

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Технології в
машинобудуванні**

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: Techniques in
a machine industry**

№ 1(9)'2024

No. 1(9)'2024

Збірник наукових праць

Collection of Scientific papers

Видання засноване у 1961 р.

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2024

Kharkiv
NTU "KhPI", 2024

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Вестник Национального технического университета «ХПИ». = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2024– № 1(9). –95с.–ISSN 2079-004X(Print), ISSN 2786–7587(Online).

Видання присвячене освітленню досягнень в галузі машинобудування. Мета видання полягає у публікації оригінальних досліджень, які теоретично досліджують та вдосконалюють технологічні процеси виготовлення деталей машин і складання виробів, технологічного обладнання та оснащення, із приділенням особливої уваги: методам механічної обробки, їх стабільності і надійності; формуванню точності й якості поверхонь деталей машин; моделюванню, проектуванню й оптимізації технологічних процесів; організаційно-технологічним проблемам гнучкого виробництва; автоматизації операцій механоскладального виробництва; створенню, управлінню та діагностиці технологічних і мехатронних систем; інтегрованим та комп'ютерним технологіям в машинобудуванні; проблемам створення систем підтримки життєвого циклу виробу машинобудування; фізико-механічним та нанотехнологіям в машинобудуванні.

Для науковців та фахівців в галузі технологій машинобудування, викладачів вищої школи, аспірантів і студентів.

This issue is devoted to clarify achievements in the mechanical engineering. The purpose of the edition is publishing original researches which explore theoretically and improve the engineering processes of machines parts manufacturing and products assembly, equipment, jigs and fixtures with paying special attention to stability and reliability of machining methods; assurance of accuracy and quality of surfaces; modeling, design and optimization of machining processes; organizational and technical problems of flexible production; automation of operations of mechanical assembly production; creation, management and diagnostics of technological and mechatronic systems; integrated and computer technologies in engineering; design problems of systems for supporting the life cycle of a machine-building product; physical-mechanical technologies and nanotechnologies in mechanical engineering. The edition is intended for scientists and specialists of mechanical engineering, lecturers, post-graduate students and students.

Ресстр суб'єктів у сфері медіа, ідентифікатор медіа R30-01541 згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 16.10.23. № 1075

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України КВ № 24359-14199P від 10 лютого 2020 р.

Мова статей – українська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні включено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії», категорія «Б» (наказ МОН України № 320 від 07.04.2022 р.). Періодичність 2 рази на рік. УДК 620-УДК 629

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <https://web.kpi.kharkov.ua/tmms/uk/visnik-ntu-hpi/>

Засновник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» **Founder** National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

Видавник кафедра технології машинобудування та металорізальних верстатів НТУ «ХПІ»

Publisher, Department of Machine Building Technology and Metal Cutting Machines, NTU "KhPI"

Редакційна колегія

Editorial board

Головний редактор:

Editor in Chief:

Пермяков О.А., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Pernyakov O.A., Dr. Tech. Sciences, Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Заступник головного редактора:

Deputy editor:

Клочко О.О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Klochko O.O., Dr. Tech. Sciences, Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Відповідальний секретар:

Responsible secretary:

Набока О.В., к-т техн. наук, проф. НТУ «ХПІ», Україна

Naboka O.V., Technical College Sciences, Prof. NTU "KhPI", Ukraine

Члени редколегії:

Members of the editorial board:

Антонюк В.С., д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна

Antonyuk V.S., Dr. Tech. Science, Prof., NTUU "KPI", Ukraine

Бембенець Міхал, д-р техн. наук, інженер, проф. АГН, Польща

Bembenek Michal, Dr. Tech. Sciences, engineer, Prof., AGH, Poland

Воронцов Б.С., д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна

Vorontsov B.S., Dr. Tech. Science, Prof., NTUU "KPI", Ukraine

Гасанов М.І., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Hasanov M.I., Dr. Tech. Sciences, Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Доброворський С.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

Dobrotvorskyi S.S., Dr. Tech. Sciences, Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Дмитриєв Д.О., д-р техн. наук, проф., ХНТУ, Україна

Dmitriev D.O., Dr. Tech. Sciences, Prof., KhNTU, Ukraine

Драган Перакович PhD, професор, Университет

Dragan Perakovich PhD, professor, University, Zagreb, Croatia

Загреб, Хорватія

Kalchenko V.V., Dr. Tech. Sciences, Prof., ChNTU, Ukraine

Кальченко В.В., д-р техн. наук, проф., ЧНТУ, Україна

Klymenko S.A., Dr. Tech. Corresponding Member of Sciences Academy

Клименко С.А., д-р техн. наук член-коресп. АН України

of Sciences of Ukraine

Ковальов В.Д., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна

Kovalev V.D., Dr. Tech. Sciences, Prof., DDMA, Ukraine

Купріянов О.В., д-р техн. наук, проф., УПА, Україна

Kupriyanov O.V., Dr. Tech. Sciences, Prof., UIPA, Ukraine

Мироненко Є.В., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна

Myronenko E.V., Dr. Tech. Sciences, Prof., DDMA, Ukraine

Михал Балол (Балог, Михал), доцент, доктор філософії,

Balog, Michal, associate professor, Doctor of Philosophy,

Технический университет Кошице, Словачія

Košice Technical University, Slovakia

Новіков Ф.В. д-р техн. наук, проф., ХНЕУ ім. С.Кузнеця

Novikov F.V. Dr. Tech. of Sciences, prof., S. Kuznets HNEU

Пасічник В.А., д-р техн. наук, проф., НТУУ «КПІ», Україна

Pasichnyk V.A., Dr. Tech. Science, Prof., NTUU "KPI", Ukraine

Роп'як Л.Я., д-р техн. наук, проф., ІФНТУНГ, Україна

Ropyak L. Ya., Dr. Tech. Sciences, Prof., IFNTUNG, Ukraine

Сталінський Д.В., д-р техн. наук, проф., ДП УкрНТЦ

Stalinsky D.V., Dr. Tech. of Sciences, Prof., SE UkrNTC

«ЕНЕРГОСТАЛЬ», Україна

"ENERGOSTAL", Ukraine

Степанов М.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Stepanov M.S., Dr. Tech. Sciences, Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Ступницький В.М., д-р техн. наук, проф. Львівська «Політехна»

Stupnytskyi V.M., Dr. Tech. Sciences, Prof. Lviv Polytechnic

Фадєєв В.А., д-р техн. наук, проф., ПАТ «ФЕД», Україна

Fadeev V. A., Dr. Tech. Science, Prof., PJSC "FED", Ukraine

Хавін Г.Л., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Khavin G.L., Dr. Tech. Sciences, Prof., NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 4 від 28 квітня 2024р., ISSN 2079-004X(Print), ISSN 2786–7587(Online).

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2024

МИГУЩЕНКО Р.П., КРОПАЧЕК О.Ю., БАЛЄВ В.М., МИГУЩЕНКО К.Р., ФІНОГЕНОВ О.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕХАНІЧНОГО РОБОТА НА ПРИКЛАДІ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА

В статті досліджені властивості механічного робота та надані рекомендації щодо змін в його конструкції. Актуальність використання роботів у світі не викликає сумніву, подібні роботи використовуються в місцях, які несуть небезпеку людині, або недоступні для людини. У кожному разі, точність позиціонування, точність дій робота безпосередньо впливають на ефективність виконання поставлених перед роботом завдань. Відпрацювання рухів робота традиційно відбувається на змаганнях з робототехніки, які широко проводяться у всьому світі. В останніх змаганнях з робототехніки однією з вправ на змаганнях була вправа, коли робот повинен повиснути на перекладині за допомогою своїх механічних важелів. Досліджуваний робот здійснює коливання у повітрі при висі на перекладині на механічних важелях. У дослідженнях ставилось завдання подолати ці негативні явища – механічні коливання, за рахунок вивчення проблеми та проведення фізичних досліджень. Для проведення фізичних досліджень та вивчення питання було прийняте рішення замінити реальний об'єкт – робот, відповідною конструкцією заміщення. Для такої конструкції заміщення прийнято фізичний маятник (класичний та оборотний). У фізичних

маятників основним параметром є момент інерції I , який визначається з формули: $I = \frac{mgd}{4\pi} T^2$, де m – маса маятника, g – прискорення

вільного падіння, d – відстань від вісі підвісу до центра маси маятника, T – період коливань маятника. Прийнята гіпотеза – збільшення моменту інерції I реального об'єкту призведе до необхідності збільшення сили, що змушує, розгойдати цей об'єкт. При лабораторних дослідженнях були сформовані дослідні установки; аналізувались вимірювані змінні – I , незалежні змінні – g , T , залежні змінні – m , d ; здійснювались експерименти на предмет оцінки вивчення впливу на момент інерції I відстані від осі підвісу до центру маси маятника d та впливу на момент інерції I маси маятника m . Отримані результати фізичних досліджень дозволяють надати рекомендації щодо зміни конструкції реального об'єкта – робота. Рекомендації дозволяють усунути негативне явище – розгойдування робота на перекладині, що дозволить якісніше виконати відповідне завдання. До таких рекомендацій належить: 1. Максимально обтяжити конструкцію збільшенням маси m . 2. Максимально подовжити важелі робота збільшенням відстані d . 3. Максимально опустити вниз центр ваги робота. Після здійснення конструктивних змін в будові робота, планується побудова його математичної моделі для подальших досліджень.

Ключові слова: механічний робот, фізичний маятник, момент інерції, похибка вимірювання, девіація

MYGUSHCHENKO R.P., KROPACHEK O.Yu., BALEV V.M., MYGUSHCHENKO K.R., FINOHENOV O.M.

RESEARCH OF THE PROPERTIES OF A MECHANICAL ROBOT USING THE EXAMPLE OF A PHYSICAL PENDULUM

The article examines the properties of a mechanical robot and provides recommendations for changes in its design. The relevance of the use of robots in the world is beyond doubt, such robots are used in places that pose a danger to humans or are inaccessible to humans. In each case, the accuracy of positioning and the accuracy of the robot's actions directly affect the efficiency of the tasks assigned to the robot. Practicing robot movements traditionally takes place at robotics competitions, which are widely held around the world. In recent robotics competitions, one of the exercises in the competition was an exercise where the robot had to hang from a beam using its mechanical levers. The researched robot oscillates in the air while hanging on a crossbar on mechanical levers. In the studies, the task was to overcome these negative phenomena - mechanical oscillations, by studying the problem and conducting physical research. In order to conduct physical research and study the issue, a decision was made to replace the real object – the robot – with an appropriate replacement structure. For such a replacement design, a physical pendulum (classical and

reversible) is adopted. In physical pendulums, the main parameter is the moment of inertia I , which is determined from the formula: $I = \frac{mgd}{4\pi} T^2$,

where m is the mass of the pendulum, g is the acceleration of free fall, d is the distance from the axis of the suspension to the center of mass of the pendulum, T is the oscillation period of the pendulum. The accepted hypothesis is that an increase in the moment of inertia of a real object will lead to the need to increase the force that forces this object to swing. Experimental installations were formed during laboratory research; measured variables – I , independent variables – g , T , dependent variables – m , d were analyzed; experiments were carried out to assess the impact on the moment of inertia I of the distance from the suspension axis to the center of mass of the pendulum d and the influence on the moment of inertia I of the mass of the pendulum m . The obtained results of physical research allow us to provide recommendations on changing the design of a real object - a robot. The recommendations make it possible to eliminate the negative phenomenon – rocking the robot on the crossbar, which will allow to perform the corresponding task better. These recommendations include the following: 1. Load the structure as much as possible by increasing the mass m . 2. Extend the robot levers as much as possible by increasing the distance d . 3. Lower the center of gravity of the robot as much as possible. After making constructive changes in the structure of the robot, it is planned to build its mathematical model for further research.

Key words: mechanical robot, physical pendulum, moment of inertia, measurement error, deviation

Вступ. Актуальність використання механічних роботів у сучасному світі не викликає сумнівів. Подібні роботи використовуються в місцях, які або несуть загрозу людині, або недоступні для людини. Особливої ваги набрали механічні роботи у військовій справі. У будь-якому разі, точність позиціонування, точність дій механічного робота безпосередньо впливає на ефективність виконання поставлених перед роботом задач [1].

В якості об'єкта дослідження прийнятий робот, виконаний учасниками наукового гуртка робототехніки школи Лінкольн Парк (Чикаго, США). Безпосередньо робот школи Лінкольн Парк представлений на рис. 1.

В комплектацію приводу робота входить:

- чотири двигуни приводу коліс (по одному двигуну на кожне колесо);
- два двигуни на важелі робота;
- один двигун для запуску дрона (літального апарату);
- система редукторів;
- електронний блок керування.

Відпрацювання рухів механічного робота, традиційно, відбувається на змаганнях з робототехніки, які широко проводяться в США та інших країнах світу. В останніх змаганнях з робототехніки, в яких приймала участь команда школи Лінкольн Парк, приймало участь десяток команд. Однією з вправ на змаганнях була

вправа, коли робот повинен повиснути на перекладині за допомогою своїх механічних важелів. Цей процес показаний на рис. 2.

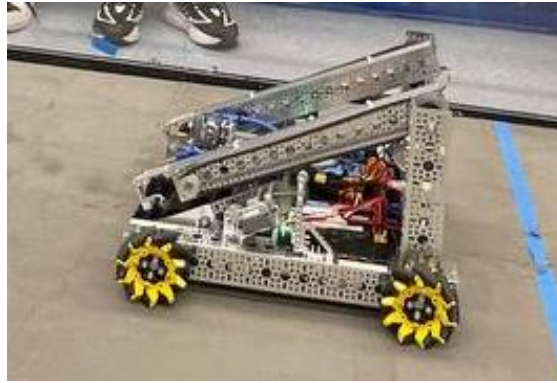


Рис. 1 – Робот школи Лінкольн Парк

У відмінності від роботів інших учасників змагань, робот школи Лінкольн Парк здійснює коливання у повітрі відносно перекладини при висі на механічних важелях. Це незадовільно відображається на точності рухів робота та йде втрата часу на виконання завдання.

В даній статті, поставлена задача побороти ці негативні явища – механічні коливання, за рахунок вивчення проблеми і проведення фізичних досліджень [2].



Рис. 2 – Вис робота на перекладині

Для проведення фізичних досліджень та вивчення питання доцільно замінити реальний об'єкт – робот, відповідною конструкцією заміщення [3]. В якості такої конструкції заміщення прийнятий маятник.

Із всього набору відомих маятників, для реалізації експериментів, доцільно розглянути [4]:

- математичний маятник;
- фізичний маятник.

Математичний маятник, в найпростішому випадку, являє собою металічну кулю, яка підвішена на невагомій і нерозтяжній нитці. Математичний маятник являє собою, практично, ідеальний пристрій, пристрій з ідеальними характеристиками, і не може бути використаним в якості конструкції заміщення реального об'єкту.

Фізичний маятник – це пристрій, який складається з твердого матеріалу, що підвішений на вісі підвісу, у якого центр коливання не співпадає з центром маси [5]. Пропонується, при дослідженні, використовувати фізичні маятники, які представлені на рис. 3 і рис. 4.

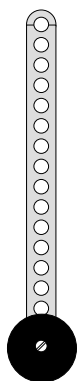


Рис. 3 – Конструкція класичного фізичного маятника

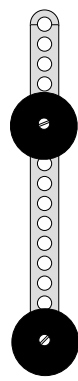


Рис. 4 – Конструкція фізичного маятника зі зміщенням центра маси

Фізичні маятники на рис. 3 і рис. 4 виконані однотипно та складаються з перфорованої планки довжиною 50 см і прилаштованого, за допомогою гвинтів, масивного вантажу.

У даних фізичних маятників, одним з параметрів, є параметр – момент інерції I , який визначається з формули [6]:

$$I = \frac{mgd}{4\pi} T^2, \quad (1)$$

де I – момент інерції;

m – маса маятника;

g – прискорення вільного падіння;

d – відстань від вісі підвісу до центру маси маятника;

T – період коливання маятника.

Момент інерції I – це скалярна величина, фізичним навантаженням якої є протидія силі, яка змушує змінити швидкість руху об'єкту, зупинити рух об'єкту, вивести об'єкт зі стану спокою [7].

Фізичний маятник на рис. 3, дозволяє визначити вплив параметрів m та d на момент інерції I , відповідно до (1). Що стосується фізичного маятника на рис. 4, то він дозволяє оцінити вплив розташування центра маси маятника на момент інерції I [8].

Абсолютно точне твердження, що збільшення моменту інерції реального об'єкту призведе до необхідності збільшення величини зовнішньої сили, щоб розгойдати цей об'єкт. Якщо зовнішня сила є постійною, то об'єкт з підвищеним моментом інерції така сила не виведе зі стану спокою. А це є рішенням проблеми для робота школи Лінкольн Парк.

Мета дослідження, постановка задачі. Метою досліджень в статті є підтвердження гіпотези:

Підвищення порогу чутливості фізичного маятника до зовнішньої сили виникає при збільшенні параметрів m – маси маятника, d – відстані від вісі підвісу до центру маси маятника і зміні місця розташування центру маси маятника.

Для досягнення мети необхідно:

- провести натурні експерименти з фізичним маятником;
- розробити і дослідити фізичну модель фізичного маятника;
- надати рекомендації для оптимізації конструкції механічного робота;
- поставити задачі для подальших досліджень.

При дослідженнях розглядаються змінні:

Вимірювальні змінні:

I – момент інерції.

