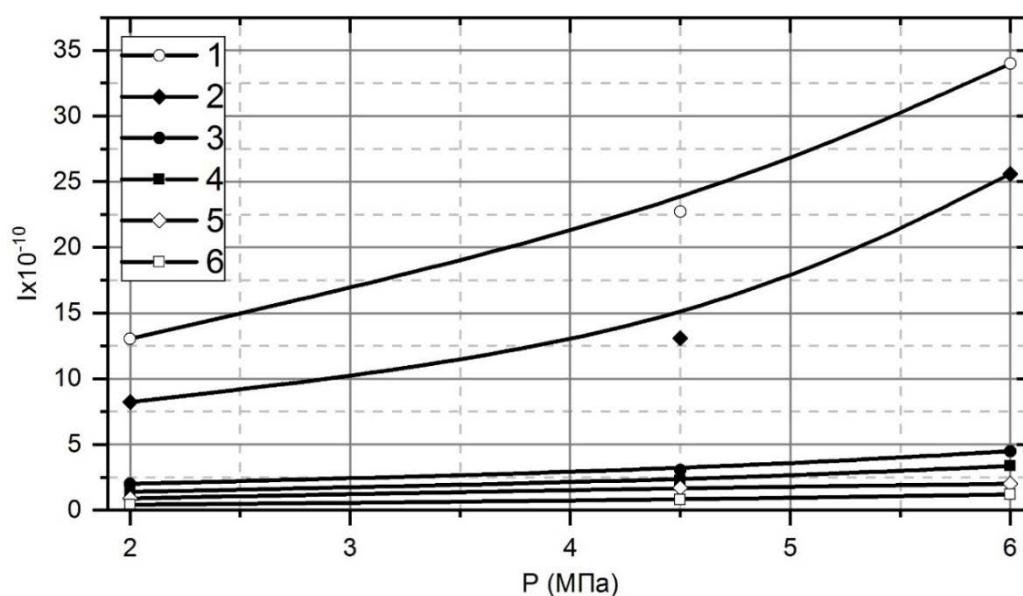
б

Рисунок 6.11 – Кінетика зношування пари сталь У8 - чавун СЧ 20 при терті в оливо-абразивному середовищі кільця (а) та вкладки (б), фрикційна обробка, інструмент з різнонаправленими пазами: 1, 2 – незміцнені; 1, 3 – ГВВ; 2, 4, 5 – ГНВ; 3, 4 – подача технологічного середовища методом поливу; 5 – з внутрішньою подачею технологічного середовища

У багатьох працях, присвячених дослідженню процесів тертя зношування показано, що інтенсивність зношування залежить, головним чином, від твердості поверхневих шарів деталей. Проведено велику кількість



а



б

Рисунок 6.12 – Залежність інтенсивності зношування пари сталь 40X - чавун СЧ 20 при терті в оливо-абразивному середовищі кільця (а) та вкладки (б) ( $V = 0,9$  м/с) фрикційна обробка, інструмент з різнонаправленими пазами: 1, 2 – незміцнені; 1, 3, 5 – ГВВ; 2, 4, 6 – ГНВ; 3, 4 – подача технологічного середовища методом поливу; 5, 6 – з внутрішньою подачею технологічного середовища

досліджень з метою визначення взаємозв'язку зносостійкості металу з його твердістю [344], в яких показано, що із збільшенням вуглецю в сталі підвищується її твердість, і відносна зносостійкість. Деталі однакової твердості, але різного хімічного складу мають різну зносостійкість. Важливе

значення мають не лише твердість, але і в'язкість, мікроструктура, величина і якість карбідів, деформування, напруженість і інше. Зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі підвищується її зносостійкість. Це підвищення більш помітне на загартованій і високовідпущеній сталі. Підвищення вмісту вуглецю у вихідній сталі суттєво впливає на якість білих шарів, підвищується їх товщина, мікротвердість, кількість залишкового аустеніту, густина дислокацій. Проведені нами дослідження показують, що білі шари є ефективним технологічним методом підвищення працездатності деталей машин.

Встановлено, що зі збільшенням вмісту вуглецю в сталі зносостійкість зміцнених деталей також зростає. Але це збільшення значно менше, ніж незміцнених як загартованих і високовідпущених так і загартованих з низьким відпуском. Так, якщо зі збільшенням вуглецю в сталі від 0,4 % до 0,8 % зносостійкість загартованої і низьковідпущеної сталі підвищилася у 1,7 разів, а покращеної більше ніж у 2 рази, то після фрикційного зміцнення зносостійкість у першому випадку підвищилася всього лише на 30 %, а в другому - на 50 %. Це свідчить про те, що білі шари, отримані на середньовуглецевих сталях у більшій мірі підвищують зносостійкість, ніж високовуглецеві. Таким чином, зміцнення середньовуглецевих сталей дозволяє приблизити характеристики їх працездатності до високовуглецевих.

Досліджувані зразки (кільця та вкладки) виготовляли з сірого чавуну СЧ 20. Для порівняння вкладки виготовляли з бронзи БрОЦС5-5-5 та антифрикційного сплаву БС-6. Зміцнювали тільки робочі поверхні кілець, робочі поверхні вкладок не зміцнювали, їх тільки шліфували електрокорундовим кругом.

Дослідження зносостійкості при терті ковзання у оливо-абразивному середовищі проводили на установці тертя за схемою «кільце - вкладка» при швидкості ковзання  $V = 0,9$  м/с і зміні питомого навантаження  $P$  від 2 МПа до 6 МПа. Час випробувань пари тертя складав  $t = 6$  год. До мінеральної оливи додавали 0,1 % абразиву за масою дисперсністю 10-20 мкм. Оливу з абразивом інтенсивно подавали у зону тертя з використанням спеціальної автономної

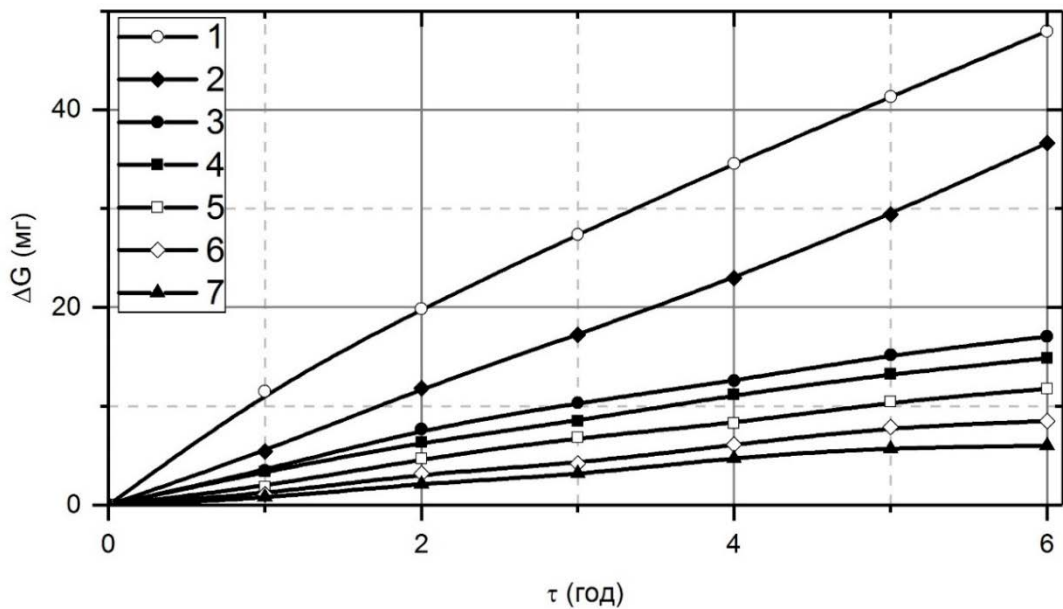
системи.

Для підвищення зносостійкості деталей машин використовується різні методи поверхневого зміцнення. Для оцінки ефективності методу фрикційного оброблення під час зношування пар тертя виготовлених з чавуну використали також гартування струмами високої частоти та ультразвукове оброблення робочих поверхонь зразків. Дослідження показали, що кожен з методів поверхневого зміцнення збільшує опір зношуванню пари чавун СЧ 20 – чавун СЧ 20 під час тертя у оливо-абразивному середовищі.

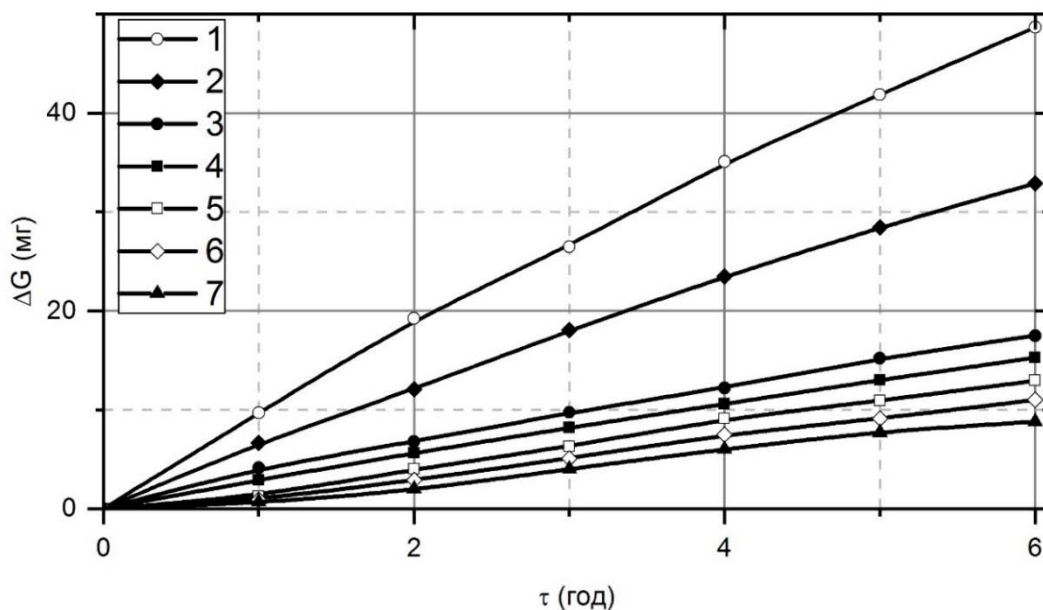
Так, при терті зі швидкістю ковзання  $V = 0,9$  м/с та питомому навантаженню  $P = 4,5$  МПа гартування струмами високої частоти зразків-кілець підвищує їх опір зношуванню лише на 40 %, а вкладок, які працювали з ними в парі, приблизно на 50 % у порівнянні з незміцненою парою. Під час зміцнення робочих поверхонь зразків-кілець за допомогою ультразвукового оброблення у поверхневих шарах останніх формується білий шар аналогічний, як і після фрикційного оброблення. Ультразвукове оброблення робочих поверхонь кілець проводили без технологічного середовища.

Експерименти показали, що поверхневе зміцнення зразків-кілець ультразвуковим обробленням підвищує їх довговічність у 3 рази, а незміцнених вкладок, які працювали з ними у парі, у 3,1 разу в порівнянні з незміцненою парою. Фрикційне оброблення ще суттєвіше підвищує опір зношуванню при терті в оливо-абразивному середовищі. На процеси зношування впливає якість зміцненого шару, яка формується за рахунок використання різного технологічного середовища (мінеральна олива, олива з поверхнево активними полімервмісними добавками) під час оброблення. Так, під час фрикційного оброблення з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи зразків-кілець їх опір зношуванню зріс у 3,4 рази, а незміцнених вкладок, які працювали у парі, у 3,3 рази у порівнянні з незміцненою парою. Найбільшу зносостійкість має пара, в якій зразки-кілець були фрикційно оброблені з використанням як технологічне середовище оливи з поверхнево активними полімервмісними добавками. Так, опір

зношуванню кілець-зразків зріс у 4,1 рази, а вкладок – у 3,8 разу у порівнянні з незміцненою парою(рис. 6.13).



а

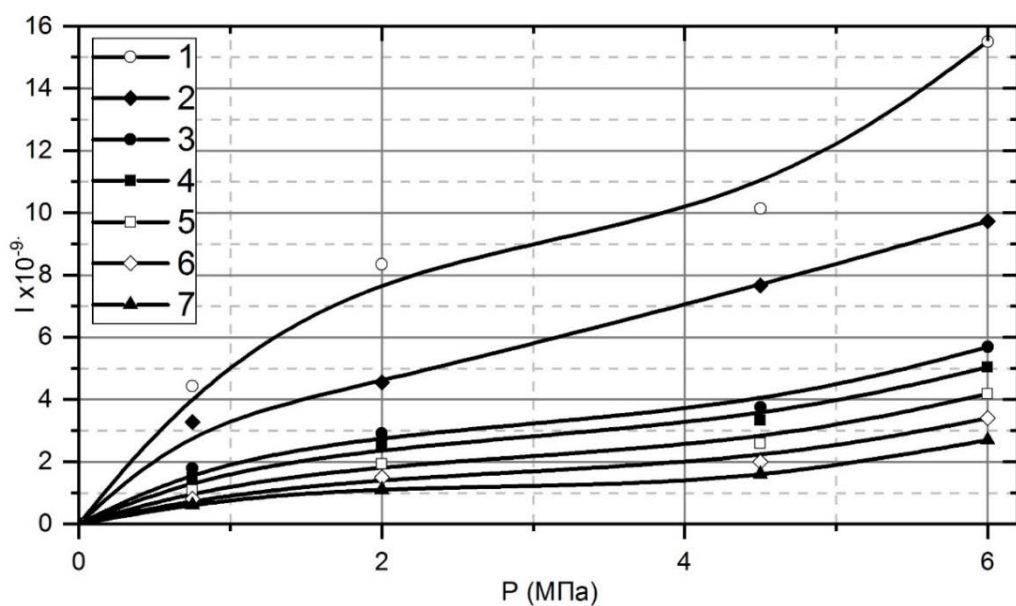


б

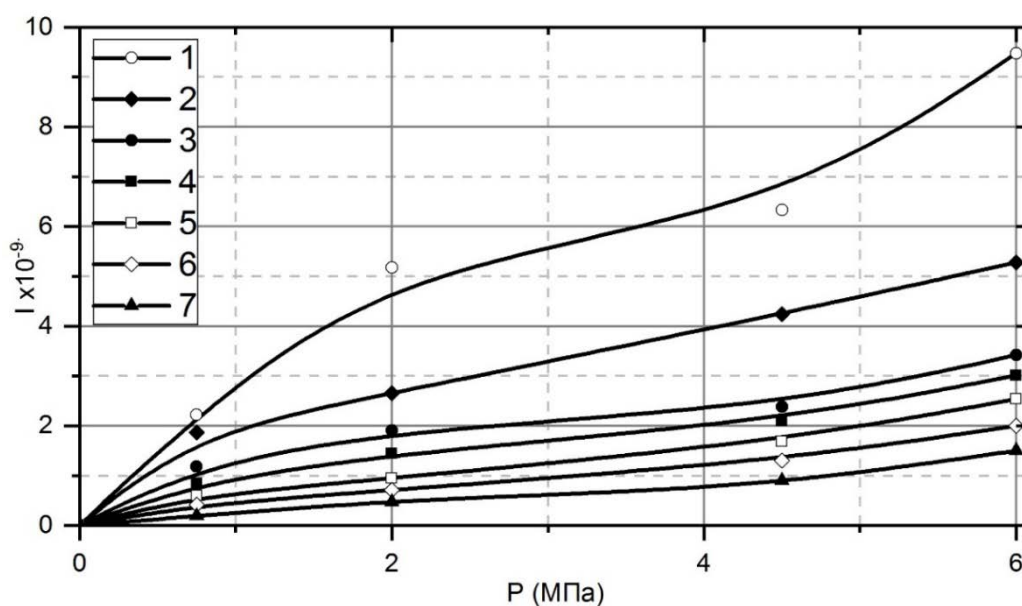
Рисунок 6.13. Кінетика зношування пари чавун СЧ 20–чавун СЧ 20 при терті в оливо-абразивному середовищі кільця (а) та вкладки (б) ( $P = 4,5$  МПа;  $V = 0,9$  м/с): 1 – незміцнені; 2 – гартування СВЧ; 3 – оброблення ультразвуком; 4 – фрикційне оброблення, інструмент (гладкий); 5 – інструмент (подача середовища поливом, різнонаправлений паз); 6 – інструмент (подача середовища через корпус, різнонаправлений паз); 7 – перервний білий шар

У всіх випадках досліджували якісний, суцільний білий шар. Для оцінки впливу якості зміцнених шарів на їх зносостійкість зразки-кілець зміцнили таким чином, щоб отримати перервний (не суцільний) білий шар. Дослідження показали, що при терті в оливо-абразивному середовищі пара тертя, де зразок-кілець має перервний білий шар, має меншу зносостійкість, ніж незміцнена пара. Так, зносостійкість як кілець, так і вкладок зменшилась майже на 20 % у порівнянні з незміцненою парою. Отже, для нормальної роботи пари тертя при зношуванні в оливо-абразивному середовищі та отримання позитивних ефектів від поверхневого зміцнення необхідно, щоб зміцнений шар був якісним, рівномірним (суцільним) по всій поверхні контакту. Якщо зміцнений шар перервний, у місцях з меншою твердістю втискаються зерна абразиву, а також продукти зношування і довговічність такої пари тертя різко зменшується. Тим можна пояснити отримання деякими авторами негативних результатів по впливу зміцнених шарів на зносостійкість пар тертя [351, 352]. Зміна питомого навантаження при терті у оливо-абразивному середовищі пари чавун СЧ 20 – чавун СЧ 20 по різному впливає на інтенсивність зношування зміцнених та незміцнених пар тертя. Так, збільшення питомого навантаження до  $P = 2$  МПа приводить до різкого збільшення інтенсивності зношування незміцненої пари (рис. 6.14). При подальшому збільшенні питомого навантаження до  $P = 4,5$  МПа мало впливає на величину інтенсивності зношування. Збільшення навантаження до 6 МПа знову приводить до різкого зростання інтенсивності зношування незміцненої пари. При зношуванні зміцнених пар із збільшенням питомого навантаження інтенсивність зношування поступово зростає. На всьому діапазоні досліджуваного питомого навантаження найбільший опір зношуванню має пара тертя зі зразками-кілець після фрикційного зміцнення з використанням як технологічне середовище оливи з поверхнево активними полімервмісними добавками. Характер кривих зношування вкладок аналогічний кривим зношування кілець, які працювали з ними у парі. З цього слідує висновок, що для підвищення опору зношуванню чавунної пари тертя при терті ковзанням у оливо-

абразивному середовищі достатньо зміцнити лише одну деталь пари, більш технологічну.



а



б

Рисунок 6.14. Вплив питомого навантаження на зношування пари чавун СЧ 20–чавун СЧ 20 при терті в оливо-абразивному середовищі кільця (а) та вкладки (б) ( $P = 4,5$  МПа;  $V = 0,9$  м/с): 1 – незміцнені; 2 – гартування СВЧ; 3 – оброблення ультразвуком; 4 – фрикційне оброблення, інструмент (гладкий); 5 – інструмент (різнонаправлений паз, подача середовища поливом); 6 – інструмент (різнонаправлений паз, подача середовища через корпус)

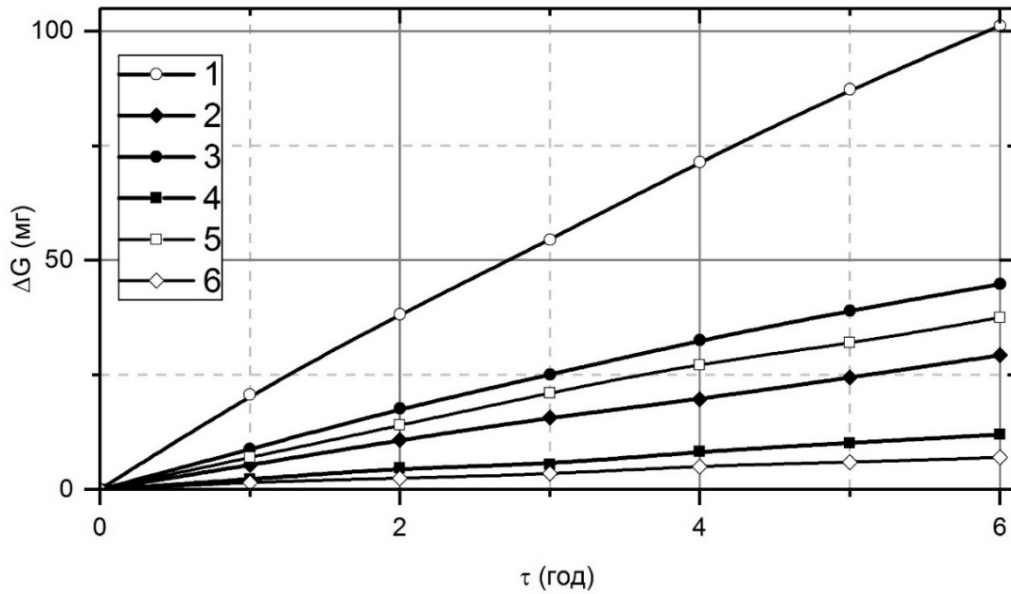


При терті пари тертя, у якій кільця були з перервним білим шаром, із збільшенням питомого навантаження інтенсивність зношування як кілець, так і вкладок більша, аніж незміцненої пари.

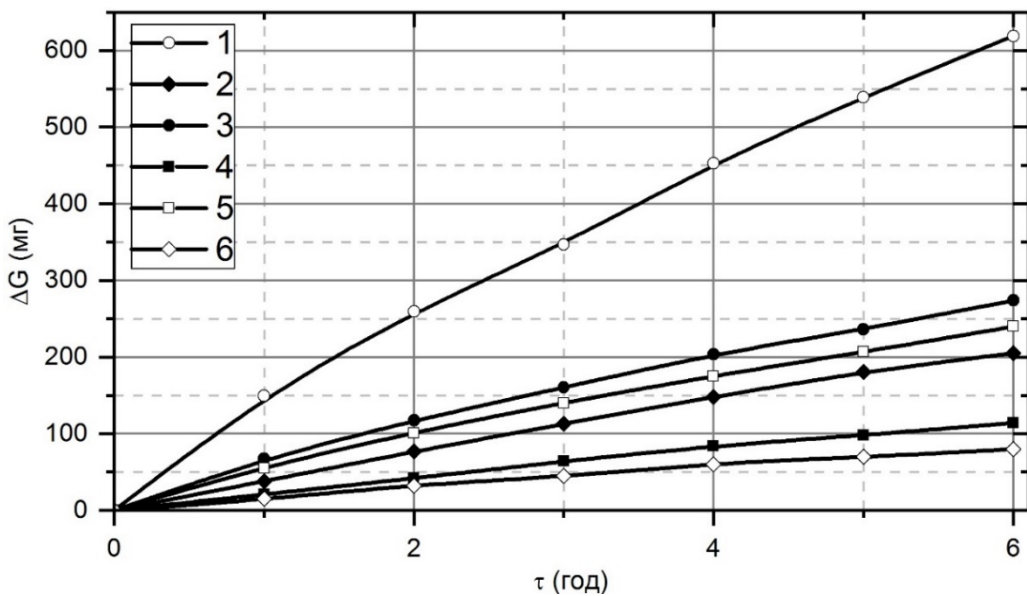
На практиці для важконавантажених, а також відповідальних вузлів тертя використовується високоміцний чавун ВЧ 50-2 та бронза або антифрикційні сплави. Підбір матеріалів пари тертя, а також використання технологій поверхневого зміцнення суттєво впливає на довговічність пари тертя при зношуванні [353, 354].

Експерименти показали, що фрикційне оброблення суттєво підвищує зносостійкість при терті в оливо-абразивному середовищі (мінеральна олива + 0,1 % абразиву) високоміцного чавуну ВЧ 50-2, який працює в парі із бронзою БрОЦС5-5-5 та антифрикційним сплавом БС6 при питомому навантаженні  $P = 4$  МПа та швидкості ковзання  $V = 1,2$  м/с (рис. 6.15). Фрикційне оброблення підвищує зносостійкість пари тертя чавун-бронза у 3,5 рази, а вкладок - у 3 рази.

Антифрикційний сплав БС6 забезпечує значно більшу зносостійкість, ніж бронза. Величина зношування незміцнених, лише шліфованих кілець при терті з вкладками із сплаву БС6 зменшилася у 2,3 рази, а вкладок – більше, ніж у 2 рази у порівнянні зі зношуванням такої ж пари із вкладкою із бронзи. При терті фрикційно зміцнених кілець у парі з вкладкою зі сплаву БС6 зношування зменшилося у 3,8 рази, а вкладок – у 2,3 разу у порівнянні з незміцненою парою. Слід відмітити, що зношування фрикційно зміцнених кілець при терті з вкладкою зі сплаву БС6 зменшилося майже у 9 разів, а вкладок – більше 5 разів у порівнянні зі зношуванням незміцнених кілець, які працювали у парі з вкладкою із бронзи. Застосуванням нових методів поверхневого зміцнення валів, а також правильним вибором антифрикційних матеріалів для вкладок, можна ефективно підвищити зносостійкість пар тертя.



а



б

Рисунок 6.15 – Кінетика зношування пари високоміцний чавун – підшипниковий сплав при терті в оливо-абразивному середовищі кільця з чавуну ВЧ 50-1,5 (а) та вкладки (б) із бронзи БрОЦС5-5-5 (1, 2, 5) і антифрикційного сплаву БС6 (3, 4, 6) ( $P = 4$  МПа;  $V = 1,2$  м/с): 1, 3 – незміцнені; 2, 4, 5, 6 – фрикційне оброблення; 2, 4 – інструмент з гладкою робочою частиною; 5, 6 – інструмент з різнонаправленими пазами; 5 – подача середовища поливом, 6 – подача середовища через корпус

#### 6.4 Дослідження зносотривкості під час абразивного тертя

Вузли сільськогосподарської техніки, а саме сошники сівалок, працюють у важких умовах тертя абразивного та зношування. Диски сошників сівалок застосовують без термічної обробки та зміцнення. Відповідно термін їх експлуатації є невеликим. Для підвищення їх ресурсу роботи запропоновано провести поверхнєве зміцнення дисків, які виготовляють зі сталі 65Г.

Експерименти з визначення зносотривкості під час абразивного тертя проводили на плоских зразках, виготовлених зі сталі 65Г розмірами 2×30×40 мм. Для порівняння зразки перед фрикційним обробленням термічно обробляли за наступними режимами: гартували і відпускали за температур 150 °С і 450 °С. Робочу поверхню зразків зміцнювали фрикційним обробленням, як технологічне середовище використовували мінеральну оливу з полімервмісними добавками.

Експериментальні дослідження на абразивне зношування проводили з закріпленим та незакріпленим (наближеним до експлуатаційних умов зношування дисків сошників) абразивом. Величину зношування визначали за втратою маси зразків. Перед дослідженнями з незакріпленим абразивом його просушували до вологості < 0,16%. Гумовий диск припрацьовували використовуючи шліфувальну смугу типу 2 зернистістю 8П, яку кріпили в зразку-тримачі на плоскій сталевій пластині. Параметри випробувань представлені в табл. 6.1. Розмір зерен абразиву використовували в діапазоні 200...1000 мкм.

Таблиця 6.1. Умови випробувань незакріпленим абразивом

Розміри гумового диска, мм		Властивості гумового диска		Навантаження в ділянці контакту, Н
діаметр	ширина	Твердість за Шором А	Відносне залишкове видовження, %	
48...50	15 ± 0,1	78...85	15...20	2,4

Експериментальні дослідження зносотривкості з закріпленим абразивом проводили використовуючи абразивний круг із електрокорунду на керамічній зв'язці 7K15, твердості CM-2. Діаметр круга становив 150 мм, ширина – 8 мм. Дослідження проводили впродовж 5 хв. при навантаженні на зразок 0,75 Н, частота обертання круга – 160 об/хв. Поверхні тертя зразків після зношування досліджували на сканівному електронному мікроскопі Zeiss EVO-40XVP з системою рентгенівського мікроаналізу INGA Energy 350.

Після фрикційного оброблення на поверхнях зразків формується мартенситно-аустенітно-цементитна структура, яка має підвищений вміст вуглецю у сталі. Отримана структура поверхневого зміцненого шару не залежала від вихідного стану сталі до фрикційного оброблення. Вихідний стан зразків до оброблення вплинув тільки на розмір зерна і тонку структуру зміцненого шару (табл. 6.2). При цьому отримуємо структуру, яка має деяку різницю у розмірах зерен мартенситу і залишкового аустеніту, густини дислокацій та відносної деформації ґратки, збільшується мікротвердість і глибина зміцненого шару.

Проведені дослідження показали, що фрикційне оброблення підвищує зносотривкість зразків під час випробувань як закріпленим, так і незакріпленим абразивом (рис. 6.16). Попередня термічна обробка посилює ефект від зміцнення поверхневого шару, оскільки збільшується глибина зміцненого поверхневого шару та і його мікротвердість [355].

Результати випробувань на зношування з закріпленим абразивом попередньо термічно оброблених зразків показали, що зносотривкість після фрикційного оброблення є вищою, ніж під час зношування з незакріпленим абразивом. Після фрикційного оброблення зразків у вихідному стані спостерігається протилежна закономірність. Це напевно пов'язано з особливостями процесу різання абразивним кругом, а також тим, що у зразків у вихідному стані товщина зміцненого шару була меншою за глибину зношування. Під час випробувань на зношування закріпленим абразивом

різниці у значеннях зносотривкості зміцнених зразків після попередніх термообробок практично немає. Водночас дослідження показали, що зносотривкість з незакріпленим абразивом після фрикційного оброблення різко зростає (рис. 6.16).

Таблиця 6.2.

Структурно-фазовий склад і тонка структура сталі 65Г після фрикційного оброблення залежно від вихідного стану матеріалу

Вид обробки до МІО	Розмір кристалітів $L$ , nm		Густина дислокацій $\rho$ , $\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$		Відносна деформація ґратки $\epsilon$ , %	
	$\alpha$ -Fe	$\gamma$ -Fe	$\alpha$ -Fe	$\gamma$ -Fe	$\alpha$ -Fe	$\gamma$ -Fe
Вихідний стан	9,1	17,4	6,5	2,3	0,085	0,146
Гартування + відпуск 150 °С	9,8	38,9	5,8	1,6	0,139	0,067
Гартування + відпуск 450 °С	6,8	30,3	13,0	0,68	0,213	0,044

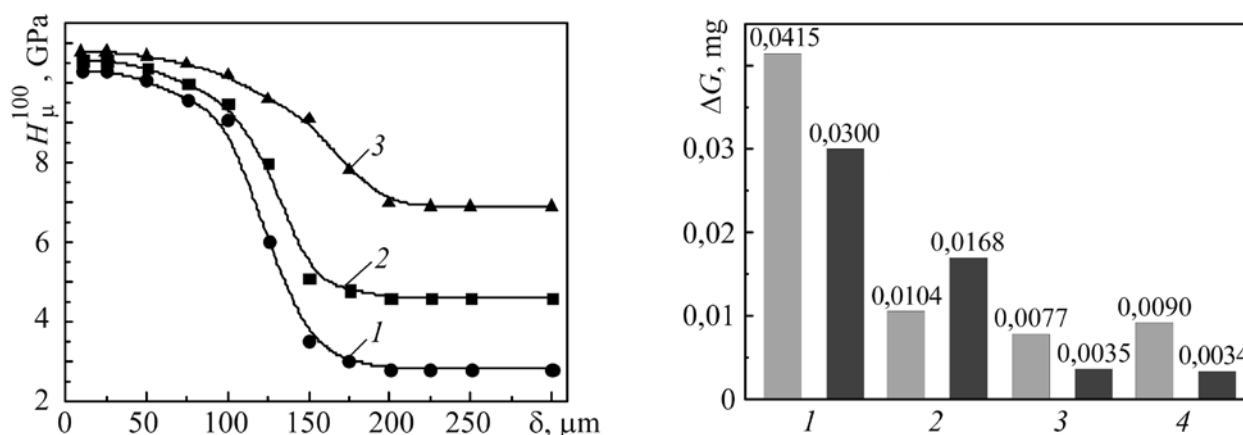


Рисунок 6.16 – Абразивна зносотривкість  $\Delta G$  зразків під час тертя з незакріпленим (■) та закріпленим (■) абразивом після фрикційного оброблення (2, 3, 4): 1 – вихідні без оброблення; 2 – вихідні; 3 – гартування і відпуск 150°C; 4 – гартування і відпуск 450°C

Отримані результати випробувань на зносотривкість узгоджуються з фрактографічним аналізом поверхонь тертя. Для зразків у вихідному стані досліджувані поверхні сильно пошкоджені (рис. 6.17), відчутніше за

випробування незакріпленим абразивом. Це зумовлено за рахунок перекочування твердих частинок абразиву між досліджуваним зразком і гумовим диском та появою подряпин і борозенок, а також слідів мікрорізання частинками максимального розміру. Після випробувань закріпленим абразивом (рис. 3b) поверхня тертя однорідніша, на ній помітні окремі ямки від потрапляння у зону контакту продуктів зношування, а ледь помітні канавки є значно меншими, ніж після випробувань з незакріпленим абразивом.