Незалежні змінні:

g – прискорення вільного падіння;

T – період коливань маятника;

Залежні змінні:

m – маса маятника;

d – відстань від вісі підвісу до центру маси маятника.

Обладнання і матеріали. Для проведення серій експериментів використовується:

- штатив;
- класичний фізичний маятник;
- фізичний маятник зі зміщенням центра маси;
- набір вантажів;
- ваги;
- лінійка;
- секундомір.

Проведення досліджень. Установка для проведення експериментів представлена на рис. 5.

Установка на рис. 5, а дозволяє визначити характер впливу змінних m і d на значення моменту інерції I . Установка на рис. 5, а виконана з умовою, що відстань від вісі підвісу до центру маси маятника d практично співпадає з відстанню від вісі підвісу до центру коливання маятника d' :

$$d \approx d'$$

Установка на рис. 5, б дозволяє визначити характер впливу радикальної зміни місця розташування центру маси маятника на значення моменту інерції I . Установка на рис. 5, б виконана з умовою, що відстань від вісі підвісу до центру маси маятника d радикально не співпадає з відстанню від вісі підвісу до центру коливання маятника d' .

У ході фізичних досліджень пропонується виконати три експерименти:

- експеримент 1 – вивчення впливу на момент інерції I відстані від вісі підвісу до центру маси маятника d , у випадку класичного фізичного маятника;
- експеримент 2 – вивчення впливу на момент інерції I маси маятника m , у випадку класичного фізичного маятника;
- експеримент 3 – вивчення впливу на момент інерції I відстані від вісі підвісу до центру маси маятника d , у випадку фізичного маятника зі зміщеним центром маси.

Кожний експеримент проводиться методом багатократних спостережень.

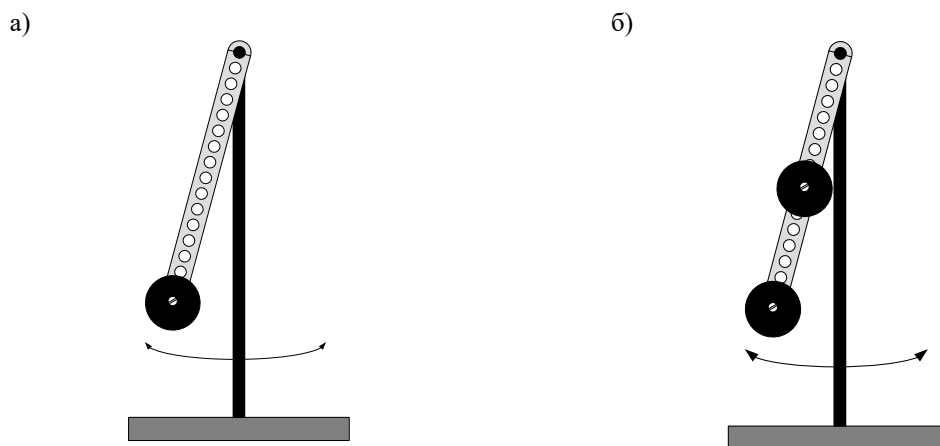


Рис. 5 – Зовнішній вигляд установки:
 а) використання класичного маятника;
 б) використання маятника зі зміщенням центру маси

Фактичне виконання установки представлено на рис. 6.



Рис. 6 – Установка

У результаті проведених експериментів отримані результати, які зведені в табл. 1. Показання моменту інерції I для всіх трьох експериментів розраховані на основі (1) і внесені в табл. 2 – 4. На рис. 7 – 9 представлені відповідні графічні представлення.

Таблиця 1 – Осереднені дані експериментів

d , м	t , с	m , кг	t , с	d' , м	t , с
0.523	41.47	0.225	40.46	0.44	40.01
0.415	37.60	0.447	41.64	0.37	37.38
0.326	33.65	0.667	42.03	0.30	34.79
0.224	30.62	0.882	42.21	0.23	32.52
0.123	27.95	1.103	42.41	0.16	31.32

Таблиця 2 – Момент інерції (експеримент 1; $m=0.494$ кг)

d , м	T , с	I , кг·м ²
0.523	1.382	0.122
0.415	1.253	0.080
0.326	1.122	0.050
0.224	1.021	0.029
0.123	0.932	0.013

Таблиця 3 – Момент інерції (експеримент 2; $d=0.523$ м)

m , кг	T , с	I , кг·м ²
0.225	1.349	0.056
0.447	1.388	0.091
0.667	1.401	0.109
0.882	1.407	0.119
1.103	1.414	0.124

Таблиця 4 – Момент інерції (експеримент 3; $m=0.776$ кг)

d' , м	T , с	I , кг·м ²
0.44	1.33	0.471
0.37	1.25	0.350
0.30	1.16	0.244
0.23	1.08	0.162
0.16	1.04	0.105

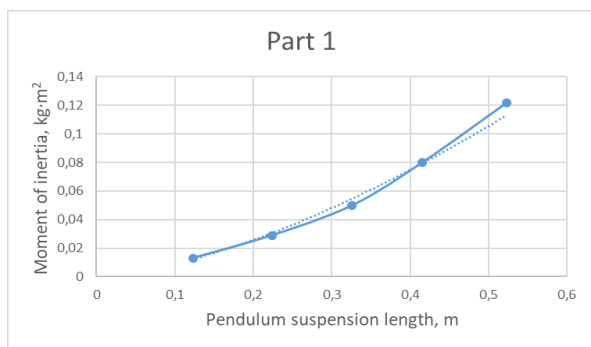


Рис. 7 – Залежність $I=f(d)$ (експеримент 1; $m=0.494$ кг)

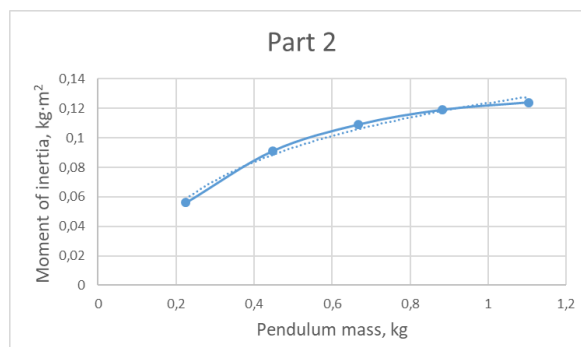


Рис. 8 – Залежність $I=f(m)$ (експеримент 2; $d=0.523$ м)

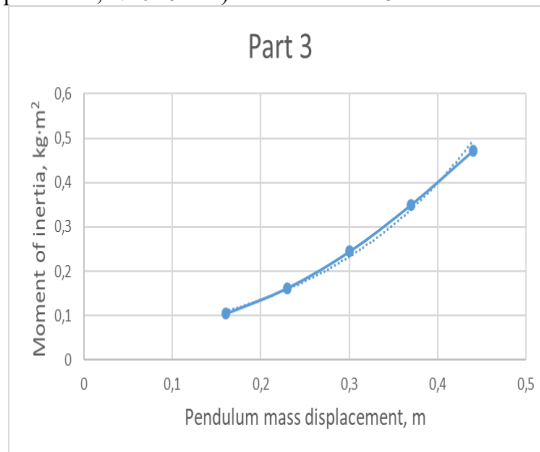


Рис. 9 – Залежність $I=f(d)$ (експеримент 3; $m=0.776$ кг)

Відповідно до представлених рисунків (рис. 7 – 9) видно, що характер зміни моменту інерції має вигляд близький до логарифмічної, степенної чи експоненційної функцій, але зі зневажливо малими похибками може бути апроксимований лінійною залежністю [9].

Запис результатів проведених експериментів здійснюється за формою [10]:

$$x = x_0 \pm \Delta x, \tag{2}$$

де x – результат вимірювання;
 x_0 – середнє значення;
 Δx – абсолютна похибка.

Тобто, для того, щоб сформува ти результат у вигляді (2), необхідно визначити значення x_0 і похибки Δx .

В даних фізичних дослідженнях проводились вимірювання параметрів m , d , T . Середні значення параметрів m , d , T отримані для всіх трьох експериментів і представлені в табл.1. По цим даним, використовуючи (1), визначені значення I (табл. 2 – 4).

Для параметрів m , d абсолютна похибка визначається похибкою інструменту при вимірюванні. Інструментальні похибки параметрів m , d :

$$\Delta m = 0.5 \text{ грам} = 0.0005 \text{ кг};$$

$$\Delta d = 0.5 \text{ мм} = 0.0005 \text{ м}.$$

Абсолютну похибку ΔT можна отримати на основі методу визначення випадкових похибок [10]. Для цього необхідно виконати ряд дій:

1. Розрахувати середнє значення T_0 :

$$T_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i,$$

де n – кількість спостережень.

2. Визначити абсолютні похибки ΔT для кожного вимірювального спостереження:

$$\Delta T = |T_0 - T_i|.$$

3. Визначити середньоквадратичну похибку серії вимірювань S_T :

$$S_T = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i)^2}$$

4. Визначити абсолютну похибку ΔT серії вимірювань:

$$\Delta T = t_\alpha \cdot S_T,$$

де t_α – коефіцієнт Стьюдента, який для п'яти вимірювальних спостережень та довірчої ймовірності 0.95 дорівнює 2.8 [11].

Використовуючи представлений алгоритм дій отримані значення ΔT для трьох експериментів. Дані зведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Дані абсолютних похибок ΔT для кожного вимірювання

№	Експеримент 1		Експеримент 2		Експеримент 3	
	T , с	ΔT , с	T , с	ΔT , с	T , с	ΔT , с
1	1.382	0.002	1.349	0.022	1.33	0,003
2	1.253	0.003	1.388	0.006	1.25	0,014
3	1.122	0.016	1.401	0.007	1.16	0,010
4	1.021	0.013	1.407	0.006	1.08	0,015
5	0.932	0.007	1.414	0.005	1.04	0,009

На основі табл. 5, отримуємо значення ΔI :

$$\Delta I = I \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2}. \tag{3}$$

Вираз (3) справедливий для знаходження абсолютної похибки при непрямих вимірюваннях. В представленому виразі (3) не враховуються вагові коефіцієнти. Результати вимірювань I , у вигляді $I \pm \Delta I$ (2), зведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Результати непрямих вимірювань I

№	Експеримент 1		Експеримент 2		Експеримент 3	
	I , кг·м ²	$\pm \Delta I$, кг·м ²	I , кг·м ²	$\pm \Delta I$, кг·м ²	I , кг·м ²	$\pm \Delta I$, кг·м ²
1	0.122	± 0.00024	0.056	± 0.00092	0.471	± 0.011
2	0.080	± 0.00023	0.091	± 0.00042	0.350	± 0.010
3	0.050	± 0.00072	0.109	± 0.00056	0.244	± 0.008
4	0.029	± 0.00038	0.119	± 0.00052	0.162	± 0.007
5	0.013	± 0.00011	0.124	± 0.00046	0.105	± 0.007

Згідно табл. 6 видно, що похибка визначення моменту інерції I не перевищує $\pm 0.001 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Для оцінки процентного вмісту похибки визначення I , необхідно розрахувати відносні похибки. Розрахунок здійснюється за формулою [12]:

$$\delta_I = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Використовуючи формулу (4) і дані табл. 6, визначаємо процентний вміст похибок. Дані зведені в табл. 7.

Таблиця 7 – Процентний вміст похибок

№	Експеримент 1		Експеримент 2		Експеримент 3	
	$I, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$\pm\delta_I, \%$	$I, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$\pm\delta_I, \%$	$I, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$\delta_I, \%$
1	0.122	± 0.20	0.056	± 1.64	0.471	± 2.335
2	0.080	± 0.29	0.091	± 0.46	0.350	± 2.857
3	0.050	± 1.44	0.109	± 0.51	0.244	± 3.279
4	0.029	± 1.31	0.119	± 0.44	0.162	± 4.321
5	0.013	± 0.85	0.124	± 0.37	0.105	± 6.667

Згідно отриманих даних видно, що відносна похибка δ_I змінюється в діапазоні від 0.20 % до 1.64 %. Це свідчить про високу точність вимірювального інструменту при визначенні m і d , акуратності проведення експериментів і зниження похибок за рахунок використання методів теорії ймовірності та математичної статистики при обробці похибок випадкових величин – періоду коливань T .

Для розрахунку величини девіації [13] коливань реального фізичного маятника δ (рис. 6), доцільно порівняти параметри коливань досліджуваного фізичного маятника з коливаннями математичного маятника, який є маятником з, практично, ідеальними параметрами.

Період коливань математичного маятника розраховується за формулою [5]:

$$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{d}{g}}$$

і залежить лише від довжини підвісу d .

На основі цієї формули легко визначити значення T_m , в залежності від довжини підвісу d . Дані представлені в табл. 8.

Таблиця 8 – Показники T_m математичного маятника

$d, \text{м}$	$T_m, \text{с}$
0.523	1.451
0.415	1.292
0.326	1.145
0.224	0.949
0.123	0.704

При підстановці отриманих даних T_m в формулу (1), визначимо момент інерції I_m для експериментів 1 і 2. Дані зведені до табл. 9.

Таблиця 9 – Показники I_m математичного маятника

Експеримент 1		Експеримент 2	
$d, \text{м}$	$I_m, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$m, \text{кг}$	$I_m, \text{кг}\cdot\text{м}^2$
0.523	0.135	0.225	0.062
0.415	0.085	0.447	0.122
0.326	0.053	0.667	0.182
0.224	0.025	0.882	0.241
0.123	0.007	1.103	0.302

Величину девіації моменту інерції досліджуваного фізичного маятника відносно параметрів коливань ідеального математичного маятника визначається за формулою:

$$\delta = \frac{I - I_m}{I_m} \cdot 100\%.$$

Величина девіації δ зведена в табл. 10.

Таблиця 10 – Величина девіації δ

Експеримент 1	Експеримент 2
$\delta, \%$	$\delta, \%$
-9.71	-9.01
-5.97	-6.20
-4.76	-4.15
17.00	15.17
73.94	74.76

З даних табл. 10 очевидно, що величина девіації δ суттєво перевищує відносну похибку δ_r , що свідчить про те, що порівнювати параметри фізичного і математичного маятників не коректно, особливо при малих значеннях параметру d і великих значеннях параметру m . Фізичний маятник, володіючи реальною масою, зміщеним центром маси вздовж вісі підвісу, зміщеним центром маси відносно вісі підвісу, підвищеним впливом дестабілізуючих факторів на коливання маятника (розкручування маятника, підвищене затухання коливаний, парусність і т.д.) містить шукані параметри, які досить сильно відрізняються від ідеальних.

Висновок. Проведені дослідження дозволяють оцінити вплив параметрів зміни маси маятника m , довжини підвісу маятника d і розташування центру маси на момент інерції I фізичного маятника. Момент інерції I безпосередньо впливає на спроможність зміни швидкості руху об'єкту, зупинки руху об'єкту, виведення об'єкту зі стану спокою.

Отримані результати фізичних натурних досліджень дозволяють надати рекомендації щодо зміни конструкції реального об'єкту – робота школи Лінкольн Парк. Рекомендації дозволяють прибрати негативне явище – розгойдування робота на перекладині, що дозволить більш якісно виконувати відповідне завдання на практиці.

До таких рекомендацій відноситься наступне [2]:

1. Максимально обтяжити конструкцію для збільшення маси m .
2. Максимально подовжити механічні важелі робота для збільшення відстані d .
3. Максимально опустити вниз центр ваги робота.

Надані рекомендації для покращення параметрів реального об'єкту – робота, з одного боку, можуть бути не виконувани через конструктивні обмеження розмірів робота, а також через можливі протиріччя з виконанням інших завдань робота, коли рекомендації входять в протиріччя по максимальному збільшенню параметрів m і d . З іншого боку, при даних дослідженнях, було внесене обмеження, коли вісь підвісу, центр маси і центр коливаний знаходяться на одній лінії. Це, безумовно, в реальності не так.

В реальному об'єкті центр маси, якщо розглядати в загальному випадку, не знаходиться на одній прямій з віссю підвісу і центром коливання. Тому необхідно додатково вивчити питання впливу кількісного зміщення точки центру маси відносно прямої:

вісь підвісу - центр коливання маятника.

Для цього доцільно розглянути формулу Штейнера [5]:

$$I = I_0 + md^2,$$

де I_0 – момент інерції відносно вісі, яка проходить через центр маси об'єкту.

Додаткові дослідження в цій частині, скоріше всього, покажуть, що центр маси об'єкта необхідно максимально наблизити до лінії:

вісь підвісу - центр коливання маятника.

Подальші дослідження повинні бути направлені на визначення кількісного значення моменту сили M , яка виводить зі стану спокою фізичний маятник.

В даних дослідженнях, за замовченням, приймався вираз:

$$M = kI,$$

де k – коефіцієнт пропорційності, що дорівнює кутовому прискоренню ε .

В широких межах ε не є величиною постійною, але в даних дослідженнях ε був прийнятий як константа. Тому момент інерції I був прийнятий прямопропорційним моменту сили M , і задача розглядалась як крайова – чим більше, тим краще (чим менше, тим гірше).

Однак, за визначенням, момент сили розраховується за формулою [14]:

$$M = Fl, \tag{5}$$

де F – сила, яка прикладена до центру коливаний, направлена по дотичній відносно вісі підвісу;
 l – плече, яке відображає відстань від вісі підвісу до центру коливаний d' .

Спиралючись на формулу (5), стає очевидним, що для зменшення моменту сили M , яка спроможна вивести маятник зі стану спокою, необхідно зменшувати l , а значить зменшувати d .

Однозначно формується екстремум, вивчення якого надасть можливість визначити оптимальне співвідношення між l та d для вирішення оптимізаційної задачі. Вирішення вказаної оптимізаційної задачі буде сприяти наближенню аналітичних досліджень, прийнятих для конструкції заміщення, до реального об'єкту.

Список літератури:

1. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні: підруч. для студентів вищ. техн. навч. закл., які навчаються за спец. 015 «Проф. освіта. Машинобудування»: присвяч. 100-річчю Ветрова Ю. О., ректора Київ. інж.-буд. ін-ту, зав. каф. буд. машин / Л.Є. Пелевін, К.І. Почка, О.М. Гаркавенко та ін.; М-во освіти і науки України, Київ. нац. ун-т буд-ва і архітектури. – Київ: ТОВ НВП «Інтерсервіс», 2016. – 258 с.
2. Мигущенко Р.П. Дослідження параметрів коливального об'єкту / Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек, К.Д. Коцкало, О.М. Фіногенов // Матеріали Міжнародної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харків, 2024.
3. Мигущенко Р.П. Анализ вопросов построения математических моделей дизельных агрегатов и компенсирования перекрестных связей / Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек, Д.О. Коваленко // Вісник НТУ «ХП». – 2004. – № 47. С. 87 – 91.
4. Кучерук І.М. Загальний курс фізики: у 3-х т. / Т.І. Механіка, молекулярна фізика і термодинаміка. – І. М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик. – Київ : Техніка, 2006, 536 с.
5. Фізика. Лабораторний практикум: навч. посіб.: / Т.М. Шелест, ОМ. Андреев, Т.І. Храмова та ін. – Дніпро: Середняк Т.К., 2023. – 304 с.
6. Загальна фізика. Лабораторний практикум: навч. посіб.: у 3 ч. Ч. 1: Класична механіка. Термодинаміка і статистична фізика. Електрика та магнетизм / А.О. Мамалуй, О.П. Сук, М.В. Лебедева, Т.І. Храмова, та ін.; за заг. ред. А.О. Мамалуй. – Харків: Підручник НТУ «ХП», 2012. – 352 с.
7. Загальна фізика. Лабораторний практикум: навч. посіб.: у 3 ч. Ч. 2: Коливання та хвилі. Оптика / А.О. Мамалуй, В.В. Пилипенко, К.Т. Лемешевська, та ін.; за заг. ред. А.О. Мамалуй. – Харків: Підручник НТУ «ХП», 2012. с. – 216 с.
8. Гапченко С.Д. Механіка. Навчально-методичний посібник для самостійної роботи з дисципліни «Фізика» / Гапченко С.Д. – Харків : ТОВ «В СПРАВИ», 2021. – 116 с.
9. Мигущенко Р.П. Елементи контролю та діагностики стану вібраційних об'єктів: монографія / Р.П. Мигущенко. – Х.: Вид-во «Підручник НТУ «ХП», 2014. – 224 с.
10. Чинков В. М. Основи метрології та вимірювальної техніки: навч. посібн., 2-е вид., перероб. і доп. / В. М. Чинков. – Х.: НТУ «ХП», 2005. – 524 с.
11. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для ВУЗов / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 2003. – 479 с.
12. Мигущенко Р. П. Исследование точностных характеристик измерительного преобразователя диагностической установки дизельных агрегатов / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків. – 2003. – № 5. – С. 84 – 85.
13. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / за ред. В.С. Білецького. – Д.: Донбас, 2004. – Т. 1: – 640 с.
14. Цасюк В.В. Теоретична механіка: Навчальний посібник. – К.: ЦУЛ, 2004. – 402 с.

Bibliography (transliterated):

1. Syntez robototekhnichnykh system v mashynobuduvanni: pidruch. dlia studentiv vyshch. tekhn. navch. zakl., yaki navchaiutsia za spets. 015 «Prof. osvita. Mashynobuduvannia»: prysviach. 100-richchiu Vietrova Yu. O., rektora Kyiv. inzh.-bud. in-tu, zav. kaf. bud. mashyn / L.Ie. Pelevin, K.I. Pochka, O.M. Harkavenko ta in.; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Kyiv. nats. un-t bud-va i arkhitektury. – Kyiv: TOV NVP «Interservis», 2016. – 258 s.
2. Myhushchenko R.P. Doslidzhennia parametriv kolyvalnoho obiekta / R.P. Myhushchenko, O.Iu. Kropachek, K.D. Kotskalo, O.M. Finohenov // Materialy Mizhnarodnoi konferentsii «Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia». – Kharkiv, 2024.
3. Myhushchenko R.P. Analiz voprosov postroeniya matematycheskykh modelei dyzelnykh ahrehatov y kompensyrovaniya perekrestnykh svyazei / R.P. Myhushchenko, O.Iu. Kropachek, D.O. Kovalenko // Visnyk NTU «KhPI». – 2004. – № 47. S. 87 – 91.
4. Kucheruk I.M. Zahalnyi kurs fizyky: u 3-kh t. / T.I. Mekhanika, molekuliarna fizyka i termodynamika. – I.M. Kucheruk, I.T. Horbachuk, P.P. Lutsyk. – Kyiv: Tekhnika, 2006, 536 c.
5. Fyzyka. Laboratornyi praktykum: navch. posib.: / T.M. Shelest, O.M. Andreiev, T.I. Khramova ta in. – Dnipro: Seredniak T.K., 2023. – 304 s.
6. Zahalna fizyka. Laboratornyi praktykum: navch. posib.: u 3 ch. Ch. 1: Klasychna mekhanika. Termodynamika i statystychna fizyka. Elektryka ta mahnyetizm / A.O. Mamalui, O.P. Suk, M.V. Lebedieva, T.I. Khramova, ta in.; za zah. red. A.O. Mamalui. – Kharkiv: Pidruchnyk NTU «KhPI», 2012. – 352 s.
7. Zahalna fizyka. Laboratornyi praktykum: navch. posib.: u 3 ch. Ch. 2: Kolyvannia ta khvyli. Optyka / A.O. Mamalui, V.V. Pylypenko, K.T. Lemeshevska, ta in.; za zah. red. A.O. Mamalui. – Kharkiv: Pidruchnyk NTU «KhPI», 2012. s. – 216 s.
8. Napochenko S.D. Mekhanika. Navchalno-metodychnyi posibnyk dlia samostiinoi roboty z dystsypliny «Fizyka» / Napochenko S.D. □ Kharkiv: TOV «V SPRAVI», 2021. – 116 s.
9. Myhushchenko R.P. Elementy kontroliu ta diahnostryky stanu vibratsiinykh obiektiv: monohrafiia / R.P. Myhushchenko. – Kh.: Vyd-vo «Pidruchnyk NTU «KhPI», 2014. – 224 s.
10. Chynkov V.M. Osnovy metrolohii ta vymiriuvalnoi tekhniky: navch. posibn., 2-e vyd., pererob. i dop. / V.M. Chynkov. – Kh.: NTU «KhPI», 2005. – 524 s.

11. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics: Textbook. manual for universities / V.E. Gmurman. – M.: Higher School, 2003. – 479 s.
12. Myhushchenko R.P. Yssledovanye tochnostnykh kharakterystyk yzmyrytelnoho preobrazovatelia dyahnostycheskoi ustanovky dyzelnykh ahrehatov / R.P. Myhushchenko, O.Yu. Kropachek // Skhidno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohii. – Kharkiv. – 2003. – № 5. – S. 84 – 85.
13. Mala hirnycha entsyklopediia: u 3 t. / za red. V.S. Biletskoho. – D.: Donbas, 2004. – Т. 1: – 640 s.
14. Tsasiuk V.V. Teoretychna mekhanika: Navchalnyi posibnyk. – K.: TsUL, 2004. – 402 s.

Поступила (received) 05.08.2024

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мигущенко Руслан Павлович (Mygushchenko Ruslan) – доктор технічних наук, професор, проректор НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-099-40-22-885; e-mail: mrp1@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3287-9772.

Кропачек Ольга Юрївна (Kropachek Olga) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичних основ електротехніки НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-067-79-5678-0; e-mail: kropachek@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5899-0252.

Балєв Володимир Миколайович (Balev Volodymyr) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-050-402-69-97; e-mail: bvnbvn@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6803-4739.

Мигущенко Катерина Русланівна (Mygushchenko Kateryna) – учениця Lincoln Park High School, м. Чикаго; тел.: +38-099-484-32-88; e-mail: katyamig06@gmail.com, ORCID: 0009-0009-5928-6975.

Фіногенов Олексій Михайлович (Finohenov Oleksii) – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: +38-066-821-60-21; e-mail: alexey.finohenov@gmail.com, ORCID: 0009-0008-6707-8511.

КЛИМЕНКО С. А., МАНОХІН А. С., КЛИМЕНКО С. Ан., ЧУМАК А. О., КОПЕЙКІНА М. Ю., МЕЛЬНІЙЧУК Ю. О.

СИЛОВІ ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБКИ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ ІНСТРУМЕНТАМИ, ОСНАЩЕНИМИ PcbN груп ВН, ВЛ

Анотація. Проведений комплекс досліджень з вивчення силових особливостей обробки загартованої сталі інструментом, оснащеним PcbN групи ВН, отриманими з вихідних порошків cBN з покриттям зі сполук Ti та без покриття, а також PcbN групи ВЛ. Визначені особливості процесу обробки показали, що значний вплив на величини складових сили різання має зношування різального інструменту – під час різання зі швидкістю 350 м/хв. процес обробки інструментом з PcbN групи ВН, отриманим з порошків з покриттям, у порівнянні з обробкою інструментом з PcbN групи ВН, отриманим з порошків без покриттям, характеризується на 15–20% меншою величиною складових сили різання. При швидкісній обробці в умовах динамічних ударних навантажень інструмент, оснащений PcbN групи ВН, отриманим з порошків cBN з покриттям, на відміну від різців з PcbN групи ВЛ зберігає працездатність при подачі 0,38 мм/об – зазвичай робота з таких умов призводить до крихкого руйнування інструменту, оснащеного PcbN групи ВЛ, за рахунок сколювання окремих фрагментів різальної кромки з боку задньої поверхні, а на інструменті, оснащеному PcbN (5% Ti), спостерігаються окремі сліди мікрівикришування. Отримані результати досліджень свідчать про можливість використання інструментів, оснащених PcbN групи ВН, спечених з порошків cBN з покриттям, в умовах швидкісного різання, що характерно для інструментів з PcbN групи ВЛ, але при наявності динамічного навантаження.

Ключові слова: PcbN груп ВН, ВЛ; покриття; складові сили різання; загартована сталь; знос інструменту.

KLYMENKO S. A., MANOKHIN A. S., KLYMENKO S. An., CHUMAK A. O., KOPEIKINA M. Yu., MELNIYCHUK Yu. O.
STRENGTH FEATURES OF HARDENED STEEL TREATMENT BY TOOLS EQUIPPED WITH PcbN OF ВН, ВЛ GROUP

Resume . A set of studies has been carried out to investigate the power features of machining hardened steel with a tool equipped with PcbN of the VN group, obtained from the initial cBN powders coated with Ti and uncoated compounds, as well as PcbN of the BL group. The determined features of the machining process have shown that the wear of the cutting tool has a significant impact on the value of the cutting force components – when cutting at a speed of 350 m/min, the machining process with a tool of PcbN group ВН obtained from coated powders, compared to machining with a tool of PcbN group ВН obtained from uncoated powders, is characterized by a 15–20% lower value of the cutting force components. During high-speed machining under dynamic shock loads, a tool equipped with ВН PcbN obtained from coated cBN powders, unlike cutters made of ВЛ PcbN, retains its performance at a feed rate of 0,38 mm/rev – usually, working under such conditions leads to brittle fracture of the tool equipped with PcbN of group ВЛ due to chipping of individual fragments of the cutting edge from the back surface, and on the tool equipped with PcbN (5% Ti), there are separate traces of microchipping. The obtained research results indicate the possibility of using tools equipped with PcbN of group ВН, sintered from coated cBN powders, under high-speed cutting conditions, which is typical for tools made of PcbN of group ВЛ, but in the presence of dynamic loading.

Keywords: PcbN of ВН, ВЛ groups; coating; components of cutting force; hardened steel; tool wear.

Вступ. Вдосконалення технологій механічної обробки виробів із сучасних конструкційних матеріалів пов'язано з підвищенням продуктивності та зниженням вартості обробки, що обумовлює необхідність створення різальних інструментів з використанням високоефективних композитів інструментального призначення, таких як надтверді матеріали (PcbN) на основі кубічного нітриду бору (cBN) [1]. На теперішній час, відповідно до стандарту ISO 513-2014, композити на основі cBN діляться на три групи: – керамо-матричні композити зі змістом 45–65% cBN у зв'язці на основі керамічних сполук Ti, C, N, B, Al, O (група ВЛ); – зі змістом 70–95% cBN, переважно у металевій зв'язці, на основі Co і Ni (група ВН); – з захисним покриттям (група ВС).

Фізико-механічні та експлуатаційні властивості матеріалів різальних інструментів багато у чому визначаються їх хімічним складом та структурою. При цьому дуже важливим є забезпечення розподілу надтвердих компонентів та елементів матриці, яка виконує роль зв'язки.

В різальних елементах на основі cBN, які використовуються для обробки загартованої сталі необхідно забезпечити високоомогенну мікроструктуру з низьким ступенем агломерації зерен cBN-cBN, що достатньо важко забезпечити оскільки методи механічного змішування завжди призводять до того, що деякі ділянки є неоднорідними за своєю природою [2]. Неоднорідна мікроструктура призводить до утворення ділянок, які або не містять сполучних добавок, або ділянок, де сполучні матеріали відокремлюються під час процесу спікання.

Одним з підходів, що дозволяє досягти рівномірного розподілу складових в структурі композитів, а також регулювати товщину прошарків зв'язки є попереднє нанесення на вихідні порошки надтвердих компонентів покриття, яке в процесі спікання матеріалу відіграє роль зв'язки, розподіленої на міжзеренних границях наповнювача.

Високу ефективність у якості покриттів довели сполуки Ti, а саме нітрид титану.

В [3] порошки cBN з покриттям TiN були отримані методом рідкофазного осадження. Зносостійкість різального інструменту зі створеного композиту PcbN приблизно в чотири рази більша, ніж у різального інструменту, виготовленого з використанням чистого порошку cBN.

В [4] також запропоновано використовувати порошки cBN із покриттям TiN, ширина межі розподілу – приблизно 50 нм. Мікроструктура композитів, виготовлених із порошків cBN, покритих TiN, є однорідною – TiN рівномірно розподілений у мікроструктурі. Автори відмічають підвищення твердості для композитів, отриманих із порошків з покриттям. Зразки, спечені з порошку cBN з покриттям, мають вищі значення міцності під час згинання, ніж зразки з порошку cBN без покриття.

Порівняльні дослідження ефективності інструментів, виготовлених з використанням порошку із покриттям, продемонстрували зниження інтенсивності їх зношування при високошвидкісному різанні загартованої сталі у порівнянні з інструментом, оснащеним композитами PcBN, отриманими з порошоків без покриттів [5].

Дослідження зносостійкості інструментів, виготовлених із композитів на основі cBN із покриттям TiN, продемонстрували кращу зносостійкість по задній поверхні та меншу шорсткість поверхні заготовки при точінні загартованої сталі.

У той же час, аналіз технічної літератури свідчить про відсутність досліджень параметрів контактної взаємодії у зоні різання, а саме досліджень навантаження на різальному інструменті з PcBN, спеченими з порошоків з покриттям, в різних умовах процесу різання загартованих сталей.

Мета дослідження. Вивчення складових сили різання під час точіння загартованої сталі в умовах стаціонарного різання і обробки з ударом та порівняння силових параметрів процесу різання для випадків використання інструментів, оснащених PcBN групи BH, спечених з вихідних порошоків з покриттям і без покриття, а також PcBN групи BL.

Методика. Покриття зі сполук Ti (кількість Ti – 3, 5 та 8 мас.% від маси порошку, склад покриття – TiN, TiB₂) наносилося на порошки cBN марки KM 14/10 з використанням йодотранспортної реакції при температурах (1200–1300) К. З порошоків з покриттям спечено композити PcBN (3% Ti), PcBN (5% Ti), PcBN (8% Ti) і виготовлено круглі пластини Ø 7 мм та товщиною 3,18 мм, які використані у різальному інструменті. Відповідно до стандарту ISO 513-2014, створений композит відноситься до групи BH. Для порівняння використано інструменти, оснащені різальними пластинами аналогічного формо-розміру з композитів, спечених з порошоків без покриття – PcBN групи BH «борсиніт» і PcBN групи BL (60% cBN-35% TiC-5% Al).

Дослідження виконані інструментом з механічним кріпленням різальних пластин під час точіння загартованої сталі ХВГ (56–58 HRC) в умовах стаціонарного різання та обробки з ударом. Сили різання вимірювалися динамометром УДМ-600 із АЦП ADA-1406 при частоті опитувань по кожному каналу 1 кГц для різання без удару та 100 кГц при нестаціонарній обробці. Кожен прохід здійснювався гострими інструментами.

Експериментальні результати. На рис. 1 показаний приклад діаграми складових сили різання, зафіксованих за час одного проходу інструментом, оснащеним PcBN (3% Ti), при швидкостях різання 110 і 220 м/хв.