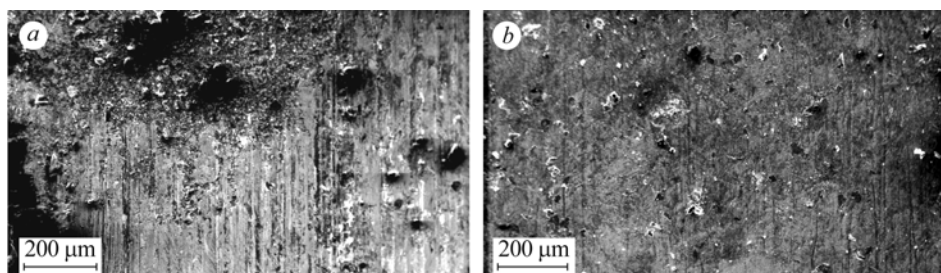


Рисунок 6.17. Поверхні зношування зразків у вихідному стані після випробувань незакріпленим (a) та закріпленим (b) абразивом.

Після фрикційного оброблення зразків у вихідному стані пошкодженість поверхонь тертя є значно нижчою, але незакріплений абразив пошкоджує її (рис. 6.18a, b). Характер зношування зразків після попередньої термічної обробки здебільшого зберігається.

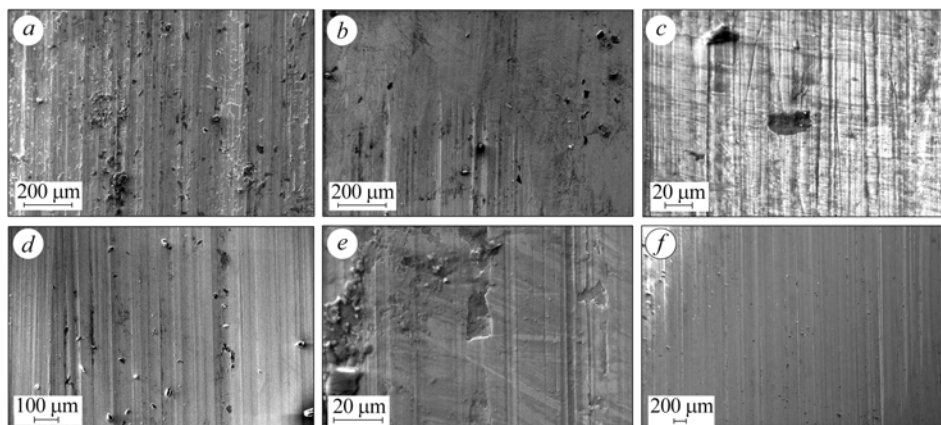


Рисунок 6.18 – Поверхні зношування зразків після випробувань незакріпленим (a, c, e) та закріпленим (b, d, f) абразивом після фрикційного оброблення зразків у різному стані: вихідний стан (a, b), гартування і відпуск 150°C (c, d), гартування і відпуск 450°C (e, f).

Відмінності полягають у тому, що під час випробувань незакріплений абразив та продукти зношування формують на поверхнях тертя великі борозенки, причому більші за глибиною на поверхнях з вищою поверхневою твердістю (рис. 6.18с). У деяких місцях спостерігається відшарування поверхневого шару від матриці. Таке відшарування спричинено значними зсувними напруженнями в зоні контакту абразиву з поверхнею тертя та великими деформаціями, які створюють випучування поверхневого шару подібно до процесів, які протікають під контактного втомного руйнування.

### **6.5. Контактна втомна міцність зміцнених шарів**

Довговічність виробів, деталі яких працюють в умовах контактної взаємодії визначається опором руйнуванню їх поверхневих шарів робочих поверхонь спряжених деталей, до яких відносяться підшипники, зуби шестерень, прокатні валки і інші. Під час експлуатації на контактних поверхнях деталей проходить знакозмінне, ударне контактне навантаження їх і руйнування, як правило, починається з поверхневого шару металу. У процесі контактного втомного руйнування відбувається на контактних поверхнях деталей локалізація у відносно невеликих об'ємах поверхневих шарів деталей напружень з великими градієнтами. Напруження, які при цьому виникають можуть навіть перевищувати границю пружності матеріалу, з якого виготовлені контактуючі деталі і приводити до виникнення тріщин.

На працездатність виробів під час контактного навантаження значно впливає стереометрія робочих поверхонь (шорсткість, хвилястість, риски, подряпини та інше). Вони стають концентраторами напружень, в яких нагромаджуються втомні напруження. Концентратори напружень стають джерелами з яких утворюються сітки поверхневих втомних тріщин. Під дією циклічних навантажень вони розповсюджуються далі у глибину поверхневого

шару металу і спричиняють формування пітингу, який є пошкодженням на спряжених поверхнях контактуючих деталей.

Під час втомного навантаження на процес руйнування контактуючих поверхонь значно впливає розмір зерна, структура, хімічний склад, твердість поверхневого шару деталей.

Залишкові напруження, які формуються у поверхневих шарах металу, їх величина, епюра, глибина залягання суттєво впливають на довговічність виробів під час експлуатації. Залишкові напруження у поверхневих шарах робочих поверхонь деталей формуються на фінішних операціях технологічного процесу обробки. На формування епюри, величини і глибини залягання залишкових напружень впливають різні параметри і процеси такі як пластичне деформування поверхневого шару, температура у зоні обробки, структурні та фазові перетворення, які проходять у процесі поверхневої обробки. Під час циклічного навантаження залишкові напруження стиску, які сформовані у поверхневих шарах деталей підвищують їх довговічність, а напруження розтягу – навпаки, понижують.

У процесі втомного контактного навантаження на поверхневі шари діє складно навантажене деформування. Не усі методи поверхневого оброблення та зміцнення, які застосовуються для підвищення довговічності під час тертя та зношування є ефективними та придатними під час контактного втомного навантаження.

Зміцнені поверхневі шари з нанокристалічною структурою ефективно підвищують довговічність під час тертя та зношування контактуючих поверхонь. Вплив зміцнених шарів на втомну міцність при контактному навантаженні вивчено недостатньо. Зміцнені шари з нанокристалічною структурою мають більшу твердість, ніж основний метал.

Дослідження на опір втомному руйнуванню під час контактного навантаження проводили на круглих зразках діаметром 35 мм виготовлених зі сталей 40ХН та У8А на трироликовій установці. Зовнішні притискні ролики діаметром 50 мм і радіусом контактної поверхні 8 мм розташовували під кутом



120° один відносно одного і за допомогою спеціального пристрою притискалися до досліджуваного зразка. Таке розташування роликів забезпечувало рівномірне притискання кожного ролика до досліджуваного зразка, а навантаження з роликів не передавалися на підшипники шпинделя зразка. Притискні ролики виготовляли зі сталі ШХ15 (гартування і низький відпуск, твердість 61-63 HRC). Примусово обертався зразок з частотою  $50 \text{ с}^{-1}$ , притискні ролики вільно обертались у підшипниках. Дослідження проводили у мінеральному мастилі «Індустріальне-40».

Робочі поверхні зразків зміцнювали фрикційним обробленням інструментом з різнонаправленими пазами на робочій поверхні і з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками.

Металографічні дослідження показали, що після фрикційної обробки у поверхневих шарах зразків, виготовлених зі сталей 40ХН та У8А формується зміцнений (білий) шар з нанокристалічною структурою. Товщина зміцненого шару і його мікротвердість залежать від режимів обробки, форми робочої частини інструмента, вмісту вуглецю у сталі, а також попередньої термічної обробки зразків.

Після фрикційної обробки інструментом з гладкою робочою частиною зразків виготовлених зі сталі 40ХН, товщина зміцненого шару складала 180-200 мкм, а його мікротвердість становила 6,8 ГПа. Мікротвердість вихідної структури становила 5,5 ГПа. Після фрикційної обробки інструментом з нарізаними різнонаправленими пазами на робочій частині товщина зміцненого шару складала 200-220 мкм, а його мікротвердість збільшилась до 7,2 ГПа.

Зі збільшенням кількості вуглецю в сталі якість зміцненого шару значно покращується. Найбільш якісний зміцнений шар був отриманий на сталі У8А. Як показали металографічні дослідження зразків зі сталі У8А після фрикційної обробки інструментом з гладкою робочою частиною, товщина зміцненого шару досягає 250-280 мкм. Утворений білий шар однорідний, мікротвердість

його становить 9,1 ГПа проти 6,6 ГПа вихідної структури. Зміцнення інструментом з пазами збільшує товщину білого шару до 300 мкм, а мікротвердість – до 11 ГПа.

Під час контактного навантаження окрім нормального притискання діють тангенціальні сили, які намагаються зсунути одну з поверхонь відносно іншої. Наявність тангенціальної сили відображається на розподілі напружень у зоні контакту. Під час дотику обкатних роликів з досліджуваним зразком, які імітують роботу підшипників кочення, на робочій поверхні виникає складна система дотичних сил, які створюють відповідні пружні мікропереміщення. Такі явища різко змінюють розподіл напружень у металі і сприяють збільшенню напружень розтягу. Тонкий шар металу, який є пластично деформований попереднім навантаженням, має залишкові напруження стиску, а у шарі який є під ним, виникають напруження розтягу. Внаслідок таких дій проходить випучування поверхневих шарів, змінюється густина дислокацій у матеріалі та утворюється підповерхнева тріщина, яка, переважно, переходить у пітинг. Неметалеві включення, карбідна ліквіація, неоднорідність структури є джерелами концентрації напружень, які сприяють прискоренню утворення підповерхневих тріщин і пітингів.

При фрикційному зміцненні у поверхневих шарах формується зміцнений білий шар з нанокристалічною структурою, який складається з високодисперсного мартенситу, залишкового аустеніту і дуже дисперсних карбідів. Мартенсит має більший питомий об'єм, аніж перліт, ферит чи аустеніт. Крім того, у білому шарі мартенсит дуже подрібнений і має більший об'єм, аніж мартенсит гартування. Тому в білих шарах, переважно, формуються залишкові напруження стиску.

Досліди показали, що при фрикційному обробленні форма робочої поверхні інструмента суттєво впливає на характер перерозподілу залишкових напружень першого роду. Так, при обробленні зразків зі сталі 40ХН (гартування і низький відпуск) виникають залишкові напруження стиску. Після фрикційного оброблення інструментом з різнонаправленими пазами на

робочій частині залишкові напруження поширюються на більшу глибину і більші за величиною, у порівнянні з напруженнями, отриманими після оброблення інструментом з гладкою робочою поверхнею. Найбільша величина залишкових напружень формується біля поверхні. Зі збільшенням глибини залишкові напруження зменшуються, далі змінюють знак і переходять у розтягуючі. Слід відмітити, що зміна знаку напружень проходить на глибині більшій, ніж зміцнений шар, по основному металу. Така ж картина спостерігається і при обробленні зразків зі сталі У8А.

Експерименти показали, що фрикційне оброблення суттєво підвищує опір контактному втомному руйнуванню сталей. Так, контактна довговічність зразків зі сталі 40ХН (гартування і низький відпуск) після фрикційного оброблення інструментом з гладкою робочою поверхнею підвищилась у 1,7 разу і у 1,9 разів після зміцнення інструментом з різнонаправленими пазами на робочій поверхні у порівнянні з незміцненими (рис. 6.19).

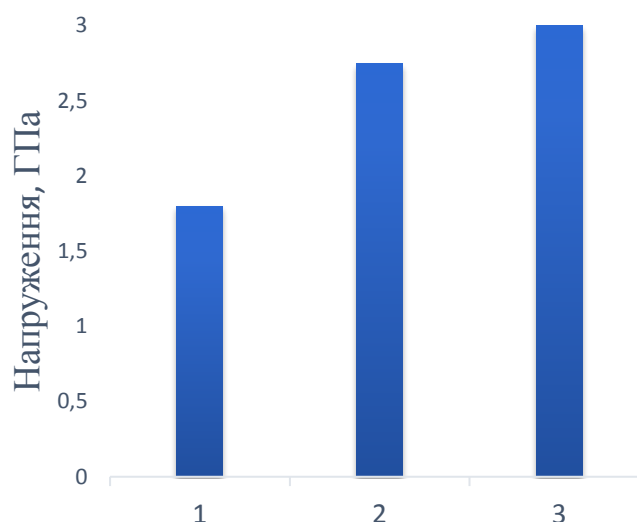


Рисунок 6.19 – Контактна втома зміцнених шарів з нанокристалічною структурою, отриманих на зразках зі сталі 40ХН фрикційним обробленням інструментом: 1 – незміцнені зразки; 2 – з гладкою робочою поверхнею; 3 – з різнонаправленими пазами на робочій поверхні.

Фрикційне оброблення інструментом з гладкою робочою поверхнею сталі У8А (гартування і низький відпуск) підвищує опір контактному

втомному руйнуванню лише у 1,4 разу, а при зміцненні інструментом з різнонаправленими пазами на робочій поверхні збільшення довговічності досягає 1,6 разів. При цьому слід відмітити, що чим вища твердість вихідного металу, тим менше впливає фрикційне оброблення на довговічність сталі при контактному навантаженні (рис. 6.20).

Підвищення опору втомному руйнуванню під час контактному навантаження зразків після фрикційного оброблення можна пояснити тим, що зміцнені білі шари з нанокристалічною структурою мають підвищену твердість і одночасно більшу в'язкість, ніж основна структура металу. В'язкість зміцнених шарів збільшується за рахунок збільшеної кількості залишкового аустеніту.

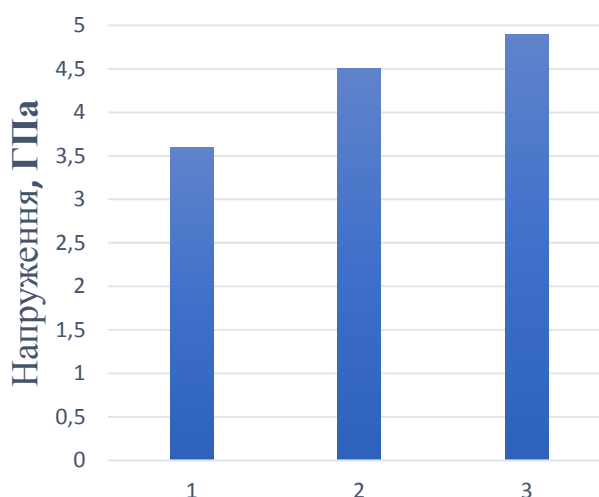


Рисунок 6.20 – Контактна втома зміцнених шарів з нанокристалічною структурою, отриманих на зразках зі сталі У8: 1 – незміцнені зразки; 2 – фрикційне оброблення інструментом з гладкою робочою поверхнею; 3 – фрикційне оброблення інструментом з різнонаправленими пазами.

Під час формування зміцнених шарів проходить дифузія та перерозподіл вуглецю та інших елементів у поверхневому шарі металу. Розміри зерна структури зміцненого шару є на нанорівні і набагато менші за основну структуру та значно збільшена густина дислокацій. Усе це в комплексі гальмує процеси утворення і розповсюдження втомних тріщин і утворення пітингів при контактному навантаженні [356].

При фрикційному обробленні з використанням інструмента з пазами на робочій поверхні проходить інтенсивне зсувне знакозмінне деформування поверхневого шару металу, яке поширюється на більшу глибину, аніж при обробленні інструментом з гладкою робочою поверхнею. Тому і збільшуються залишкові напруження за величиною та глибиною залягання.

Оскільки твердість зміцнених білих шарів з нанокристалічною структурою вища твердість основної структури зразків, то постає питання чи не буде відшаровування їх у процесі втомного контактного навантаження. Проведений металографічний аналіз показав, що під час втомного контактного навантаження робочих поверхонь зразків тріщина зароджується під поверхневим зміцненим шаром у зоні дії залишкових напружень розтягу і розповсюджується по основному металу (рис. 6.21).



Рисунок 6.21 – Фото розповсюдження тріщини під час досліджень на контактну втомну міцність

## 6.6 Опір малоцикловому втомному руйнуванню

Деякі деталі машин працюють під впливом циклічних низькочастотних навантажень, які за значеннями більші за границю текучості матеріалу. Малоциклове втомне руйнування відбувається в межах навантажень до  $10^5$  циклів. Такий вид руйнування під час експлуатації має свою специфіку та інтенсивність деформування металу деталей характеризується нагромадженням великих пластичних деформацій. Нагромадження деформацій залежить від фізико-механічних властивостей металу поверхневих шарів та виду навантаження їх.

Процес малоциклового втомного руйнування металу деталей під час експлуатації можна поділити на три стадії. Під час першої стадії відбуваються структурні зміни в об'ємах деформованого металу, у першу чергу у поверхневому шару, та нагромадження дефектів ґратки. На другій стадії відбувається зародженням втомних мікротріщин. На третій стадії процесу руйнування утворені мікротріщини зливаються у великі магістральні тріщини і приводять до кінцевого руйнування деталей.

Під час малоциклового втомного руйнування у поверхневих шарах металу деталей нагромаджуються великі пластичні деформації, тому не всі методи оброблення придатні для підвищення довговічності деталей при їх експлуатації, особливо в корозійних середовищах. Постає питання про вплив фрикційного оброблення, яке змінює структурно-напружений стан поверхневих шарів металу на опір малоцикловому втомному руйнуванню.

Експериментальні дослідження на опір малоцикловому втомному руйнуванню проводили на зразках розміром  $2,5 \times 12 \times 55$  мм, виготовлених зі сталі 45 (гартування і низький відпуск) при чистому згині з жорстким навантаженням з частотою 0,83 Гц на повітрі та у 3 %-ному водяному розчині *NaCl*.

Фрикційне оброблення робочих поверхонь зразків інструментом з поперечними пазми на робочій поверхні і з використанням як технологічне

середовище мінеральної оливи та мінеральної оливи з полімервмісними добавками.

Проведені дослідження показали, що фрикційне оброблення з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками значно підвищує опір малоциклового втомного руйнування зразків зі сталі 45 (гартування і низький відпуск) як при низьких так і високих деформаціях (рис. 6.22). Фрикційне оброблення зразків з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи підвищує опір малоциклового втомного руйнування тільки за низьких деформацій ( $\varepsilon < 0,5$  %). За високих деформацій ( $\varepsilon > 0,5$  %), навпаки, знижується.

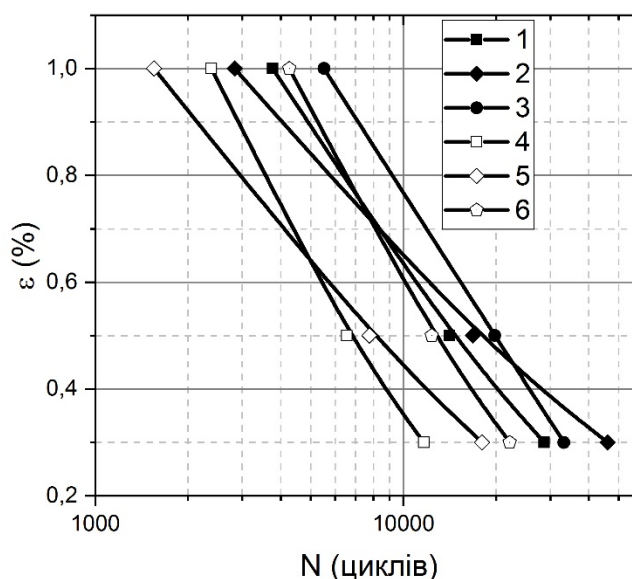


Рисунок 6.22 – Криві опору малоциклового втомного руйнування зразків зі сталі 45 (гартування, низький відпуск) при дослідженнях на повітрі (1, 2, 3) і у 3 %-му розчині *NaCl*; (4, 5, 6): 1, 4 – вихідні; 2, 5 – фрикційне оброблення, технологічне середовище мінеральна олива; 3, 6 – фрикційне оброблення, технологічне середовище мінеральна олива з полімервмісними добавками

Проведені дослідження на повітрі показали, що опір втомному руйнуванню зразків після фрикційного оброблення збільшився майже у 1,4 разів, а у 3 %-ному розчині *NaCl* (корозійне середовище) – майже у 2,4 разів порівняно з незміцненими зразками. При дослідження зразків навантажених

низькими деформаціями, крім пластичності і в'язкості поверхневого шару, на довговічність зразків значно впливають залишкові напруження стиску, які знаходяться на великій глибині, яка є більшою за товщину зміцненого шару. Під час досліджень з навантаженнями з високими деформаціями залишкові напруження починають релаксувати і вони менше впливають на процес руйнування.

Фрикційне оброблення формує у поверхневих шарах металу зразків зміцнені шари з нанокристалічною структурою, які мають підвищену твердість і одночасно в'язкість, дуже малий розмір зерна, значно збільшену густину дислокацій, збільшену кількість вуглецю. Усі вказані параметри сповільнюють процеси утворення сітки мікротріщин і їх розповсюдження.

Корозійні середовища значно понижують опір втомному руйнуванню. Проведені випробування у 3 %-му водяному розчині *NaCl* показали, фрикційне оброблення підвищує опір малоциклового втомному руйнуванню. Характер отриманих залежностей кривих опору малоциклового втомному руйнуванню у корозійному середовищі є таким самим, як і під час випробувань на повітрі, тільки різняться вони кількісно.

Проведені дослідження на опір малоциклового втомному руйнуванню показали, що фрикційне оброблення підвищує опір малоциклового втомному руйнуванню як на повітрі так і у корозійному середовищі. Під час фрикційного оброблення використання технологічних середовищ з полімервмісними добавками сприяють формуванню якісних, суцільних та товстих зміцнених шарів з нанокристалічною структурою. Застосовувані технологічні середовища покращують фізико-механічні властивості зміцненого поверхневого шару металу, шорсткість оброблених поверхонь, величину, глибину розповсюдження та знак сформованих залишкових напружень [357].



## **6.7 Технологія фрикційного оброблення технологічного оснащення та деталей машин**

Довговічність технологічного оснащення (напрямні, плити і елементи, матриці штампів та інше) та деталей машин (ролики накатних головок, кільця струмознімачів, ножі і інше) визначається, головним чином, зносотривкістю їх базових поверхонь і стійкістю до затуплення різальних лез. Існуючі на даному етапі технології зміцнення технологічного оснащення (гартування СВЧ, цементация азотування і інші) трудомісткі, складні, часто приводять до деформування та жолоблення деталей, виникненню тріщин, не дають бажаних результатів.

У багатьох випадках для підвищення довговічності немає потреби зміцнювати повністю усю деталь, достатньо зміцнити лише її робочі поверхні, які найбільше зношуються. Для підвищення довговічності технологічного оснащення та деталей машин використовували фрикційне оброблення їх робочих поверхонь (рис. 6.23). Фрикційне оброблення плоских поверхонь проводили на модернізованому плоскошліфувальному верстаті моделі 3E710. Для оброблення циліндричних поверхонь використовували модернізований токарно-гвинторізний верстат 16K20 з встановленим замість різцетримача спеціального пристрою з автономним приводом інструмента. Для забезпечення лінійної швидкості на периферії інструмента 60-65 м/с було проведено модернізацію вузла головного привода верстата. Інструмент-диск використовували збірним, який дозволяв замінювати вставки, виготовлені з різних матеріалів і з різною формою робочої поверхні. Конструкція корпусу інструмента забезпечувала подачу технологічного середовища через радіальні отвори безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь. Збірний інструмент встановлювали на конус шпинделя верстата. У даному випадку зменшується радіальне і торцеве биття інструмента. Діаметр інструмента-диска вибирали виходячи з конструктивних особливостей верстата, на якому буде проводитись фрикційне зміцнення. Вставку інструмента виготовляли зі сталі

12X18H10T. Діаметр інструмента-диска становив 240 мм, ширина робочої частини – 6-8 мм. На робочій поверхні вставки інструмента для підвищення зсувного деформування і покращання якості зміцненої поверхні нарізали різнонаправлені пази шириною 8 мм. Краї робочого профілю інструмента заправляли під радіус біля 1 мм для усунення переходу між зміцненою і незміцненою частинами деталей при роботі з подачею, а також для покращення заходу і виходу інструмента під час оброблення. Перед установкою інструмента на верстат проводили його статичне балансування. Після встановлення інструмента на шпиндель, його робочий профіль проточували ельборовим різцем і доводили абразивним бруском (M14). Шорсткість робочої поверхні інструмента була не більше  $R_a = 0,38-0,42$  мкм, радіальне биття – не більше 0,02 мм.

Як технологічне середовище у процесі фрикційного оброблення використовували мінеральну оливу з полімервмісними добавками. Для подачі технологічного середовища у зону оброблення використовували систему подачі мастильно-охолоджуючої рідини верстата і підводили до спеціальних канавок, виготовлених у корпусі збірного інструмента.

Перед фрикційним зміцненням, яке є фінішною операцією, деталі проходили повну механічну і термічну обробки згідно заводського технологічного процесу. На останній операції чистового шліфування залишали припуск 0,03-0,05 мм під фрикційне оброблення.

Зміцнювали деталі – напрямні, кільця, ножі, накатні ролики, які були виготовлені зі сталей 45, 40ХН, 65Г та У8А (гартування і низький відпуск та високий відпуск).

Твердість зміцненого шару визначали з допомогою переносного твердоміра фірми «Mahr». Перевірка геометричних параметрів і якості зміцнених деталей показала, що вони відповідають технічним вимогам до них. Відхилення від площинності напрямних, плит і елементів пристроїв у поперечному і поздовжньому напрямках та за діагоналями не перевищувало 0,012 мм на 100 мм довжини при допустимих за технічними вимогами – 0,02

мм. Шорсткість зміцнених поверхонь становила  $R_a = 0,38-0,62$  мкм. Усі розміри та шорсткість зміцнених поверхонь відповідали кресленням та технічним вимогам на деталі.

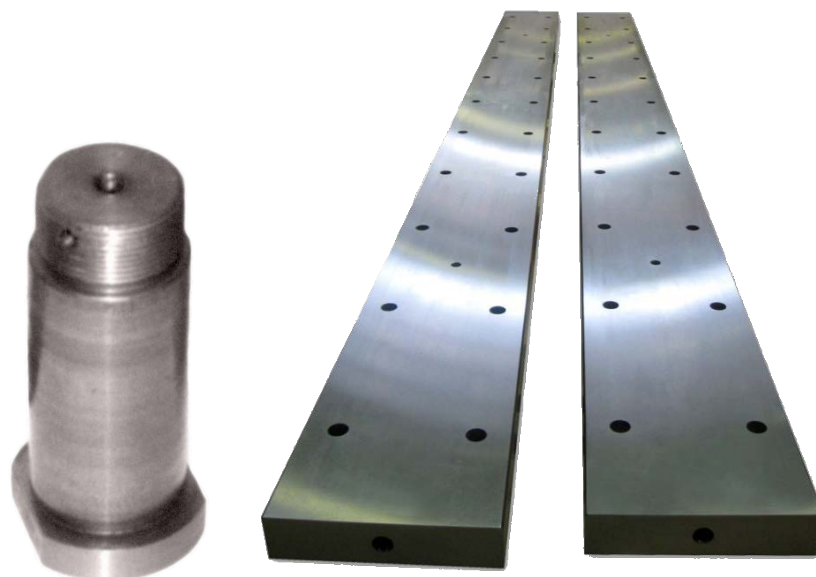


Рисунок 6.23 – Деталі технологічного оснащення після фрикційного оброблення

Металографічні дослідження показали, що після фрикційного оброблення у поверхневих шарах зразків утворилися якісні, суцільні білі шари. Так, на сталі 45 товщина білого шару становила  $\delta = 200-230$  мкм, на сталях 40Х та 40ХН –  $\delta = 250-270$  мкм, на сталі У8А –  $\delta = 300-330$  мкм і на сталі 65Г –  $\delta = 220-240$  мкм. Мікротвердість білого шару на сталі 45 становила  $H_{\mu} = 8,5-9,1$  ГПа при твердості основної структури  $H_{\mu} = 4,7-4,8$  ГПа, на сталі 40Х -  $H_{\mu} = 9,1-9,5$  ГПа при твердості основної структури  $H_{\mu} = 5-5,3$  ГПа і на сталі У8А –  $H_{\mu} = 10,3-11,2$  ГПа при твердості основної структури  $H_{\mu} = 6,1-6,5$  ГПа.

Розроблено технологічний процес зміцнення робочих поверхонь кілець струмознімачів для роторних вентиляторів сушил цегельних заводів (рис. 6.24). Кільця виготовляли зі сталі 45 у стані постачання. Товщина зміцненого шару становила 150-180 мкм і твердістю 8,5 ГПа. Кільця монтують у спеціальні захищені корпуси по 8 штук для зменшення потрапляння всередину

абразивного пилю. Кільця працюють в умовах підвищених температур (90-130°C) та інтенсивного абразивного зношування. Проведені дослідно-промислові дослідження у виробничих умовах показали, що кільця після фрикційного оброблення мають вищу довговічність (1,4-1,5 разів) у порівнянні з заводськими.

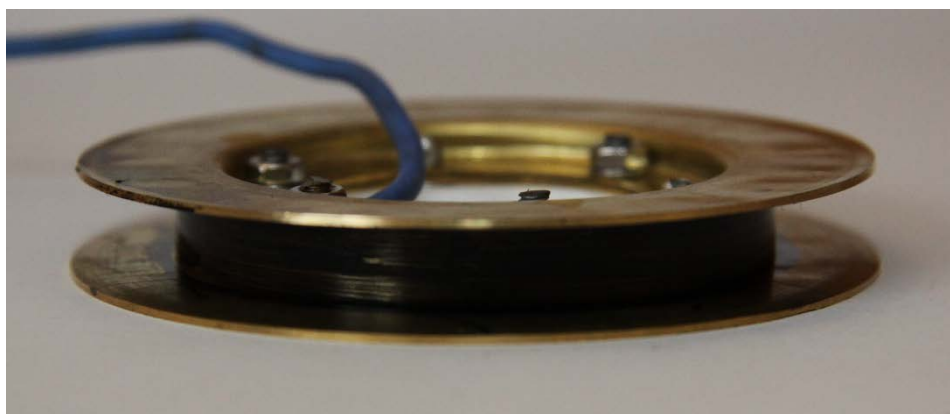


Рисунок 6.24 – Кільце струмознімачів для роторних вентиляторів сушил  
цегельних заводів

Розроблений технологічний процес зміцнення різальних лез ножів рухомих барабанів подрібнювача соломи зернозбирального комбайна фірми «CLAAS». Різальні леза ножів подрібнювача працюють у важких умовах абразивного зношування. Солома повинна бути подрібнена, далі розстеляється на полі і використовується як добриво. Ножі виготовляють зі сталі 50ХФА ГОСТ 14959-79 після гартування і середнього відпуску. Ножі у процесі роботи сильно зношуються. Для нормальної роботи на барабані встановлюють 84 ножі (рис. 6.25).



Рисунок 6.25 – Ніж рухомих барабанів подрібнювача соломи  
зернозбирального комбайна фірми «CLAAS»

Для підвищення довговічності ножів у експлуатації було розроблено технологічний процес зміцнення поверхонь ножів. Було запропоновано замінити сталь 50ХФА на сталь 65Г і проводити зміцнення ножів без попередньої термічної обробки. Був розроблений спеціальний пристрій для закріплення ножів на верстаті, який би забезпечив нахил ножа відносно стола верстата під кутом  $11^\circ$ .

Проведені дослідно-промислові дослідження у польових умовах показали, що зміцнені ножі мають вищу довговічність у порівнянні з ножами, виготовлені за заводською технологією. Підвищення довговічності ножів складало 1,25-1,3 разів. Слід відмітити зміцнювали поверхні ножів, виготовлених зі сталі 65Г у стані постачання, тобто без попередньої термічної обробки. Довговічність зміцнених ножів була вищою, ніж виготовлених за заводською технологією і без попередньої термічної обробки.

Розроблено також технологічний процес виготовлення роликів накатних головок для формування профілю дроту решіткового настилу (рис. 6.26). Ролики виготовляються зі сталі Х12МФ, гартують з низьким відпуском. Для підвищення довговічності роликів робочу поверхню зміцнювали фрикційним обробленням. У поверхневих шарах формується зміцнений шар товщиною 270-310 мкм і мікротвердістю 10,3 ГПа, що відповідає твердості 68 HRC.



Рисунок 6.26 – Ролик накатних головок для формування профілю дроту решіткового настилу

Накатні ролики працюють в умовах сильного зсувного деформування і зношування. Проведені дослідно-промислові випробування у умовах реального виробництва показали підвищення довговічності зміцнених роликів у 1,3-1,4 рази у порівнянні з заводською технологією.

## Висновки до розділу 6

1. Дослідження зносотривкості пари сталь 40ХН – чавун СЧ 20 при терті без мащення за схемою «кільце-кільце» показали, що підвищення зносотривкості досліджуваної пари після фрикційної обробки інструментом з різнонаправленими пазами на робочій частині з внутрішньою подачею технологічного середовища і легування міддю і складає біля 5,4 разів.

2. Дослідження показали, що фрикційне оброблення суттєво підвищує опір зношуванню пар сталь-чавун під час тертя у оливо-абразивному середовищі. Так, при випробуваннях на зносостійкість при питомому навантаженні 4,5 МПа і швидкості ковзання 0,9 м/с, величина зношування зміцнених кілець, виготовлених зі сталі 45 після гартування і низького відпуску зменшилася у 2,7 разу, а після високого відпуску - у 3 рази у порівнянні з такими ж незміцненими кільцями. Характерно відмітити, що величина зношування незміцнених вкладок із сірого чавуну, які працювали зі зміцненими кільцями зменшилося також майже у стільки ж разів.

3. Експерименти показали, що фрикційне зміцнення суттєво підвищує опір контактному втомному руйнуванню сталей. Так, контактна довговічність зразків із загартованої і низьковідпущеної сталі 40ХН після фрикційного зміцнення інструментом з гладкою робочою поверхнею підвищилась у 1,7 разу і у 1,9 разів після зміцнення інструментом з пазами на робочій частині у порівнянні з незміцненими

4. Фрикційне зміцнення інструментом з гладкою робочою частиною сталі У8А у загартованому і низьковідпущеному стані підвищує опір контактному втомному руйнуванню лише у 1,4 разу, а при зміцненні інструментом з пазами на робочій частині збільшення довговічності досягає 1,6 разів. При цьому слід відмітити, що чим вища твердість вихідного металу, тим менше впливає фрикційне зміцнення на довговічність сталі при контактному навантаженні.

5. На основі проведеного комплексу теоретичних і експериментальних

досліджень представлено інженерні рекомендації відносно використання методу фрикційного оброблення для формування на робочих поверхнях деталей машин зміцненого поверхневого шару з нанокристалічною структурою. Розроблено технологічні процеси зміцнення циліндричних поверхонь напрямних штампів пресформ; робочих поверхонь кілець струмознімачів для роторних вентиляторів сушил цегельних заводів, які працюють в умовах підвищених температур (90-130°C); плоских поверхонь напрямних спеціального обладнання для штампа обрубки полоси решіткового настилу; роликів накатних головок для формування профілю дроту решіткового настилу. Також розроблені технологічного процесу та обладнання для зміцнення робочих поверхонь рухомих ножів соломоподрібнювача зернозбирального комбайна «CLAAS». Дослідно-промислові випробування показали, що фрикційне зміцнення робочих поверхонь деталей машин підвищує їх довговічність у 1,3-1,6 разів у порівнянні з незміцненими.



## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішена важлива і актуальна науково-прикладна проблема підвищення ефективності процесу фрикційної обробки за рахунок цілеспрямованої зміни форми робочої поверхні інструмента, подачі технологічного середовища безпосередньо у зону обробки та обґрунтованого призначення режимів обробки, що забезпечило формуванню зміцнених шарів з нанокристалічною структурою, істотне покращання точності і якості оброблених поверхонь деталей машин і підвищення експлуатаційних властивостей.

1. Подальшого розвитку набули наукові основи забезпечення формування зміцнених шарів з нанокристалічною структурою на масивних деталях машин, які доповнені новими підходами з додаванням циклічних, високочастотних динамічних навантажень оброблювальної поверхні та подачі спеціального технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь та врахуванням термопружного стану у поверхневих шарах.

2. Вперше запропоновано новий технологічний метод фінішної обробки плоских та циліндричних поверхонь деталей машин для формування зміцнених поверхневих шарів з нанокристалічною структурою за рахунок поєднання оброблення з використанням висококонцентрованих джерел енергії та інтенсивного деформування зони контакту інструмент-деталь.

3. Вдосконалено математичну модель термопружного стану поверхневих шарів оброблюваних зразків у процесі фрикційного оброблення інструментом з перервною робочою поверхнею, яка дозволяє визначати розподіл температури та швидкість її зміни за глибиною, величину теплового потоку і напруження та зміну їх значень за глибиною, швидкість навантаження оброблюваної поверхні. Отримано, теоретичні результати швидкостей нагрівання і охолодження металу на оброблюваній поверхні та у поверхневому шарі металу під зоною контакту інструмент-деталь. Швидкість нагрівання

зони контакту складає  $5 \cdot 10^5$  K/c- $1,5 \cdot 10^6$  K/c, швидкість охолодження зони контакту під час проходження над нею пази інструмента складає  $4 \cdot 10^5$  K/c- $1 \cdot 10^5$  K/c. З глибиною шару швидкості нагрівання і охолодження металу зменшується.

4. Розроблено математичні і імітаційні моделі тримасових коливальних систем динамічних процесів під час фрикційного оброблення циліндричних і плоских поверхонь деталей інструментами з перервною робочою поверхнею. Визначено на основі розв'язку імітаційної моделі частоту ударних навантажень зони контакту інструмента з оброблюваною поверхнею, що має на робочій частині пази, ширина та кількість яких змінна при моделюванні.

5. Розроблено математичні та імітаційні моделі у середовищі Mathcad визначення АЧХ процесу перервного фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин. Визначено кількість пазів, які розташовані на периферії інструмента, що вводять динамічну систему у явище резонансу (для плоскошліфувального верстату – 7...12 пазів; для токарного верстата – 8...10 пазів).

6. Встановлено, що під час фрикційного оброблення інструментом з перервною робочою поверхнею та з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками і подачі його безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь (використовуючи інструмент з внутрішньою подачею середовища) зі збільшенням ширини пази збільшується товщина зміцненого шару (у 1,4-1,5 разів) і його твердість (у 1,2-1,3 разів). Також збільшується насичення поверхневого шару металу вуглецем. Максимальний вміст вуглецю біля оброблюваної поверхні на зразках зі сталі 45 складав біля 2 мас. %.

7. Експериментально встановлено що, збільшення моди деформації за рахунок використання інструмента з різнонаправленими пазами приводить до зменшення розміру зерна зміцненого шару. Так, після оброблення інструментом з різнонаправленими пазами на робочій частині розмір зерна

біля обробленої поверхні складав  $8,6 \pm 0,6$  нм.

8. Використання інструментів з перервною робочою поверхнею зменшує параметри стереометрії оброблюваних поверхонь, зменшуються параметри шорсткості, хвилястості. Покращуються параметри кривої несучої здатності, що суттєво впливає на процеси тертя та зношування. Швидше проходить припрацювання пар тертя, збільшені оливкові кишені, збільшується питома площа контакту, що підтверджується експериментальними дослідженнями зносотривкості.

9. Проведені експериментальні дослідження показали, що фрикційне оброблення інструментом з перервною робочою поверхнею, використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками і подачею його через корпус інструмента безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь підвищують зносотривкість під час різних видів тертя (без мащення, з граничним мащенням, у оливо-абразивному середовищі) у 1,5-3,3 разів у залежності від умов тертя у порівнянні зі зразками, зміцненими інструментом з вузькими пазами і подачею технологічного середовища методом поливу. Підвищується опір втомному контакту руйнуванню у 1,4-1,6 разів, а також опір малоцикловому втомному руйнуванню тільки за низьких деформацій ( $\epsilon < 0,5$  %). За високих деформацій ( $\epsilon > 0,5$  %), навпаки, дещо знижується.

10. На основі проведеного комплексу теоретичних і експериментальних досліджень представлено інженерні рекомендації відносно використання методу фрикційного оброблення для формування на робочих поверхнях деталей машин зміцненого поверхневого шару з нанокристалічною структурою. Розроблено технологічні процеси зміцнення циліндричних поверхонь напрямних штампів пресформ; робочих поверхонь кілець струмознімачів для роторних вентиляторів сушил цегельних заводів, які працюють в умовах підвищених температур (90-130°C); плоских поверхонь напрямних спеціального обладнання для штампа обрубки смуги решіткового

настилу; роликів накатних головок для формування профілю дроту решіткового настилу. Також розробленні технологічного процесу та обладнання для зміцнення робочих поверхонь рухомих ножів соломоподрібнювача зернозбирального комбайна «CLAAS». Дослідно-промислові випробування показали, що фрикційне зміцнення робочих поверхонь деталей машин підвищує їх довговічність у 1,3-1,6 разів у порівнянні з незміцненими.

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі на кафедрі робототехніки і інтегрованих технологій машинобудування Національного університету «Львівська політехніка».

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов [и др.], под ред. А.Г. Суслова. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – К. : Наукова думка, 2007. – 558 с.
3. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
4. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 2000. – 320 с.
5. Уманский В.Б. Новые способы упрочнения деталей машин / В.Б. Уманский, Л.К. Маняк. ; Справ. пособие. – Донецк : Донбасс, 1990. – 144 с.
6. Золотухин И.В. Новые направления физического материаловедения / И.В. Золотухин, Ю.Е. Калинин, О.В. Стогней. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2000. – 360с.
7. Голубець В.М. Технологічні методи поверхневого зміцнення металічних конструкційних матеріалів / В.М. Голубець. – Львів : ВТФ «Друксервіс», 2000. – 178 с.
8. Dearnley P.A. Introduction to Surface Engineering / P.A. Dearnley. Cambridge University Press, 2017. – 325 p.
9. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
10. Хворостухин Л.А. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением // Л.А. Хворостухин, С.В. Шишкин, А.П. Ковалев, Р.А. Ишмаков. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.
11. Ляшенко Б.А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработкой и положение в Украине / Б.А. Ляшенко, С.А. Клименко // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 94–104.

12. Новые материалы / Под ред. Ю.С.Карабасова.– М.:МИСИС,2002.– 736 с.
13. Корж В.М. Інженерія поверхні – новий технологічний напрямок виготовлення деталей машин і конструкцій / В.М. Корж, Ю.С. Попіль // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 92–94.
14. Bell T. Surface engineering: past, present and future / T. Bell // Surface engineering. – 1990. – V.6, N 1. – P. 31–40.
15. Рыжов Э.В. Научные основы технологического управления качеством поверхности деталей при механической обработке / Э.В. Рыжов // Трение и износ. – 1997. – Т. 18, № 3. – С. 293–300.
16. Lersen-Basse Jorn. Surface engineering and the new millennium / Lersen-Basse Jorn // Surface Engineering. – 1998. V. 14, N 2. – P. 81–83.
17. Wang X.H. Effect of molybdenum on the microstructure and wear resistance of Fe-based hardfacing coatings. / Wang X.H., Han F., Liu X.M., Qu S.Y. and Zou Z.D., // Materials Science and Engineering A. – 2008. 489(1–2). – P. 193–200.
18. Dwivedi D.K. Abrasive wear behavior of iron base hard surfacing alloy coatings developed by welding / D.K. Dwivedi // Surface Engineering. – 2004. – Vol. 20, No. 2. – P. 87–92.
19. Harsha S. Some studies on Microstructure, Hardness and Abrasive Wear Behaviour of Flame Sprayed Co base alloy Coating / Harsha S., Dwivedi D.K. // Surface Engineering. – V23, N4. – 2007. – 261 p.
20. Deng Hongxia. Influence of coating thickness and temperature on mechanical properties of steel deposited with Co-based alloy hard facing coating / Deng Hongxia, Huiji Shi, Seiji Tsuruoka // Surface & Coatings Technology. – 2010. –V.204. – P. 3927–3934.
21. Sharma S.P. Microstructure, hardness and abrasive wear behavior of continuously compacted thermal sprayed Ni base alloy powder coatings in different conditions / S.P. Sharma, D.K. Dwivedi, P.K. Jain // International Journal of Surface Science and Engineering. – 2008. – V.2, N.3–4. – P. 240–251.
22. Lukaszewicz K. Review of nanocomposite thin films and coatings deposited

- by PVD and CVD technology / Krzysztof Lukaszewicz // *Nanomaterials*. – 2011. – P. 145–163.
23. Recent advances of superhard nanocomposite coatings: a review / Sam Zhang, Deen Sun, Yongqing Fu, Hejun Du // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – № 167. – P. 113–119.
24. Musil J. Physical and mechanical properties of hard nanocomposite films prepared by reactive magnetron sputtering / J. Musil // *Nanostructured Hard Coatings*. – 2006. – P. 407–463.
25. Microstructure of Cathodic arc Evaporated (Al, Ti)N Hard Coatings Deposited at Different Orientations to the Target / D. Rafaja, Ch. Wüstefeld, D. Heger [et al.] // 18th Plansee Seminar 2013. Institut für Werkstoffwissenschaft. – Freiberg (Deutschland). – 2013. – P. 1404–1413.
26. Musil J. Hard nanostructured and nanocomposite thin films [Электронный ресурс] / J. Musil // *Mikkeli International Industrial Coating* 2006. – Praha. – 2006. – Режим доступа : <http://www.miics.net/archive/getfile.php?file=77>.
27. A new approach to improve the surface properties of H13 steel for metal forming applications by applying the TiAlN multi-layer coating / H. Elmkhah, F. Mahboubi, A. Abdollah-zadeh, A.R. Sabour Rouhaghdam // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol 32. – P. 873–877
28. Dwivedi D.K. Microstructure and abrasive wear behavior of iron base hardfacing developed by SMA welding / D.K. Dwivedi // *Material Science and Technology*. – 2004. – V. 20, N.10. – P. 1326–1330.
29. Бойцов А.Г. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами / А.Г. Бойцов, В.Н. Машков, В.А. Смоленцев, Л.А. Хворостухин – М.: Машиностроение, 1991 – 144 с.
30. Аверьянова И.О. Технология машиностроения. Высокоэнергетические и комбинированные методы обработки: учеб. пособие / И.О. Аверьянова, В.В. Клепиков. – М. : ФОРУМ, 2008. – 304 с.
31. Коваленко В. Лазерні технології: завоювання нових позицій / В. Коваленко // *Вісник НАН України*. – 2000. – № 1. – С. 11–22.

32. Ведерникова И.И., Полетаев В.А. Упрочнение рабочих поверхностей деталей машин лазерным модифицированием // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 3. – С. 1–3.
33. Спиридонов Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Спиридонов Н. В. – Минск : Высшая школа, 1988. – 155 с.
34. Великих В.С. Влияние лазерной закалки на механические свойства стали 45 с различной предварительной термической обработкой / В.С.Великих, В.С.Картацев, А.В.Романенко и др. // Физика и химия обрабатываемых материалов. – 1984. – № 2. – С. 12–16.
35. Grum J. Laser surface hardening / J. Grum // Handbook of metallurgical process design; ed. by G. Totten, K. Funatani, L. Xie. – New York : CRC Press. – 2004. – P. 641–731.
36. Магин Д.Ю. Исследование структуры и свойств высокопрочной теплостойкой стали после объемной термической обработки и лазерного поверхностного упрочнения / Д.Ю. Магин, С.В. Костромин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е.Алексеева. Серия : Metallurgy and materials science. – 2013. – № 4 (101). – С. 256–261.
37. Костромин С.В. Влияние скорости лазерной закалки на структуру и свойства стали 30ХГСА / С.В. Костромин, И.Р. Шатилов // Сборник научных трудов SWorld по материалам международной научно-практической конференции. – 2013. – Т. 1. – № 12. – С. 1–5.
38. Hruska M. Standard and scanning laser hardening procedure / M. Hruska, M. Vostrak, E. Smazalova, M. Svantner // Conference Metal 2013 proceedings. – Ostrava : TANGER, 2013. – S. 1009–1014.
39. Soundarapandian S. Laser Surface Hardening / S. Soundarapandian, B. Dahotre Narendra // ASM Handbook. V. 4A. Steel Heat Treating Fundamentals and Processes. – 2013. – P. 476–502.
40. Синькевич Ю.В. Электроимпульсное полирование на основе железа, хрома и никеля / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский, Г.Я. Беляев //



Минск : БНТУ, 2014. – 325 с.

41. Электроимпульсное упрочнение твердосплавного материала на основе карбида вольфрама / С.В. Побережный, О.О. Кузнечик, В.В. Докторов, Г.А. Трубицин // Инновационные технологии в машиностроении : материалы междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк – 2011. – С. 216–217.
42. Коваленко В.С. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов / В.С. Коваленко, А.Д. Верхотуров, Л.Ф. Головкин и др. – М.: Наука, 1986. – 276 с.
43. Гаврилов Г.Н. Особенности формирования структуры сталей при лазерном термическом цикле / Г.Н. Гаврилов, В.А. Кастро, И.Б. Брауэр, Е.С. Беляев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – № 12. – С. 38–41.
44. Гуреев Д.М. Лазерно-ультразвуковое упрочнение поверхности стали / Д.М. Гуреев // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – № 3. – С. 283–286.
45. Чудина О.В. Комбинированные методы поверхностного упрочнения сталей с применением лазерного нагрева. Теория и технология / О.В. Чудина. – М. : МАДИ (ГТУ), 2003. – 248 с.
46. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении / Базров Б.М. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
47. Получение наноструктурированных углеродных материалов с управляемыми поверхностными и объемными физическими свойствами в условиях лазерного воздействия [Электронный ресурс] / С.М. Аракелян, В.Г. Прокошев, А.О. Кучерик, С.В. Кутровская // Владимирский Государственный Университет. – 2009. – Режим доступа : [http://www.edu-cons.net/atlas\\_last/doc/359/2%2823%29.pdf](http://www.edu-cons.net/atlas_last/doc/359/2%2823%29.pdf)
48. Управляемое формирование микроконусов на сверхтугоплавких металлах при многоимпульсном лазерном облучении / Н.В. Андреева, Ю.И. Пестов, В.С. Макин [и др.] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия : Физико-математические науки. – 2013. – № 1(165). – С. 29–37 с
49. Nemecek S. Microstructure and properties of cast iron after laser surface

- hardening / S. Nemecek // The Scientific Journal «Materials Engineering – Materialove inzinierstvo». – 2013. – Vol. 20. – № 4. – P. 153–159.
50. Исследование процессов формирования наноструктур на поверхности материалов под действием излучения ЛГР-лазера / С.И. Миколуцкий, В.Н. Токарев, В.Ю. Хомич [и др.] // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т.1. – № 4. – С. 548–554.
51. Микроструктуры, наноструктуры и гидродинамические неустойчивости, индуцированные лазерным излучением на поверхности твердых тел : монография / С.М. Аракелян, В.Г. Прокошев, Д.В. Абрамов, А.О. Кучерик. – Владимир : Издательство Владим. гос. ун-та, 2010. – 144 с.
52. Mojtabehi F. Surface treatment of nano-structured steel with pulsed laser / Faezeh Mojtabehi, Hamidreza Shahverdi, Mohammad Javad Torkamany // Materials Physics and Mechanics. – 2013. – № 17. – P. 17–21.
53. Гуреев Д.М. Механизмы фазовых превращений в железе и сталях при лазерном нагреве / Д.М. Гуреев, А. В. Камашев, С. В. Ямщиков. – Самара : Самарский ун-т, 1999. – 164 с.
54. Kennedy E, Byrne G, Collins DN A review of the use of high power diode lasers in surface hardening // Kennedy E, Byrne G, Collins DN / J Mater Process Technol. – 2004. – N155–156. – P. 1855–1860
55. M.A. Montealegre. Surface treatments by laser technology / M.A. Montealegre, G. Castro, P. Rey, J. L. Arias, P. Vázquez, M. González // Contemporary Materials, 2010. – I-1. – P. 19–30.
56. Majumdar Jyotsna Dutta. Laser Surface Engineering // Jyotsna Dutta Majumdar, Indranil Manna / Handbook of Manufacturing Engineering and Technology, 2014
57. Chandra B.Ramesh. Surface Modification of Metals by Using Laser Surface Engineering and Physical Vapor Deposition – A Review / B.Ramesh Chandra // International Journal and Magazine of Engineering, Technology, Management and Research. – 2015. – Vol. 2, Iss. 8. – P. 2179–2185
58. Adel KM. The effect of laser surface hardening on the wear and friction

- characteristics of acicular bainitic ductile iron. // Adel K.M., Dhia A.S., Ghazali M.J. / *Int J Mech Mater Eng (IJMME)*. – 2009. – Vol. 4(2). – P. 167–171
59. Костюк Г.И. Влияние комбинированной лазерно-плазменно-ионной обработки на свойства поверхностного слоя / Г. И. Костюк, О.О Бруяка, К. П. Мисяк // Компьютерные и информационные технологии при моделировании, в управлении и экономике : сборник науч. трудов. – Харьков, 2009. – С. 29–36.
60. Paul C.P. Cobalt Free Laser Cladding on AISI type 316L Stainless Steel for Improved Cavitation and Slurry Erosion Wear Behavior / Paul C.P., Gandhi B.K., Bhargav R., Dwivedi D.K., and Kukreja L.M. // *Journal of Materials Engineering & Performance*. – 2014. – Vol. 23. – P. 4463–4471.
61. Salloom R. Laser surface engineering of B<sub>4</sub>C/Fe nano composite coating on low carbon steel: Experimental coupled with computational approach / R. Salloom, S.S. Joshi, N.B. Dahotre, S.G. Srinivasan // *Materials & Design*. – 2020. – Vol. 190. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108576>
62. Lo KH. Laser transformation hardening of AISI 440C martensitic stainless steel for higher cavitation erosion resistance // Lo KH, Cheng FT, Man HC / *Surf Coat Technol*. – 2003. – N. 173. – P. 96–104
63. Ocelík V. Laser surface treatment of grey cast iron for automotive applications // V. Ocelík, P.N. Tang, M.C. de Boer, U.O.B. de Oliveira, J.Th.M. De Hosson / *WIT Transactions on Engineering Sciences*. – 2005. – Vol. 49. – P. 221–230
64. Bartkowska A. Production and Properties of FeB-Fe<sub>2</sub>B-Fe<sub>3</sub>(B,C) Surface Layers Formed on Tool Steel Using Combination of Diffusion and Laser Processing / A. Bartkowska // *Coatings*. – 2020. – Vol. 10(11), doi:10.3390/coatings10111130
65. Laser surface hardening of martensitic stainless steel hollow parts / G. Tani, A. Fortunato, A. Ascari, G. Campana // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 59. – P. 207–210
66. Combined surface hardening and laser patterning approach for functionalising

- stainless steel surfaces / A. Garcia-Giron, J.M. Romano, Y. Liang, B. Dashtbozorg, H. Dong, P. Penchev, S.S. Dimov // *Applied Surface Science*. – 2018. – N439. – P. 516–524
67. Mahmoud Moradi. High power diode laser surface hardening of AISI 4130; statistical modelling and optimization / M. Moradi, M. K. Moghadam // *Optics and Laser Technology*. – 2019. – Vol. 111. – P. 554–570
68. The influence of laser hardening on wear in the valve and valve seat contact / T. Slatter, H. Taylor, R. Lewis, P. King // *Wear*. – 2009. N267. – 797–806
69. Laser surface hardening of large cylindrical components utilizing ring spot geometry / Leonardo Orazi, Erica Liverani, Alessandro Ascari, Alessandro Fortunato, Luca Tomesani // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 63. – P. 233–236
70. Discrete laser spot hardening of austempered ductile iron / Ann Zammit, Stephen Abela, John Charles Betts, Maurice Grech // *Surface & Coatings Technology* – 2017. – Vol. 331. – P. 143–152
71. Influence of heat treatment on microstructures and mechanical properties of K447A cladding layers obtained by laser solid forming / Zhenlin Zhang, Yue Zhao, Jiguo Shan, Aiping Wu, Huaipeng Gu, Xin Tang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 790. – P. 703–715
72. Visscher H. The influence of laser line hardening of carbon steel AISI 1045 on the lubricated wear against steel AISI 52100 / H. Visscher, M.B. de Rooij, P.H. Vroegop, D.J. Schipper // *Wear*. – 1995. – V. 181–183. – P. 638–647.
73. Napadlek W. Laser percussive strengthening of the aluminum alloys. / W. Napadlek // *Journal of KONES Powertrain and Transport*. – 2011. – V.18. – № 1. – P. 373–383.
74. Montealegre M. A. Surface treatments by laser technology / M.A. Montealegre, Castro G., P. Rey, J.L. Arias, P. Vázquez, M. González // *Contemporary Materials*. – 2010. I.1. – P. 19–30
75. Соболева Н.Н. Упрочняющая фрикционная обработка NiCrBSi лазерного покрытия / Н.Н. Соболева, А.В. Макаров, И.Ю. Малыгина // *Обработка*

- металлов. Технология. Оборудование. Инструменты. – 2013. – № 4 (61). – С. 79–85.
76. Лещинский Л.К. Плазменное поверхностное упрочнение / Л.К. Лещинский, С.С. Самогутин, И.И. Пирч, В.И. Комар. – К.: Техника, 1990. – 109 с.
77. Лепешев А.А. Плазменное напыление аморфных и нанокристаллических материалов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – 224 с.
78. Балановский А. Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов : монография / А. Е. Балановский – Иркутск : Изд – во ИрГТУ, 2006 – 180 с.
79. Оценка качества плазменных покрытий, нанесенных комбинированным методом с обкаткой роликом, полученная на основе компьютерного моделирования / А.М. Кадырметов, В.И. Посметьев, В.О. Никонов, В.В. Посметьев // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – №87 (03). – С. 383–395.
80. Савуляк В.І. Плазмове гартування робочих поверхонь деталей транспортної техніки / В.І. Савуляк, О.В. Шаповалова // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 1. – С. 73–77.
81. Жадкевич М.Л. Импульсно-плазменное упрочнение инструмента / М.Л. Жадкевич, Ю.Н. Тюрин, О.В. Колисниченко // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2003. – № 4. – С. 40–41.
82. Тюрин Ю.Н. Импульсно-плазменное упрочнение инструмента / Ю.Н. Тюрин, О.В. Колисниченко, Н.Г. Цыганков // Автоматическая сварка. – 2001. – № 1. – С. 38–41.
83. Савуляк В. І. Формування високовуглецевих шарів з використанням плазми на поверхнях сталевих деталей для їх зміцнення / В.І. Савуляк, О.В. Шаповалова // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – №6 – С. 235–238.
84. Упрочнение серого чугуна поверхностным отбелом при микроплазменном оплавлении / А.Н. Емелюшин, Е.В. Петроченко, С.П. Нефедьев [и др.] // Современные технологии обработки металлов с применением

инструментов из сверхтвёрдых материалов – новые технологии и направления : сб. науч. тр. – Магнитогорск : ГОУ ВПО МГТУ, 2010. – Вып. 3. – С. 80–87.

85. Нечаев В.П. Модификация свойств поверхностных слоев тяжело нагруженных деталей горных машин посредством плазменного упрочнения / В.П. Нечаев, А.А. Рязанцев // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – 2012. – Вип. 32. – С. 123–126.
86. Ковалевский С.В. Упрочнение поверхностей деталей машин в открытой плазме / С.В. Ковалевский, С.В. Сокур // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2012. – № 3 (28). – С. 293–296.
87. Peng Ji. Optimization strategy for the velocity distribution based on tool influence function non-linearity in atmospheric pressure plasma processing / Peng Ji, Duo Li, Xing Su, Zheng Qiao, Kaiji Wu, Li Song, Bing Peng, Bo Wang // Precision Engineering. – 2020. – N 65. – P. 269–278.
88. Самотугин С.С. Влияние технологии плазменной обработки на микрорельеф поверхности стальных изделий / С.С. Самотугин, В.А. Мазур, В.И. Лавриненко, В.В. Смоквина // Захист металургійних машин від поломок : зб. наук. праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2009. – Вип. 11. – С. 41–46.
89. A Comparative Study on White Layer Properties by Laser Cutting vs. Electrical Discharge Machining of Nitinol Shape Memory Alloy / С.Н. Fu, J.F. Liu, Y.B. Guo, Q.Z. Zhao // Procedia CIRP. – 2016. Vol. 42. – P. 246 – 251
90. Корягин С.И. Способы обработки материалов / С.И. Корягин, И.В. Пименов, В.К. Худяков. – Калининград : Калинингр. ун-т, 2000. – 448 с.
91. Повышение жаропрочности сталей / С. М. Шевченко, В. Н. Сахарова, Г. В. Пачурин, В. А. Иняев // Фундаментальные исследования. – 2006. – № 4. – С. 87–88.
92. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения (в 2-х томах) / М.С. Поляк. – М. : «Л.В.М. – СКРИПТ», «Машиностроение»,

1995. – Т. 1. – 832 с.
93. Кіяннівський М.В. Електрофізичні та електрохімічні методи обробки поверхонь деталей у машинобудуванні / М.В. Кіяннівський, Н.І. Цивінда. – Кривий Ріг : Видавничий центр КТУ, 2011. – 412 с.
94. Рогозин В. Д. Высокоэнергетические воздействия на материалы / В.Д. Рогозин ; ВолгГТУ. – Волгоград : РПК «Политехник», 2007. – 77 с.
95. Симон Г., Тома М. Прикладная техника обработки поверхности металлических материалов: справочник / Г. Симон, М. Тома – Челябинск: Металлургия, 1991. – 368 с.
96. Киселев Е. С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля / Е.С. Киселев. – Ульяновск : УлГТУ, 2003. – 186 с.
97. Акулович Л.М. Влияние ультразвука на процессы упрочнения и обработки деталей машин в магнитном поле / Л.М. Акулович, А.М. Ефимов, А.В. Линник // Инновационные технологии в машиностроении : материалы междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк – 2011. – С. 241–244.
98. Зуев Л.Б. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации А1 / Л.Б. Зуев, Б.С. Семухин, К.И. Бушмелева // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70. – № 1. – С. 52–58.
99. Формирование нанокристаллической структуры в поверхностных слоях стали ЭК-181 в процессе ультразвуковой обработки / А.В. Панин, Е.А. Мельникова, О.Б. Перевалова [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12. – № 2. – С. 83–93.
100. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / Абрамов В.О., Абрамов О.В., Артемьев В.В. [и др.]; под ред. О.В. Абрамова, В.М. Приходько. – М. : Янус-К, 2006. – 688 с.
101. Хмелёв В.Н. Ультразвуковая размерная обработка материалов : науч. монография / В.Н. Хмелёв, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок / Алт. гос. Техн. Ун-т. им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Издательство АлтГТУ, 1997. – 120 с.
102. Бабей Ю.И. Поверхностное упрочнение металлов / Ю.И. Бабей,

- Б.И. Бутаков, В.Г. Сысоев – К.: Наукова думка, 1995. – 256 с.
103. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна / Ю.И. Бабей. – К. : Наукова думка, 1988. – 240 с.
104. Бишутин С.Г. Состояния тонких поверхностных структур шлифованных деталей и их изменения в процессе трения / С.Г. Бишутин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2010. – № 1 (25). – С. 5–9.
105. Trung Do Duc. A Study on Calculating Grinding Temperature / Do Duc Trung, Nguyen Van Thien, Hoang Tien Dung, and Tran Quoc Hung // ICERA 2018, LNNS 63, 2019, P. 84–90
106. Жасимов М.М. Управление качеством деталей при поверхностном пластическом деформировании. – Алма-Ата : Наука, 1986. – 208 с.
107. Утяшев Ф.З. Кинематика течения и структурообразование металла при интенсивной пластической деформации / Ф.З. Утяшев // Физика и техника высоких давлений, Том 23, № 1. 2013. С. 45–55.
108. Колмаков А.Г. Использование положений системного анализа при изучении структуры, особенностей пластического деформирования и разрушения металлов // Металлы. – 2004. – № 4. – С. 98-107.
109. Киричек А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием / А.В. Киричек, Соловьев, А.Г. Лизуткин – М.: Машиностроение, 2004. 288 с.
110. Кабатов А.А. Анализ финишных методов обработки поверхностным пластическим деформированием / А.А. Кабатов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2013. – № 58. – С. 49–54.
111. Conrad H. Mechanisms governing the plastic deformation of nanocrystalline materials, including grain-size softening. / H. Conrad, J. Narayan // Mechanical properties of nanocrystalline materials. – 2011. DOI:10.1201/B11164-2.
112. Gutkin M.Yu. Plastic Deformation in Nanocrystalline Materials // M.Yu. Gutkin, I.A. Ovid'ko / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. P. 187.



113. Теория и практика деформационных методов формирования нанокристаллической структуры в металлах и сплавах / Ф.З. Утяшев, Г.И. Рааб, В.Г. Шибakov, М.М. Ганиев – Казань : Изд-во Казан. Ун-та, 2016. – 207 с.
114. Васильев М.А., Прокопенко Г.И., Филатова В.С. Нанокристаллизация металлических поверхностей методами интенсивной пластической деформации (обзор) // Успехи физ. мет., 2004. – Т. 5. – с. 345–399.
115. Валиев Р.З., Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией – М.: Логос, 2000.– 272с.
116. Механические свойства наноструктурного железа, полученного интенсивной пластической деформацией трением / А.И. Юркова, А.В. Белоцкий, А.В. Бякова, Ю.В. Мильман // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології – Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. – 2009. – Т. 7. – № 2. – С. 619–632.
117. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / Смелянский В.М. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.
118. Евдокимова А.Н. Упрочнение поверхностных слоев деталей машин путем использования знакопеременных сдвиговых деформаций при высокоскоростном трении / А.Н. Евдокимова // Вестник машиностроения – 1999. – № 4. – С. 11–13.
119. Евдокимова А.Н. Влияние среды и знакопеременных деформаций при высокоскоростном трении на изнашивание и упрочнение поверхностных слоев стали / А.Н. Евдокимова // Трение и износ. – 1997. – Т. 18, № 2. – С. 201–204.
120. Евдокимов В.Д. Технология упрочнения машиностроительных материалов: учебное пособие-справочник / В.Д. Евдокимов, Л.П. Клименко, А.Н. Евдокимова; под ред. В.Д. Евдокимова. – Одесса Николаев : Изд-во НГГУ им. Петра Могилы, 2005. – 352 с.