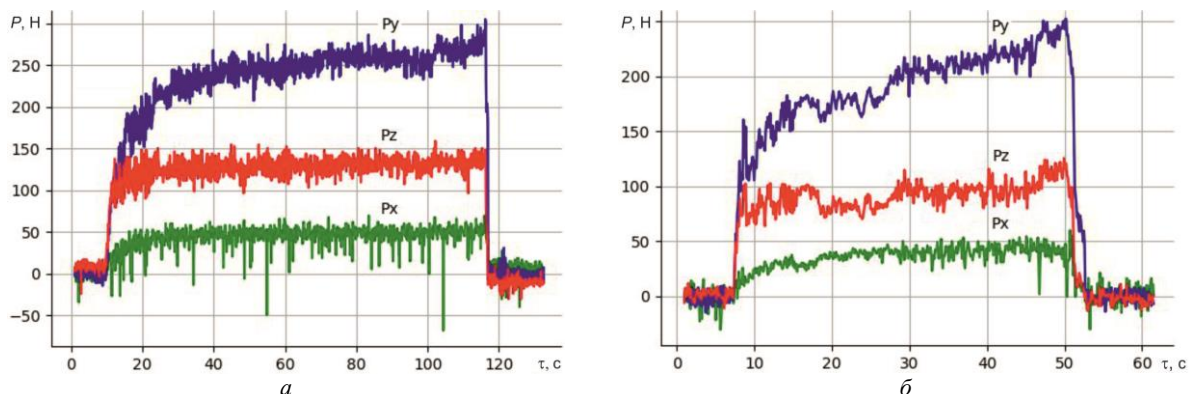


Рис. 1. Складові сили різання при обробці інструментом з PcBN (3% Ti) при $v = 110$ м/хв. (а) і $v = 220$ м/хв. (б)

Порівняльна характеристика трибологічних властивостей композитів, якими оснащені інструменти, може бути отримана при аналізі діаграми на рис. 2, на якій наведено величини складових сили різання для інструментів із PcBN (3% Ti) і PcBN «борсиніт» при швидкості різання $v = 110$ м/хв, визначені після повного врізання інструменту (третья секунда різання), коли на робочих ділянках інструментів ще не сформовано початкові зони зношування.

Користуючись уявленнями щодо впливу коефіцієнту тертя на силу різання, можна дати оцінку величини даного параметра для зазначених умов обробки. З урахуванням виразу для апроксимації даних, отриманих при моделюванні контактної взаємодії в зоні різання загартованої сталі інструментом, оснащеним PcBN – $P_z = 79,17 + 138,9f$, наведеного в [6], визначимо коефіцієнти тертя для PcBN «борсиніт» і PcBN (3% Ti) – $f = 0,34$ та $f = 0,21$ відповідно. Деяко нижчі значення складових сили різання і коефіцієнта тертя у створеного композиту з найбільшою ймовірністю обумовлені наявністю в їх складі фаз TiN і TiB₂, окислення яких відбувається при температурах 400–700 °С і супроводжується формуванням TiO₂ і V₂O₃, що володіють антифрикційними властивостями і є твердими змазками.

Зі збільшенням швидкості різання до 220 м/хв. значення коефіцієнту тертя для обох інструментів з PcBN становить вже $f = 0,16–0,18$. Низьке (менше 0,20) значення коефіцієнту тертя пояснюється тим, що при високошвидкісній обробці загартованої сталі на контактній ділянці стружка-інструмент з PcBN частково має місце тертя в умовах наявності рідкої фази [7]. Даний фактор має визначальний вплив на параметри процесу різання, вплив трибологічних властивостей конкретного інструментального матеріалу в даному випадку обмежений.

Зазначене пояснює близькі значення величин сил різання (рис. 3), що спостерігаються вже на 30-й секунді обробки для всіх досліджуваних композитів. Враховуючи значення довірчих інтервалів ($P_z = \pm 12$ Н, $P_y = \pm 14$ Н), можна зробити висновок, що вплив трибологічних властивостей матеріалу інструменту на сили різання при високих швидкостях різання і після появи початкового зносу в умовах даного експерименту статистично не значимий.

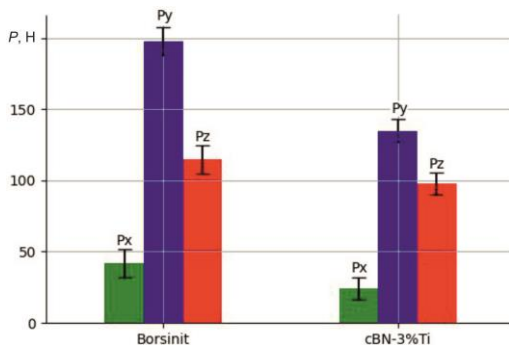


Рис. 2. Складові сили різання при обробці інструментами з РсВN(с) (3% Ti) и РсВN «борсиніт» у початковий момент різання ($v = 110$ м/хв.)

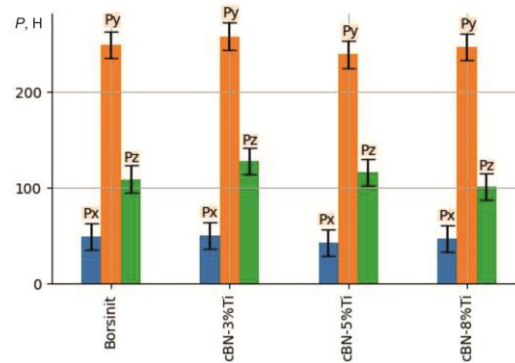


Рис. 3 – Складові сили різання при обробці інструментами, оснащеними РсВN «борсиніт», РсВN (3% Ti), РсВN (5% Ti) РсВN (8% Ti) при 220 м/хв.

Додатково проведено тестування інструментів зі швидкістю різання 350 м/хв. ($t = 0,2$ мм, $S = 0,1$ мм/об). У цьому випадку інтенсивне зношування інструменту призводить до зростання складових сили різання, а нерівномірне зношування інструменту з РсВN «борсиніт» вже після 60 с різання обумовлює істотно вищі (на 15–20%, рис. 4) значення складових сили різання в порівнянні з інструментом, оснащеним РсВN (5% Ti).

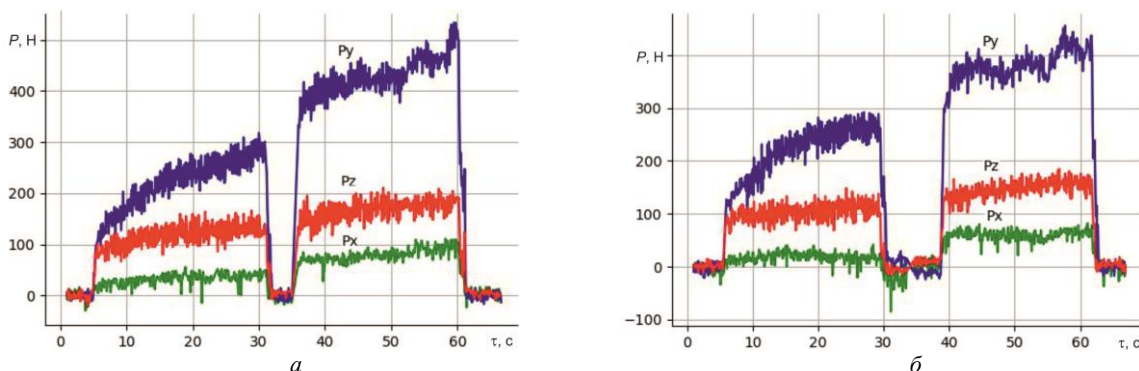
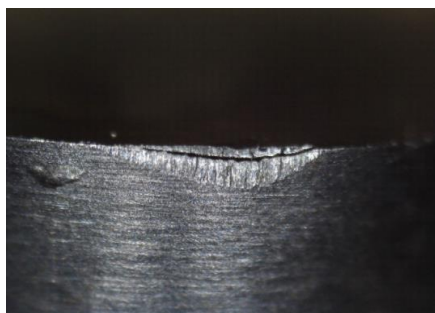
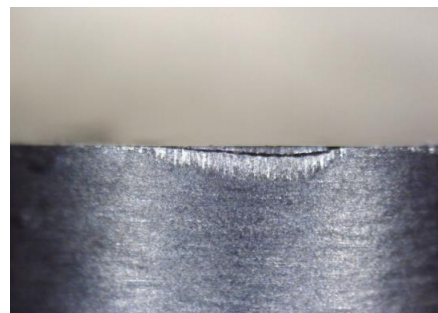


Рис. 4 – Складові сили різання при обробці інструментами, оснащеними РсВN «борсиніт» (а) та РсВN (5% Ti) (б) ($v = 350$ м/хв. $t = 0,2$ мм, $S = 0,1$ мм/об)

Контактні ділянки інструментів, оснащених РсВN «борсиніт» і РсВN, отриманих з порошків з покриттям, після різання протягом 1 хв. 30 с при швидкості різання $v = 350$ м/хв. представлений на рис. 5. Максимальна величина фаски зносу на задній поверхні інструментів дорівнює 0,24 і 0,2 мм відповідно, що підтверджує більш високій опір зношуванню, характерний для інструментів, оснащених РсВN, отриманим з порошків з покриттям, в умовах високошвидкісного різання.



а



б

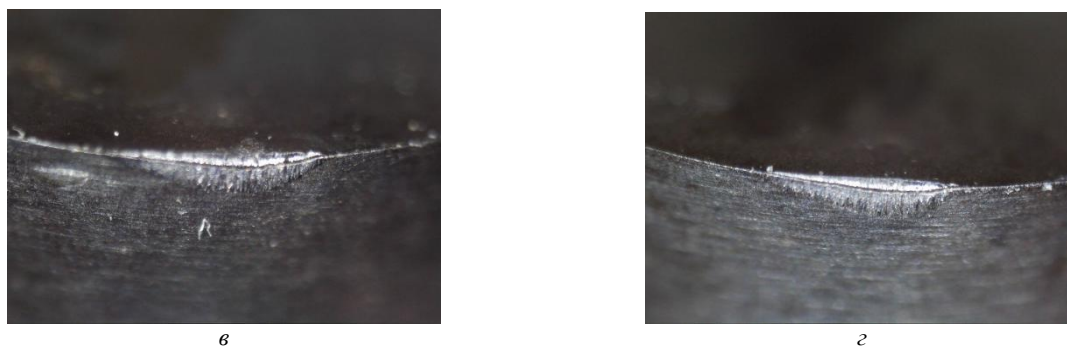


Рис. 5 – Контактні ділянки інструментів, оснащених РсВN «борсиніт» (а), РсВN (3% Тi) (б), РсВN (5% Тi) (в), РсВN (8% Тi) (г), після обробки при $v = 350$ м/хв. $t = 0,2$ мм, $S = 0,1$ мм/об

Сили різання в умовах динамічного навантаження інструментів розглядалися при обробці інструментами, оснащеними РсВN, отриманими з порошків з покриттям, і РсВN групи BL. Вивчався вплив динамічних імпульсних навантажень на характеристики сигналів, що відповідають складовим силам різання. У цих умовах ймовірність руйнування інструменту з пластинами із композиту РсВN групи BL дуже висока, тому для зміцнення інструменту на його різальній кромці виконувалася фаска шириною 0,2 мм і переднім кутом -20° . Зовнішній вигляд імпульсів складових сил різання інструментом з такою геометрією при точінні з ударом ($v = 220$ м/хв.) показаний на фрагменті діаграми на рис. 6.

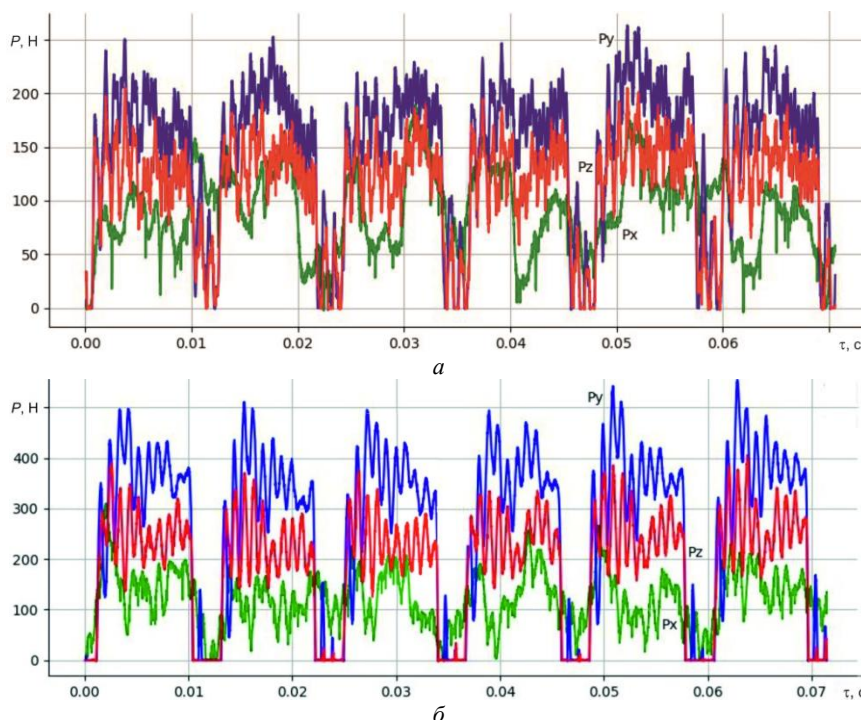


Рис. 6 – Сили різання при обробці різцем із композитом РсВN (5% Тi) при $S = 0,38$ мм/об (а), $S = 0,1$ мм/об (б)

Як показали тести, обробка з подачею 0,10 мм/об, що супроводжується імпульсами сил Pz і Py амплітудою до 200, 250 Н відбувається без руйнування зміцнених інструментів. Збільшення подачі до $S = 0,38$ мм/об зі зростанням амплітуди сил до 400, 550 Н викликає крихке руйнування інструменту, оснащеного РсВN-BL – з'являються сколи окремих фрагментів різальної кромки з боку задньої поверхні (рис. 7, а), інструмент з РсВN (5% Тi) при цьому зберігає працездатність при наявності на контактній поверхні окремих слідів мікротріщин (рис. 7, б).

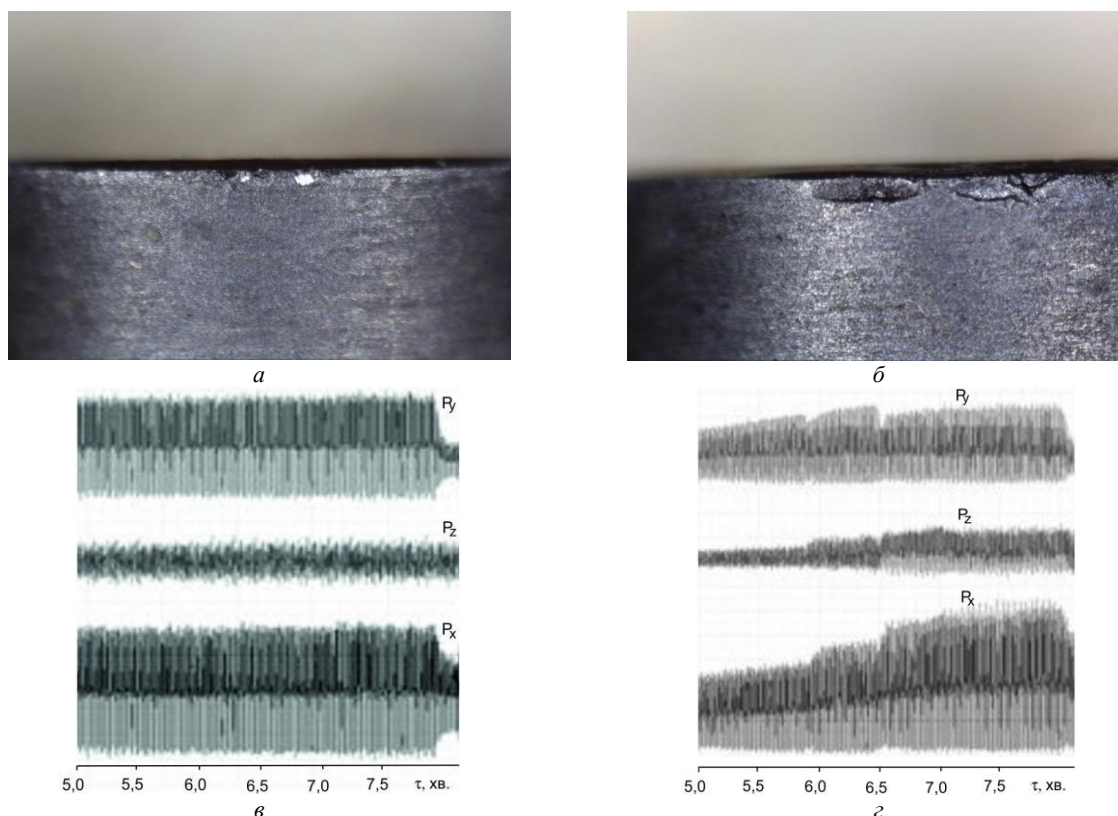


Рис. 7 – Контактні ділянки (а, б), загальний вигляд сигналів складових сили різання (в, з): інструмент, оснащений PcBN (5% Ti) (а, в), оснащений PcBN BL (б, з), ($v = 220$ м/хв., $t = 0,2$ мм, $S = 0,38$ мм/об)

На діаграмах показаний загальний вигляд сигналів складових сили різання при обробці вказаними інструментами, у випадках коли різання супроводжується руйнуванням різальної кромки різця (рис. 7, в) і під час точіння інструментом, різальна кромка якого залишається цілою (рис. 7, з).