121. Елементи фізики поверхні, наноструктур і технологій : монографія / В.В. Погосов, Ю.А. Куницький, А.В. Бабіч, А.В. Коротун. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2010. – 365 с.
122. Сысоев Э.П. Нанокерамические материалы [в 2 ч.]. Ч. 2. Трубки, стержни, проволока / Э.П. Сысоев. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 86 с.
123. Андриевский Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы / Р.А. Андриевский // Российский химический журнал. – 2002. – Т. 46. – №5. – С. 50–56.
124. Griffiths B.J. Tribological Advantages of White Layers Produced by Machining. / Griffiths B.J., Furze D.C. // J. Tribol. – 1987. – N.109(2).– P. 338-342.
125. Poulachon G., Albert A., Schluraff M., Jawahir I.S. An experimental investigation of work material micro structure effects on white layer formation in PCBN hard turning // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2005. – N 45. – P. 211–218.
126. Duan C., Wang M. Some metallurgical aspects of chips formed in high speed machining of high strength low alloy steel // Scripta Materialia. – 2005. – N 52. – P. 1001–1004.
127. Bosheh S.S., Mativenga P.T. White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling – International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2006. – Vol. 46. – P. 225-233.
128. Guo Y.B., Sahni J. A comparative study of turned and cylindrically ground white layers. – International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2004. – Vol. 44. – P. 135–145.
129. Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique / G.Cusanelli, A. Hessler-Wyser, F. Bobard et al. – Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – N. 149. – P. 289–295.
130. Brown M. Destructive and non-destructive testing methods for characterization and detection of machining-induced white layer: A review

- paper. / M.Brown, D.Wright, R.M'Saoubi, J.McGourlay, M.Wallis, A.Mantle, P.Crawforth, H.Ghadbeigi // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2018. – Vol. 23. – P. 39–53
131. Brown M. Non-destructive detection of machining-induced white layers through grain size and crystallographic texture-sensitive methods / M. Brown, D. Pieris, D. Wright, P. Crawforth, R. M'Saoubi, J. McGourlay, A.Mantle, R. Patel, R.J. Smith, H. Ghadbeigi // *Materials and Design*. – 2021, Vol. 200.
132. Masoumi Mohammad. Microstructure and crystallographic orientation evolutions below the superficial white layer of a used pearlitic rail / M. Masoumi, N. Batista de Lima, G. Tressia, A. Sinatora, H. Goldenstein // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Vol. 8, Iss. 6, 2019. – P. 6275–6288
133. A study on wear resistance of the white layer. / Y.Y. Yang, H.S. Fang, W.G. Huang // *Tribology International*. – 1996. – Vol. 29. No. 5. – P. 425–428.
134. Phase and microstructural evolution in white etching layer of a pearlitic steel during rolling-sliding friction // Y.Zhou, J.F.Peng, Z.P.Luo, B.B.Cao, X.S.Jin, M.H.Zhu // *Wear*. – 2016. Vol. 362–363. – P. 8–17
135. Modeling of white layer formation under thermally dominant conditions in orthogonal machining of hardened AISI 52100 steel / A. Ramesh, S.N. Melkote // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2008. – Vol. 48. – P. 402–414
136. Investigation of the relationship between the white layer thickness and 3D surface texture parameters in the die sinking EDM process / H. Ramasawmy, L. Blunt, K.P. Rajurkar // *Precision Engineering*. – 2005. – Vol. 29. – P. 479–490
137. Micro fracture investigations of white etching layers / A.K. Saxena, A. Kumar, M. Herbig, S. Brinckmanna, G. Dehm, C. Kirchlechner // *Materials and Design*. – 2019. – Vol. 180. – 107892
138. Effects of cutting conditions on the microstructure and residual stress of white and dark layers in cutting hardened steel / Z. Fangyuan, D. Chunzheng, S. Wei, Ju Kang // *Journal of Materials Processing Tech*. – 2019. – Vol. 266. – P. 599–

139. Structure and Composition of the White Layer in the Wire-EDM Process / F. Klockea, L.Hensgen, A. Klink, L. Ehle, A. Schwedt // *Procedia CIRP* . – 2016. Vol. 42. – P. 673 – 678
140. Experimental research on EDM of AISI O1 tool steel and study of the surface white layer formation / E.L. Papazoglou, A.P. Markopoulos, D.E. Manolakos // *Procedia Structural Integrity*. – 2018. – Vol. 10. – P. 235–242
141. Case study: Formation of white etching layers in a failed rolling element bearing race / Li-Biao Wan, Shu-Xin Li, Si-Yuan Lu, Yun-Shuai Su, Xue-Dao Shu, Hai-Bo Huang // *Wear*. – 2018. – Vol. 396–397. – P. 126–134
142. Influence of the initial surface state of bodies in contact on the formation of white etching layers under dry sliding conditions / O. Vargolici, P. Merino, A. Saulot, J. Cavoret, S. Simon, F. Ville, Y. Berthier // *Wear*. – 2016. – Vol. 366-367. – P. 209–216
143. Bülent Ekmekci. Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM) // *Applied Surface Science*. – 2007. – Vol. 253. – P. 9234–9240
144. Figure the impact of steel microstructure and heat treatment on the formation of white etching cracks / Benjamin Gould, Mohanchand Paladugu, Nicholaos G. Demas, Aaron C. Greco, R. Scott Hyde // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 134. – P. 232–239
145. Investigation of influence of white layer geometry on spalling property in railway wheel steel / T. Kato, A. Sugeta, E. Nakayama // *Wear*. – 2011. – Vol. 271. – P. 400–407
146. The basic relationships between residual stress, white layer, and fatigue life of hard turned and ground surfaces in rolling contact / Y.B. Guo, A.W. Warren, F. Hashimoto // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2010. – Vol. 2. – P. 129–134
147. Destructive and non-destructive testing methods for characterization and detection of machining-induced white layer: A review paper / M. Brown,

- D. Wright, R. M'Saoubi, J. McGourlay, M. Wallis, A. Mantle, P. Crawforth, H. Ghadbeigi // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2018. – Vol. 23. – P. 39–53
148. Nano structure and transformation mechanism of white layer for AISI1045 steel during impact wear // Yunhua Xua, Liang Fang, Qihong Cen, Jinhua Zhub / *Wear*. – 2005. – Vol. 258. – P. 537–544
149. A finite element modeling approach to predicting white layer formation in nickel superalloys // S. Ranganath, C. Guo, P. Hegde // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2009. – Vol. 58 – P. 77–80
150. Formation mechanisms of white layers induced by hard turning of AISI 52100 steel / S.B. Hosseini, U. Klement, Y. Yaoa, K. Rytberg // *Acta Materialia*. – 2015. – Vol.89. – P. 258–267
151. Tool wear effects on white and dark layer formation in hard turning of AISI 52100 steel // A. Attanasio, D. Umbrello, C. Cappellini, G. Rotella, R. M'Saoubi / *Wear*. 2012. – Vol. 286 – 287. – P. 98– 107
152. BarryJ. TEM study on the surface white layer in two turned hardened steels / J. Barry, G. Byrne // *Materials Science and Engineering*. – 2002. – A325. – P. 356–364
153. Cutting temperatures during hard turning – Measurements and effects on white layer formation in AISI 52100 / S.B. Hosseini, T. Beno, U. Klement, J. Kaminski, K. Rytberg // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2014. – Vol. 214. – P. 1293–1300
154. White and dark layer formation mechanism in hard cutting of AISI52100 steel / Zhang Fang-yuan, Duan Chun-zheng, Wang Min-jie, Sun Wei // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2018. – Vol. 32. – P. 878–887
155. An experimental study of the white layer formation during cryogenic assisted hard machining of AISI 52100 steel / Guang-Chao Nie, Xiao-Ming Zhang, Dong Zhang, Han Ding // *Procedia CIRP*. – 2018. Vol. 77. – P. 223–226
156. Development of white etching layers on rails: simulations and experiments / C. Bernsteiner, G.Müller, A.Meierhofer, K.Six, D.Künstner, P.Dietmaier //

- Wear. – 2016. – Vol. 366-367. – P.116–122
157. The microstructure analysis of white etching layer on treads of rails / Rui Pan, Ruiming Ren, Chunhuan Chen, Xiujuan Zhao // *Engineering Failure Analysis*. – 2017. – Vol.82. – P. 39–46
158. Guo Y.B. A comparative study of hard turned and cylindrically ground white layers / Y.B. Guo, J. Sahni // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2004. – Vol. 44. – P. 135–145
159. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения / Б.М. Балоян, А.Г. Колмаков, М.И. Алымов, А.М. Кротов. – М. : АгроПрессДизайн, 2007. – 125 с.
160. Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии / Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, А.Д. Погребняк [и др.]. – Х. : ХНУ им. В.Н. Каразина, 2009. – 209 с.
161. Конструкционные материалы / Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. - М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
162. Перспективы электроискрового упрочнения твердосплавного режущего инструмента / Е.В. Корбут, Б.А. Ляшенко, И.И. Подчерняева, Д.В. Юрченко // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. – 2012. – № 12. – С. 67–80.
163. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы – состояние разработок и применение. // *Перспективные материалы*. – 2001. – № 6. – С. 5–11.
164. Синькевич Ю.В. Электроимпульсное полирование на основе железа, хрома и никеля / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковський, Г.Я. Беляев // Минск : БНТУ, 2014. – 325 с.
165. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства / Гусев А.И. – Екатеринбург : УрО РАН, 1998. – 199 с.
166. Наноматеріали і нанотехнології / Азаренков М.О., Неклюдов І.М., Береснев В.М. і інші. – Х. : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2014. – 316 с.
167. Малыгин Г.А. Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов / Г.А. Малыгин // *Физика твердого тела*. – 2007. – Т. 49. – Вып.

6. – С. 961–982.
168. Формирование наноструктурированного состояния в литейном жаропрочном сплаве при микролегировании его лантаном / В.В. Сидоров, В.Е. Ригин, Д.В. Зайцев, А.В. Горюнов // Электронный научный журнал «ТРУДЫ ВИАМ». – 2013. – № 1. – Режим доступа : <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/1.pdf>.
169. Фастовець П.М. Класифікація нано-структурованих матеріалів для інженерії поверхні деталей машин / П.М. Фастовець // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. –N 3/5 (57). – С. 19–25
170. Plastic deformation of nanostructured materials / Glezer A.M., Kozlov E.V., Koneva N.A., Popova N.A., Kurzina I.A. – London : CRC Press, 2017. – 321 p.
171. Пенкин Н.С. Основы трибологии и триботехники / Н.С. Пенкин, А.Н. Пенкин, В.М. Сербин. – М. : Машиностроение, 2008. – 206 с.
172. Bernardini J. Diffusion in Nanomaterials / J. Bernardini, D.L. Beke // Nanocrystalline metals and oxides. Selected properties and applications. Kluwer Academic Publishers, New York, Boston. – 2002. – P. 41–80.
173. Gusev A.I. Nanocrystalline materials. / Gusev A.I., Rempel A.A. // Cambridge International Science Publishing. – 2004. –P. 346.
174. Головин Ю.И. Введение в нанотехнологию. – М.: Машиностроение-1. – 2003. – 112с.
175. Gleiter H. Nanostuctured materials: basic concepts and microstructure. / Acta mater. – 2000. – V. 48. – P. 1–29.
176. Fultz B. Grain boundaries of nanocrystalline materials – their widths, compositions, and internal structures / Fultz B., Frase H.N. // Hyperfine Interactions. – 2000. – N 130. – P. 81–108.
177. Акишин А.И., Бондаренко Г.Г., Быков Д.В. и др. Физика воздействия концентрированных потоков энергии на материалы. – М.: Изд-во УНЦ ДО, 2004. 418 с.

178. Ungár T. Characterization of nanocrystalline materials by X-ray line profile analysis / Ungár T. // *Journal of Materials Science*. – 2007. – Vol.42. – P.1584–1593.
179. Горский В.В. Влияние активных элементов рабочей среды и внешних воздействий на физическую природу и механизм формирования наноструктурных износостойких материалов в зоне контакта металлов при трении / Горский В.В., Грипачевский А.Н., Тихонович В.В., Уваров В.Н. // *Успехи физ. мет.* – 2003. – Т. 4 – С. 271–302
180. Глезер А.М. Нанокристаллы, закаленные из расплава / А.М. Глезер, И.Е. Пермякова – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.
181. Cherkaoui M. Atomistic and continuum modeling of nanocrystalline materials / Mohammed Cherkaoui, Laurent Capolungo. Springer, 2009. – 387 p.
182. Shimojo M. Formation of nano-sized martensite and its application to fatigue strengthening. / M.Shimojo, M. S., Y.Higo, Y. H., Shimojo, M. // *Advances in Materials Research, Amorphous and Nanocrystalline Materials -Preparation, Properties and Applications*, Springer Verlag, Berlin, Germany. – 2001.– P.186-204.
183. Современная трибология. Итоги и перспективы / отв. ред. К. В. Фролов. – М. : Издательство ЛКИ, 2008. – 480 с.
184. *Structural Nanocrystalline Materials. Fundamentals and Applications* / Koch C.C., Ovid'ko I.A., Seal S., Veprek S. – Cambridge University Press, Cambridge, 2007. – 364 p.
185. Тотай А.В. Технологическое обеспечение физических и эксплуатационных свойств поверхностных слоев деталей машин // *Трение и износ*. – 1997. – Т. 18, № 3. – С. 385–394.
186. Шевченко С.В., Стеценко Н.Н. Наноструктурные состояния в металлах сплавах и интерметаллических соединениях: методы получения, структура, свойства // *Успехи физ. мет.* – 2004. – Т. 5. – С. 219–255.
187. Алымов М.И., Зеленский В.А. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. – М.:



- МИФИ, 2004. – 52 с.
188. Алферов С.М., Копье П.С. Сурис Р.А. и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Нано- и микросистемная техника. – 2003. – № 8. – С. 3 – 13.
189. Societal Implication of Nanoscience and Nanotechnology. Eds. M. C. Roco, W.S. Bainbridge, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2001.
190. Буравлев Ю.М. Применение концентрированных потоков энергии для химико-термической обработки сплавов в водородосодержащей среде / Ю.М. Буравлев, А.Г. Милославский, М.П. Кушнир // Тяжелое машиностроение – 1999. – № 6. – С. 11–16.
191. Алымов М.И. Механические свойства нанокристаллических материалов / М.И. Алымов – М. : МИФИ, 2004. – 32 с.
192. Белый А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
193. Суслов А.Г. Выбор упрочняюще-отделочных методов обработки для повышения износостойкости деталей машин / А.Г. Суслов, А.П. Улашкин // Справочный инженерный журнал. – 1998. – № 7. – С. 15-21
194. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы / А.И. Гусев, А.А. Ремпель – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 224 с.
195. Фирстов С.А., Подрезов Ю.Н., Даниленко Н.И. Концепция “вредных” и “полезных” примесей в структурной инженерии границ раздела наноматериалов // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии 2005, т. 3. №2, С. 577-583.
196. Gleiter H. Nanostuctured materials: basic concepts and microstructure / H. Gleiter // Acta mater. – 2000. – Vol. 48. – P. 1–29.
197. Arvind R. Kalidindi. Nanocrystalline Materials at Equilibrium: A Thermodynamic. / Kalidindi, Arvind R., Tongjai Chookajorn, and Christopher A. Schuh // Review.” JOM 67, no. 12 (<http://dx.doi.org/10.1007/s11837-015-1636-9>)

198. Лякишев Н.П. Получение и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов / Н.П. Лякишев, М.И. Алымов – М. : ЭЛИЗ, 2007. – 148 с.
199. Шуваева Е. А. Физические свойства наноматериалов / Е.А. Шуваева, В.Ю. Введенский, А.С. Перминов. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2011 – 225 с.
200. Андриевский Р. А. Прочность наноструктур / Р. А. Андриевский, А. М. Глезер // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179. – № 4. – С. 337–358.
201. Столяров В.В. Особенности механических свойств наноструктурных сплавов / В.В. Столяров // Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 3 (31). – С. 54–60.
202. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы / Р.А. Андриевский, А.В. Рагуля. – М. : Издательский центр «Академия», 2005. – 192 с.
203. Бабей Ю.И. Метод определения остаточных напряжений первого рода / Ю.И. Бабей, М.Ф. Бережницкая // Препринт АН УССР. Физ.-мех.ин-т – Львов, 1980. – № 30 /6. – 66 с.
204. Аморфные металлические сплавы / под ред. Ф.Е. Люборского: [пер. с англ.] – М.: Металлургия, 1987. – 584 с.
205. Ковнеристый Ю.К. Объемно-аморфизирующиеся металлические сплавы и наноструктурные материалы на их основе // Металловедением и термическая обработка. – 2005. – №7. – С.14–16
206. Глезер А.М. Аморфные и нанокристаллические структуры: сходства, различия, взаимные переходы // Российский химический журнал. – 2002. – Том XLVI. – № 5. – С. 57–63
207. Glezer A.M. Amorphous-Nanocrystalline Alloys / A.M. Glezer, N.A. Shurygina – London : CRC Press, 2018. – 458 p.
208. Amorphous and nanocrystalline materials: preparation, properties, and applications / A. Inoue; K. Hashimoto (ed.). – Springer, 2001. – 206 p.
209. Прач О.Л. Аморфні сплави. Огляд / О.Л. Прач, О.І. Трудоношин, В.О. Баранов, К.В. Михаленков // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра : Матеріали ІХ Міжнар. наук.-практ. конф., 24 травня 2011 року. –

- К. : НТУУ «КПІ», 2011. – С. 216–222.
210. Золотухин И.В. Аморфные металлические материалы / И.В. Золотухин // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 4. – С. 73–78.
211. Xu Y. Nano structure and transformation mechanism of white layer for AISI1045 steel during impact wear / Yunhua Xu, Liang Fang, Qihong Cen, Jinhua Zhu // Wear, 2004. – P. 537–544
212. The failure models induced by white layers during impact wear / Ye-Yuan Yang, Hong-Sheng Fang, Yan-Kang Zheng, Zhi-Gang Yang, Zhong-Liang Jiang // Wear. 1995. – Vol.185 – P.17-22
213. Покинтелица Н.И. Применение высокоскоростного трения для различных технологических операций / Н.И. Покинтелица // Транспортное машиностроение. – К.: СУДУ, 1995. – С. 214–216.
214. Евдокимова А.Н. Знакопеременное высокоскоростное трение и его технологические возможности / А.Н. Евдокимова – Киев – Одесса: УМАОИ, Консалтинг, 1997. – 210 с.
215. Якимов А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – Киев – Одесса : Издательское объединение «Вища школа», 1986. – 176 с.
216. Новиков Ф. В. К вопросу о сущности прерывистого шлифования / Ф.В. Новиков, А. А. Якимов // Высокие технологии в машиностроении : сб. науч. трудов НТУ «ХПИ». – Харьков, 2001. – Вып. 1 (4).
217. Сталинский Д.В. Динамические и теплофизические особенности шлифования самоосциллирующим кругом / Д.В. Сталинский, А.Ю. Пирогов, Ю.А. Сызый // Вісник СевНТУ : зб. наук. праць. Серія : Машиноприладо-будування та транспорт. – Севастополь. – 2012. – Вип. 128. – С. 220–225.
218. Гурей І.В. Характеристики зміцненого шару після фрикційного оброблення / І.В. Гурей // Машинознавство. – 2004. – №5. – С. 35–39.
219. Данильченко Ю. М. Динамический анализ механической колебательной системы «шпиндельный узел» металлорежущего станка / Ю.М. Данильченко, А.И. Петришин // Вісн. Нац. техн. ун-ту України

- «КПШ». Серія : Машинобудування. – 2012. – № 64. – С. 27–34
220. Сизый Ю. А. Математическое моделирование динамики прерывистого шлифования / Ю. А. Сизый, А. В. Фесенко, Ю. Н. Любимый, С. Н. Кадыгроб // Вісн. нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». Темат. вип. : Технології в машинобудуванні – Харків: НТУ«ХПШ». – 2010. – №24. – С. 40–49.
221. Никитин С.П. Влияние колебаний динамической системы станка на точность и температуру при шлифовании / С.П. Никитин // Вестник Пермского нац. исследо. политехн. университет. – 2010. – № 3. – С. 31–47.
222. Kuriyagawa T. Grinding temperature within contact arc between wheel and workpiece in high-efficiency grinding of ultrahard cutting tool materials / Tsunemoto Kuriyagawa, Katsuo Syoji, Hideo Ohshita // Journal of materials processing. – 2003. – № 136. – P.39–47.
223. Сызый Ю.А. Динамика обдирочного шлифования самоосциллирующим кругом / Ю.А. Сызый, Д.В. Сталинский, С.В. Таран // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 25. – С. 50–55.
224. Коренев Б. Г. Динамические гасители колебаний. Теория и технические приложения / Б. Г. Коренев, Л. М. Резников. – М. : Наука, 1988. – 304 с.
225. Ковтун В.М. Разработка математической модели параметрических колебаний при круглом наружном врезном прерывистом шлифовании и её анализ / В.М. Ковтун, Ю.А. Сызый // Студенческие конференции : Фундаментальні і прикладні проблеми в машинобудуванні – НТУ «ХПШ», 2014. – С. 136–140.
226. Андронов А.А. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин – 2-е изд., перераб. и испр. – М. : Наука, 1981. – 918 с.
227. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков / С.С. Кедров. – М. : Машиностроение, 1978. – 199 с.
228. Орликов М.Л. Динамика станков / М.Л. Орликов – К. : Вища школа, 1989. – 272 с.
229. Упрочнение поверхности деталей комбинированными способами / Под

- ред. А.Г. Бойцова и В.Н. Машкова.– М.: Машиностроение, 1991.– 144 с.
230. Тушинский Л.И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов / Л.И. Тушинский ; отв. ред. Е.И. Шемякин. – Новосибирск : Наука, 1990. – 303 с.
231. Гурей І.В. Дослідження фретинг-корозії зміцнених поверхневих шарів, отриманих фрикційною обробкою / І.В. Гурей // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Серія : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2012. – № 729. – С. 97–101.
232. Джавад Джадаллах Мустафа Аль Дувейк. Підвищення якості інструментів та деталей з клиноподібними робочими елементами застосуванням лазерного зміцнення: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.07 / Джавад Джадаллах Мустафа Аль Дувейк. – К., 2004. – 20 с.
233. Hurey I. The research in to components of friction force tool part during friction hardening of plate steel faces / Ihor Hurey, Volodymyr Gurey, Petro Dmyterko, Babiarz Robert // Advances in manufacturing science and technology. – 2014. – N. 3. – P. 56–64.
234. Пат. 75804 Україна, МПК В24В 39/00 Інструмент для отримання наноструктурних поверхневих шарів деталей машин / Гурей І.В., Гурей В.І., Кирилів В.І.; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка» u201207473; заявл. 19.06.12; опубл. 10.12.12, Бюл. 23.
235. Інструмент для отримання наноструктурних зміцнених поверхневих шарів деталей машин: пат. № 134389 Україна, МПК (2019.01) В24В 7/00 / І.В. Гурей, В.І. Гурей, Т.А. Гурей, В.І. Кирилів; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка» u 2018 12892; заявл. 26.12.18; опубл. 10.05.19, Бюл. №9.
236. Інструмент для поверхневої наноструктуризації плоских, торцевих і циліндричних поверхонь: пат. № 146839 Україна, МПК (2006) В24В 39/00, В82У 30/00 / В.І. Кирилів, Б.П. Чайковський, О.В. Максимів, Б.Р. Ціж, В.І.

- Гурей, заявник і патентовласник Фізико-механічний інститут ім.Г.В. Карпенка НАН України u 2020 06884; заявл. 27.10.20; опубл. 24.03.21, Бюл. №12.
237. Інструмент для легування поверхневих шарів деталей машин: пат. № 123883 Україна, МПК (2021.01) B24B 39/04 (2006.01) B23H 5/14 (2006.01) / І.В. Гурей, В.І. Гурей, В.І. Кирилів; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка» а 2019 07693; заявл. 08.07.19; опубл. 16.06.21, Бюл. №24.
238. Чернов Н. Н. Металлорежущие станки. – М. : Mash.stroen., 1978. – 389с.
239. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский – М. : Наука, 1976. – 279 с.
240. Пляскин И.И. Оптимизация технических решений в машиностроении / И.И. Пляскин – М. : Машиностроение, 1982. – 176 с.
241. Ермаков С.М. Математическая теория оптимального эксперимента / С.М. Ермаков, А.А. Жиглявский. – М. : Наука, 1987. – 320 с.
242. Спиродонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиродонов – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.
243. Ishikawa K. What is Total Quality Control // The Japanese Way. London, Prentice Hall, 1985.
244. Исикава К. Японские методы управления качеством / Сокр.пер. с англ. / Под. Ред. А.В. Гличева. – М: Экономика, 1988. – 214 с.
245. Гурей І.В. Теоретичне визначення термонапруженого стану під час фрикційного зміцнення / І.В. Гурей, В.І. Гурей // Сучасні технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць. Вип. 11. – Харків НТУ «ХП», 2016. С. 42–48
246. Подстригач Я.С., Коляно Ю.М. Неустановившиеся температурные поля и напряжения в тонких пластинах. – К.: Наукова думка, 1972. – 308 с.
247. Глек Р.И. Температурное поле и напряжение в пластинке, нагреваемой

- движущимся несквозным призматическим источником тепла // Термомеханические процессы в кусочно-однородных элементах конструкций. – К.: Наукова думка, 1978. – С. 178–182.
248. Подстригач Я.С., Коляно Ю.М. Обобщенная термодинамика. – К.: Наукова думка, 1976. – 310 с.
249. Chandrasekharaiah D.S. Hyperbolic thermoelasticity. A review of recent literature // *Appl. Mech. Rev.* – 1998. – Vol. 51. – № 12. – P. 705–729.
250. Das B. Problems and Solutions in Thermoelasticity and Magneto thermoelasticity. – Springer International Publishing, Cham. – 2017.
251. Green A.E., Lindsay K.A. Thermoelasticity // *J. Elasticity*, 1972. – Vol. 2 (1). – P. 1–7.
252. Ignaczak J., Ostoja-Starzewski M. Thermoelasticity with finite wave speeds. – New York : Oxford University Press Inc. – 2010.
253. Reza Eslami M., Hetnarski R.B., Ignaczak J., Noda N., Sumi N., Tanigawa Y. Theory of Elasticity and Thermal Stresses: Explanations, Problems and Solutions Explanations. – Problems and Solutions, Springer. – 2013.
254. Schwartz M. Encyclopedia of Smart Materials / M. Schwartz. –New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. – 1073 p.
255. Liu G.R. The finite element method / Liu G.R., Quek S.S.– BH, 2003.– 348 p.
256. Chen Z. Finite Element Methods and their applications / Zhangxin Chen – Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – 414 p.
257. Sherief H. H. Boundary element method in generalized thermoelasticity/ H.H. Sherief, A.M.A.El-Latief // In: Encyclopedia of Thermal Stresses/Ed. R.B.Hetnarski. –Springer. Dordrecht. – 2014. – P. 567–575.
258. Дьяконов В.П. Mathematica 5.1/5.2/6. Программирование и математические вычисления / В.П. Дьяконов.– М.: ДМК-Пресс, 2008. – 576 с.
259. Gurey V. Mathematical model of the thermoelasticity of the surface layer of parts during discontinuous friction treatment / V. Gurey, H. Shynkarenko, I. Kuzio // *Advanced in Design, Simulation and Manufacturing IV.* – 2021. – Vol.

- 2: Mechanical and Chemical Engineering. – P. 12–22
260. Шахбазов Я. О. Технологічні можливості зниження амплітуди коливань технологічної системи шліфування / Я.О. Шахбазов // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Серія : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – Л. : Вид-во Львів. політехніки. – 2004. – № 515. – С. 51–54.
261. Бабаков И. М. Теория колебаний : учеб. пособие / И. М. Бабаков. – [4-е изд., испр.]. – М. : Дрофа, 2004. – 591 с.
262. Кобринський А.Е. Механізми с упругими зв'язами. Динаміка и устійчивість / А.Е. Кобринський – М. : Наука, 1964. – 390с
263. Каминская В.В. Станины и корпусные детали металлорежущих станков (расчет и конструирование) / Каминская В.В., Левина З.М., Решетов Л.Н. ; под. ред. Д.Н. Решетова – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. – 363 с.
264. Инженерные методы исследования ударных процессов. – М. : Машиностроение, 1977. – 240 с.
265. Петраков Ю. В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням / Ю. В. Петраков. – К. : УкрНДІАТ, 2004. – 383 с.
266. Gurey V. Mathematical model of dynamic processes during frictional hardening of flat surfaces / V. Gurey, V. Korendiy, P. Dmyterko // Вісник НУ «ЛП» Серія “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”. – 2014. – Вип. 78. – С. 79–85.
267. Сизый Ю.А. Динамика упругой схемы обдирочного шлифования кругом с прерывной режущей поверхностью / Ю.А. Сизый, Д.В. Сталинський, А.Ю. Пирогов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. –№ 28. – С. 14–20.
268. Комлев И. А. Станки для силового шлифования / И. А. Комлев. – М. : Машиностроение, 1982. – 64 с.
269. Лурье Г. Б. Устройство шлифовальных станков / Г. Б. Лурье, В. Н. Комиссаржевская. – М. : Высшая школа, 1983. – 125 с.



270. Сидоров Д.Е. Динамическая модель плоского шлифования / Д. Сидоров // Оптимізація виробничих процесів. Зб. наук. праць. – 2009. – №11. – С. 229–223
271. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов – М. : Машиностроение, 1967. – 359 с.
272. Блехман И. И. Вибрационная механика / И. И. Блехман. – М. : Физматлит, 1994. – 400 с.
273. Бидерман В.М. Теория механических колебаний: Учебник для вузов / В.М. Бидерман – М. : Высш. школа, 1980. – 408 с.
274. Писаренко Г.С. Колебания механических систем с учетом несовершенной упругости материала / Писаренко Г.С. – К. : Наукова думка, 1970. – 380с.
275. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах . Т.2. Динамика / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон. – М. : Наука, 1991. – 638 с.
276. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний : Учеб. пособ для вузов. : 3-е издание, перераб. / Я.Г. Пановко – М. : Наука, 1991. – 256 с.
277. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко – М. : Наука, 1967. – 444с.
278. Тимошенко С.П. Прочность и колебания элементов / Тимошкнко С.П. ; под. ред. Э.И. Григолюка – М. : Наука, 1975. 705 с.
279. Детали и механизмы металлорежущих станков / под ред. Д. Н. Решетова. – Т. 1. – М. : Машиностроение, 1972. – 664 с.
280. Проников А.С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем : справочник (в 3-х т.). Т. 1. Проектирование станков / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов [и др.] ; под общей ред. А.С. Проникова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана : Машиностроение, 1994. – 444 с.
281. Gurey V. Simulation modelling of dynamic processes due discontinuous frictional treatment of the flat surfaces / Volodymyr Gurey. // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. – 2020. – Vol. 6, No. 2. – P.

- 23– 33.
282. Лазарев Ю.Ф. Моделирование процессов и систем в MATLAB : учеб. курс / Ю.Ф. Лазарев – Спб. : Питер ; Киев : Изд. группа BHV, 2005. – 512 с.
283. Лазарев Ю.Ф. Начала программирования в среде MATLAB: учеб. пособие / Ю.Ф. Лазарев. – К. : НТУУ «КПИ», 2003. – 424 с.
284. Hurey I. Simulation model of dynamic processes during friction hardening of the flat surfaces / Ihor Hurey, Volodymyr Gurey, Petro Dmyterko // Вісник НУ «ЛП» Серія “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні”. – 2013. – Вип. 772. – С. 80–85.
285. Gurey V. Simulation model of dynamic processor during friction hardening of the flat surfaces / V. Gurey, P. Dmyterko // Litteris et Artibus : V Міжнародний молодіжний науковий форум : матеріали, 26–28 листопада 2015 р., Львів, Україна. – 2015. – С. 322–326.
286. Гурей І.В. Імітаційна модель динамічних процесів під час фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей / І.В. Гурей, В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко // Збірник наукових праць II-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Львів, 2014. – С. 25.
287. Гурей В.І. Моделювання амплітудно-частотної характеристики процесу фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей машин / В.І. Гурей // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. Харків НТУ «ХПІ». – 2020. – Вип. № 2. – С. 30–35.
288. Gurey V. Mathematical model of dynamic processes during frictional hardening of the cylindrical surfaces of parts / V. Gurey; I. Kuzio // Scientific Journal of TNTU. – Ternopil: TNTU. – 2020. – Vol. 100. – No. 4. – P. 29–39.
289. Гурей В.І. Моделювання динамічних процесів під час фрикційної обробки циліндричних поверхонь / В.І. Гурей, І.В. Кузьо // II Міжнародна науково-технічна конференція “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2021”, Вінниця. – 2021.
290. Гурей В.І. Моделювання амплітудно-частотної характеристики

- фрикційного зміцнення циліндричних поверхонь деталей машин / В.І. Гурей // Наукові нотатки. № 70 – Луцький національний університет, 2020. С. 82–89.
291. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах : Т. 3. Специальные главы механики / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон ; под ред. Г.Ю. Джанелидзе, Д.Р. Меркина. – М. : Наука, 1973. – 488 с.
292. Гурей І.В. Моделювання гіроскопічних процесів під час фрикційного зміцнення деталей машин / І.В. Гурей, В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко // Вісник НУ «ЛП» Серія “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні”. – 2013. – Вип. 760. – С. 14–18.
293. Dmyterko P. Impact of processing modes and parameters of the working part of the instrument on the surface quality of flat parts during high-speed friction hardening / P. Dmyterko, Y. Novitskyu, V. Gurey // Матеріали конференції: Litteris et Artibus, Lviv. – 2017. – Р. 250–251.
294. Гурей В.І. Моделювання траєкторії руху точки контакту інструмент-деталь під час зміцнення диском з гладкою робочою частиною / В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко // Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції, Львів–Звенів (Карпати), 6–10 лютого, 2017 р. – 2017. – С. 35–36.
295. Гурей В.І. Імітаційне моделювання переміщення осі швидкообертаючого шпинделя верстата під дією гіроскопічних сил / В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко, І.В. Кузьо // Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць IX Міжнародної наук.-практ. конференції, Львів–Плай (Карпати), 3–7 лютого, 2020 року. – 2020. – С. 66–70.
296. Карпенко Г.В. Влияние водорода на свойства стали / Карпенко Г.В., Крипякевич Р.И. // Москва: Металлургиздат. – 1962. –198 с.
297. Андрейків О.Є. Механіка руйнуванні та довговічність металевих матеріалів у водновмісному середовищах. / О.Є. Андрейків, О.В. Гембара // – Київ: Наук. Думка, 2007. – 344 с.

298. Ткачов В.І. Механізм оборотного впливу водню на механічні властивості сталі // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – 35, №4. – С. 29-37.
299. Похмурський В.І., Федоров В.В. Вплив водню на дифузійні процеси в металах. – Львів: Фіз.мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка, 1998. – 208 с.
300. Швед М.М. Изменение эксплуатационных свойств железа и стали под влиянием водорода. – Киев: Наук.думка, 1985. – 118 с.
301. Ткачов В.И., Холодный В.И., Левина И.Н. Работоспособность сталей и сплавов в среде водорода. – Львов: Физ.-хим. ин-т., 1999. – 256 с.
302. Панасюк В.В. Концентрація декогезивного впливу водню на метали / В.В. Панасюк // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014. – №2. – 7-15.
303. Сошко А.И., Сошко В.А. Смазочно-охлаждающие средства в механической обработке металла. Херсон: Олди-плюс. – 2008. – Т.1, 2. – 618 с.
304. Сошко В.А., Сошко А.И. Механохимическая обработка металлов. Riga, LV-1039, Latvia, LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 98 с.
305. Гурей И. Формирование нанокристаллического поверхностного слоя в процессе фрикционного упрочнения / И. Гурей, В. Гурей, Т. Гурей, Я. Бурек // Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografia. Gorzów Wlkp.-Poznań. – 2014. – S. 190–200.
306. Гурей І.В. Формування нанокристалічного зміцненого шару деталей машин під час фрикційного зміцнення / І.В. Гурей, В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко // Прогресивні технології і системи машинобудування. Міжнародний збірник наукових праць. – 2013. – Вип. 1,2 (46). – С. 98–106.
307. Андрейків О.Є. Математична модель визначення концентрації водню, за якої відбувається зміна механізму деформування / О.Є. Андрейків, Н.Т. Гембара // Мат. методи та фіз.-мех. поля. – 2019. – 62, №3. – С. 19–25.
308. Остащ О.П., Витвицький В.І. Двоїстість дії водню на механічну поведінку сталей і структурна оптимізація їх водневотривкості / О.П. Остащ, В.І. Витвицький // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2011. – 47, №4. – С. 5–19

309. Панасюк В.В. Міцність конструкційних металів у водневомісних середовищах / В.В. Панасюк, І.М. Дмитрах // Фізико-механічний інститут: поступ і здобутки; під ред. Панасюка В.В. – Львів: Сполом, 2011. – С.101–120.
310. Андрейків О.Є. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріал у водневомісних середовищах / О.Є. Андрейків, О.В. Гембара – К.: Наук.думка, 2008. – 344 с.
311. Gurey V. The effect of the hardened nanocrystalline surface layer on durability of guideways / V. Gurey, I. Hurey // Lecture Notes in mechanical engineering. advanced manufacturing processes. – 2019. – Vol 1. – P. 63–72
312. Пакет программ для обработки результатов количественного рентгеноспектрального микроанализа методом ZAF на мини-ЭВМ / Н.С. Цикунов, В.А. Баширев, А.Н. Грибачевский и др. – К.: - 1981. - 40 с. / Препринт / АН СССР, Институт металлофизики, 81.16/.
313. Гурей І.В. Зміна вмісту хімічних елементів у поверхневому шарі під час фрикційного зміцнення деталей машин / І.В. Гурей, Т.А. Гурей, Гурей І.В. // Збірник наукових праць VII-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», Львів. – 2018. – С. 38–40.
314. Segal V.M. Deformation mode and plastic flow in ultra fine grained material // Mater. Sci. Eng. – 2005. – V. 406A. – P. 205-216
315. Krous W., Nolze G. Powder cell – a program for the representation and manipulation of crystal structures and calculation of the resulting X-ray powder patterns // J. Appl. Cryst. – 1996. – 29. – P. 301–303.
316. Powder Diffraction File Search Manual. Alphabetical Listing and Search Section of Frequently Encountered Phases. Inorganic 1974. – Philadelphia: JCPDS, 1974. – 839 p.
317. Gutkin M., Ovid'ko I.A Declination and rotation deformation in nanocrystalline materials // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2003. – Vol. 4. – P. 79-113
318. Segal V.M. Severe plastic deformation: simple shear versus pure shear //

- Mater. Sci. Eng. – 2002. – Vol. 338A/ – P. 331–344
319. Pineau A. Failure of metals II: Fatigue / Pineau A., McDowell D.L., Busso E.P., Antolovich S.D. // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 107. – P. 484–507.
320. Santecchia E. A Review on Fatigue Life Prediction Methods for Metals / Santecchia E., Hamouda A. M. S., Musharavati F., Zalnezhad E, Cabibbo M., El Mehtedi M., Spigarelli S. // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2016, 9573524
321. Withers P.J. Residual stress and its role in failure. // *Rep. Prog. Phys.* – 2007. – Vol. 70. – P. 2211–2264.
322. Gurey V. Influence of surface hardened nanocrystalline layers on the resistance of contact fatigue destruction / V. Gurey, I. Hurey // *Lecture notes in mechanical engineering. Advances in design, simulation and manufacturing III. 2020* – Vol. 1: Manufacturing and materials engineering. – P. 483–491.
323. Fujiwara Y. Relationship between roughness parameters based on material ratio curve and tactile roughness for sanded surfaces of two hardwoods / Y. Fujiwara, Y. Fujii, S. Okumura // *J Wood Sci.* – 2005. – Vol. 51. – P. 274–277.
324. Stout K.J., Blunt L. *Three-Dimensional Surface Topography*, Elsevier, 2000.
325. Качество машин: справочник. В 2-х т. Т. 2 / А.Г.Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич и др. / Под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
326. Суслов А.Г. Конструкторско-технологическое обеспечение качества и конкурентоспособности изделий машиностроения / А.Г. Суслов // *Научноёмкие технологии в машиностроении*. – 2017. – № 7. – С. 25–28
327. International standard ISO 13565-3. Geometrical Product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties – Part 3: Height characterization using the material probability curve.
328. Smith G.T. *Industrial Metrology: Surface and roundness*, Springer Science & Business Media. – 2013.
329. ISO 4287, Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture: Profile Method-Terms, definitions and surface texture parameters. –1997.

330. Gurey V. Topography of the strengthened cylindrical surface after frictional continuous treatment / Volodymyr Gurey // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. – 2020. – Vol. 6, No. 3. – P. 9–19.
331. Pawlus P. A review of methods of random surface topography modeling. / Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M. // Tribology International. – 2020. – Vol. 152.
332. Dzierwa A. Influence of surface preparation on surface topography and tribological behaviours, Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2017. – N. 17(3). – P. 502–510.
333. Pawlus P. Prediction of Parameters of Equivalent Sum Rough Surfaces. / Pawlus Pawel, Reizer Rafal, Zelasko Wieslaw // Materials. – 2020. – N13. – 4898; doi:10.3390/ma13214898
334. Pawlus P. Material ratio curve as information on the state of surface topography – A review. / Pawlus Pawel, Reizer Rafal, Wieczorowski Michal, Krolczyk Grzegorz // Precision Engineering. 2020. – N65. – P. 240–258
335. Gert W. Wolf. Scale independent surface characterisation: Geography meets precision surface metrology / Gert W.W. // Precision Engineering. – 2017. – N. 49. – P. 456–480
336. ISO 4288, Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture: Profile Method-Rules and procedures for the assessment of surface texture. –1996.
337. Гурей В.І. Дослідження складових сил під час фрикційного зміцнення циліндричних поверхонь деталей машин / В.І. Гурей // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2020. – № 2(49). – С. 81–90.
338. Гурей І.В. Математичне моделювання точності поверхонь тіл обертання під час їх оброблення / І.В. Гурей, В.І. Гурей // Збірник наукових праць V-ої науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», Львів. – 2016. – С. 36–38.

339. Hurey I. Wpływ szlifowania ściernicą z diamentu i CBN na trwałość stali 1H12N2MVFBA / I. Hurey, V. Gurey // *Mechanik.* – 2015. – N. 8-9. – S. 132–134.
340. Рыжов С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / О.В. Рыжов, А.Г. Суслов, В.П. Федоров, – М.: Машиностроение, 1979. – 176с.
341. Lewis S.R. Full-scale testing of laser clad railway track; Case study – Testing for wear, bend fatigue and insulated block joint lipping integrity. / S.R.Lewis, R.Lewis, P.S.Goodwin, S.Fretwell-Smith, D.I.Fletcher, K.Murray, J.Jaiswal // *Wear, Volumes 376–377, Part B, 2017.* P. 1930-1937
342. Effect of loading on the friction and interface microstructure of lubricated steel tribopairs / Shaogang Cui, Hongtao Zhu, Shanhong Wana, Kiet Tieu Bach H. Tran, Liping Wang, Qiang Zhu // *Tribology International.* – 2017. – Vol. 116. – P. 180–191
343. Денисенко М.И. Роль вторичных структур при абразивном изнашивании конструкционных материалов / М.И. Денисенко, О.В. Зазимко, В.Ф. Лабунец, В.В. Загребельный // *Проблеми тертя та зношування*, 2015, 4 (69) – 38-42 с.
344. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. –М.: Маш-стр., 1977. – 526 с.
345. Gurey V. The effect of the hardened nanocrystalline surface layer on durability of guideways / Gurey V., Hurey I. // *Grabchenko's international conference on advanced manufacturing processes (InterPartner-2019)*, September 10–13, 2019, Odessa : International Association for technological development and innovation. – 2019. – С. 41.
346. Гурей І.В. Дослідження якості вторинних структур в зоні тертя зміцнених поверхонь / В.І. Гурей, Т.А. Гурей, Гурей І.В. // *Матеріали всеукр. наук.-практ. конф. «Обладнання і технології сучасного машинобудування»* – Тернопіль. – 2017. – С. 68-69.



347. Гурей Т.А., Гурей В.І., Гурей І.В. Дослідження адсорбційного ефекту під час зношування зміцнених поверхонь / Т.А. Гурей, В.І. Гурей, І.В. Гурей // Збірник наукових праць III-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції «Новітні шляхи створення, експлуатації і сервісу автомобілів» 12-15 вересня 2017 р, Миколаїв-Коблево, 2017. – С. 18-20.
348. Hurey I. Wear resistance of gray cast iron pair after friction hardening / I. Hurey, V. Gurey, T. Hurey, P. Dmyterko // International scientific conference “Cluster-Casting-Future”, Rzeszow. – 2014. – P. 95–98.
349. Гурей І.В. Вплив нанокристалічного зміцненого шару на зносостійкість сірого чавуну при терті з граничним мащенням / І.В. Гурей, В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко // Сучасні технології в машинобудуванні, 2014, вип. 9, С. 23–32
350. Gurey V. Wear resistance of strengthened layers with nanocrystalline structure in friction with boundary lubrication / V. Gurey. // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. – 2020. – Vol. 6, No. 1.– P. 83–90.
351. Hurey I. Wear resistance of hardened nanocrystalline structures in the course of friction of steel-grey cast iron pair in oil-abrasive medium / I. Hurey, T. Hurey, V. Gurey // Lecture notes in mechanical engineering. advances in design, simulation and manufacturing II. – 2019. – P. 572–580.
352. Hurey I. The effect of nanocrystalline layers on the wear resistance of grey cast iron during friction in an oil-abrasive medium / I. Hurey, T. Hurey, V. Gurey // Tribologia. – 2018. – N. 282 (6). – P. 37–42
353. Hurey I. Wpływ utwardzonych warstw nanokrystalicznych na odporność na zużycie żeliwa podczas tarcia w środowisku olejowo – ściernym / Hurey Ihor, Hurey Tetyana, Gurey Volodymyr // Problematyka funkcjonowania i rozwoju branży metalowej w Polsce. Innowacje technologiczne : streszczenia wystąpień : V Ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna, 5–6 lipca 2018 r - Jedlina : Radomska Rada Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych NOT. – С. 11.
354. Hurey I. Wear resistance of hardened nanocrystalline structures in the course of friction of steel-grey cast iron pair in oil-abrasive medium / Hurey I., Hurey

- T., Gurey V. // *Advances in design, simulation and manufacturing: The innovation exchange : proceedings of the 2nd International conference, Lutsk, Ukraine, June 11–14, 2019, Sumy : Sumy University Book.* – С. 117.
355. Maksymiv O.V. Influence of the surface nanostructuring of 65G steel on the wear resistance of the disks of furrow openers of seeding machines / O.V. Maksymiv, V.I. Kyryliv, V.P. Chaikovskiy, B.R. Tsizh, A.M. Kostruba, V.I. Hurei // *Materials Science.* – 2021. – Vol. 56. – P. 523–529
356. Gurey V. Influence of surface hardened nanocrystalline layers on the resistance of contact fatigue destruction / V. Gurey, I. Hurey // *Proceedings of the 3rd international conference on design, simulation, manufacturing: The innovation exchange, DSMIE-2020, June 9-12, 2020, Kharkiv.* – 2020. С. 104
357. Гурей І.В. Дослідження малоциклової втомної міцності поверхневих шарів сталевих зразків після фрикційного зміцнення / І.В. Гурей, Т.А. Гурей, В.І. Гурей // *Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво»*, Краматорськ, 2018. С. 41–44.

# ДОДАТКИ

## Додаток А

Товариство з обмеженою  
відповідальністю «Удеч-Техніка»

Директор  Щуйко Я.В.



« 12 » 09 2018 р

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт підтверджує те, що доцентом кафедри МАМ Національного університету «Львівська політехніка», к.т.н. Гуреєм В.І. запропоновано технологічний метод поверхневого фрикційного зміцнення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин.

Фрикційною обробкою проводили зміцнення циліндричних поверхонь кілець струмознімачів.

Дослідно-промислова перевірка показала, що після фрикційного зміцнення оброблювальних поверхонь деталей формується білий шар, товщина зміцненого шару становить 290-450 мкм, твердість 940-950 HV при вихідній – 700 HV.

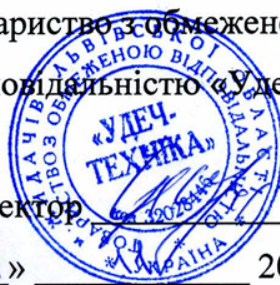
Дослідно-промислові випробування показали, зміцнені циліндричні робочі поверхні кілець струмознімачів для роторних вентиляторів сушил цегельних заводів, які працюють в умовах підвищених температур (90-130°C) показали підвищення довговічності обладнання у 1,3-1,5 разів.

## Додаток Б

Товариство з обмеженою  
відповідальністю «Удеч-Техніка»

Директор  Шуйко Я.В.

« 14 » \_\_\_\_\_ 2019 р



## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт підтверджує те, що докторантом Національного університету «Львівська політехніка», к.т.н., доц. Гуреєм В.І. запропоновано технологічний метод поверхневого фрикційного зміцнення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин.

Зміцнення виконували фінішною операцією фрикційного оброблення циліндричних поверхонь напрямних штампів прес-форм, роликів накатних головок для формування профілю дроту решіткового настилу, плоских поверхонь напрямних спеціального обладнання для штампа обрубки полоси решіткового настилу.

Дослідно-промислова перевірка показала, що після фрикційного зміцнення оброблювальних поверхонь деталей формується білий шар, товщина зміцненого шару становить 290-450 мкм, твердість 940-950 HV при вихідній – 700 HV.

Дослідно-промислові випробування показали, зміцнені циліндричні поверхні напрямних штампів прес-форм показали підвищення міжремонтного ресурсу роботи прес-форм у 1,4-1,6 разів у порівнянні з заводською технологією; зміцнені ролики накатних головок для формування профілю дроту решіткового настилу показали підвищення довговічності обладнання у 1,5-1,7 разів; зміцнені плоскі поверхні напрямних спеціального обладнання для штампа обрубки смуги решіткового настилу показали підвищення довговічності у 1,4-1,6 разів.

## Додаток В

Товариство з обмеженою відповідальністю

«Завод Електронпобутприлад»

Генеральний директор  Ждиняк З.І.



\_\_\_\_\_ 2019 р

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт підтверджує те, що докторантом каф. МАМ Національного університету «Львівська політехніка», к.т.н., доц. Гурем В.І. запропоновано технологічний метод поверхневого фрикційного зміцнення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин.

Зміцнення проведено фінішною технологічною операцією фрикційного оброблення циліндричних поверхонь напрямних штампів прес-форм, роликів накатних головок для накатування зовнішніх поверхонь заготовок прокату, а також плоских поверхонь спеціальних різців для підрізання шнеків.

Дослідно-промислова перевірка показала, що після фрикційного зміцнення оброблювальних поверхонь деталей формується білий шар, товщина зміцненого шару становить 250-450 мкм, твердість 930-950 HV при вихідній – 700 HV.

Дослідно-промислові випробування показали, зміцнені циліндричні поверхні напрямних штампів прес-форм показали підвищення міжремонтного ресурсу роботи прес-форм у 1,4-1,7 разів у порівнянні з заводською технологією; зміцнені ролики накатних головок для накатування зовнішніх поверхонь заготовок прокату показали підвищення довговічності обладнання у 1,4-1,6 разів; зміцнені плоскі поверхні спеціальних різців для підрізання шнеків показали підвищення довговічності у 1,4-1,6 разів.

## Додаток Г



## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Даний акт підтверджує те, що працівниками Національного університету «Львівська політехніка» запропоновано технологічний метод поверхневого фрикційного зміцнення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин.

У інструментальному цеху введено вказаний метод зміцнення поверхневих шарів деталей технологічного оснащення (напрямні прес-форм, штовхачі, поверхні тертя повзунів).

Дослідно-промислова перевірка показала, що після фрикційного зміцнення оброблювальних поверхонь деталей формується білий шар, товщина зміцненого шару становить 290-450 мкм, твердість 940-950 HV при вихідній – 700 HV.

Дослідно-промислові випробування показали, що після зміцнення однієї із пар тертя підвищується опір зношуванню у 1,25-1,5 рази у порівнянні із парами тертя, які виготовлені за попередньо використовуваною технологією.

Начальник виробництва

Штогрин С.П.

**Додаток Д****Фермерське господарство «СЕРЖ»**

Тернопільська обл., Тернопільський р-н., с.Дибше

**АКТ****ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВОЇ ПЕРЕВІРКИ МЕТОДУ  
МІКРОЛЕГУВАННЯ НОЖІВ СОЛОМОПОДРІБНЮВАЧА КОМБАЙНІВ  
ФІРМИ «CLASS»**

У Національному університеті «Львівська політехніка» на кафедрі механіки та автоматизації машинобудування розроблено нову, прогресивну технологію мікролегування та зміцнення різальних поверхонь ножів соломоподрібнювача для комбайнів фірми «Class». Відпрацьовані режими обробки, підібраний матеріал оброблювального інструмента, форма робочої частини, а також технологічне середовище.

Обробка різальних лез здійснювали з однієї сторони, шириною 10-12 мм, ножі були виготовлені зі сталі 65Г у стані постачання. Після мікролегування у поверхневих шарах оброблювальних ножів утворився нанокристалічних шар товщиною у 500-600 мкм з підвищеною твердістю (980-1060 HV) від основного матеріалу. Вимоги щодо шорсткості поверхонь не ставилися. Шорсткість після обробки становила  $Ra$  0,8 мкм. Операція мікролегування є фінішною операцією при виготовленні ножів та виключає об'ємну термічну обробку.

Дослідно-промислові випробування показали, що метод мікролегування різальних поверхонь ножів, без об'ємного термічної обробки підвищує довговічність ножів на 20-25% у порівнянні з заводськими ножами після термічної обробки.

Цей акт не веде до взаємних зобов'язань за фінансовими розрахунками.

Голова фермерського  
господарства «Серж»



Шкільний М.І.

«23» Серпень 2020 р.



## Додаток Е

Приватне агропромислове підприємство «АГРОІНВЕСТ»  
Тернопільська обл., Тернопільський р-н., с.м.т.Козова

### АКТ ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВОЇ ПЕРЕВІРКИ МЕТОДУ МІКРОЛЕГУВАННЯ НОЖІВ СОЛОМОПОДРІБНЮВАЧА КОМБАЙНІВ ФІРМИ «CLASS»

У Національному університеті «Львівська політехніка» на кафедрі механіки та автоматизації машинобудування розроблено нову, прогресивну технологію мікролегування та зміцнення різальних поверхонь ножів соломоподрібнювача для комбайнів фірми «Class». Відпрацьовані режими обробки, підібраний матеріал оброблювального інструмента, форма робочої частини, а також технологічне середовище.

Обробка різальних лез здійснювали з однієї сторони, шириною 10-12 мм, ножі були виготовлені зі сталі 65Г у стані постачання. Після мікролегування у поверхневих шарах оброблювальних ножів утворився нанокристалічних шар товщиною у 500-600 мкм з підвищеною твердістю (980-1060 HV) від основного матеріалу. Вимоги щодо шорсткості поверхонь не ставилися. Шорсткість після обробки становила  $Ra$  0,8 мкм. Операція мікролегування є фінішною операцією при виготовленні ножів та виключає об'ємну термічну обробку.

Дослідно-промислові випробування показали, що метод мікролегування різальних поверхонь ножів, без об'ємного термічної обробки підвищує довговічність ножів на 20% у порівнянні з заводськими ножами після термічної обробки.

Цей акт не веде до взаємних зобов'язань за фінансовими розрахунками.

Керівник приватного агропромислового підприємства «АГРОІНВЕСТ»



Пудлик Ю.Й.

« 16 » березня 2020 р.

## Додаток Є



ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної  
роботи Національного університету  
«Львівська політехніка»

\_\_\_\_\_ Давидчак О.Р.

## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи докторанта  
Гурея Володимира Ігоровича «Науково-технологічні основи підвищення якості  
та експлуатаційних характеристик деталей машин формуванням зміцнених  
нанокристалічних шарів» у навчальному процесі кафедри механіки та  
автоматизації машинобудування

**Комісія у складі:**

*голова комісії:*

Кузьо І.В. – д.т.н., проф., завідувач кафедри механіки та автоматизації  
машинобудування;

*члени комісії:*

Гурський В.М. – д.т.н., доцент кафедри механіки та автоматизації  
машинобудування;

Шоловій Ю.П. – к.т.н., доцент, доцент кафедри механіки та автоматизації  
машинобудування.

Корендій В.М. – к.т.н., доцент, доцент кафедри механіки та автоматизації  
машинобудування, системний адміністратор ІМІТ.

цим актом підтверджує, що в навчальному процесі кафедри механіки та  
автоматизації машинобудування впроваджено та використовуються наступні  
результати дисертаційної роботи Гурея В.І.:

- розроблені математичні моделі визначення термопружних та динамічних характеристик під час проведення практичних занять з курсу «Математичне програмування»;
- дослідження на основі теоретичних і експериментальних досліджень впливу режимів обробки, геометрії робочої частини інструменту на динамічні характеристики процесу фрикційного зміцнення деталей

машин під час проведення лабораторних робіт «Технологічне обладнання та процеси виготовлення машин»

Застосування результатів дисертаційної дослідження підвищує теоретичний рівень та практичні навички студентів у використанні сучасних прикладних розрахункових методів, зокрема під час проектування в сучасних програмних засобах.

**Голова комісії:**

Завідувач кафедри механіки та автоматизації машинобудування, д.т.н., проф.



Кузьбо І.В.

**Члени комісії:**

Доцент кафедри механіки та автоматизації машинобудування, д.т.н.



Гурський В.М.

Доцент кафедри механіки та автоматизації машинобудування, к.т.н., доцент



Шоловій Ю.П.

Доцент кафедри механіки та автоматизації машинобудування, системний адміністратор ІІМТ, к.т.н., доцент



Корендій В.М.

## Додаток Ж



### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи докторанта  
Гурея Володимира Ігоровича «Науково-технологічні основи підвищення якості та  
експлуатаційних характеристик деталей машин формуванням зміцнених нанокристалічних  
шарів» у навчальному процесі  
кафедри комп'ютеризованого машинобудування  
Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

### Комісія у складі:

*голова комісії:*

Панчук В. Г. – д.т.н., проф., завідувач кафедри комп'ютеризованого  
машинобудування;

*члени комісії:*

Онисько О. Р. – д.т.н., доц., професор кафедри комп'ютеризованого  
машинобудування;

Шуляр І. О. – к.т.н., доц., доцент кафедри комп'ютеризованого  
машинобудування;

цим актом підтверджує, що в навчальний процес кафедри комп'ютеризованого  
машинобудування впроваджено та використовуються наступні результати  
дисертаційної роботи Гурея В.І.:

- математичні моделі багатофакторного експерименту для визначення впливу технологічних параметрів фрикційного оброблення на товщину зміцненого шару, складових сили взаємодії у зоні контакту інструмент – деталь під час вивчення дисципліни «Основи наукових досліджень»;
- результати дослідження впливу технологічних режимів обробки, геометрії робочої частини інструменту на динамічні характеристики процесу фрикційного зміцнення деталей машин під час вивчення дисципліни «Технології зміцнення та відновлення деталей і конструкцій».

Застосування результатів дисертаційного дослідження дозволяє підвищити теоретичний та практичний рівень підготовки студентів та аспірантів спеціальності 131 – Прикладна механіка.

### Голова комісії:

Завідувач кафедри комп'ютеризованого  
машинобудування, д.т.н., проф.

### Члени комісії:

Професор кафедри комп'ютеризованого  
машинобудування, д.т.н., доц.

Доцент кафедри комп'ютеризованого  
машинобудування, к.т.н.

Панчук В. Г.

Онисько О. Р.

Шуляр І. О.

Додаток 3  
(11) **134389**

(19) **UA**

(51) МПК (2019.01)  
**B24B 7/00**  
**B82Y 30/00**

<p>(21) Номер заявки: <b>u 2018 12892</b></p> <p>(22) Дата подання заявки: <b>26.12.2018</b></p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: <b>10.05.2019</b></p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: <b>10.05.2019, Бюл. № 9</b></p>	<p>(72) Винахідники: <b>Гурей Ігор Володимирович, UA,</b> <b>Гурей Володимир Ігорович, UA,</b> <b>Гурей Тетяна Андріївна, UA,</b> <b>Кирилів Володимир Іванович, UA</b></p> <p>(73) Власник: <b>НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА",</b> вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, UA</p>
---	--

(54) Назва корисної моделі:

**ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ НАНОСТРУКТУРНИХ ЗМІЦНЕНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

(57) Формула корисної моделі:

Інструмент для формування наноструктурних зміцнених поверхневих шарів деталей машин, який виконаний із нержавіючої сталі або титанового сплаву, у вигляді диска з робочою поверхнею на його периферії та посадочним отвором у вигляді конуса Морзе, який відрізняється тим, що на робочій поверхні інструмента нарізані у парній кількості різноспрямовані нахилені праві і ліві пази під кутом  $\alpha = 30^\circ \dots 60^\circ$  у кількості:

$$n \leq \frac{\pi \cdot D}{L},$$

де D - зовнішній діаметр інструмента, мм;

L - коловий крок пазів, який складає  $L = b \cdot \operatorname{tg}(\alpha) + l$ , мм;

b - ширина робочої поверхні інструмента, мм;

 $\alpha$  - кут нахилу пазів, град.;l - ширина паза інструмента,  $l = (2 \dots 20) \cdot c$ , мм;

c - ширина зони контакту інструмент-деталь, мм.

## Додаток И

(11) 146839

(19) UA

(51) МПК (2021.01)

B24B 39/00

B82Y 30/00

(21) Номер заявки: **u 2020 06884**(22) Дата подання заявки: **27.10.2020**(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **25.03.2021**(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: **24.03.2021, Бюл. № 12**(72) Винахідники:  
**Кирилів Володимир Іванович, UA,**  
**Чайковський Борис Петрович, UA,**  
**Максимів Ольга Володимирівна, UA,**  
**Ціж Богдан Романович, UA,**  
**Гурей Володимир Ігорович, UA**(73) Володілець:  
**ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Г.В. КАРПЕНКА НАН УКРАЇНИ,**  
**вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060, UA**

(54) Назва корисної моделі:

**ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОЇ НАНОСТРУКТУРИЗАЦІЇ ПЛОСКИХ, ТОРЦЕВИХ І ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ**

(57) Формула корисної моделі:

1. Інструмент для отримання поверхневих наноструктур різнонаправленою термопластичною деформацією високошвидкісним тертям на плоских, торцевих і циліндричних поверхнях з циклічним прикладанням тиску в зоні фрикційного контакту, який складається із корпусу і робочого диску, виконаного із титанового сплаву або нержавіючої сталі, причому з метою підвищення продуктивності процесу та покращення фізико-механічних властивостей обробленого поверхневого шару, робоча поверхня інструмента виконана зигзагоподібною зі змінною шириною робочої поверхні інструмента і утворена радіусними циліндричними заглибинами, вісь яких перпендикулярна до осі обертання інструмента і рівномірно розміщеними на обох торцях інструмента з їх взаємним зміщенням на половину кута їх розташування.

2. Інструмент за п. 1, який **відрізняється** тим, що радіусні заглибини виконані на половину ширини робочої поверхні інструмента радіусом, вибраним із співвідношення  $R=(2...3) \times b$ , де  $b$  - ширина робочої поверхні інструмента, а їх кількість на кожній торцевій поверхні вибирають із співвідношення:

$$n = \frac{\pi \cdot D}{(4...5) \cdot \sqrt{2Rh - h^2}},$$

де  $D$  - зовнішній діаметр інструмента, мм;

$R$  - радіус заглибин, мм;

$h$  - висота утвореного заглибинами сегмента, мм.

## Додаток І

(11) **123883**(19) **UA**

(51) МПК (2021.01)  
**B24B 39/00**  
**B24B 39/04** (2006.01)  
**B23H 5/00**  
**B23H 5/14** (2006.01)

(21) Номер заявки: **а 2019 07693**

(22) Дата подання заявки: **08.07.2019**

(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: **17.06.2021**

(41) Дата публікації відомостей про заявку та номер Бюлетеня: **10.01.2020, Бюл.№ 1**

(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: **16.06.2021, Бюл. № 24**

(72) Винахідники:  
**Гурей Ігор Володимирович, UA,**  
**Гурей Володимир Ігорович, UA,**  
**Кирилів Володимир Іванович, UA**

(73) Володілець:  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА",**  
**вул. Ст. Бандери, 12, м. Львів, 79013, UA**

(54) Назва винаходу:

**ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЛЕГУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

(57) Формула винаходу:

Інструмент для легування поверхневих шарів деталей машин, що складається з корпусу, на який встановлений диск із титанового сплаву або нержавіючої сталі з робочою частиною на периферії, на якій виконані поперечні пази, і посадочним отвором у вигляді конуса Морзе та закріплений кільцем з лівою різью, який **відрізняється** тим, що на робочій частині диска інструмента поперечні пази виконані з радіально розташованими отворами діаметром  $\varnothing$  1-4 мм з можливістю подачі технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь.