Висновки. Визначені особливості процесу обробки загартованих сталей інструментами, оснащеними PcBN груп ВН і ВЛ показали, що значний вплив на величині складових сили різання має зношування різального інструменту. Після 60 с різання зі швидкістю 350 м/хв. процес обробки інструментом з PcBN групи ВН, отриманим з порошків cBN з покриттям на основі сполук Ti, у порівнянні з обробкою інструментом з PcBN групи ВН «борсиніт», спеченим з порошків cBN без покриття, характеризується на 15–20% меншою величиною складових сили різання.

При швидкісній обробці в умовах динамічних ударних навантажень інструмент, оснащений PcBN групи ВН, отриманих з порошків cBN з покриттям, на відміну від різців з PcBN групи ВЛ (зі зміцнювальною фаскою) зберігає працездатність при подачі 0,38 мм/об. При цьому робота в таких умовах призводить до крихкого руйнування інструменту, оснащеного PcBN групи ВЛ, за рахунок сколювання окремих фрагментів різальної кромки з боку задньої поверхні, а на інструменті, оснащеному PcBN (5% Ti), спостерігаються окремі сліди мікрокришування.

Отримані результати досліджень свідчать про можливість використання інструментів, оснащених PcBN групи ВН, отриманих з порошків cBN з покриттям, в умовах високошвидкісного різання, що характерно для інструментів з PcBN групи ВЛ, але при наявності динамічного навантаження.

Список літератури:

1. Клименко, С. А. Высокопроизводительная чистовая лезвийная обработка деталей из сталей высокой твердости / С.А. Клименко, А.С. Манохин, М.Ю. Копейкина, С.Ан. Клименко, Ю.А. Мельничук, А.А. Чумак; под ред. С.А. Клименко. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2018. – 304 с.
2. Umer, M. A. A sol-gel route to nanocrystalline TiN coated cubic boron nitride particles // M. A. Umer, H. S. Park, D. J. Lee, H. J. Ryu, S. H. Hong // J. of Alloys and Compounds. – 2011. – 509(41). – P. 9764–9769.
3. Lee, Y.-S. Improving wear resistance of cBN-based cutting tools using TiN coating on cBN powder surface / Y.-S. Lee, T.-W. Kang, S.-W. Shin, D.-W. Kim // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2021. – № 631. – P. 127758.
4. Umer, M. A. Polycrystalline cubic boron nitride sintered compacts prepared from nanocrystalline TiN coated cBN powder / M. A. Umer, P. H. Sub, D. J. Lee, H. J. Ryu, S. H. Hong // Mat. Sci. and Eng: A. – 2012. – 552. – P. 151–156.
5. Манохін, А. С. Інструмент, виготовлений із порошків кубічного нітриду бору з CVD покриттям / А. С. Манохін, Ю. О. Мельничук, С. А. Клименко, М. П. Семенько, Г. А. Петасюк, А. Г. Филипович,

С. Ан. Клименко, Ю. Е. Рижов // Инструментальне матеріалознавство : зб. наук. праць. – К. : ІНМ НАН України, 2023. – Вип. 26. – С. 305–314.

6. Манохін, А. С. Вплив коефіцієнту тертя на параметри механіки контактної взаємодії у зоні різання загартованої сталі інструментом із PcBN / А. С. Манохін, С. А. Клименко, А. О. Чумак, Ю. Е. Рижов // Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті : мат. 24-го Міжнарод. наук.-техн. семінару, 26–27 березня 2024 р., м. Київ. – К. : АТМ України, 2024. – С.

7. Manokhin, A. S. Tribology of cutting by tools equipped with cBN-based PSHM /A. S. Manokhin, S. A. Klimenko, M. Yu. Kopeikina, S. An. Klimentko, V. V. Poshchupkin, M. M. Lyakhovitskii // J. Superhard Mat. – 2014. – Vol. 36, № 2. – P. 124–135.

References (transliterated):

1. Klymenko, S. A., Manokhin, A. S., Kopeikina, M. Yu., Klymenko, S. An., Melniychuk, Yu. A., Chumak, A. A. *Vysokoproizvoditel'naya chistovaya lezviynaya obrabotka detaley iz staley vysokoy tverdosti*. ISM im. V.N. Bakulya NAN Ukrainy. 304.

2. Umer, M. A. , Park, H. S. , Lee, D. J. , Ryu, H. J. , Hong, S. H. A sol–gel route to nanocrystalline TiN coated cubic boron nitride particles. (2011). *J. of Alloys and Compounds*. 509(41). 9764–9769.

3. Lee, Y.-S., Kang, T.-W. , Shin, S.-W., Kim, D.-W. (2021). Improving wear resistance of cBN-based cutting tools using TiN coating on cBN powder surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 631. 127758.

4. Umer, M. A., Sub, P. H., Lee, D. J., Ryu, H. J., Hong, S. H. (2012). Polycrystalline cubic boron nitride sintered compacts prepared from nanocrystalline TiN coated cBN powder. *Mat. Sci. and Eng: A*. 552. 151–156.

5. Manokhin, A. S., Melniychuk, Yu. O., Klymenko, S. A., Semen'ko, M. P., Petasyuk, F. A., Fylypovych, A. G., Klymenko, S. An., Ryzhov Yu/ E. (2023). Instrument, vygotovlenyy iz poroshkov kubichnogo natrylu boru z CVD pokryttyam. *Instrumental'ne materialoznavstvo*. 26. 305–314.

6. Manokhin, A. S., Klymenko, S. A., Chumak, A. A., Ryzhov, Yu. E. (2024). *Vplyv koefitsientu tertya na parametry mekhaniki kontaktnoi vzaemodii u zoni rizannya zagartovanoi stali instrumentom is PcBN*. Suchasni pytannya vyrobnytstva v promyslovosti ta na transporti : mat. 24 Mizhnarod. nauk.-tekhn. seminaru. АТМ України.

7. Manokhin, A. S., Klimentko, S. A., Kopeikina, M. Yu., Klimentko, S. An., Poshchupkin, V. V., Lyakhovitskii, M. M. (2014). Tribology of cutting by tools equipped with cBN-based PSHM. *J. Superhard Mat*. 36 (2), 124–135.

Відомості про авторів / Information About the Authors

Клименко Сергій Анатолійович (Klymenko Sergii) – член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, заступник директора Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України наукової роботи, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>. E-mail: atmu@meta.ua.

Манохін Андрій Сергійович (Manokhin Andrii) – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>. E-mail: the.manokhin@gmail.com

Клименко Сергій Анатолійович (Klymenko Serhii) – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, пр. Перемоги, 37, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>. E-mail: alcon1202@ukr.net

Чумак Анатолій Олександрович (Chumak Anatolii) – кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>. E-mail: chumak1826ar@gmail.com

Копейкіна Марина Юріївна (Kopeikina Maryna) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>. E-mail: atmu1@meta.ua

Мельнічук Юрій Олексійович (Melniychuk Yurii) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-4529-2775>. E-mail: en22@i.ua

ЯКОВЕНКО І.Е., ПЕРМЯКОВ О.А., ІЛЬІН Д.О., БАСОВА Є.В, ГОРБУЛИК В.І

ДО ПРОБЛЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДІЛЬНИЦІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ З ПОЛІСТИРОЛУ

Анотація. У роботі запропоновано укрупнену модель аналізу промислового виробництва з метою оцінки можливості та доцільності автоматизації існуючого виробничого процесу. Виявлено основні параметри об'єктів обробки, що впливають на ухвалення рішення щодо автоматизації процесу його виготовлення. На підставі аналізу конфігурації, геометричних параметрів, особливостей розташування складнопрофільних поверхонь деталей з полістиролу, а також аналізу їх технологічності зроблено висновок про можливість та доцільність автоматизації ділянки механічної обробки таких деталей. Особливу увагу було приділено аналізу існуючих технологічних процесів обробки типових деталей. В результаті аналізу було сформовано набір вимог до структури та параметрів нової автоматизованої технологічної системи, а також запропоновано новий технологічний процес обробки комплексу деталей. На підставі сформульованих вимог було обрано програмний тип та машинний рівень автоматизації технологічної системи, базовим елементом структури якого став робот-маніпулятор. Для обраного типу технологічної системи розроблено новий комплексний технологічний процес обробки комплексу деталей, який передбачає незначні зміни у конструкції деяких деталей, що не впливає на їхнє функціональне призначення. Для реалізації запропонованого технологічного процесу та сформульованих вимог до обладнання обрано конкретні основні елементи системи - робот-маніпулятор та силовий агрегат, а також ріжучий інструмент, який дозволяє проводити обробку практично всіх деталей комплексу без заміни в процесі роботи. Це дозволило запропонувати варіант автоматизованого робочого місця, оснащений двома робочими поворотними столами для встановлення заготовок. Запропонований варіант автоматизованої технологічної системи та її реалізація дозволили значно скоротити допоміжний час виконання механічних операцій, звільнити робітників високої кваліфікації та знизити собівартість виготовлення деталей.

YAKOVENKO I., PERMYAKOV O., ILIN D., BASOVA Ye., GORBULIK V.

ON THE ISSUE OF AUTOMATION OF THE SECTION OF MECHANICAL PROCESSING OF POLYSTYRENE PARTS

Abstract. The paper proposes a consolidated model of the analysis of industrial production in order to assess the possibility and expediency of automation of the existing production process. The main parameters of the processing objects, which affect the decision-making regarding the automation of the process of its manufacture, are revealed. Based on the analysis of the configuration, geometric parameters, features of the location of the complex profile surfaces of polystyrene parts, as well as the analysis of their manufacturability, a conclusion was made about the possibility and expediency of automating the area of mechanical processing of such parts. Special attention was paid to the analysis of existing technological processes of processing typical parts. As a result of the analysis, a set of requirements for the structure and parameters of the new automated technological system was formed, as well as a new technological process for processing a set of parts was proposed. On the basis of the formulated requirements, the software type and machine level of automation of the technological system were chosen, the basic element of which was the manipulator robot. For the selected type of technological system, a new complex technological process of processing a set of parts has been developed, which involves minor changes in the design of some parts, which does not affect their functional purpose. For the implementation of the proposed technological process and the formed requirements for the equipment, specific main elements of the system were chosen - a robot-manipulator and a power unit, as well as a cutting tool, which allows processing of almost all parts of the set without replacement during the work. This made it possible to offer an option of an automated workplace, equipped with two working rotary tables for setting workpieces. The proposed version of the automated technological system and its implementation made it possible to significantly reduce the auxiliary time of mechanical operations, release highly qualified workers and reduce the cost of manufacturing parts.

Вступ. Наразі основним напрямком розвитку машинобудівної промисловості є широке впровадження автоматизації технологічних процесів, зокрема, комплексної автоматизації робочих місць та виробництва загалом. Цьому сприяють сучасні наукові досягнення у галузі мехатроніки, розвитку обчислювальних комплексів та інтелектуальних систем, концепції ІНДУСТРІЯ 4.0. При впровадженні механізації та автоматизації на заводах основна увага приділяється електроніці, автоматизації контролю деталей та ширшому використанню верстатів з програмним управлінням, що сприяє виробництву якіснішої продукції, зниженню її собівартості, а також підвищенню продуктивності праці. На сучасному етапі розвитку автоматизованих систем управління технологічними процесами все більшої актуальності набуває використання в процесі виробництва роботизованих систем з числовим програмним управлінням, які дозволяють прискорити процес виготовлення деталей, зробити його більш точним та зручним. Тому технологічні процеси, які використовуються працівниками високої кваліфікації з ручним інструментом, необхідно змінювати на більш ефективні автоматизовані процеси з використанням сучасних роботизованих систем.

Такий підхід, за попередніми оцінками, має значно скоротити час виконання операцій, а також звільнити достатньо кваліфікованих працівників для вирішення інших завдань виробництва.

Мета дослідження. Виявити та проаналізувати особливості обробки складнопрофільних поверхонь різних деталей із полістиролу, можливості автоматизації процесу механічної обробки цих деталей та призначення ефективних засобів реалізації цього процесу.

Поставлена мета конкретизується у низці завдань:

1. Охарактеризувати та проаналізувати технічні характеристики конструкції складнопрофільних деталей, що підлягають механічній обробці.
2. Проаналізувати існуючі технологічні процеси, що застосовуються для обробки цих деталей.
3. Оцінити можливість автоматизації процесу обробки та вибрати найбільш ефективний варіант із можливих.
4. Розробити новий технологічний процес для автоматизованого оброблення комплексу деталей.
5. Сформулювати набір вимог до проєктованої автоматизованої технологічної системи та запропонувати обладнання, інструмент та технологічне оснащення для її реалізації.

Аналіз основних досягнень та літератури. У технічній літературі автоматизація сприймається як комплекс заходів для впровадження машин, механізмів, математичних моделей, програмного забезпечення у виробничі процеси.

Результат цих заходів – виконання значної частини технологічних операцій не людьми, а спеціальним устаткуванням [1], що дозволяє: скоротити час виготовлення, упаковки, сортування продукції; знизити вартість людської праці; швидше реалізувати складні технічні завдання та ін. У роботах [1,2] розглядається загальний підхід до проблем автоматизації виробничих процесів та методів вирішення цих проблем на підставі концентрації операцій, автоматизації процесів завантаження-вивантаження деталі, управління безпосередньо процесом обробки. Однак рекомендації мають досить загальний характер і відносяться в основному до масового та багатосерійного машинобудівного виробництва, яке побудовано в основному на використанні агрегатних верстатів, автоматичних ліній та робототехнічних комплексів на базі токарних та багатофункціональних верстатів механічної обробки.

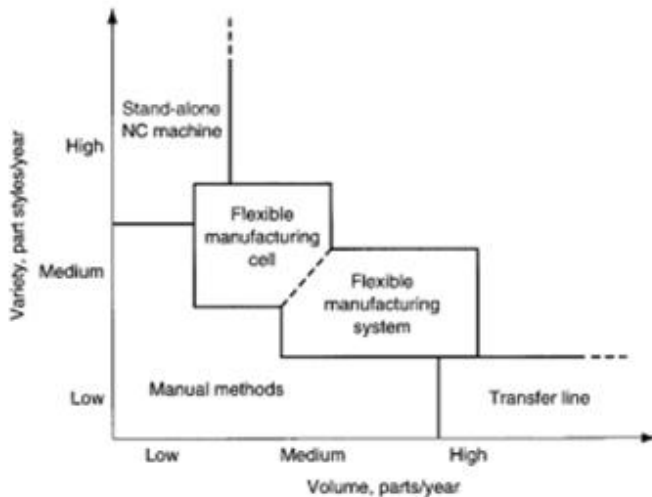


Рис. 1 – Типи автоматизації виробничих процесів[3]

робочих місць, кваліфікації персоналу, чисельності працюючих тощо). Пропонується розділити автоматизацію виробничих процесів п'ять рівнів: від автоматизації пристрою (автоматизація окремих виконавчих механізмів, контролерів, датчиків машини тощо) через рівні автоматизації машини – робочого місця (дільниці) – заводу до підприємства у цілому (рис.2).

У тій чи іншій мірі, питання та рекомендації, викладені у цих роботах, пов'язані практично з усіма галузями промисловості від заготівельного та хімічного виробництва до автомобільної та аерокосмічної промисловості, а також охороною здоров'я, сферою послуг, торгівлею та мають узагальнений характер, який відображає тенденції автоматизації сучасного суспільства.

У роботах [5, 6, 7] розглянуто цілі та загальні принципи автоматизації виробничих процесів. Основна роль процесі автоматизації відводиться технологічним процесам виготовлення деталей у машинобудуванні і контролю над ходом виконання технологічного процесу, причому охоплюється весь цикл виготовлення: обробка- контроль – транспортування. Однак, вплив конструктивних особливостей об'єктів обробки розглядається на рівні проектування технології та не зачіпає безпосередньо процес аналізу можливості та доцільності автоматизації виробничого процесу. Аналогічний підхід викладено у роботі [8], де основний акцент робиться на автоматизовані системи управління технологічними процесами, які представлені як складні системи та характеризуються наявністю елементів загальної спрямованості, системним характером реалізації алгоритмів обміну та обробки інформації, а також великою кількістю функціональних підсистем. Даний підхід можна ефективно використовувати на стадії технологічної підготовки повного циклу автоматизованого виробництва, але практично дуже складно застосувати його в умовах дрібносерійного неритмічного виробництва.

У роботі [9] пропонується методика вирішення прикладних завдань для підготовки технологічних процесів механічної обробки складнопрофільних поверхонь різного типу на верстатах з числовим програмним

Детальний аналіз типів автоматизації виробничих процесів наведено у фундаментальних роботах [3,4]. Процеси автоматизації промислового виробництва розділені на три основних типи: програмна автоматизація; гнучка автоматизація; жорстка автоматизація, які пов'язані з варіативністю і типами виробництва (рис.1).

Мається на увазі, що в індивідуальному виробництві на універсальному обладнанні автоматизація недоцільна. Також в роботах розглянуто приклади використання кожного типу у ретроспективі та сучасних виробничих умовах під впливом концепції «Індустрія 4.0» та досягнень мехатроніки. Особливу увагу приділено питанням роботизації технологічних процесів і, зокрема, процесам, коли робот маніпулює інструментом під час виконання обробки. Окремо розглянуто питання впливу автоматизації на людський фактор у виробничому процесі (зміна структури



Рис.2 – Рівні автоматизації

управлінням, які актуальні при обробці деталей профільних з'єднань з високою точністю. Однак така методика не зовсім може бути застосовна при проектуванні автоматизованих технологічних систем більш широкого профілю (не обов'язково обробка на верстатах з ЧПУ) і не враховує властивостей полістиролу.

У роботах [10, 11] розглянуто процес структурно-параметричного синтезу автоматизованих систем механообробки з жорсткою схемою виконання технологічного процесу (агрегатні верстати та автоматичні лінії), що не зовсім відповідає можливості використання цього підходу для дрібносерійного виробництва габаритних деталей.

У статтях [12,13] розглядається необхідність створення автономної моделі розумної фабрики виходячи з принципів Індустрії 4.0. Ця модель представляє автономну виробничу систему, що об'єднує в одне ціле всі складові виробництва, такі як машини, вантажно-розвантажувальні роботи та обладнання, склади тощо, а також людські ресурси та інформаційні потоки. Виробнича система не керується централізовано, але кожен агрегат має свою власну систему управління та спілкується з іншими за принципом IoT. Запропонована модель носить укрупнений характер та описує вже готові технічні рішення, без розшифрування факторів, які до цих рішень призвели.

У статті [14] висвітлюється перспектива використання цифрової інтеграції інформації про життєвий цикл товару. Особливу увагу було приділено визначенню ролі цифрових 3D моделей. Запропоноване рішення може підвищити ефективність ланцюга поставок та планування за рахунок постійного надання інформації про кожен етап життєвого циклу продукту. Однак, це дослідження стосується в основному автоматизації підприємства у цілому, та не розглядає можливість та доцільність автоматизацій на рівні дільниці.

Розширення світового попиту на деталі з пластмас та підвищення їх естетичних та функціональних властивостей за рахунок механічної обробки розглянуто у звіті [15].

Питання особливостей механічної обробки деталей із пластмас і, зокрема, з полістиролу розглянуті у роботах [16,17]. У цих роботах проаналізовано фізику процесів механічної обробки пластмас та надано рекомендації щодо конструкцій різального інструменту та параметрів процесу різання такого матеріалу.

Матеріали дослідження.

Як зазначалося вище, автоматизація промислового механообробного виробництва може виконуватися за кількома напрямками від створення спеціального обладнання з жорстким кінематичним зв'язком (типу агрегатних верстатів) до розробки робото-технічних комплексів на базі багатофункціональних верстатів з ЧПУ, оснащених роботами, або на базі тільки роботів маніпуляторів. У дрібносерійному виробництві необхідно знаходити компроміс між гнучкістю та продуктивністю обладнання з урахуванням спрямованості та характеристиками об'єктів обробки.

Автори пропонують розглядати процес проектування автоматизованих ділянок серійного виробництва з урахуванням не тільки технологічних процесів виготовлення деталей, а й факторів, які суттєво впливають на структуру цих технологічних процесів та, зрештою, на можливість та способи автоматизації виробництва. До таких факторів безумовно належать різні характеристики об'єкта обробки, такі як: серійність випуску, технологічність (матеріал деталі та його характеристики з погляду оброблюваності, габарити деталі, форма та геометричні параметри оброблюваних поверхонь, їх розташування та ін.). Причому всі ці показники необхідно розглядати в комплексі, з одного боку для формування набору вимог, які повинна забезпечувати створювана автоматизована технологічна система, а з іншого, як систему обмежень при прийнятті тих чи інших технічних рішень автоматизації виробництва. Ці вимоги та обмеження дозволяють скоротити кількість варіантів, що розглядаються, в процесі синтезу компонувальних рішень автоматизованої технологічної системи, а також при виборі або проектуванні основного обладнання та засобів технологічного оснащення.

Процес вибору методу автоматизації та підбору (проектування за потреби) обладнання та технологічної оснастки для його реалізації можна представити у вигляді кількох етапів:

1. Аналіз існуючого виробничого процесу на підприємстві чи процесу, прийнятого як базовий під час створення нового виробництва: серійність виробництва; розміри партій деталей; періодичність замовлень; прогнозований життєвий цикл об'єктів обробки; інфраструктура підприємства тощо.
2. Аналіз об'єкта обробки: матеріал та його фізико-механічні властивості; габаритні розміри; геометричні параметри формованих поверхонь; технологічність виготовлення деталей; вимоги до якості, ергономіки, естетики деталей тощо.
3. Аналіз існуючого технологічного процесу або проектування нового маршрутного технологічного процесу з урахуванням проведеного на другому етапі аналізу об'єктів обробки.
4. Формування вимог та системи обмежень до проєктованої системи автоматизації ділянки (робочого місця) виробництва
5. Синтез варіантів автоматизованої технологічної системи, які здатні забезпечити сформовані вимоги та вписатись у задані обмеження.
6. Функціонально вартісний аналіз запропонованих варіантів та вибір найбільш ефективного з урахуванням можливостей підприємства, термінів реалізації, залучення інвесторів.

Як об'єкт дослідження за запропонованою методикою нами було обрано ділянку серійного виробництва з механічної обробки деталей різної конфігурації з полістиролу.

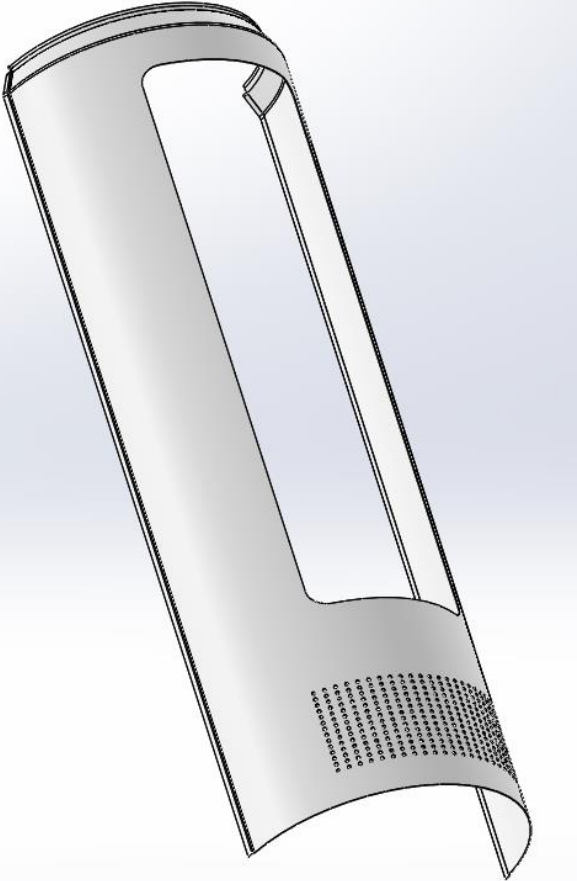
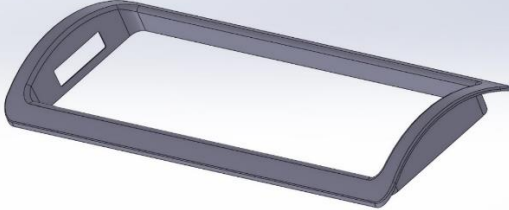
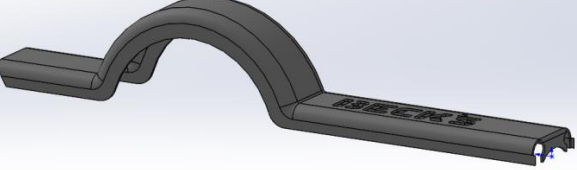
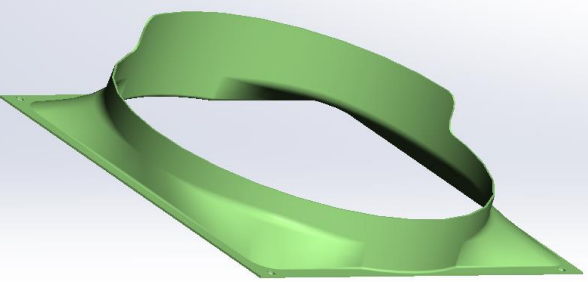
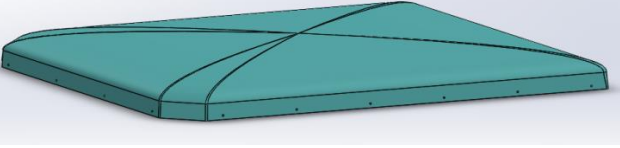
Мета даного дослідження полягала в аналізі можливості та доцільності автоматизації виробничої ділянки, розробки компоувальної схеми автоматизованої технологічної системи, якщо це можливо і доцільно, та способів її реалізації (вибір/проекування обладнання, інструменту, технологічного оснащення).

Основним напрямом діяльності підприємства, для якого ми виконували дослідження, є виготовлення на замовлення деталей із різних пластмас (формування з подальшою механічною обробкою).

На ділянці, що розглядається, в даний час обробляються різні деталі (об'єкти обробки) з пластмас (в основному полістирол), характерні представники яких представлені в таблиці 1.

Аналіз ринку виробів дозволив зробити висновок про потенційне зростання замовлень через дедалі поширеного застосування виробів із пластмаси [14] під час виготовлення пристроїв, машин і механізмів, що свідчить про доцільність автоматизації виробництва и підвищення його ефективності.

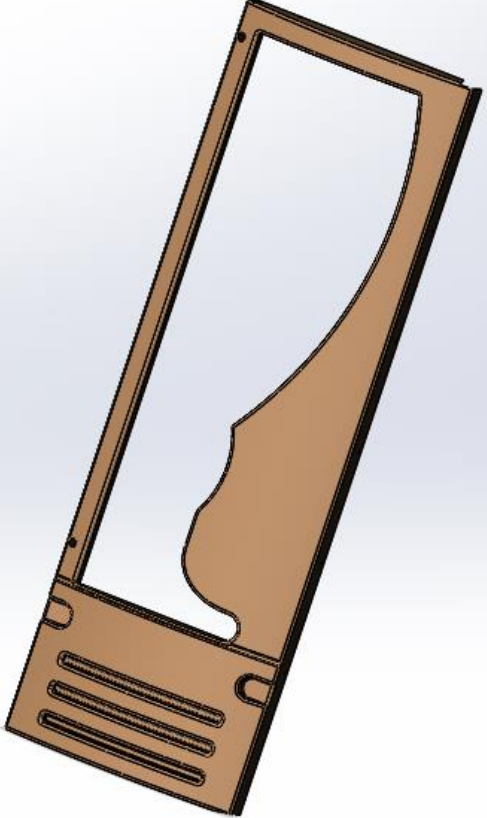
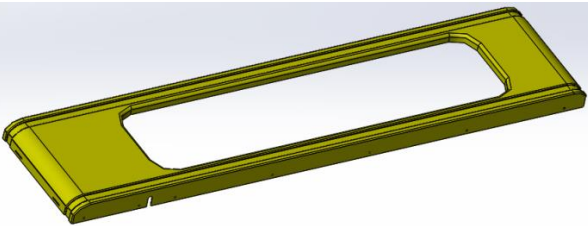
Таблиця 1 – Характерні представники деталей, які оброблюються на ділянці

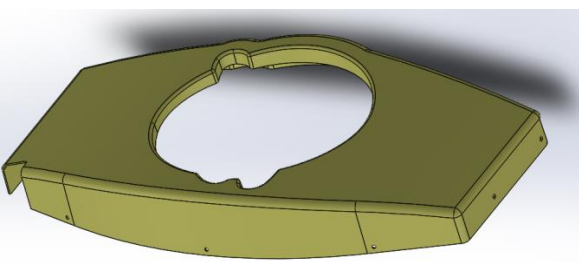
Об'єкт обробки та його характеристики	Об'єкт обробки та його характеристики
 <p>Панель передня та задня* Число сторін обробки – 4+ Габарити 2007x707x345 Параметри обробки: внутрішній контур вікна, зовнішній контур, 320 відп. $\phi 8$ (отвори розташовані рядами по 16 шт з кутовим кроком 5^0 діапазон розташування отворів 90^0), обробка напусків * Задня панель без вікна Товщина матеріалу 3мм</p>	 <p>Накладка Число сторін обробки – 4 Габарити 1475x498x170 Параметри обробки: зовнішній контур, верхній контур вікна, контур основи, вікно для системи керування 170x50 (перехідний радіус R 5), 12 отв. $\phi 7$ з двох сторін Товщина матеріалу 3мм</p>
 <p>Корпус Габарити: 543x90x60</p>	 <p>Ухил Число сторін обробки – 3 Габарити 533x470x115 Параметри обробки: зовнішній контур по периметру, контур по циліндру (перехідний радіус R 15), 4 отв. $\phi 10$ Товщина матеріалу 2,5мм</p>  <p>Кришка Габарити 1177x938x100 Число сторін обробки - 3</p>

<p>Число сторін обробки: - 2 Параметри обробки: внутрішній контур із двох сторін Товщина матеріалу 2мм</p>	<p>Параметри обробки: внутрішній контур; 15 отв. $\phi 4,5$мм Товщина матеріалу 3мм</p>
--	---

Продовження таблиці 1

 <p>Кришка панелі Габарити: 235x100x34 Число сторін обробки – 4 Параметри обробки: зовнішній контур, вікно 71x30, вікно 22x30, вікно 22x30 (скрізь радіус переходу R2), 4 отв. $\phi 7$, одинотв. $\Phi 5$ Товщина матеріалу 1,8 мм</p>	 <p>Логотипи лівий та правий Габарити: 406x97x36 Число сторін обробки – 4 Параметри обробки: зовнішній контур, внутрішній контур, внутрішній контур вікна 10x23, торцева поверхня вікна 15x27 Товщина матеріалу 2мм</p>
---	--

 <p>Облицювання Габарити 1748x593x95 Число сторін обробки -5 Параметри обробки: зовнішній контур, внутрішній контур, 2 отв. $\phi 20$, 18 отв. $\phi 3$ з 3 фасками $\phi 6$ Товщина матеріалу 4мм</p>	 <p>Панель-кришка Габарити 1960x464x43 Число сторін обробки -4 Параметри обробки: зовнішній контур, внутрішній контур, 2 глухих паза 4x40 (R2), напіввідкритий паз 34x16 (R 8) Товщина матеріалу 4мм</p>
--	--

<p><i>Примітки:</i></p>	 <p>Панель верхня Габарити: 683x357x90 Число сторін обробки – 5 Параметри обробки: зовнішній контур, внутрішній контур складного профілю, 3 отв. $\phi 5$, 3 отв. $\phi 3$ з 3 фасками $\phi 6$, бічний виріз 43x46 (радіус переходу R2) Товщина матеріалу 4мм</p>
-------------------------	--

1. Усі розміри виконуються за 14 квалітетом
2. На оброблених поверхнях сколи, задирки не допускаються

Подані в таблиці 1 типові представники об'єктів обробки мають ряд характерних ознак, які дозволяють сформулювати вимоги до автоматизованої технологічної системи, що проектується. Матеріал деталей (при товщині від 1,5мм до 4,0мм) добре обробляється без сколів та задирок на високих швидкостях різання (рекомендовано 12000-24000об/хв) та подачі інструменту (рекомендовано 3-6м/хв). Форма, розміри та відносно невисока точність оброблюваних поверхонь мають на увазі використання лезового горизонтального інструменту (свердла, фрези).

Габаритні розміри деталей, що обробляються, висувають вимогу забезпечити зону обробки в горизонтальній площині більше 2100x800мм і висотою ходу інструменту у вертикальній площині більше 400мм. З погляду безпосередньо обробки всі розглянуті деталі у цілому є досить технологічними з точки зору обробки, проте розміри заготовок, товщина матеріалу та його фізико-механічні властивості свідчать про дуже низьку жорсткість конструкції та необхідність застосування спеціальних настановних пристроїв.

Існуючий технологічний процес на виробництві засновано на механічній обробці зазначених у таблиці поверхонь з використанням працівників високої кваліфікації, ручного інструменту та розмічувальних накладних шаблонів для забезпечення точного положення поверхонь, що обробляються. Установка заготовок здійснюється на спеціальні каркасні пристрої, які повторюють контур заготовки по основним поверхням, що забезпечує необхідну жорсткість при обробці. Пристосування виготовляються на фрезерних верстатах із ЧПУ з матеріалу, який легкообробити (ДСП, МДФ), під кожну конкретну деталь із використанням її 3D моделі. Закріплення заготовок здійснюється з використанням шурупів за технологічним напуском заготовки (рис.3), який у подальшому видаляється при обробці зовнішнього контуру.



Рис.3 – Установка и закріплення заготовки деталі

операцій.

Незважаючи на те, що обробку деталей виконують робітники високої кваліфікації, ймовірність отримання бракованих виробів досить висока через тривалість процесу обробки (повний цикл обробки лицьової панелі займає більше години), монотонності праці (свердління 320 однакових отворів) та необхідності працювати за шаблонами та розміткою. Тому автоматизація виконання обробки деталей на цьому робочому місці дозволить скоротити час виконання операцій, кількість бракованих виробів та вивільнити висококваліфікований персонал.

Таким чином, на підставі аналізу параметрів типових представників оброблюваних деталей, існуючого технологічного процесу та можливостей підприємства можна сформулювати ряд основних вимог до спроектованої автоматизованої технологічної системи:

- 1 - можливість обробки заготовки з різних сторін, бажано 5-ти координатна обробка;
- 2 - можливість обробки криволінійних контурів у двох площинах;
- 3 – можливість обробляти габаритні деталі з робочою зоною понад 2100x800мм;
- 4 - можливість встановлення та закріплення заготовки поза робочою зоною обладнання;
- 5 - можливість обробки більшості поверхонь одним інструментом;
- 6 – можливість швидкої зміни інструменту;
- 7 - можливість обробки на високих швидкостях різання;
- 8 - можливість швидкого переходу від виготовлення однієї деталі до іншої;
- 9 - можливість скорочення часу виконання допоміжних технологічних переходів;

10 – можливість скорочення участі працівника у виробничому процесі.