## Додаток К

## Лістинг програми

```

(* ***===== **** *)
(* Фізичні та термомеханічні *)
(* характеристики *)
(* термопружного стрижня *)
(* ***===== **** *)
(* _Довжина відрізка [М] *) a = 0.; b = 0.1;
(* _Модуль пружності  $\left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}\right]$  *) c[x_] := 2.14 * 1011;
(* _Коефіцієнт в'язкості [Па с] *) lepko[x_] := 0.00111;
(* _Густина  $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]$  *) ρ[x_] := 7850.;
(* _Коефіцієнт теплопровідності  $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{м с } ^\circ\text{C}}\right]$  *) λ[x_] := 41.;
(* _Теплоємність оброблюваного матеріалу  $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг } ^\circ\text{C}}\right]$  *) ce[x_] := 466.;
(* _Коефіцієнт лінійного розширення [М °C] *) arcs[x_] := 1.2 * 10-5;
(* Швидкість хвилі  $\left[\frac{\text{м}}{\text{с}}\right]$  *) pfali[x_] :=  $\sqrt{c[x] / \rho[x]}$ ;
(* _Час(=T0) переміщення хвилі по глибині плити *) czas = (b - a) / pfali[a];
T0 = czas;
(* ***===== **** *)
(* Питоме навантаження *)
(* термопружної плити *)
(* ***===== **** *)
(* _Розподілене навантаження  $\left[\frac{\text{Н}}{\text{кг}}\right]$  *) f[x_, t_] := 0.;
(* _Концентровані джерела тепла *) Q[x_, t_] := 0.;
(* ***===== **** *)
(* Поверхневі навантаження *)
(* термопружної плити *)
(* ***===== **** *)
(* _Переміщення в точці x=a *) α = 1020; αb = 0.; ua = 0.; ub = 0.;
(* _Температурні умови в точці x=a *) αcb = 0.; θa = 0.; θb = 0.; izola = 0.;
(* _Час проходження одиничного контакту *) tpress = 6.4 * 10-4;
(* _Час проходження паузу *) tpausz = 1.5 * 10-4; tc = tpress + tpausz;
(* _Час моделювання процесу обробки *) T = 2. * 1.5 * tc;
(* _Амплітуда теплового потоку в контакті *) qfriction = 1.7 * 106;
(* _Амплітуда тиску в контакті *) opressure = -1200.;
(* _Пружні поверхневі навантаження в точці x=b *)
sigmab[t_] := If[t - tc * IntegerPart[t / tc] ≤ tpress, opressure, 0.];
(* _Густина теплового потоку в точці x=b *)
strub[t_] := If[t - tc * IntegerPart[t / tc] ≤ tpress, qfriction, 0.];
(* ***===== **** *)
(* Початкові навантаження *)
(* термопружної плити *)
(* ***===== **** *)
(* _Початкове переміщення *) u0[x_] := 0.;
(* _Початкова швидкість *) v0[x_] := 0.;
(* _Початкова температура *) θ0[x_] := 0.;
(* ***===== **** *)
(* Параметри чисельного *)
(* обчислення *)
(* ***===== **** *)
(* _Кількість кінцевих елементів *) n = 1 * 224;
(* _Кількість кроків обчислення в часі *) nt = 4 T * pfali[a] * n / (b - a);
nt = IntegerPart[4 T * pfali[a] * n / (b - a)];
(* _Довжина кожного елемента *) h = (b - a) / n;
(* _Довжина часового кроку *) Δt = T / nt;
(* _Параметри RS обчислення в часі *) γ = 0.525; β = .525;

```



```

(*_Сітка вузлів обчислення *) xn = Table[a + h * i, {i, 0, n}];
Print["***** Характеристики чисельного обчислення ***** "];
Print["*** Кількість скінчених елементів n = ", n];
Print["*** Кількість кроків обчислення в часі nt = ", nt];
Print["*** Довжина скінченого елемента h = ", h];
Print["*** Довжина кроку обчислення в часі Δt = ", Δt];
Print["*** Час дослідження поведінки стержня T = ", T];
(* ***** *)
(* Відображення *)
(* початкових умов *)
(* ***** *)
(* ***** *)
(* Початкові розклади *)
(* переміщень, швидкості і температури *)
(* між вузлами сітки *)
(* ***** *)
(* Список початкових величин переміщення, швидкості і температури *)
qj = Table[u0[xn[[i]]], {i, 1, n + 1}];
spj = Table[v0[xn[[i]]], {i, 1, n + 1}];
tetj = Table[θ0[xn[[i]]], {i, 1, n + 1}];
q = Table[0., {i, 1, n + 1}];
velocity = Table[0., {i, 1, n + 1}];
temp = Table[0., {i, 1, n + 1}];
(* Впорядкування графіків *)
Tu0 = Table[{(xn[[i]] - a) / (b - a), qj[[i]]}, {i, 1, n + 1}];
Tv0 = Table[{(xn[[i]] - a) / (b - a), spj[[i]]}, {i, 1, n + 1}];
Ttem0 = Table[{(xn[[i]] - a) / (b - a), tetj[[i]]}, {i, 1, n + 1}];
rux = ListPlot[Tu0, PlotRange → All, PlotStyle → {RGBColor[1, 0, 0],
    Thickness[0.01]}, GridLines → Automatic, Frame → True,
    FrameLabel → {x, "uh(x, t0)"},
    RotateLabel → True, ImageSize → 210, DisplayFunction → Identity];
rvx = ListPlot[Tv0, PlotRange → All, PlotStyle → {RGBColor[0, 0, 1],
    Thickness[0.01]}, GridLines → Automatic, Frame → True,
    FrameLabel → {x, "ūh(x, t0)"}, RotateLabel → True, ImageSize → 210,
    DisplayFunction → Identity];
rtem = ListPlot[Ttem0, PlotRange → All, PlotStyle → {RGBColor[0, 1, 0],
    Thickness[0.01]}, GridLines → Automatic, Frame → True,
    FrameLabel → {x, "θh(x, t0)"}, RotateLabel → True, ImageSize → 210,
    DisplayFunction → Identity];
tabtemp = {};
titlet = {"n", "ūh(x, tn)", "θh(x, tn)", "qh(x, tn)"};
tabtemp = PrependTo[tabtemp, titlet];
tabelast = {};
tabelast = PrependTo[tabelast, title = {" n ", " ūh(x, tn) ", " ũh(x, tn) ",
    " uh(x, tn) ", " σh(x, tn) " }];
Print[" ***** "];
Print[" ***** "];
Print["Початковий розподіл швидкості ũh(x, t0), переміщення uh(x, t0)
і температури θh(x, t0)"];
Show[GraphicsGrid[{{rvx, rux}, {rtem}}], ImageSize → 210,
    TextStyle → {FontSize → 15}, PlotStyle → Thickness[0.01]]
Clear[Ttem0, Tu0, Tv0];
Print[" ***** "];
(* ***** *)
(* Визначення прорідженої матриці *)
(* системи рекурентних рівнянь *)

```

```

(* ***=====*** ***)
mMx = SparseArray[{{i_, i_} -> 0., {i_, j_} /;
  Abs[i - j] == 1 -> 0., {i_, j_} /; Abs[i - j] == 2 -> 0.,
  {i_, j_} /; Abs[i - j] == 3 -> 0.}, {2 (n + 1), 2 (n + 1)}];
(*_Матриця кінцевих елементів *)melem = Table[0., {i, 1, 4}, {j, 1, 4}];
(*_Вектор навантаження *)Lelem = Table[0., {i, 1, 4}];
Ss = SparseArray[{{i_, i_} -> 0., {i_, j_} /; Abs[i - j] == 1 -> 0.},
  {(n + 1), (n + 1)}];
(* ***=====*** ***)
(* Розрахунок матриці *)
(* системи рекурентних рівнянь *)
(* ***=====*** ***)
i = 1; g = Δt * γ; p =  $\frac{1}{2}$  * Δt2 * β;
Do[ $xs = \frac{xn[j + 1] + xn[j]}{2}$ ;
  M =  $\frac{h * \rho[xs]}{3}$   $\begin{pmatrix} 1. & 0.5 \\ 0.5 & 1. \end{pmatrix}$ ; S =  $\frac{h * c[xs]}{3}$   $\begin{pmatrix} 1. & 0.5 \\ 0.5 & 1. \end{pmatrix}$ ;
  Cel =  $\frac{c[xs]}{h}$   $\begin{pmatrix} 1. & -1. \\ -1. & 1. \end{pmatrix}$ ; B =  $\frac{c[xs] * arc[xs]}{2}$   $\begin{pmatrix} -1. & -1. \\ 1. & 1. \end{pmatrix}$ ;
  A =  $\frac{lepko[xs]}{h}$   $\begin{pmatrix} 1. & -1. \\ -1. & 1. \end{pmatrix}$ ; Λ =  $\frac{\lambda[xs]}{h}$   $\begin{pmatrix} 1. & -1. \\ -1. & 1. \end{pmatrix}$ ;
  melem[1, 1] = M[1, 1] + g * A[1, 1] + p * Cel[1, 1];
  melem[3, 1] = M[2, 1] + g * A[2, 1] + p * Cel[2, 1];
  melem[1, 3] = M[1, 2] + g * A[1, 2] + p * Cel[1, 2];
  melem[3, 3] = M[2, 2] + g * A[2, 2] + p * Cel[2, 2];
  melem[2, 2] = S[1, 1] + g * Λ[1, 1];
  melem[4, 4] = S[2, 2] + g * Λ[2, 2];
  melem[2, 4] = S[1, 2] + g * Λ[1, 2];
  melem[4, 2] = S[2, 1] + g * Λ[2, 1];
  melem[1, 2] = g * B[1, 1]; melem[1, 4] = g * B[1, 2];
  melem[3, 2] = g * B[2, 1]; melem[3, 4] = g * B[2, 2];
  melem[2, 1] = -g * B[1, 1]; melem[2, 3] = -g * B[2, 1];
  melem[4, 1] = -g * B[1, 2]; melem[4, 3] = -g * B[2, 2];
  Do[Do[mMx[i + k - 1, i + m - 1] += melem[k, m], {m, 1, 4}],
    {k, 1, 4}];
  i = i + 2, {j, 1, n}];
(*_Запис умови межі Держіле в матрицю рекурентних рівнянь *)
mMx[1, 1] += α; mMx[2, 2] += izola * α;
ut = Table[u0[xn[i]], {i, 1, n + 1}, {j, 1, nt + 1}];
vt = Table[v0[xn[i]], {i, 1, n + 1}, {j, 1, nt + 1}];
θt = Table[θ0[xn[i]], {i, 1, n + 1}, {j, 1, nt + 1}];
Ss = SparseArray[{{i_, i_} -> 0., {i_, j_} /; Abs[i - j] == 1 -> 0.},
  {(n + 1), (n + 1)}];
Fu = Table[0., {i, 1, n + 1}];
Fθ = Table[0., {i, 1, n + 1}];
Print[" ===== "];
Print[" Моніторинг характеристик термопружної плити "];
Print[" під час рекурсивного обчислення "];
Print[" ===== "];
(* ***=====*** ***)
(* Рекурсивні схеми *)
(* Розрахнку в часі *)
(* ***=====*** ***)
t = 0.; num = 0;
Do[t += Δt / 2.;

```

```

(*_Розрахунок вільних виразів системи рекурентних рівнянь
на j-му кроці розрахунку в часі *)
i = 1; W = Table[0., {m, 1, 2 * (n + 1)}];
Do[ $x_n = \frac{x_{n+1} + x_n}{2}$ ;

R =  $\begin{pmatrix} spj[j] \\ qj[j] \\ tetj[j] \\ spj[j+1] \\ qj[j+1] \\ tetj[j+1] \end{pmatrix}$ ;

M =  $\frac{h * \rho[xs]}{3.} \begin{pmatrix} 1. & 0.5 \\ 0.5 & 1. \end{pmatrix}$ ; S =  $\frac{h * ce[xs]}{3.} \begin{pmatrix} 1. & 0.5 \\ 0.5 & 1. \end{pmatrix}$ ;
Cel =  $\frac{c[xs]}{h} \begin{pmatrix} 1. & -1. \\ -1. & 1. \end{pmatrix}$ ; B =  $\frac{c[xs] * arc[xs]}{2.} \begin{pmatrix} -1. & -1. \\ 1. & 1. \end{pmatrix}$ ;
A =  $\frac{lepko[xs]}{h} \begin{pmatrix} 1. & -1. \\ -1. & 1. \end{pmatrix}$ ;  $\Lambda = \frac{\lambda[xs]}{h} \begin{pmatrix} 1. & -1. \\ -1. & 1. \end{pmatrix}$ ;
Z = A +  $\Delta t * \gamma * Cel$ ;
Ls =  $\frac{h * f[xs, t]}{2.} \begin{pmatrix} 1. \\ 1. \end{pmatrix}$ ; Lc =  $\frac{h * Q[xs, t]}{2.} \begin{pmatrix} 1. \\ 1. \end{pmatrix}$ ;
Lelem[[1]] = Ls[[1]]; Lelem[[2]] = Lc[[1]];
Lelem[[3]] = Ls[[2]]; Lelem[[4]] = Lc[[2]];

W3 =  $\begin{pmatrix} Z[[1, 1]] & Cel[[1, 1]] & B[[1, 1]] & Z[[1, 2]] & Cel[[1, 2]] & B[[1, 2]] \\ -B[[1, 1]] & 0 & \Lambda[[1, 1]] & -B[[2, 1]] & 0 & \Lambda[[1, 2]] \\ Z[[2, 1]] & Cel[[2, 1]] & B[[2, 1]] & Z[[2, 2]] & Cel[[2, 2]] & B[[2, 2]] \\ -B[[1, 2]] & 0 & \Lambda[[2, 1]] & -B[[2, 2]] & 0 & \Lambda[[2, 2]] \end{pmatrix}$ ;

Lj = Lelem - W3.R;
Do[
W[[i + k - 1]] += Lj[[k]], {k, 1, 4}];
i = i + 2, {j, 1, n}];

(*_Запис граничних умов у вектор навантаження системи рекурентних рівнянь *)
W[[1]] +=  $\alpha * ua$ ; W[[2]] +=  $\alpha * \theta a$ ; W[[2 * n + 1]] +=  $sigmab[t] + \alpha b * ub$ ; W[[2 * n + 2]] +=  $strub[t] + \alpha cb * \theta b$ ;
(* ***** *)
(* Розв'язування системи дискретних рівнянь *)
(* термоеластодинаміки (ТЕД) *)
(* ***** *)
Y = LinearSolve[mMx, W] // Flatten;
accel = Table[Y[[2 * (j - 1) + 1]], {j, 1, n + 1}]; pzt = Table[Y[[2 * j]], {j, 1, n + 1}];
q = qj +  $\Delta t * spj + 0.5 * \Delta t^2 * accel$ ; velocity = spj +  $\Delta t * accel$ ; temp = tetj +  $\Delta t * pzt$ ;
Do[ut[[i, krok + 1]] = q[[i]]; vt[[i, krok + 1]] = velocity[[i]];
 $\theta t[[i, krok + 1]] = temp[[i]]$ , {i, 1, n + 1}];
If[num <= 400, num += 1,
{(*Print[" === ***** ===", " ", "krok", " ", "Час tj+1 = ", t + 0.5 *  $\Delta t$ ,
" ***** === "];*)
Tu = Table[{ $\frac{x_n[[i]]}{b - a}$ ,  $10^5 * q[[i]]$ }, {i, 1, n + 1}]; Tv = Table[{ $\frac{x_n[[i]]}{b - a}$ , velocity[[i]]}, {i, 1, n + 1}];
Tw = Table[{ $\frac{x_n[[i]]}{b - a}$ ,  $10^{-5} * accel[[i]]$ }, {i, 1, n + 1}];
Ttem = Table[{ $\frac{x_n[[i]]}{b - a}$ , temp[[i]]}, {i, 1, n + 1}];
Ttemprim = Table[{ $\frac{x_n[[i]]}{b - a}$ , pzt[[i]]}, {i, 1, n + 1}];
(*_Переміщення *)
uh[x_, i_] := q[[i]] *  $\frac{x_n[[i + 1]] - x}{h}$  + q[[i + 1]] *  $\frac{x - x_n[[i]]}{h}$ ;
(*_Швидкість *)

```

```

Oh[x_, i_] := temp[[i]] *  $\frac{xn[[i+1]] - x}{h}$  + temp[[i+1]] *  $\frac{x - xn[[i]]}{h}$ ;
(* _Напруженність *)
oh[x_, i_] := c[x] * (Dx uh[x, i] - arc[x] * Oh[x, i]) + lepko[x] * Dx vh[x, i];
(* _Тепловий потік *)
qh[x_, i_] := -λ[x] * Dx Oh[x, i];
(* ***** *)
(* Розрахунок розподілу пружних напружень *)
(* i розкладу теплового потоку *)
(* ***** *)
Tsigm = Table[{0., 0.}, {i, 1, n}]; Tstrumciepla = Table[{0., 0.}, {i, 1, n}];
Do[x = xn[[i]] + h/2.;
  Tsigm[[i]] = {x/(b-a), c[x] * ((q[[i+1]] - q[[i]])/h - arc[x] * Oh[x, i])};
  Tstrumciepla[[i]] = {x/(b-a), -λ[x] * (temp[[i+1]] - temp[[i])/h}, {i, 1, n}];
(* ***** *)
(* Впорядкування діаграм розподілів характеристик *)
(* апроксимації МКЕ *)
(* ***** *)
przyspiesz = ListLinePlot[Tw, PlotRange → All, PlotStyle → {RGBColor[0.9, 0, 0.1], Thickness[0.01]},
  GridLines → Automatic, Frame → True, FrameLabel → {"x/(b-a)", "10-5*üh(x, tj+1/2)"}, ImageSize → 210];
przemieszcz = ListLinePlot[Tu, PlotRange → All, PlotStyle → {RGBColor[0, 0.5, 0.5], Thickness[0.01]},
  GridLines → Automatic, Frame → True, FrameLabel → {"x/(b-a)", "105*uh(x, tj+1/2)"}, ImageSize → 210];
prendko = ListLinePlot[Tv, PlotRange → All, PlotStyle → {RGBColor[0, 0.2, 0.8], Thickness[0.01]},
  GridLines → Automatic, Frame → True, FrameLabel → {"x/(b-a)", "üh(x, tj+1/2)"}, ImageSize → 210];
Print[
  "*****
  ***** "];
Print["***** n = ", krok, " t=tj+1 = ",
  t + 0.5 * Δt, " ***** "];
Print[
  "*****
  ***** "];
Print["***** t=tj+1 = ", t + 0.5 * Δt, " ", przyspiesz, " ", prendko, " ", przemieszcz];
Print["Графіки швидкості зміни температури üh(x, tj+1/2), та температури Oh(x, tj+1/2)"];
temperatura = ListLinePlot[Ttem, PlotRange → All, PlotStyle → {RGBColor[0.5, 0.5, 0], Thickness[0.01]},
  GridLines → Automatic, Frame → True, FrameLabel → {"x/(b-a)", "Oh(x, tj+1)"}, ImageSize → 210];
ryswarp = ListLinePlot[Ttemprim, PlotJoined → True, PlotRange → All,
  PlotStyle → {RGBColor[0, 0.2, 0.8], Thickness[0.01]}, GridLines → Automatic, Frame → True,
  FrameLabel → {"x/(b-a)", "üh(x, tj+1/2)"}, ImageSize → 210];
Print["***** t=tj+1 = ", t + 0.5 * Δt, " ", ryswarp, " ", temperatura];
Print["Графіки напружень σh(x, tj+1), та розклад теплового потоку qh(x, tj+1)"];
Rysigm = ListLinePlot[Tsigm, PlotRange → All, PlotStyle → {RGBColor[0.7, 0.1, 0.1], Thickness[0.01]},
  GridLines → Automatic, Frame → True, FrameLabel → {"x/(b-a)", "σh(x, tj+1)"}, RotateLabel → True,
  ImageSize → 210];
Rciep = ListLinePlot[Tstrumciepla, PlotRange → All, PlotStyle → {RGBColor[0.1, 0.1, 0.1], Thickness[0.01]},
  GridLines → Automatic, Frame → True, FrameLabel → {"x/(b-a)", "qh(x, tj+1)"}, RotateLabel → True,
  ImageSize → 210];
Print["*****", " n = ", krok, " t=tj+1 = ", t + 0.5 * Δt, " Rysigm, Rciep];
num = 0;
tabelast = AppendTo[tabelast, {krok, przyspiesz, prendko, przemieszcz, Rysigm}];
tabtemp = AppendTo[tabtemp, {krok, ryswarp, temperatura, Rciep}]];
t = t + 0.5 * Δt; qj = q; spj = velocity; tetj = temp,
{krok, 1, nt}];

Print["@@@@@@@@@@@@@@@@ Temperature Field Characteristics Monitoring @@@@
tabtemp = AppendTo[tabtemp, titlet];
Print[Grid[tabtemp, Frame → All]];
Print[
  "@@@@@@@@@@@@@@@@ Elasticity Field Characteristics Monitoring
  @@@@@@@@@@@@@@@@@@"];
tabelast = AppendTo[tabelast, title];
Print[Grid[tabelast, Frame → All]];

```

```

Dysypacja = Table[0., {k, 1, nt + 1}]; EnergiaPotencjalna = Table[0., {k, 1, nt + 1}];
EnergiaKinetyczna = Table[0., {k, 1, nt + 1}]; EnergiaCiepna = Table[0., {k, 1, nt + 1}];
EnergiaCałkowita = Table[0., {k, 1, nt + 1}]; EnergiaMechaniczna = Table[0., {k, 1, nt + 1}];
Transformer = Table[0., {k, 1, nt + 1}];
Do[ec = ep = ek = tr = dys = 0.;
  For[m = 1, m ≤ n, m++, x = xn[[m]] + h / 2.;
    ux = (ut[[m + 1, k]] - ut[[m, k]]) / h;
    vx = (vt[[m + 1, k]] - vt[[m, k]]) / h;
    tx = (θt[[m + 1, k]] - θt[[m, k]]) / h;
    dys += lepko[x] * vx2 + λ[x] * tx2;
    ep += c[x] * ux2;
    ek += ρ[x] * (vt[[m, k]]2 + vt[[m + 1, k]] * vt[[m, k]] + vt[[m + 1, k]]2);
    ec += ce[x] * (θt[[m, k]]2 + θt[[m + 1, k]] * θt[[m, k]] + θt[[m + 1, k]]2);
    tr += c[x] * arc[x] * h * vx * (θt[[m + 1, k]] + θt[[m, k]]) / 2.
  ];
Dysypacja[[k]] = dys * h / 2.;
EnergiaPotencjalna[[k]] = h * ep / 2.;
EnergiaKinetyczna[[k]] = h * ek / 6.;
EnergiaMechaniczna[[k]] = EnergiaPotencjalna[[k]] + EnergiaKinetyczna[[k]];
EnergiaCiepna[[k]] = h * ec / 6.;
EnergiaCałkowita[[k]] = EnergiaPotencjalna[[k]] + EnergiaKinetyczna[[k]] + EnergiaCiepna[[k]];
Transformer[[k]] = tr, {k, 1, nt + 1}];
(* ***** *)
(*      Впорядкування графіків      *)
(*  енергетичних характеристик  *)
(* ***** *)
(* ***** *)
Print[" ПОВЕДІНКА ЕНЕРГІЇ ПОТЕНЦІАЛЬНОЇ P(t) І ЕНЕРГІЇ КІНЕТИЧНОЇ K(t)  "];
EnergiaPotencjalna = EnergiaPotencjalna * 10-5;
wepot = ListLinePlot[EnergiaPotencjalna, Background → Lighter[Yellow, 0.6803],
  Frame → True, FrameStyle → Directive[Black, 12], GridLines → Automatic,
  FrameLabel → {"time step", " Ph(t) * 10-5"}, ImageSize → 280, PlotRange → All];
EnergiaKinetyczna = EnergiaKinetyczna;
wekin = ListLinePlot[EnergiaKinetyczna, Background → Lighter[Yellow, 0.6803],
  Frame → True, FrameStyle → Directive[Black, 12], GridLines → Automatic,
  FrameLabel → {"time step", " Kh(t)"}, ImageSize → 280, PlotRange → All];
Print[wepot, "      ", wekin];
(* ***** *)
Print[" ЗМІНИ ШВИДКОСТІ НАВАНТАЖЕНОГО КРАЮ І ЕНЕРГІЇ НАВАНТАЖЕННЯ  "];
(* ***** *)
speed = Table[vt[[n + 1, k]], {k, 1, nt + 1}];
Do[speed[[k + 1]] = (vt[[n + 1, k + 1]] + vt[[n + 1, k]]) / 2., {k, 1, nt}];
speed = 1. * speed;
wsspee = ListLinePlot[speed, Background → Lighter[Yellow, 0.06803],
  Frame → True, FrameStyle → Directive[Black, 12],
  PlotLabel → StyleForm["Moving Boundary Velocity", FontSize → 10], GridLines → Automatic,
  FrameLabel → {"time step", " vh(b, t)"}, ImageSize → 280, PlotRange → All];
energySpeed = Table[0., {k, 1, nt + 1}]; dt = Δt / 2.;
Do[energySpeed[[k + 1]] = energySpeed[[k]] + dt * (vt[[n + 1, k + 1]] + vt[[n + 1, k]]) * sigmab[k * Δt + dt] +
  dt * (θt[[n + 1, k + 1]] + θt[[n + 1, k]]) * strub[k * Δt + dt], {k, 1, nt}];
energySpeed = 10-5 * energySpeed;
wbrzeg = ListLinePlot[energySpeed, Background → Lighter[Yellow, 0.068],
  Frame → True, FrameStyle → Directive[Black, 12],
  PlotLabel → StyleForm["Boundary Pressure Energy", FontSize → 10],

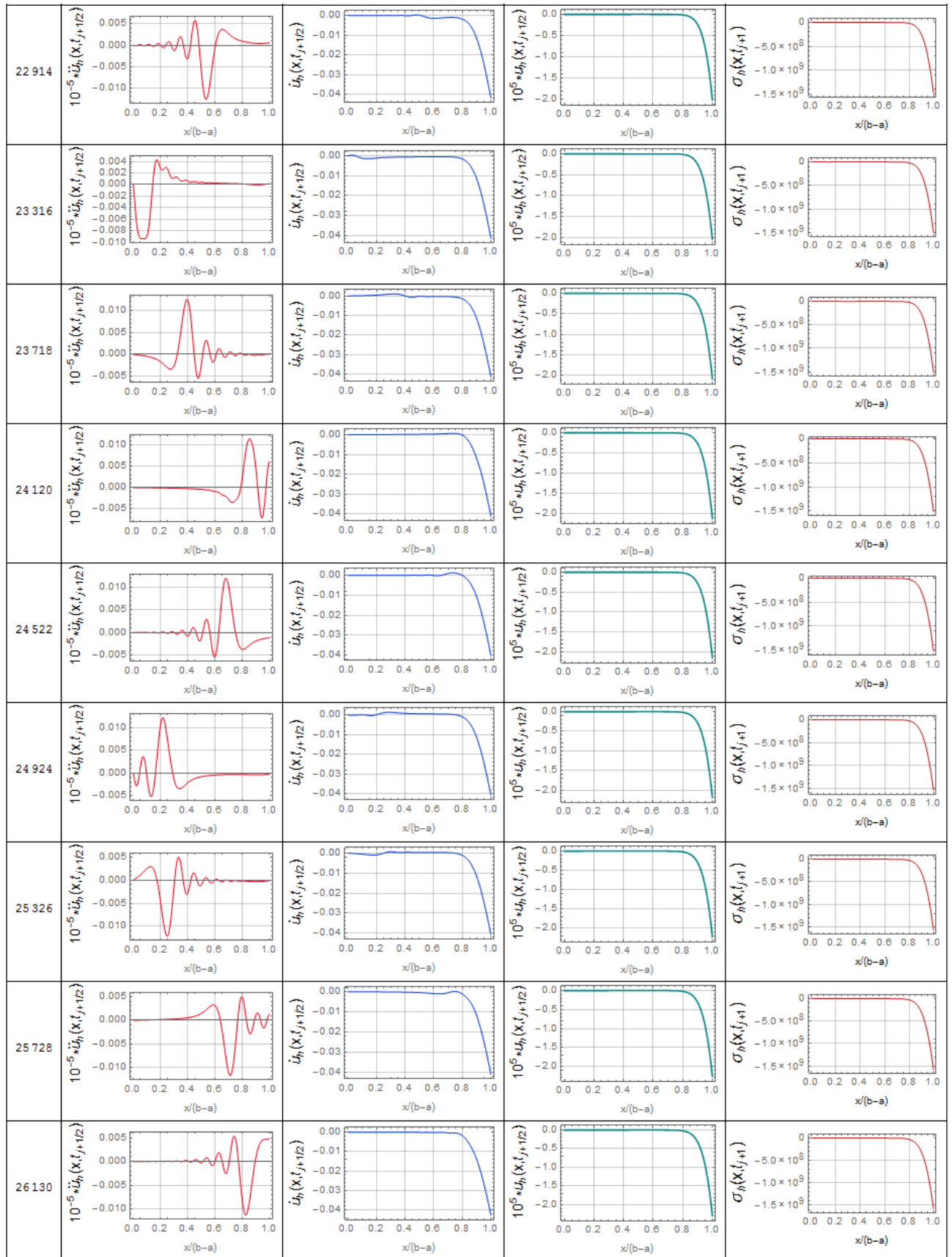
```

```

GridLines → Automatic, FrameLabel → {"time step", "  $10^{-5} \bar{\theta}_h(t) = 10^{-5} \int_0^t [\bar{\sigma}_{vh}(b) + \bar{q}\theta(b)] d\tau$ "},
ImageSize → 280, PlotRange → All];
Print[wsspee, "      ", wbrzeg];
(* *****)
Print[" Зміни часу розсіювання енергії і теплової енергії "];
(* *****)
Dysypacja = Dysypacja * 10-10;
wdysyp = ListLinePlot[Dysypacja, Background → Lighter[Green, 0.69],
Frame → True, FrameStyle → Directive[Black, 12],
GridLines → Automatic, FrameLabel → {"time step", " $D_h(t) * 10^{-10}$ "},
ImageSize → 280, PlotRange → All];
EnergiaCieplna = EnergiaCieplna * 10-5;
weciepl = ListLinePlot[EnergiaCieplna, Background → Lighter[Green, 0.69],
Frame → True, FrameStyle → Directive[Black, 12],
GridLines → Automatic, FrameLabel → {"time step", " $\bar{\theta}_h(t) * 10^{-5}$ "},
ImageSize → 280, PlotRange → All];
Print[w dysyp, "      ", weciepl];
(* *****)
Print[" Втрати енергії і кількість її перетворення з механічної на теплоту і назад "];
(* *****)
Straty = Table[0., {k, 1, nt + 1}]; dt = Δt / 2.;
Do[Straty[[k + 1]] = Straty[[k]] + dt * (Dysypacja[[k + 1]] + Dysypacja[[k]]), {k, 1, nt}];
wstr = ListLinePlot[105 * Straty, Background → Lighter[Yellow, 0.69],
Frame → True, FrameStyle → Directive[Black, 12], GridLines → Automatic,
FrameLabel → {"time step", " $10^5 S_h(t) = 10^5 \int_0^t D_h(\tau) d\tau$ "}, ImageSize → 280, PlotRange → All];
Transformer = Transformer * 10-10;
wtrans = ListLinePlot[Transformer, Background → Lighter[Yellow, 0.69],
Frame → True, FrameStyle → Directive[Black, 12], GridLines → Automatic,
FrameLabel → {"time step", "  $b(\theta_h(t), \dot{u}_h(t)) * 10^{-10}$ "}, ImageSize → 280, PlotRange → All];
Print[wstr, "      ", wtrans];
(* *****)
Print[" Поведінка температури і переміщення на поверхні контакту "];
Kontakt = Table[0., {k, 1, nt + 1}]; Displasment = Table[0., {k, 1, nt + 1}];
Do[Kontakt[[k]] = θt[[n + 1, k]]; Displasment[[k]] = 105 * ut[[n + 1, k]], {k, 1, nt + 1}];
wodset = ListLinePlot[Kontakt, Background → Lighter[Yellow, 0.0701],
Frame → True, FrameStyle → Directive[Brown, 12], GridLines → Automatic,
FrameLabel → {"time step", "  $\theta_h(b, t)$ "}, ImageSize → 280];
woddis = ListLinePlot[Displasment, Background → Lighter[Yellow, 0.701],
Frame → True, FrameStyle → Directive[Brown, 12], GridLines → Automatic,
FrameLabel → {"time step", "  $u_h(b, t) * 10^5$ "}, ImageSize → 280];
Print[wodset, "      ", woddis];
Print[" *****)"];
Print[" Моделювання процесу навантаження триває  $N_{press} = \tau_{press} / \Delta t =$  ",  $\tau_{press} / \Delta t$ , " kroków"];
Print[" Моделювання процесу без навантаження триває  $N_{pauz} = \tau_{pauz} / \Delta t =$  ",  $\tau_{pauz} / \Delta t$ , " kroków"];
Print[" На моделювання проходження глибини плити (promienia dysku) затрачаємо  $N_0 = T_0 / \Delta t =$  ",  $T_0 / \Delta t$ ,
Print[" *****)"];

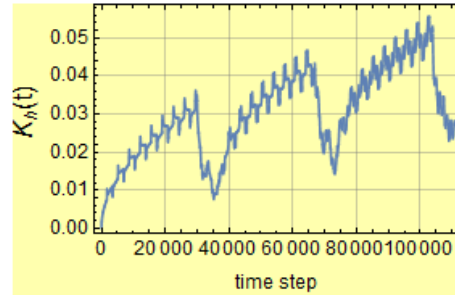
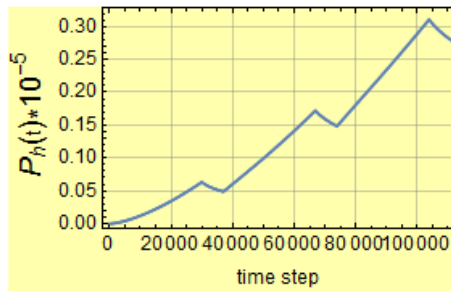
```