З аналізу конфігурації типових деталей представників обробки, технологічних процесів і сформованих виходячи з цього аналізу вимог до автоматизації процесу обробки авторами зроблено висновок про можливість автоматизації робочого місця з виготовлення деталей. У якості структурної моделі автоматизованої технологічної системи, яка задовольняє вище переліченим вимогам, доцільно використовувати програмну автоматизацію обладнання, що використовується на даному робочому місці (див. рис.1 та рис.2).

Реалізувати таку систему можна у різний спосіб.

По-перше, можна використовувати 5-ти координатний фрезерний верстат зі столом відповідного габариту, оснащений поворотним пристроєм для забезпечення обробки з усіх можливих сторін. Однак, у цьому випадку з одного боку, утруднено виконання вимоги 3, а з іншого вимагає значних капітальних вкладень через вартість такого обладнання.

По-друге, можна використовувати 5-ти або 6-ти координатний робот-маніпулятор типу «вільна рука», оснащений необхідною силовою установкою, що забезпечує потрібні режими обробки, а також спеціальними пристроями для встановлення заготовок. Це дозволяє виконати повний цикл обробки та забезпечити всі зазначені вище вимоги до системи. Щодо вартості реалізації проекту цей варіант є набагато економічним. Тому автори рекомендували цей варіант як основний.

Реалізація запропонованого варіанта автоматизованої технологічної системи полягає у підборі обладнання, інструменту та технологічного оснащення відповідно до висунутих вище вимог.

Особливості оброблюваності полістиролу, форма поверхонь та вимоги, які до них пред'являються, дозволяють використовувати кінцеві фрези спеціальної конструкції, які забезпечують початкове формування отвору на незначну глибину з подальшим формуванням необхідного профілю периферійною поверхнею кінцевої фрези за рахунок автоматизації кінематики переміщення інструменту. Виходячи з аналізу розмірів



оброблюваних поверхонь (мінімальний діаметр обробки 3мм) доцільно використовувати спеціальну однокромкову фрезу для обробки пластику AA1LX D3.3*d3*112*L50 UA (рис.4), що дозволяє забезпечити чистий зріз без задирок. Рекомендовані режими обробки для цього варіанту: подача – 4м/хв; частота обертання шпинделя - 20000об/хв.

Використання одного інструменту для виконання різних технологічних переходів дозволяє значно скоротити допоміжний час на заміну та налаштування інструменту у координатах технологічної системи (виведення в точку «0»).



Рис.5 – Мотор-шпиндель ES951e

Для реалізації необхідної частоти обертання інструменту слід підібрати силовий агрегат, який забезпечує потрібну частоту обертання шпинделя та потужність різання. При одноінструментній обробці полістиролу кінцевими однокромковими фрезами при ширині фрезерування, яка не перевищує 4мм, момент, що крутить, не перевищує 4Нм, а необхідна потужність різання не перевищує 4кВт. Виходячи з цього, у якості силового вузла пропонується використовувати мотор-шпиндель ES951e компанії HSD Mechatronics (рис.5) з отвором для встановлення інструменту по стандарту ISO30. Цей мотор масою 27кг забезпечує момент, що крутить, 6,5Нм і швидкість обертання від 12000 до 24000 об/хв при потужності 8кВт і використанні напруги 220В, що не вимагає додаткових заходів з

техніки безпеки на робочому місці. При виборі моделі робота-маніпулятора, крім задоволення розглянутих вище вимог, враховувалися додатково можливість встановлення мотор-шпинделя відповідної маси на руці робота (вантажопідйомність робота) та експлуатаційні особливості робототехніки на підприємстві. Так як на підприємстві вже був досвід роботи з системами програмування ROBOGUIDE фірми FANUC, вибір зупинився на роботі-маніпуляторі FANUC M-710iC/70 (рис.6), хоча були розглянуті варіанти від інших фірм виробників роботів-маніпуляторів (Kawasaki, KUKA, MitsubishiMotoman та ін).

Промисловий робот FANUC M-710iC/70 має необхідний максимальний радіус досяжності і забезпечує обробку поверхонь всіх розглянутих вище типових деталей, незважаючи на те, що зона обробки деталей часто стає в рази меншою, тому що невелика

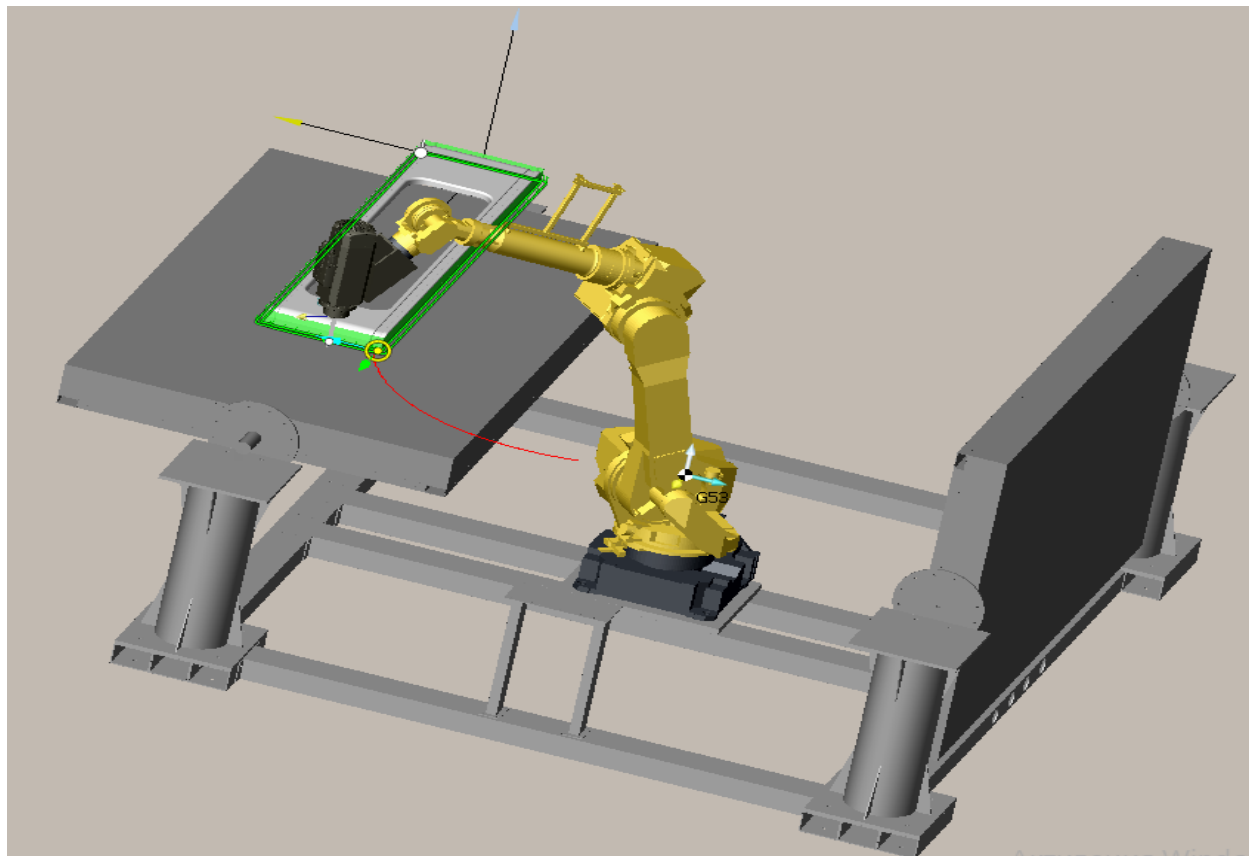


Рис.6 – Робот-маніпулятор FANUC M-710iC/70

довжина інструменту, його положення в просторі, габарити силової установки та обмежені зони обертання робота не дозволяють обробляти відносно далекі сторони великогабаритних деталей за один устан.

При програмуванні робота на обробку деталі «Накладка» виникла проблема доступу руки з інструментом до зони обробки прямокутного отвору деталі, яка була вирішена незначною зміною геометрії вікна узгодженої із замовником (поверхня контуру вікна стала нахиленою до торцевої поверхні під кутом 5°), що ніяк не вплинуло на наступний монтаж конструкції.

Для мінімізації часу на заміну заготовки та забезпечення максимальної безперервності процесу обробки за рахунок скорочення допоміжного часу на зняття/установку заготовки на робочому місці було запропоновано встановити 2 робочі столи (з поворотними осями обертання у вертикальній площині на кут 45°) з обох боків робота (рис.7).



Це дозволяє виконувати підготовчі роботи на одному столі (зняття-установку деталі, заміну пристрою для обробки іншої деталі тощо), поки робот виконує обробку деталі, встановленої на іншому столі.

На столах передбачені базові отвори для монтажу пристроїв під обробку конкретної деталі. Тобто, в процесі обробки однієї деталі є можливість встановити інший пристрій та підготувати обробку деталі іншого типу на другому столі (встановити пристрій і саму заготовку безпосередньо під час виконання обробки). Такий підхід дозволяє значно зменшити допоміжний час виконання технологічної операції. В якості настановно-затискних пристроїв авторами було запропоновано використовувати спеціальні пристрої з вакуумним затиском, що дозволяє значно



скоротити час на закріплення заготовки і повністю виключити слюсарні операції ручного обрізання залишкового напуску. Однак, в даний час запропоновані варіанти реалізовані не в повному обсязі, що пов'язано з додатковими інвестиціями, а тільки для деталей зі зниженою жорсткістю і обробкою складнопрофільних поверхонь великої протяжності, що найбільш часто замовляються, хоча в подальшому передбачається розширення номенклатури спеціальних вакуумних пристосувань (рис.8).

Висновки.

Запропонована структура та послідовність аналізу виробничого процесу на підприємстві, конструктивних характеристик та технології обробки комплексу деталей з полістиролу дозволила оцінити можливість та доцільність автоматизації виробничого процесу на ділянці механічної обробки та виробити систему вимог до структури та параметрів автоматизованого робочого місця.

Це дозволило значно скоротити час щодо підбору та проектування основного обладнання, інструменту та засобів технологічної оснастки, які здатні реалізувати запропонований варіант автоматизованої технічної системи, а також підвищити технологічність обробки деяких деталей та оптимізувати технологічні процеси обробки всього комплексу деталей. Запропонований варіант автоматизованого робочого місця дозволив значно (до 50%) скоротити допоміжний та підготовчий заключний час на обробку деталей та підвищити частку безпосередньо процесу різання до 50-60%. На запропонованому автоматизованому робочому місці можлива обробка також інших типів деталей із полістиролу, які задовольняють розглянутим вище параметрам процесу обробки (габаритам деталі, товщині матеріалу, розмірам та параметрам оброблюваних поверхонь та ін.).

У роботі вибір варіантів автоматизації робочого місця оснований на експертній оцінці сформованих вимог до технічної системи. Надалі автори припускають використовувати штучний інтелект у процесі створення структури автоматизованої технологічної системи та варіантів її технічної реалізації.

Підтвердження. Загальна методика, послідовність та принципи розгляду параметрів були використані при оцінці можливості та доцільності автоматизації ділянки механічної обробки на підприємстві «UBC Promo». В результаті роботи були вироблені рекомендації щодо можливості та доцільності автоматизації ділянки, які частково були реалізовані та їх реалізація буде продовжена у міру розвитку підприємства.

Список літератури:

1. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні / Н.М. Капустін, П.М. Кузнецов, А.Г. Схіртладзе та ін; за ред. Н.М. Капустина. - М.: Вищ. шк., 2004. - 415 с.: іл.
2. Якимов О. В. Технологія автоматизованого машинобудування / О. В. Якимов та ін. // Одеса: ОНПУ, 2005. - 410 с.
3. Automation production systems and computer-integrated manufacturing / Mikell P. Groover. // Lehigh University. - Fourth edition. , 2015. - 811 p.
4. Groover, Mikell P. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed // John Wiley & Sons, Inc., 2010. - 1025p.
5. Шевченка В.В. Основи автоматизації технологічних процесів. Електронне мережне навчальне видання. / В.В. Шевченка, Г.С. Тимчик. - Київ: КПІ, 2023. - 111с.
6. Муляр Ю. І. Автоматизація виробництва в машинобудуванні. Частина I / Ю. І. Муляр, С. В. Репінський. - Вінниця: ВНТУ, 2019. - 99 с.
7. Гунько Ю. Л. Автоматизація виробничих процесів / Гунько Ю. Л., Федорусь Ю. В.; Луцька нац. техн. ун-т. - Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2015. - 164с.
8. Grigoryuk EN Problems of Automation and Management Principles Information Flow in Manufacturing / EN Grigoryuk, VV Bulkin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 221 (2017) 012006 doi:10.1088/1757-899X/221/1/012006
9. Дубчак В. М. Розв'язання прикладних завдань автоматизації підготовки сучасних технологічних процесів механічної обробки / В. М. Дубчак // Техніка, енергетика, транспорт АПК. - 2019. - № 1. - С. 97-102.
10. Structural Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools / Yakovenko I., Permyakov A., Prihodko O., Basova Y., Ivanova M. // In: Tonkonogiy V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. - 2020. - pp. 352-363. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_36
11. Parametric Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools. / Yakovenko I., Permyakov A., Naboka O., Prihodko O., Havryliuk Y. // In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. - 2020. - pp. 85-93 https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_9
12. Sevic M. Models of smart factory using principles of INDUSTRY 4.0 / Martin Sevic, Petr Keller // MM SCIENCE JOURNAL. - 2021 - MARCH. p.4238-4243.
13. Koblasa, F., Sirova, E., Kralikova, R.: Використання процесів мислення в промислових практиках - Preliminary survey. Tehnički vjesnik, 2019, 26.3: 786-792.
14. Yevheniia Basova et al. Increasing supply chain resilience in the face of rapidly changing demand with 3d model visualisation. / Dobrotvorskiy S., Balog M., Iakovets A., Chelabi M., Zinchenko A. // International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, 2023, 2023(14), pp. 35-47
15. Cutting plastics pollution — Financial measures for more circular value chain // European Investment Bank. - 2023. - 66 p.
16. Хавін Г.Л. Ефективність свердління полімерних композиційних матеріалів свердлами, відмінними за конструкцією від спірального / Хавін Г.Л., Хоу Чживень // Інтегровані технології та енергозбереження / Нац. ун-т "ХП". - Харків, 2018. - №3 - с. 47-53.
17. Хавін Г.Л. Потрібно утворення при свердлінні полімерних композиційних матеріалів // Вісник НТУ «ХП» - Харків, 2014. - №42 - с.129-139.

Bibliography (transliterated):

1. Automatizacija proizvodstvennyh protsessov v mashinostroenii / NM Kapustin, PM Kuznetsov, AG Shirladze i dr.; podred. NM Kapustina. - M.: Vyssh. shk., 2004. - 415 s.: il.
2. Yakimov OV Tehnologiya avtomatizovanogo mashinobuduvannya / OV Yakimov ta in. // Odesa: ONPU, 2005. - 410p.
3. Automation production systems and computer-integrated manufacturing / Mikell P. Groover. // Lehigh University. - Fourth edition. , 2015. - 811 p.

4. Groover , Mikell P. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 4th ed // John Wiley & Sons, Inc., 2010. - 1025 p
5. Shevchenko VV Osnovi avtomatizatsii i tehnologichnih protsesiv .Elektronemerezhnenavchalnevidannya . / VV Shevchenko, GS Timchik . - Kyiv : KPI, 2023. - 111s.
6. Mulyar Yu. I. Avtomatizatsiya virobnytstva v mashinobuduvanni . Chastina I / Yu. I. Mulyar , SV Repinskiy . - Vinnitsya : VNTU, 2019. - 99 s.
7. Gunko Yu. L. Avtomatizatsiya virobnychih protsesiv / Gunko Yu. L., Fedorus Yu. V.; Lutskiy nats . tehn . un-t . - Lutsk: RVV LNTU, 2015. - 164s.
8. Grigoryuk EN Problems of Automation and Management Principles Information Flow in Manufacturing / EN Grigoryuk , VV Bulkin // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 221 (2017) 012006 doi:10.1088/1757-899X/221/1/012006
9. Dubchak VM Rozvyazanniya prikladnih zadach avtomatizatsii i pidgotovki suchasni tehnologichnih protsesiv mehanichnoyi obrobki / VM Dubchak // Tehnika , energetika , transport APK. - 2019. - # 1. - S. 97-102.
10. Structural Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools / Yakovenko I., Permyakov A., Prihodko O., Basova Y., Ivanova M.. // In: Tonkonogyi V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – pp. 352-363. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_36
11. Parametric Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools. / Yakovenko I., Permyakov A., Naboka O., Prihodko O., Havryliuk Y. // In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – pp. 85-93 https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_9
12. Sevic M. Model smart factory using the principles of INDUSTRY 4.0 / Martin Sevic , Petr Keller // MM SCIENCE JOURNAL. - 2021 - MARCH. p.4238-4243 .
13. Koblasa , F., Sirova , E., Kralikova , R . Tehnicki vjesnik , 2019, 26.3: 786-792.
14. Yevheniia Basova et al. Increasing supply chain resilience in the face of rapidly changing demand with 3d model visualisation. / Dobrotvorskiy S., Balog M., Iakovets A., Chelabi M., Zinchenko A. // International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics, 2023, 2023(14), pp. 35–47
15. Cutting plastic pollution — Financial measures for more circular value chain // European Investment Bank, - 2023. – 66 p .
16. Khavin G.L. Effektivnost verleniyapolimernykh kompozitivsverlami , otlichnyimi pokonstruktivnyimi spiralnogo / Khavin GL, Hou Ch given // Integrovaniye tehnologiy energo zberegeniya / Nats. in-t "HPI". - Kharkiv , 2018. - #3 - s. 47-53.
17. Khavin G.L. Trescheno obrazovanie prisverleniyapolimernykh kompozitiv // Visnik NTU «HPI» - Kharkiv , 2014. - #42 -s.129-139.