## Зведена таблиця по-крокового розрахунку

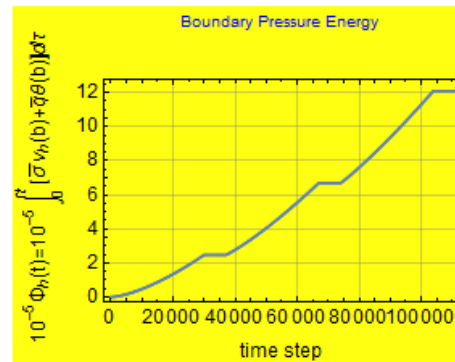
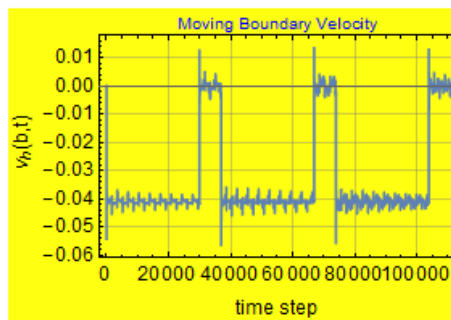


На основі крокових даних побудовані графіки досліджуваних параметрів

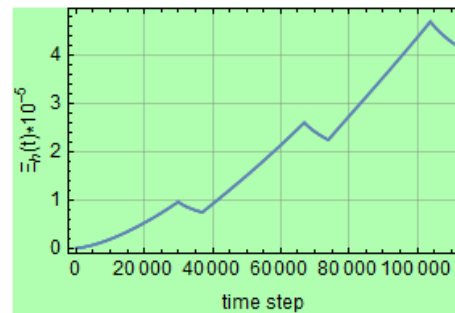
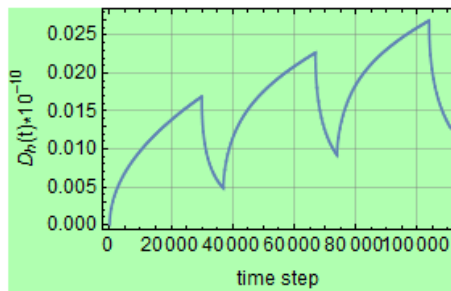
Поведінка енергії потенціальної  $P(t)$  і енергії кінетичної  $K(t)$



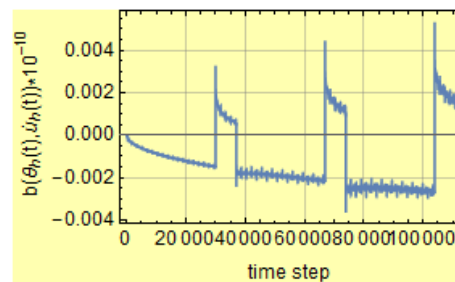
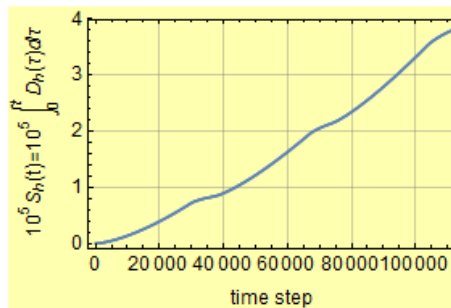
Зміни швидкості навантаженого краю і енергії навантаження



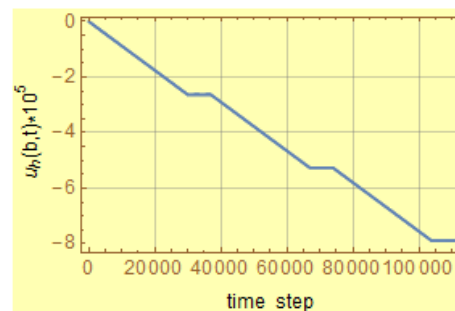
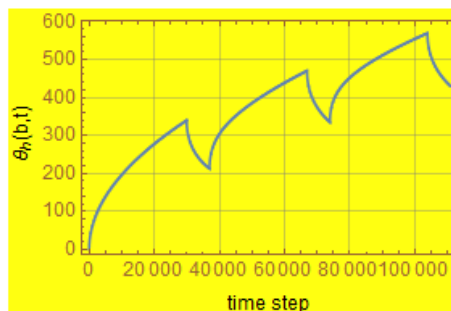
Зміни часу розсіювання енергії і теплової енергії



Втрати енергії і кількість її перетворення з механічної на теплоту і назад



Поведінка температури і переміщення на поверхні контакту





### Додаток Л

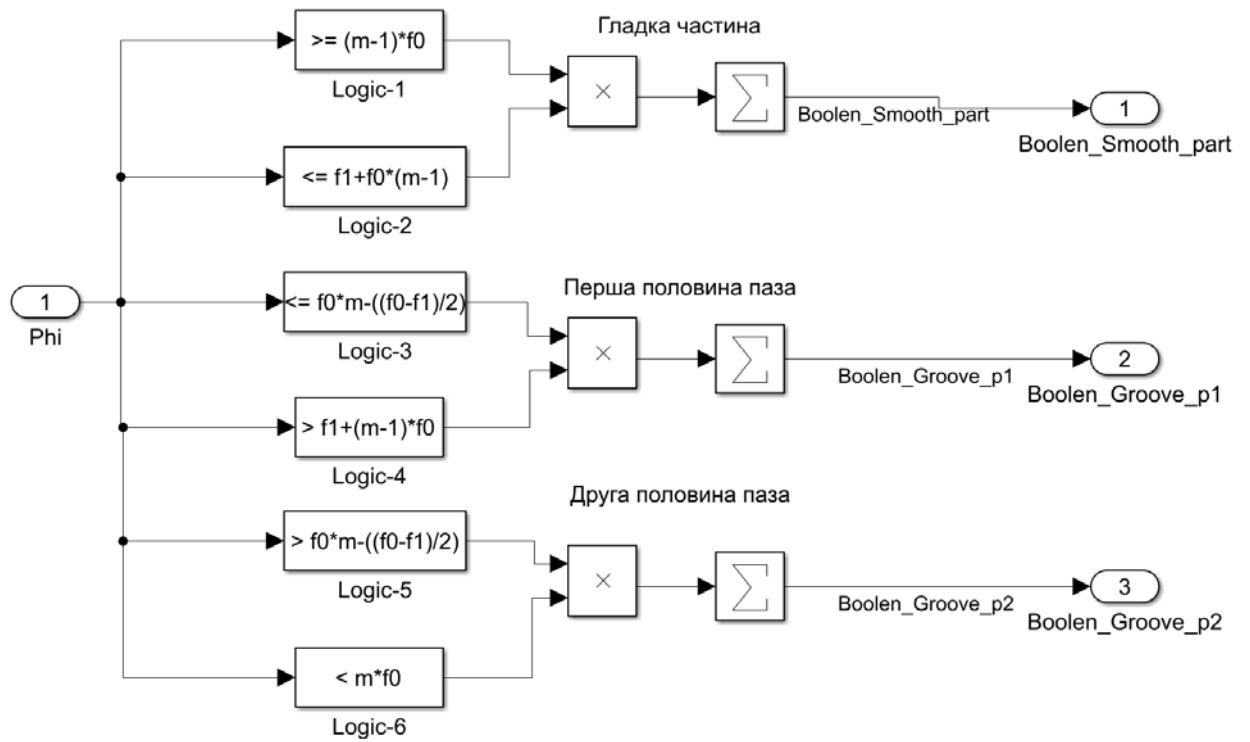


Рис. Л.1 – Блок-схема визначення геометрії інструмента

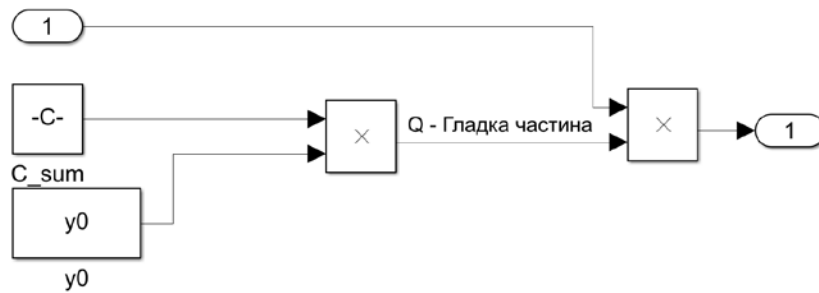


Рис. Л.2 – Блок-схема визначення гладкої частини

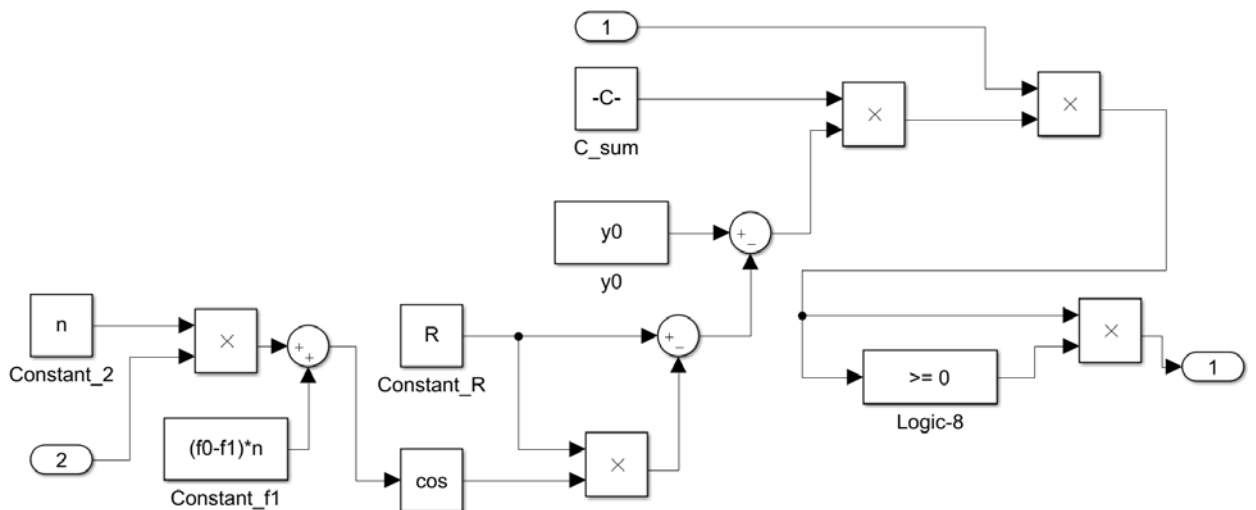


Рис. Л.3 – Блок-схема визначення першої частини паза

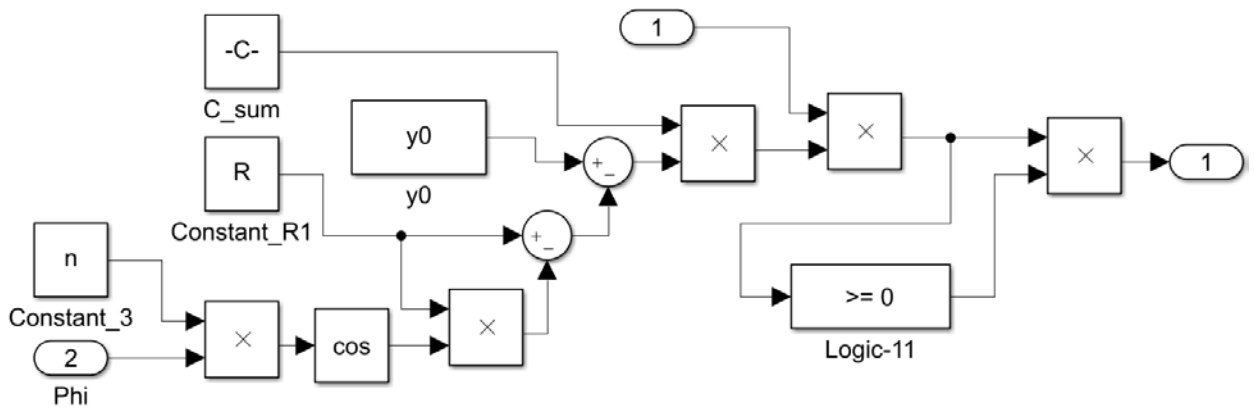


Рис. Л.4 – Блок-схема визначення другої частини паза

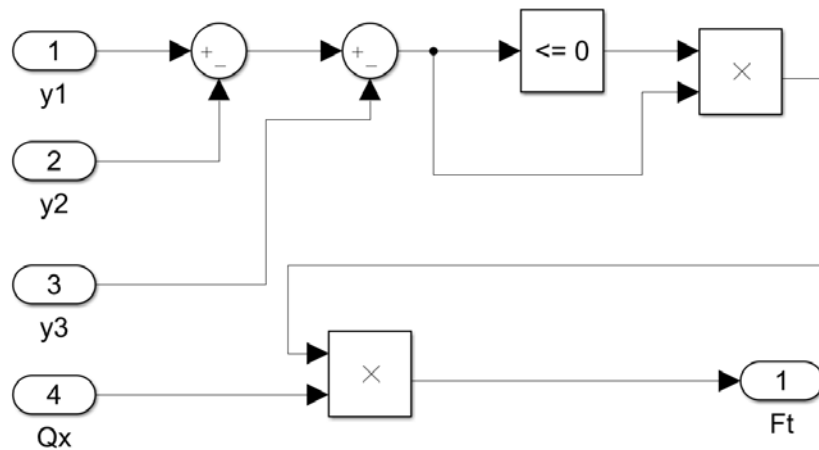


Рис. Л.5 – Блок-схема визначення сили тертя

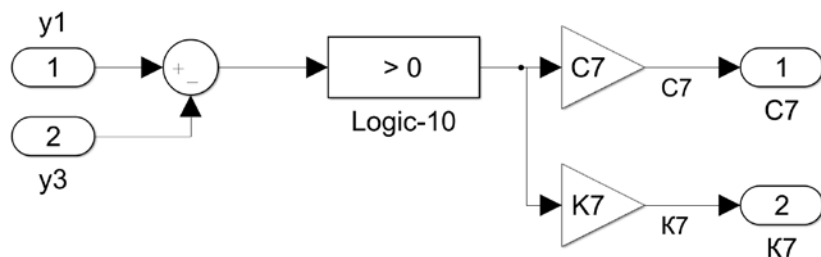
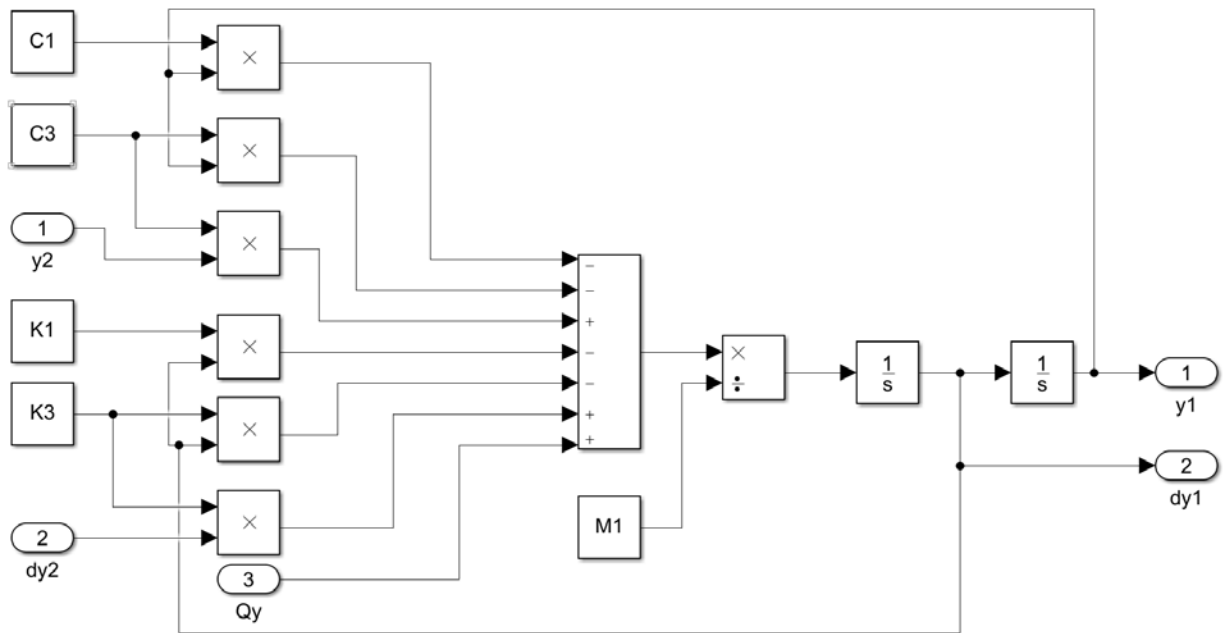
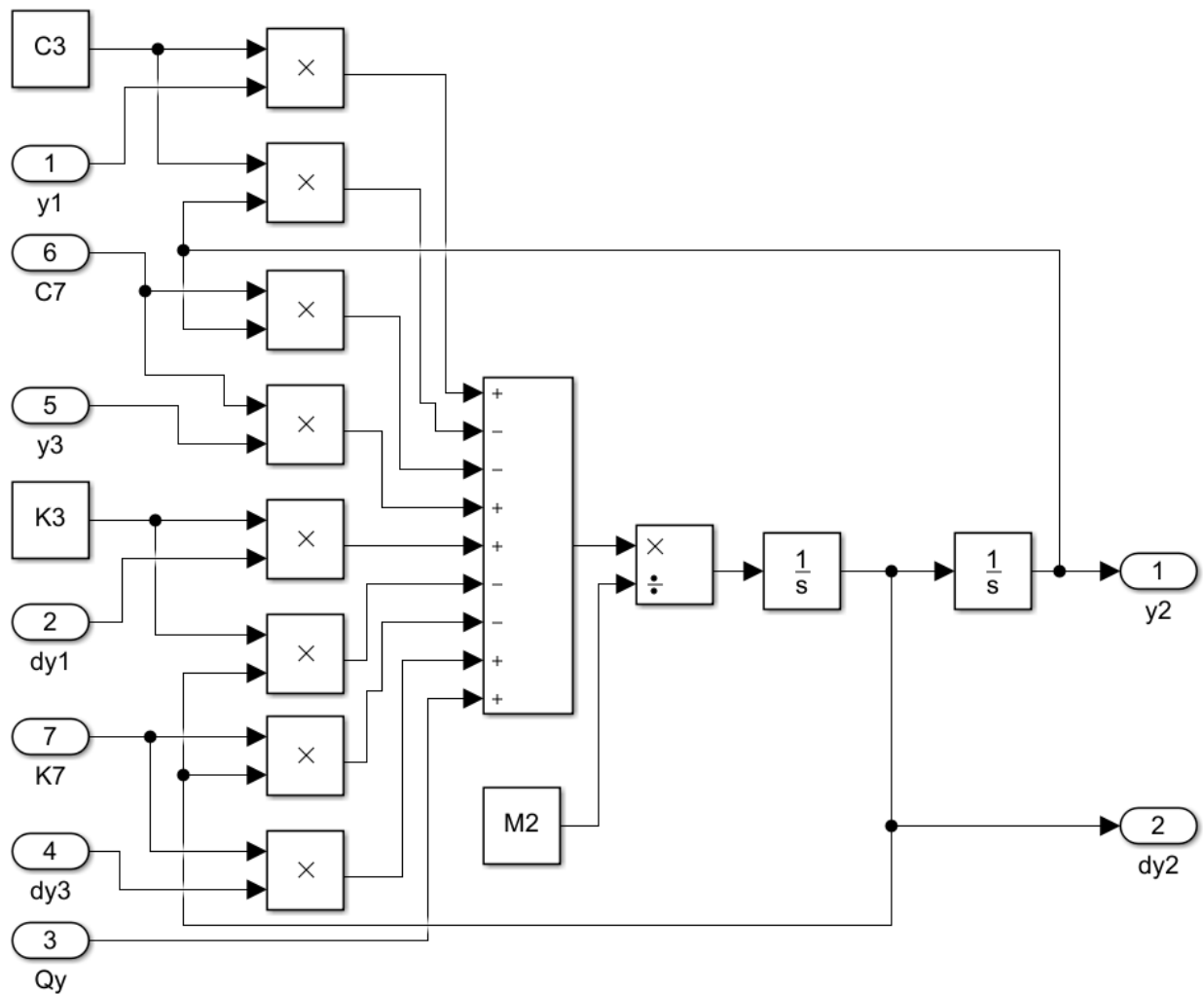
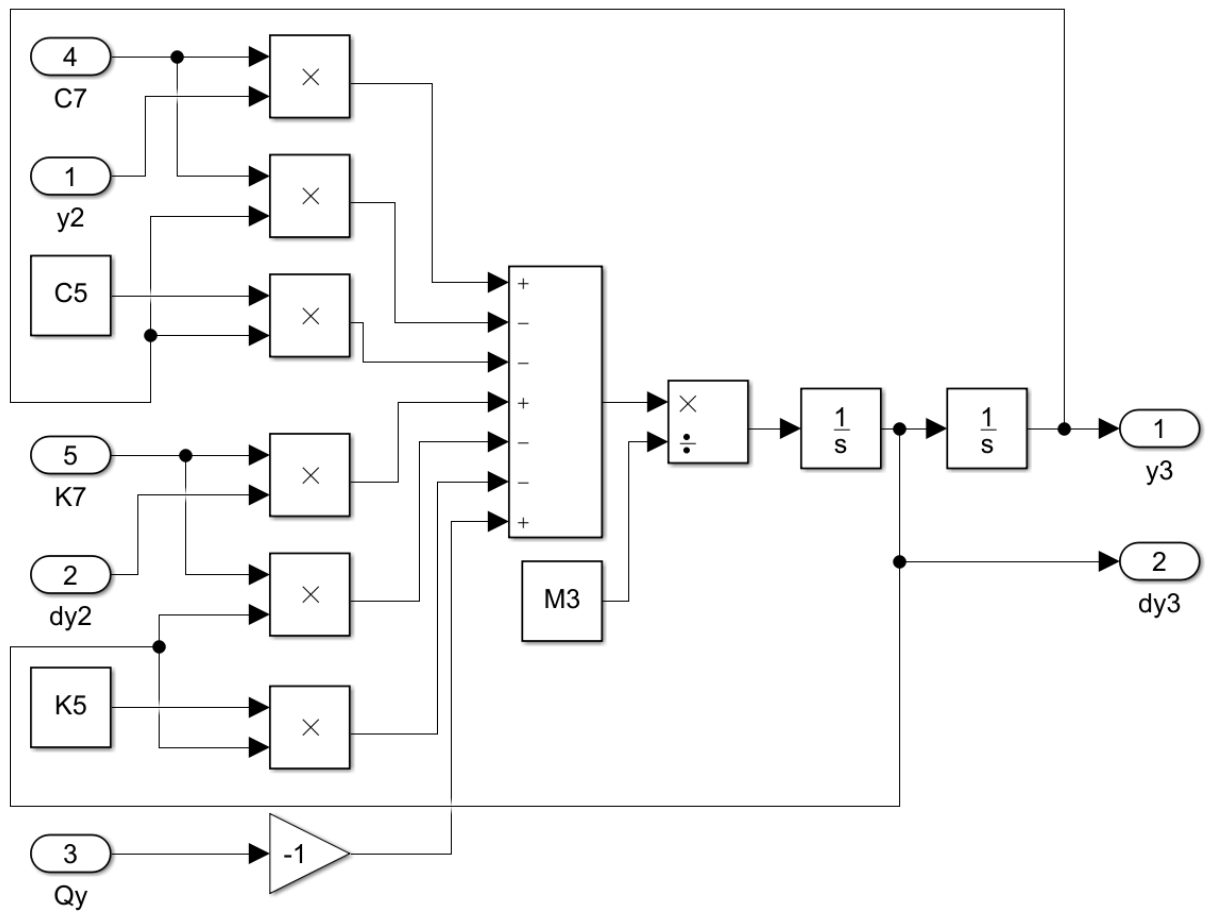
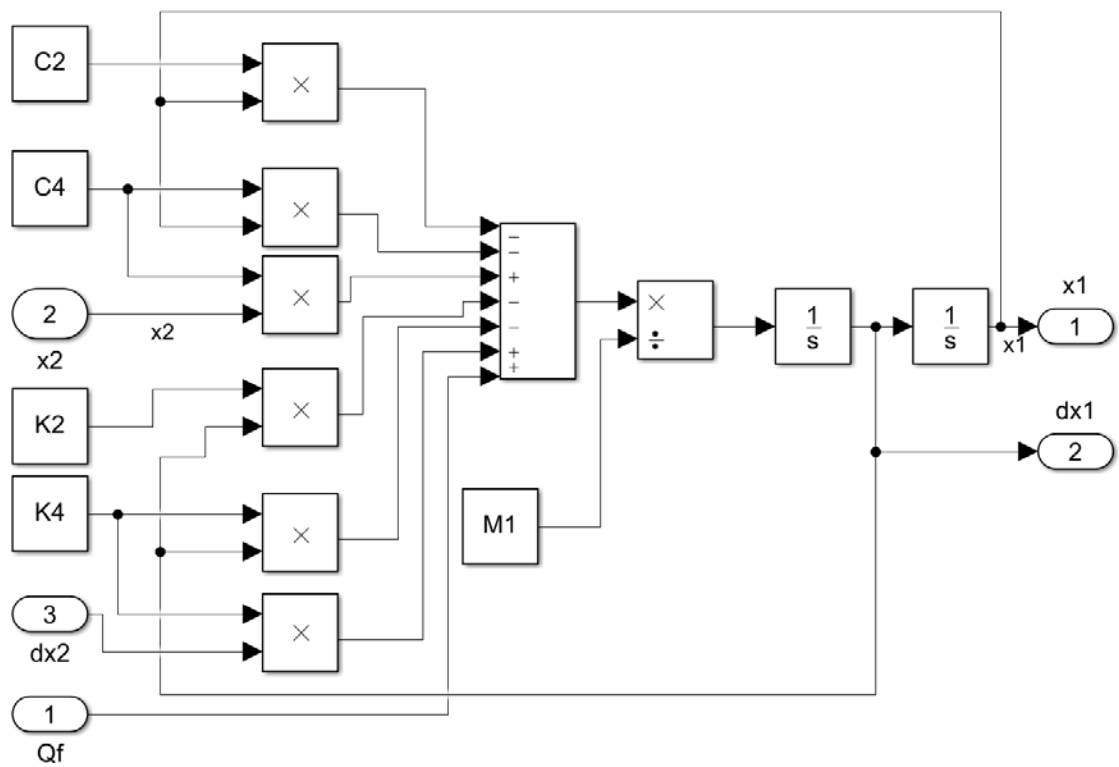
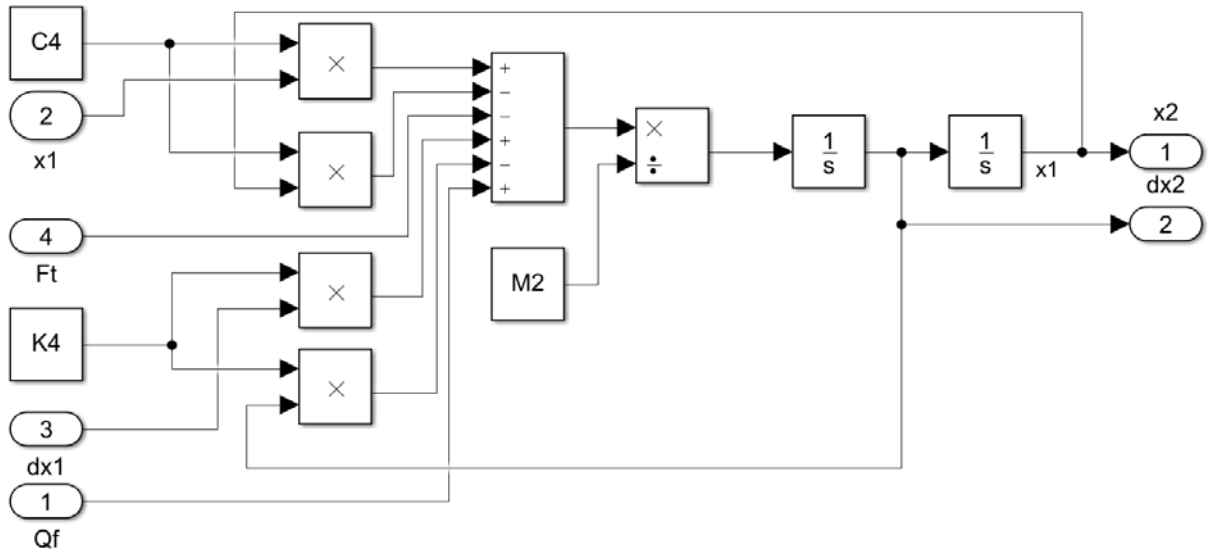
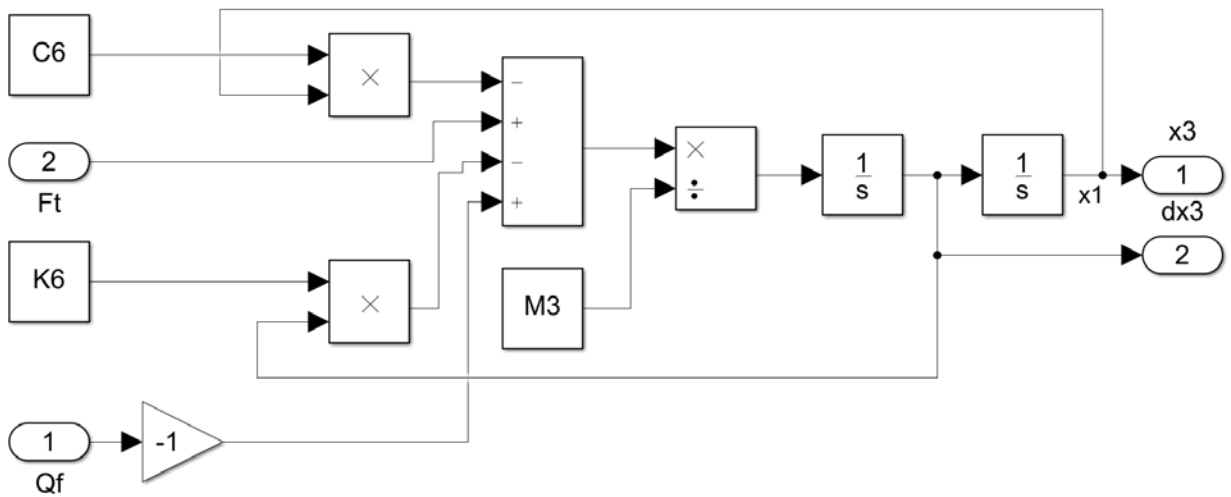


Рис. Л.6 – Блок-схема визначення контактної жорсткості та демпфування

Рис. Л.7 – Блок-схема визначення переміщення  $y_1$ Рис. Л.8 – Блок-схема визначення переміщення  $y_2$

Рис. Л.9 – Блок-схема визначення переміщення  $u_3$ Рис. Л.10 – Блок-схема визначення переміщення  $x_1$

Рис. Л.11 – Блок-схема визначення переміщення  $x_2$ Рис. Л.12 – Блок-схема визначення переміщення  $x_3$

## Додаток М

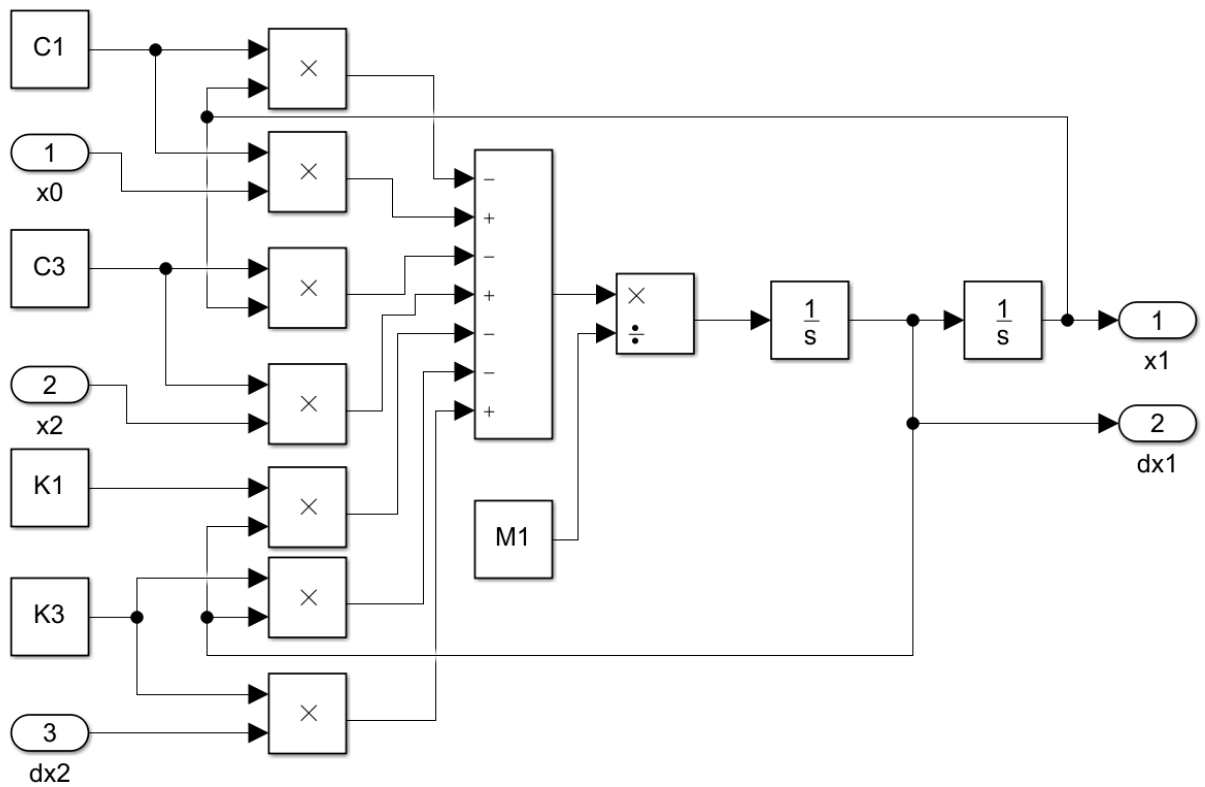
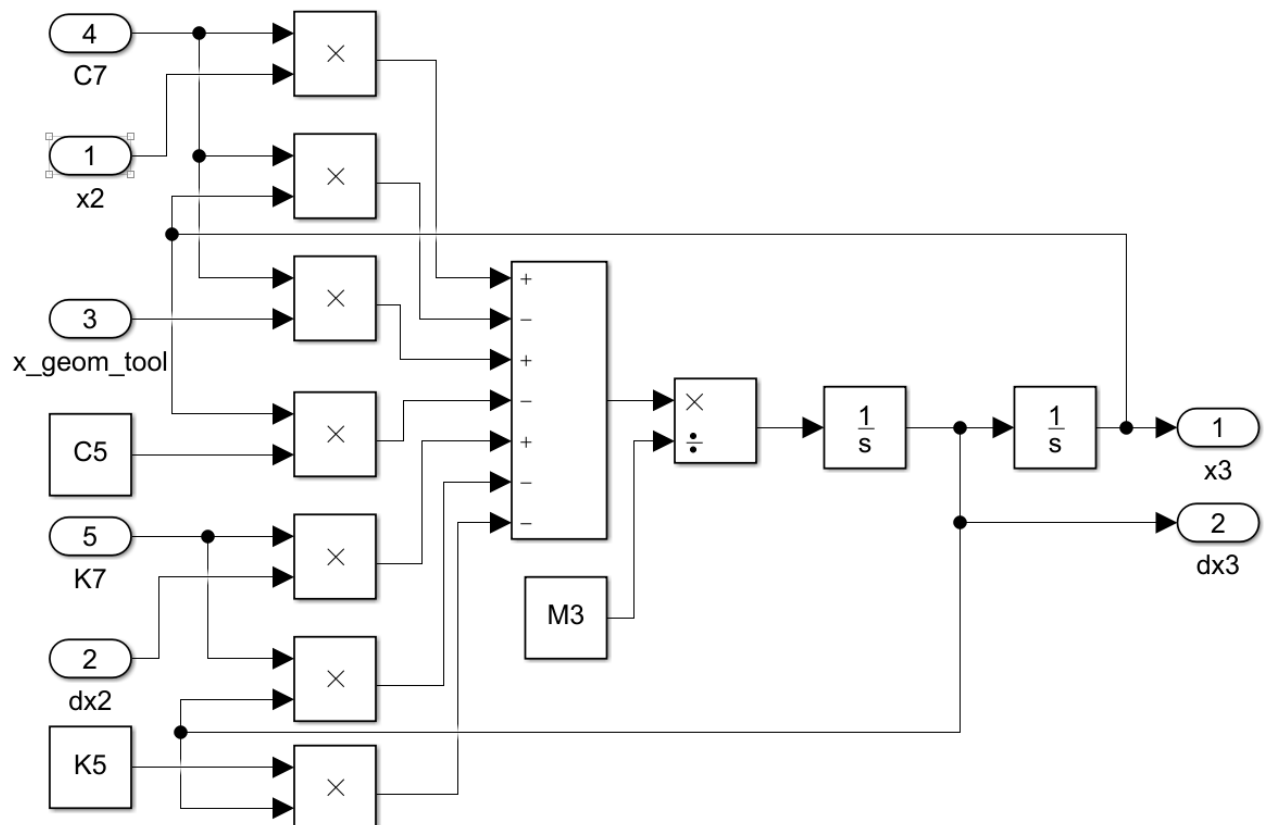
Рис. М.1 – Блок-схема визначення переміщення  $x_1$ 

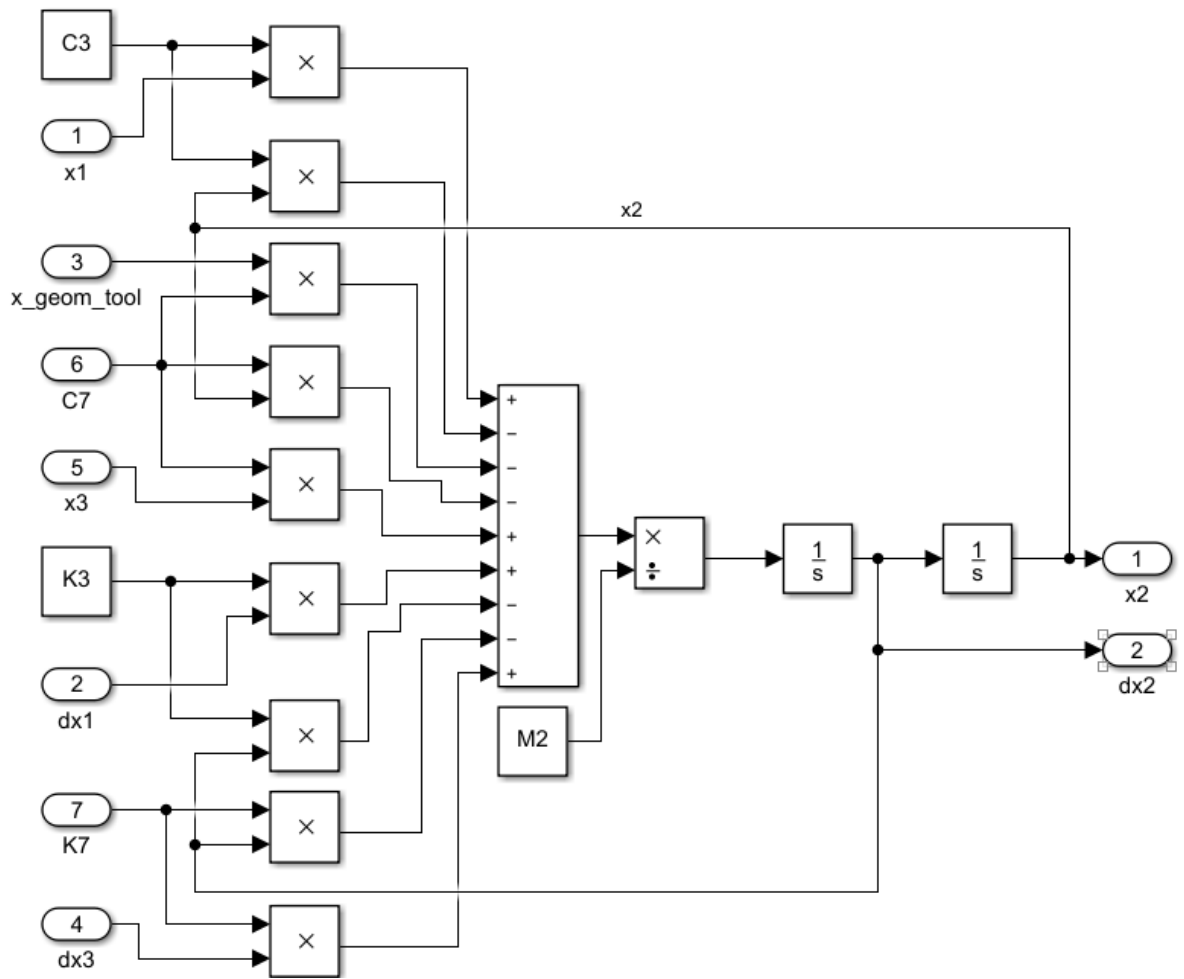
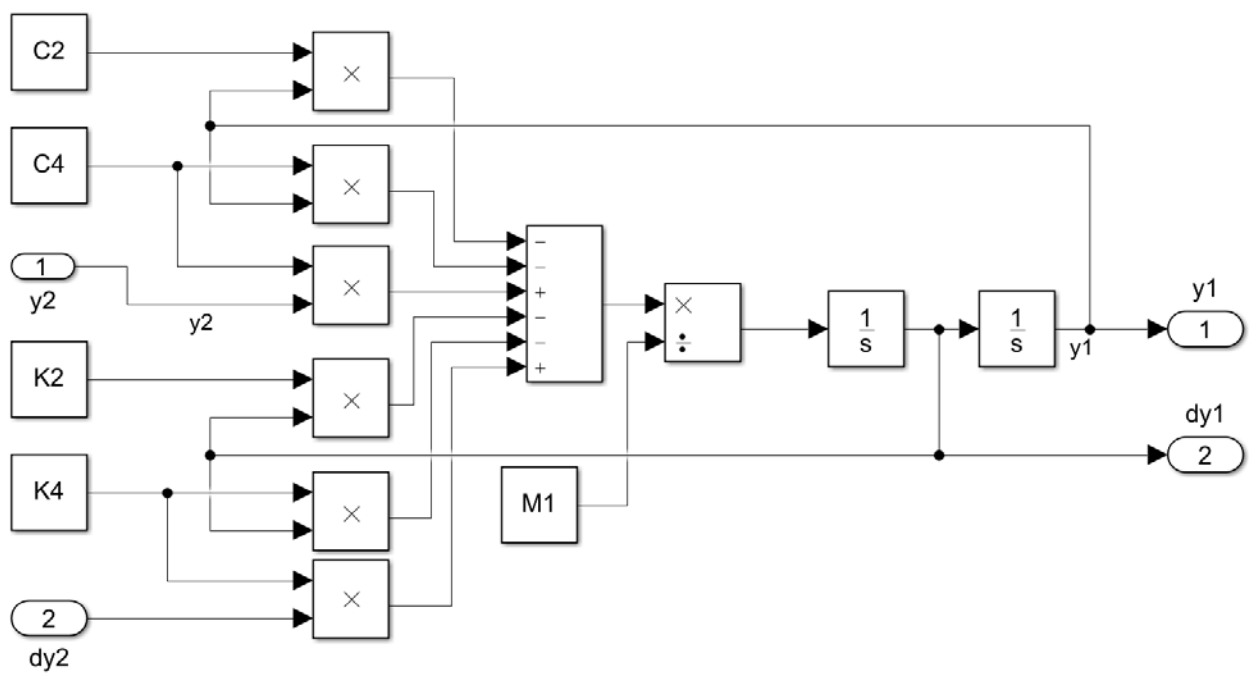
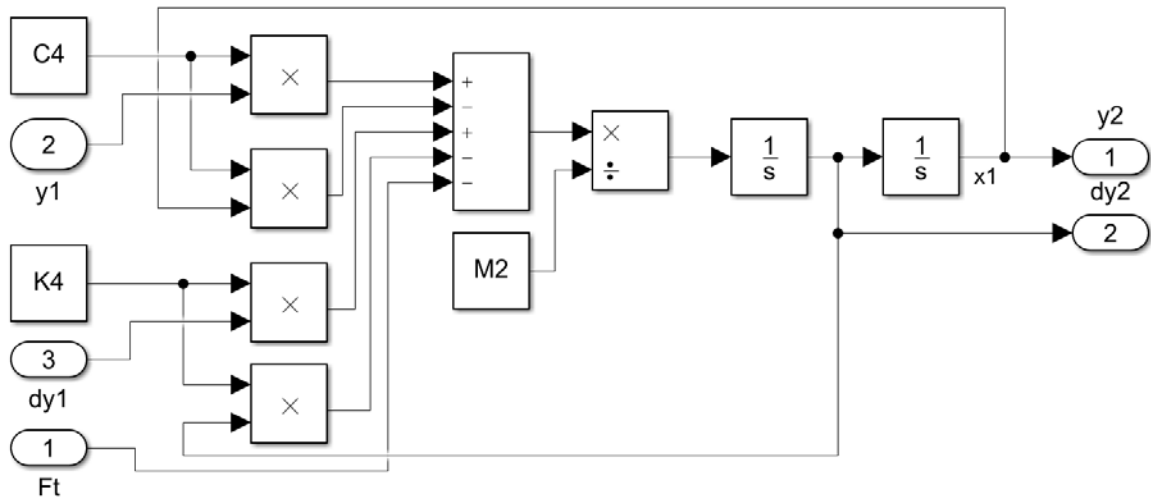
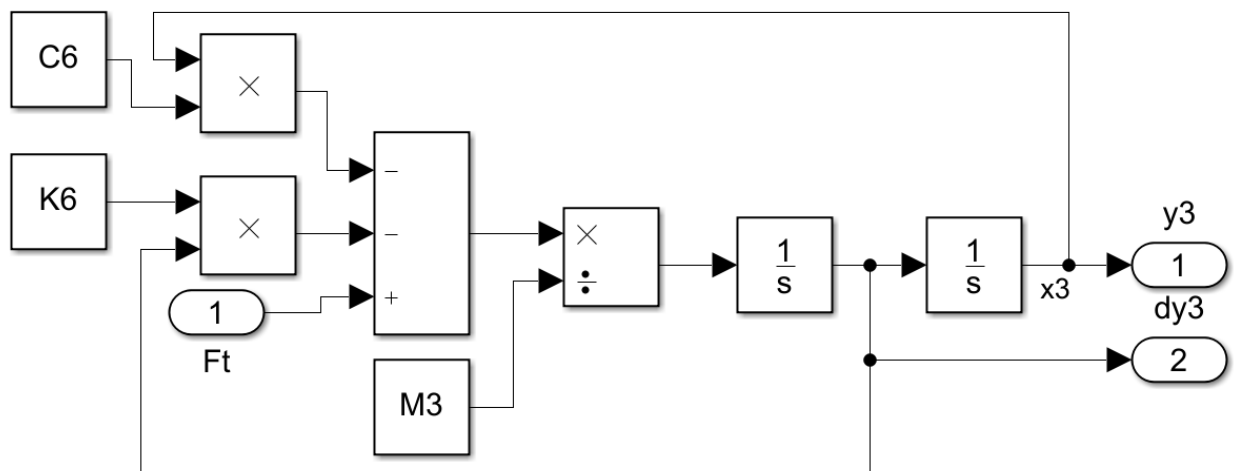
Рис. М.2 – Блок-схема визначення переміщення  $x_3$ Рис. М.3 – Блок-схема визначення переміщення  $x_2$ 

Рис. М.4 – Блок-схема визначення переміщення  $y_1$ Рис. М.5 – Блок-схема визначення переміщення  $y_2$ Рис. М.6 – Блок-схема визначення переміщення  $y_3$



## Додаток Н

### ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ЗМІЩЕНОГО ШАРУ

(Некомпозиційний план другого  
порядку)

$k := 3$  - кількість факторів

$n := 15$  - кількість дослідів

$n_0 := 3$  - кількість дослідів у центрі плану

ORIGIN  $\equiv 1$

$j := 1..n$      $i := 2..4$      $\underline{1} := 3..4$      $r := 1..10$      $u := 1..3$

Генеруємо матрицю проведення експериментів

$$x := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$x_{j,5} := x_{j,2} \cdot x_{j,3}$$

$$x_{j,6} := x_{j,2} \cdot x_{j,4}$$

$$x_{j,7} := x_{j,3} \cdot x_{j,4}$$

$$x_{j,8} := (x_{j,2})^2$$

$$x_{j,9} := (x_{j,3})^2$$

$$x_{j,10} := (x_{j,4})^2$$

x0 x1 x2 x3 x12 x13 x23 x11 x22 x33

$$X =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
2	1	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0
3	1	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0
4	1	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
7	1	1	0	-1	0	-1	0	1	0	1
8	1	-1	0	1	0	-1	0	1	0	1
9	1	-1	0	-1	0	1	0	1	0	1
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1
12	1	0	1	-1	0	0	-1	0	1	1
13	1	0	-1	1	0	0	-1	0	1	1
14	1	0	-1	-1	0	0	1	0	1	1
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

- результат побудови матриці планування експериментів

Введення результатів дослідів

$y_j :=$	$j =$	$y_{0_u} :=$		$y_j =$		$y_{0_u} =$
990	1	735	$y_j := \ln(y_j)$	990	$y_{0_u} := \ln(y_{0_u})$	735
640	2	710		640		710
920	3	705		920		705
510	4			510		
720	5			720		
720	6			$1.03 \cdot 10^3$		
1030	7			630		
630	8			560		
560	9			510		
510	10			720		
720	11			$1.19 \cdot 10^3$		
1190	12			760		
760	13			680		
680	14			410		
410	15			720		
720						

$$\underline{A} := \frac{1}{8} \quad \underline{B} := \frac{1}{4} \quad \underline{B}_1 := \frac{13}{48} \quad \underline{C} := \frac{-1}{16} \quad \underline{D} := \frac{1}{4} \quad p := 2 \quad \underline{n}_0 := 3$$

## Обчислення коефіцієнтів моделі

$$b_o := \frac{1}{n_o} \cdot \sum_u y0_u \quad b0 := b_o \quad b0 = 6.574$$

$$b_i := A \cdot \sum_j (x_{j,i} \cdot y_j) \quad b1 := b_2 \quad b1 = 0.14$$

$$b2 := b_3 \quad b2 = 0.275$$

$$b3 := b_4 \quad b3 = 0.192$$

$$b_{i,1} := D \cdot \sum_j (x_{j,i} \cdot x_{j,1} \cdot y_j) \quad b12 := b_{2,3} \quad b12 = -0.038$$

$$b13 := b_{2,4} \quad b13 = 0.1$$

$$b23 := b_{3,4} \quad b23 = -0.014$$

$$b_{i,i} := B \cdot \sum_j [(x_{j,i})^2 \cdot y_j] + \left[ C \cdot \sum_i \sum_j [(x_{j,i})^2 \cdot y_j] - \frac{1}{p \cdot n_o} \cdot \sum_u y0_u \right]$$

$$b11 := b_{2,2} \quad b11 = -0.023$$

$$b22 := b_{3,3} \quad b22 = 0.054$$

$$b33 := b_{4,4} \quad b33 = -0.065$$

## Визначення дисперсії параметра оптимізації

$$y_s := \frac{\sum_u y0_u}{n_o} \quad s2_y := \frac{\sum_u (y0_u - y_s)^2}{n_o - 1} \quad y_s = 6.574$$

$$s2_y = 4.974 \times 10^{-4}$$

$$se := \sum_u (y_{0u} - y_s)^2 \quad se = 9.947 \times 10^{-4}$$

Визначення дисперсій, які характеризують помилки при визначенні коефіцієнтів рівняння регресії

$$s_{2_{bo}} := \frac{1}{n_o} \cdot s_{2_y} \quad s_{2_{bo}} = 1.658 \times 10^{-4}$$

$$s_{2_{bi}} := A \cdot s_{2_y} \quad s_{2_{bi}} = 6.217 \times 10^{-5}$$

$$s_{2_{bil}} := D \cdot s_{2_y} \quad s_{2_{bil}} = 1.243 \times 10^{-4}$$

$$s_{2_{bii}} := B_1 \cdot s_{2_y} \quad s_{2_{bii}} = 1.347 \times 10^{-4}$$

Визначення довірливих інтервалів коефіцієнтів регресії

$$s_{bo} := \sqrt{s_{2_{bo}}} \quad s_{bi} := \sqrt{s_{2_{bi}}} \quad s_{bil} := \sqrt{s_{2_{bil}}} \quad s_{bii} := \sqrt{s_{2_{bii}}}$$

$t := 4.3$  - табличне значення критерію Стюдента при числі ступенів вільності  $f = 5$

$$\Delta_{bo} := |t \cdot s_{bo}| \quad \Delta_{bi} := |t \cdot s_{bi}| \quad \Delta_{bil} := |t \cdot s_{bil}| \quad \Delta_{bii} := |t \cdot s_{bii}|$$

$$\Delta_{bo} = 0.055 \quad \Delta_{bi} = 0.034 \quad \Delta_{bil} = 0.048 \quad \Delta_{bii} = 0.05$$

Визначення статично незначимих коефіцієнтів регресії

$$bo := \text{if}(|b_0| > \Delta_{bo}, b_0, 0)$$

$$b1 := \text{if}(|b_1| > \Delta_{bi}, b_1, 0)$$

$$b2 := \text{if}(|b_2| > \Delta_{bi}, b_2, 0)$$

$$b3 := \text{if}(|b_3| > \Delta_{bi}, b_3, 0)$$

$$b12 := \text{if}(|b_{12}| > \Delta_{bil}, b_{12}, 0)$$

$$\underline{\underline{b13}} := \text{if}(|b13| > \Delta bil, b13, 0)$$

$$\underline{\underline{b23}} := \text{if}(|b23| > \Delta bil, b23, 0)$$

$$\underline{\underline{b11}} := \text{if}(|b11| > \Delta bii, b11, 0)$$

$$\underline{\underline{b22}} := \text{if}(|b22| > \Delta bii, b22, 0)$$

$$\underline{\underline{b33}} := \text{if}(|b33| > \Delta bii, b33, 0)$$

$$\underline{\underline{B}} := \begin{pmatrix} b0 & b13 \\ b1 & b23 \\ b2 & b11 \\ b3 & b22 \\ b12 & b33 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 6.574 & 0.1 \\ 0.14 & 0 \\ 0.275 & 0 \\ 0.192 & 0.054 \\ 0 & -0.065 \end{pmatrix}$$

Так як деякі коефіцієнти є незначимі, проводиться перерахунок решти коефіцієнтів використовуючи метод найменших квадратів. Для цього складається система нормальних рівнянь.

$$sx1 := \sum_j (x_{j,2})^2 \quad sx2 := \sum_j (x_{j,3})^2 \quad sx3 := \sum_j (x_{j,4})^2$$

$$sx11 := \sum_j (x_{j,2})^4 \quad sx22 := \sum_j (x_{j,3})^4 \quad sx33 := \sum_j (x_{j,4})^4$$

$$sx12 := \sum_j [(x_{j,2})^2 \cdot (x_{j,3})^2] \quad sx13 := \sum_j [(x_{j,2})^2 \cdot (x_{j,4})^2]$$

$$sx23 := \sum_j [(x_{j,3})^2 \cdot (x_{j,4})^2]$$

$$y1 := \sum_j y_j \quad y2 := \sum_j (y_j \cdot x_{j,2}) \quad y3 := \sum_j (y_j \cdot x_{j,3}) \quad y4 := \sum_j (y_j \cdot x_{j,4})$$

$$y_5 := \sum_j (y_j \cdot x_{j,2} \cdot x_{j,3}) \quad y_6 := \sum_j (y_j \cdot x_{j,2} \cdot x_{j,4}) \quad y_7 := \sum_j (y_j \cdot x_{j,3} \cdot x_{j,4})$$

$$y_8 := \sum_j [y_j \cdot (x_{j,2})^2] \quad y_9 := \sum_j [y_j \cdot (x_{j,3})^2] \quad y_{10} := \sum_j [y_j \cdot (x_{j,4})^2]$$

$$b_{1n} := \frac{y_2}{sx_1} \quad b_{2n} := \frac{y_3}{sx_2} \quad b_{3n} := \frac{y_4}{sx_3} \quad b_{12n} := \frac{y_5}{sx_{12}} \quad b_{13n} := \frac{y_6}{sx_{13}}$$

$$b_{23n} := \frac{y_7}{sx_{23}}$$

$$b_{3n} = 0.192$$

$$b_0 = 10 \quad b_{11} = 10 \quad b_{22} = 10 \quad b_{33} = 10$$

GIVEN

$$n \cdot b_0 + sx_1 \cdot b_{11} + sx_2 \cdot b_{22} + sx_3 \cdot b_{33} = y_1$$

$$sx_{11} \cdot b_0 + sx_{11} \cdot b_{11} + sx_{12} \cdot b_{22} + sx_{13} \cdot b_{33} = y_8$$

$$sx_{21} \cdot b_0 + sx_{12} \cdot b_{11} + sx_{22} \cdot b_{22} + sx_{23} \cdot b_{33} = y_9$$

$$sx_{31} \cdot b_0 + sx_{13} \cdot b_{11} + sx_{23} \cdot b_{22} + sx_{33} \cdot b_{33} = y_{10}$$

B := FIND(b<sub>0</sub>, b<sub>11</sub>, b<sub>22</sub>, b<sub>33</sub>)

$$b_{0n} := 1 \quad b_{11n} := 1 \quad b_{22n} := 1$$

Given

+

$$n \cdot b_{0n} + sx_1 \cdot b_{11n} + sx_2 \cdot b_{22n} = y_1$$

$$sx_{11} \cdot b_{0n} + sx_{11} \cdot b_{11n} + sx_{12} \cdot b_{22n} = y_8$$

$$sx_{21} \cdot b_{0n} + sx_{12} \cdot b_{11n} + sx_{22} \cdot b_{22n} = y_9$$

bn := Find(b<sub>0n</sub>, b<sub>11n</sub>, b<sub>22n</sub>)

$$b_n = \begin{pmatrix} 6.538 \\ -0.021 \\ 0.056 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \underline{\underline{b_{1n}}} := 0 & \underline{\underline{b_{2n}}} := 0 \\ \underline{\underline{b_{12n}}} := 0 & \underline{\underline{b_{13n}}} := 0 & \underline{\underline{b_{23n}}} := 0 & b_{33n} := 0 \end{matrix}$$

$$B := \begin{pmatrix} b_{0n} \\ b_{1n} \\ b_{2n} \\ b_{3n} \\ b_{12n} \\ b_{13n} \\ b_{23n} \\ b_{11n} \\ b_{22n} \\ b_{33n} \end{pmatrix} \quad bb := \begin{pmatrix} b_{n1} \\ b_{1n} \\ b_{2n} \\ b_{3n} \\ b_{12n} \\ b_{13n} \\ b_{23n} \\ b_{n2} \\ b_{n3} \\ b_{33n} \end{pmatrix} \quad bb = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 6.538 \\ \hline 2 & 0 \\ \hline 3 & 0 \\ \hline 4 & 0.192 \\ \hline 5 & 0 \\ \hline 6 & 0 \\ \hline 7 & 0 \\ \hline 8 & -0.021 \\ \hline 9 & 0.056 \\ \hline 10 & 0 \\ \hline \end{array}$$

- значення перерахованих коефіцієнтів регресії

Перевірка адекватності отриманої моделі за F-критерієм

$$y_{sj} := \sum_r (bb_r \cdot x_{j,r}) \quad sr := \sum_j (y_j - y_{sj})^2 \quad sr = 0.88$$

$$k1 := 6 \text{ - кількість значимих коефіцієнтів моделі} \quad se = 9.947 \times 10^{-4}$$

$$f := n - k1 - (n_o - 1)$$

$$s2_{ad} := \frac{sr - se}{f}$$

$$F_r := \frac{s2_{ad}}{s2_y} \quad F_t := 19.3 \text{ - табличне значення F-критерія}$$

$$F_r = 252.596$$

$$\text{if}(F_r < F_t, 1, 0) = 0 \quad \begin{array}{l} 1 \text{ - модель адекватна} \\ 0 \text{ - модель не адекватна} \end{array}$$

Перевід безрозмірних величин у розмірні, використовуючи елементи символічної математики та отримання рівняння моделі

$$v_u := \begin{array}{|c|} \hline 2 \\ \hline 4 \\ \hline 6 \\ \hline \end{array} \quad t_{u1} := \begin{array}{|c|} \hline 0.15 \\ \hline 0.25 \\ \hline 0.35 \\ \hline \end{array} \quad lp_u := \begin{array}{|c|} \hline 6 \\ \hline 9 \\ \hline 12 \\ \hline \end{array}$$

$$y_{v_u} := \ln(v_u) \quad y_{t_u} := \ln(t_u) \quad y_{lp_u} := \ln(lp_u)$$

$y_{v_u} =$	$y_{t_u} =$	$y_{lp_u} =$
0.693	-1.897	1.792
1.386	-1.386	2.197
1.792	-1.05	2.485

$$bb =$$

	1
1	6.538
2	0
3	0
4	0.192
5	0
6	0
7	0
8	-0.021
9	0.056
10	0

$$x_1 := 1 \quad x_2 := 1 \quad x_3 := 1$$

$$v := 1 \quad s := 1 \quad t := 1$$

$$x_1 := 1.82 \cdot \ln(v) - 2.262$$

$$x_2 := 2.36 \cdot \ln(t) + 3.478$$

$$x_3 := 2.89 \cdot \ln(lp) - 6.17$$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 \quad 10$$

$$y := 6.538 + 0.192 \cdot x_3 - 0.021 \cdot x_1^2 + 0.056 \cdot x_2^2$$

$$6.538 + 0.192 \cdot x_3 - 0.021 \cdot x_1^2 + 0.056 \cdot x_2^2$$

$$0.192 \cdot x_3 + 0.17290728 \cdot \ln(v) + -0.0695604 \cdot \ln(v)^2 + 0.056 \cdot x_2^2 + 6.430550476$$

$$0.192 \cdot x_3 + 0.91930496 \cdot \ln(t) + 0.17290728 \cdot \ln(v) + 0.3118976 \cdot \ln(t)^2 \dots$$

$$+ -0.0695604 \cdot \ln(v)^2 + 7.10795358$$

$$0.55488 \cdot \ln(lp) + 0.91930496 \cdot \ln(t) + 0.17290728 \cdot \ln(v) + 0.3118976 \cdot \ln(t)^2 \dots$$

$$+ -0.0695604 \cdot \ln(v)^2 + 5.92331358$$

$$5.923 + 0.173 \cdot \ln(v) - 0.07 \cdot \ln(v)^2 + 0.92 \cdot \ln(t) + 0.312 \cdot \ln(t)^2 + 0.555 \cdot \ln(lp)$$

$$e^{5.923} = 373.531$$

$$Py := 373.5 \cdot v^{0.17 - 0.07 \cdot \ln(v)} \cdot t^{0.92 + 0.31 \ln(t)} \cdot lp^{0.55}$$



## Додаток О



Kingston University



**CERTIFICATE OF ERASMUS+  
TEACHING MOBILITY ATTENDANCE**

I hereby certify that

***Volodymyr Gurey***

Participated in the Erasmus+ Programme

Grant Agreement Number 2017-1-UK01-KA107-036029

on a teaching mobility run between 10/11/2018 and 18/11/2018,  
 lectured or participated on each of the 5 days between 12<sup>th</sup> November  
 to 16<sup>th</sup> November 2018 on the modules titled, and at the academic level, with  
 teaching hours as stated below:

**EG4011 - Engineering Mechanics, Structures and  
Materials (Level 4) – 2 hours**

**EG4010 - Engineering Design and Professional  
Practice (Level 4) – 6 hours**

**ME5013 - Engineering Design, Materials, and  
Manufacture 2 (Level 5) – 4 hours**

**ME5131 - Solid Mechanics and Thermofluids (Level 4) – 2 hours**

and delivered a research seminar

**“The Nanocrystalline Hardened Layer Formation due to Frictional  
Treatment of Machine Parts”**

in Kingston University, London

**Dr. Alan G. Flowers**  
 Erasmus+ Coordinator KU-LPNU  
 Kingston University, London

**Kingston  
University**

16 NOV 2018

**Dated: 16<sup>th</sup> November 2018**  
 FACULTY OF  
 SCIENCE, ENGINEERING  
 AND COMPUTING

## Додаток П



Kingston University

**Kingston  
University**  
London

**CERTIFICATE OF ERASMUS+  
TEACHING MOBILITY ATTENDANCE**

I hereby certify that

***Volodymyr Gurey***

Participated in the Erasmus+ Programme

Grant Agreement Number 2019-1-UK01-KA107-061076 on a **teaching mobility** which provided the participant with **continuing education and professional development** run between 24/02/2020 and 28/02/2020,

lectured or participated on each of the 5 days between 24<sup>th</sup> February to 28<sup>th</sup> February 2020 on the modules titled, and at the academic level, as stated below:

**ME6011 – Thermofluid and Mechanical Principles 3 (Level 6),  
ME6012 – Mechatronics, Dynamics and Control (Level 6),  
ME5013 – Engineering Design, Materials and Manufacture 2 (Level 5),  
AE5101 – Aircraft System (Level 5),  
EG4010 – Engineering Design and Professional Practice (Level 4),  
EG4011 – Engineering Mechanics, Structures and Materials (Level 4),  
EG4012 – Engineering Mathematics and Computing (Level 4),  
EG4013 – Fluid Mechanics and Engineering Science (Level 4),**

**and delivered a research seminar titled  
“The Effect of the Hardened Nanocrystalline Surface Layer on Durability  
of Guideways”**

in Kingston University, London

FACULTY OF SCIENCE  
ENGINEERING & COMPUTING  
KINGSTON UNIVERSITY  
PENRHYN ROAD  
KINGSTON UPON THAMES  
SURREY  
KT1 2EE

**Dr. Alan G. Flowers**  
Erasmus+ Coordinator KU-LPNU  
Kingston University, London

**Dated: 28<sup>th</sup> February 2020**