Відомості про авторів / About the Authors

Яковенко Ігор Едуардович (Yakovenko Ihor) - кандидат технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: igor.dych59@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8344-996X

Пермяков Олександр Анатолійович (Permyakov Oleksandr) - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: perm_a@i.ua, ORCID: 0000-0002-9589-0194

Ільїн Дмитро Олексійович (Ilin Dmitro) – магістр групи МІТ – М422к.05. Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: d.ilin@promo.beer-co.com, ORCID: 0009-0004-5199-3943

Басова Євгенія Володимирівна (Basova Yevheniia) - кандидат технічних наук, доцент кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8549-4788

Горбулик Володимир Іванович (Gorbulyk Volodymyr) – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, Україна м. Чернівці, вул. Коцюбинського, 2, тел. +38050 9792460, E_mail gorbulyk@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6091-2261>

*ТУЛУПОВ В.І., ОНИЩУК С.Г.***ВИКОРИСТАННЯ КОМБІНОВАНИХ СПОСОБІВ ОБРОБКИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВИРОБІВ**

Досліджено використання комбінованих способів обробки для забезпечення життєвого циклу виробів машинобудування. Доведено доцільність використання як джерела тепла імпульсного електричного струму для реалізації процесу алюмотермічного зміцнення. Використання імпульсного електричного струму дозволяє отримати дискретні покриття, що збільшують життєвий цикл виробів. Визначено умови початку процесу алюмотермії; експериментально підтверджено доцільність використання оксиду хрому для синтезу оксиду алюмінію. Металографічні дослідження підтвердили наявність в поверхневому шарі хрому та алюмінію після алюмотермії. Зносостійкість дискретного покриття досліджено на спеціальному устаткуванні за методикою випробувань на машині тертя. Дискретне покриття, отримане після алюмотермії, має зношення менше у 2,3 рази, зносостійкість більше у 2 рази, інтенсивність зношення менше у 1,8 рази. Використання комбінованих способів в технологічному процесі дозволяє зменшити виробничий цикл за рахунок зменшення кількості технологічних операцій.

Ключові слова: життєвий цикл, зносостійкість, комбіновані способи обробки, алюмотермія.

TULUPOV V.I., ONYSHCHUK S.G.**USE OF COMBINED PROCESSING METHODS TO ENSURE THE LIFE CYCLE OF PRODUCTS**

The use of combined processing methods to ensure the lifecycle of engineering products has been investigated. The feasibility of using pulse electric current as a heat source for implementing the aluminothermic strengthening process has been substantiated. The use of pulse electric current enables the attainment of discrete coatings, thereby enhancing the product lifecycle. The initiation conditions of the aluminothermy process have been identified; the feasibility of using chromium oxide for aluminum oxide synthesis has been experimentally confirmed. Metallographic studies have confirmed the presence of chromium and aluminum in the surface layer after aluminothermy. The wear resistance of the discrete coating has been examined using specialized equipment according to the friction machine testing methodology. The discrete coating obtained after aluminothermy exhibits a wear reduction of 2.3 times, a wear resistance increases of 2 times, and a wear intensity decrease of 1.8 times. The utilization of combined methods in the technological process allows for a reduction in the production cycle by reducing the number of technological operations.

Keywords: life cycle, wear resistance, combined processing methods, aluminothermy

1. Вступ. Одним з головних завдань машинобудівної галузі є забезпечення якості виробів, що виготовляються, протягом життєвого циклу. Одним з важливих етапів життєвого циклу є виробництво [1]. Саме на цьому етапі формуються показники якості виробу, що в подальшому сприятимуть експлуатації протягом тривалого періоду. Це завдання може бути вирішено використанням зміцнювальних методів обробки [2].

Серед методів зміцнення останнім часом набули поширення комбіновані методи [3], до яких належать хімічні та хіміко-термічні (цементування, азотування, нітроцементация), термічні (гартування струмами високої частоти), обробка виробів концентрованими потоками енергії (пучки електронів, плазмові потоки, лазерне випромінювання), механічні (поверхнево-пластичне деформування) та ін.

Особливістю комбінованих методів обробки можна відзначити те, що їх використання дозволяє отримати на поверхні деталі зміцненого шару на етапі виробництва, що суттєво покращить експлуатаційні властивості та життєвий цикл [4]. Вибір того чи іншого методу зміцнення серед комбінованих методів визначається такими чинниками, як:

- енергоємність процесу зміцнення;
- характеристики покриття (зносостійкість, глибина зміцненого шару, твердість, величина залишкових напруг в поверхневому шарі).

Перший з чинників – енергоємність процесу зміцнення – може вплинути на загальну енергоємність технологічного процесу виготовлення виробу. Для зменшення енергоємності процесів механічної обробки в машинобудуванні використовують додаткові джерела тепла. Ідеальне штучне джерело тепла, що застосовується у технологічному методі поверхневого зміцнення, повинно забезпечувати швидкісне нагрівання металу, піддаватися контролю та регулюванню в строго нормованих дозах в одиницю часу, забезпечувати широкий діапазон температур.

Другий чинник – характеристики покриття – визначають експлуатаційні показники виробу.

Таким чином, дослідження використання комбінованих способів на етапі виробництва є актуальним.

2. Мета дослідження. Дослідження комбінованих способів обробки деталей з метою забезпечення життєвого циклу.

3. Викладення основного матеріалу та результати. Для вибору того чи іншого джерела живлення для реалізації комбінованих методів зміцнення важливим є енергоємність процесу.

Серед відомих джерел тепла найменші витрати енергії (питомі витрати енергії) спостерігаються при використанні електричних джерел тепла (менше 1 Дж/см³), а найбільші – при використанні плазмово-механічних (4,5 Дж/см³) та лазерно-механічних джерел тепла (більше 6,5 Дж/см³) [5]. Тому як джерело тепла використовується імпульсний електричний струм.

Серед існуючих комбінованих методів зміцнювальної обробки хіміко-термічна обробка поєднує в собі хімічний та термічний вплив, що сприяє зміні складу, структури та властивостей поверхневого шару оброблюваних деталей. До хіміко-термічної обробки належить й метод поверхневого зміцнення деталей з використанням алюмотермії [6].

Алюмотермічний процес полягає в виділенні значної кількості тепла через відновлення оксидів металічних елементів. Температура процесу алюмотермії може досягати до 2500 °С. В роботі [7] описано процес алюмотермії, що проводиться в вакуумі з використанням спеціального обладнання. Авторами досліджено різні реакції синтезу оксиду алюмінію, зокрема $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = 2\text{Cr} + \text{Al}_2\text{O}_3$ та $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = 2\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$. Відзначається, що використання оксиду заліза для синтезу оксиду алюмінію економічно недоцільно порівняно з оксидом хрому.

Для дослідження прийнято варіант окислення оксиду хрому для синтезу оксиду алюмінію. Реакція алюмотермічного відновлення Cr_2O_3 починається при температурі понад 1400 °С та при 1600 °С завершується практично повністю [8].

Для розрахунку необхідної сили струму для забезпечення температури початку та підтримки процесу алюмотермії, використовувався програмний комплекс ANSYS (рис. 1), який базується на методі кінцевих елементів, а саме, модуль Workbench, оскільки він дозволяє вирішувати термоелектричні задачі.

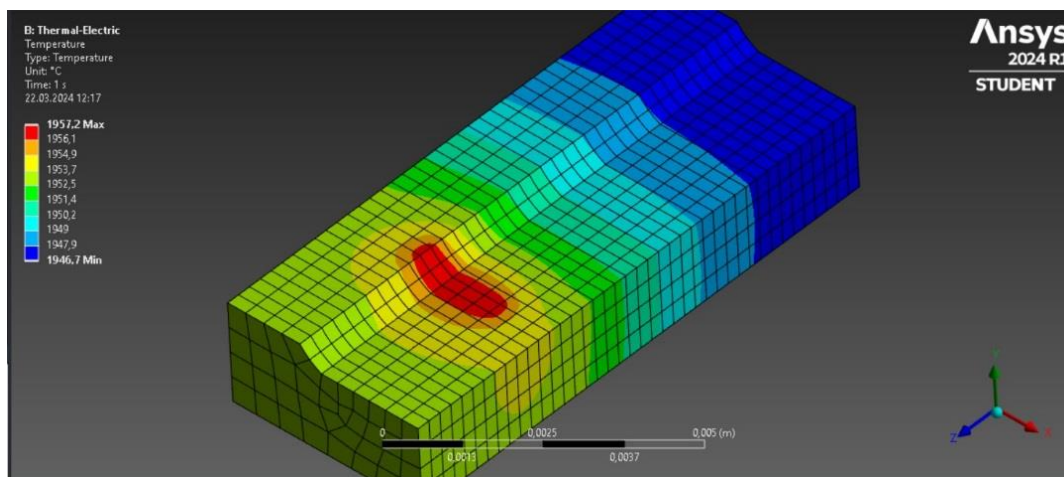


Рис. 1 – Модель теплових полів при алюмотермії

В результаті моделювання визначено, що для забезпечення процесу алюмотермії сила імпульсного електричного струму повинна дорівнювати $I = 125\text{--}130$ А.

Як було відзначено, другим важливим чинником, що визначає якість виробів та впливає на життєвий цикл, є вид покриття. Особливістю дискретних покриттів є те, що вони є зміцненими окремими ділянками, що розташовані на робочих поверхнях деталей з визначеною суцільністю.

Дискретні покриття збільшують зносостійкість поверхонь тертя за рахунок ефективного використання явища структурно-енергетичної пристосованості матеріалів при терті шляхом створення архітектури поверхні тертя, що зберігає фрагменти руйнування вторинних структур.

Наявність в поверхневому шарі дискретних ділянок підвищеної твердості, оптимальної суцільності, геометрії та глибини проникнення в поверхню усуває концентрацію напружень від контактних навантажень та перериває процес тріщиноутворення, пластичного деформування, а також зменшує схильність до тужавіння деталей.

З практики машинобудування відомо, що після нанесення покриття наявність залишкових напружень стискування є позитивним фактом, який сприяє зменшенню крихкості. При наявності в покритті значних залишкових напружень стискування в процесі навантаження системи основа-покриття (до початку збільшення пластичних деформацій) розтріскування покриття не спостерігається [9].

Дискретне покриття виключає відокремлення покриття, збільшує його зносостійкість, тому що дискретна структура покриття обмежує його локальне перенапруження, яке є причиною зношення традиційних покриттів. Дискретне покриття має менші мікронапруження, чим при нанесенні суцільним шаром. Ці особливості дискретних покриттів мають важливе значення для забезпечення життєвого циклу виробів.

Для визначення параметрів дискретного покриття використовується залежність для розрахунку критичного кроку тріщини:

$$C_n = -\frac{1}{k} \ln \left(0,1 + \frac{\sigma_n^{ocm}}{\varepsilon_k} \frac{1}{E_n} \right) \quad (1)$$

де σ_n^{ocm} – залишкові напруження в покритті, МПа; ε_k – критична деформація основи під дією зовнішнього навантаження, Н; E_n – модуль пружності покриття, МПа.

Реалізація методу алюмотермічного відновлення оксиду алюмінію здійснювалась за допомогою генератора імпульсного струму. Використання імпульсного струму забезпечує формування регулярної дискретної структури у вигляді зміцнених фрагментів.

Розташування зміцнених фрагментів залежить від частоти та тривалості імпульсів струму, режимів оброблення (частоти обертання та поздовжньої подачі електрода-інструмента).

Тривалість імпульсів визначається залежністю [10]

$$\tau = \frac{60 \cdot C_n}{\pi \cdot D \cdot n} \cdot K, \quad (2)$$

де C_n – довжина зміцненого фрагменту (визначається за формулою (1)), мм; D – діаметр поверхні оброблюваної деталі, мм; n – частота обертів шпинделя, хв^{-1} ; K – коефіцієнт, який залежить від матеріалу оброблювальної заготовки, щільності струму при пропусканні його через зону різання та швидкості різання.

Частота імпульсного струму f , що забезпечує періодичність утворення зміцнених фрагментів, визначається залежністю

$$f = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot (C_n + l)}, \quad (3)$$

де l – відстань між зміцненими фрагментами, мм.

Експериментальні дослідження алюмотермічного відновлення виконувались на зразках, виготовлених зі сталі 40ХН (ДСТУ 7806:2015). Для досліджень використовувався токарно-гвинторізний верстат мод.1К625. Перед початком експериментів зразок має шорсткість поверхні $Ra=2,5$ мкм. При виконанні експериментальних досліджень на поверхню зразка наноситься шар завтовшки 0,5-1 мм суміші оксиду хрому Cr_2O_3 , металевого порошку алюмінію Al та зв'язувальної речовини.

Електрод-інструмент ізолюється текстолітовими прокладками та закріплюється в різцетримачі токарно-гвинторізного верстата. Дослідний зразок закріплюється в трикулачковому патроні й отримує обертання з частотою 63 хв^{-1} . Електрод-інструмент отримує поздовжню подачу зі швидкістю 2 мм/хв.

Від генератора імпульсного струму подається імпульсний електричний струм силою 128 А напругою 12 В. В результаті виникає електрична дуга, що ініціює процес алюмотермії (рис. 2). Зазор між електродом та поверхнею дослідного зразка залишається в межах 0,1-0,15 мм.

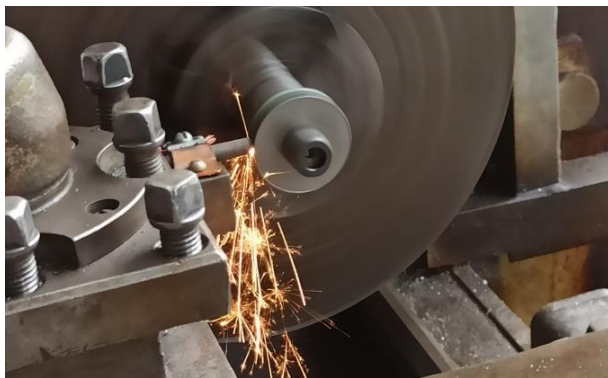


Рис. 2 – Реалізація алюмотермічного відновлення

Для дослідження отриманого покриття виконано металографічні дослідження. Результати рентгенофлуоресцентного та спектрального аналізів свідчать про насичення зміцненого шару зразка хромом (10,94%) та алюмінієм (6,1%) після алюмотермії. У макроструктурі металу зразка тріщин, раковин, пор, неметалевих включень та інших дефектів металургійного характеру не виявлено.

Рівень мікротвердості визначено на мікротвердоміром ПМТ-3 при навантаженні 25 г. Результати вимірів мікротвердості наведені на рис. 3.

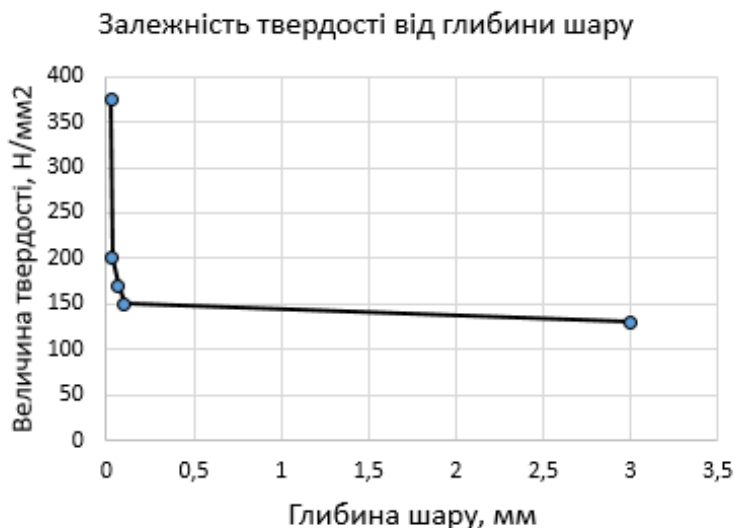


Рисунок 3 – Залежності розподілення мікротвердості по глибині поверхневого шару після зміцнення методом алюмотермії

Аналіз вимірювання мікротвердості свідчить про те, що глибина зміцненого шару становить 0,1 мм. Мікротвердість зміцненого шару становить: на глибині 0,025 мм від поверхні зразка - $370 \div 380 \text{ Н/мм}^2$; на глибині 0,03 мм – 200 Н/мм^2 ; на глибині 0,07 мм – 170 Н/мм^2 ; на глибині 0,1 мм – 150 Н/мм^2 . Мікротвердість основного металу становить 130 Н/мм^2 .

Однією з важливих характеристик дискретного покриття, що забезпечує збільшення життєвого циклу виробу, є його зносостійкість. Для експериментального дослідження зносостійкості дискретного покриття, отриманого в результаті алюмотермічного відновлення, було використано метод «штучних баз».

Експериментальні дослідження зносостійкості виконували з використанням спеціального устаткування за методикою випробувань на машині тертя виконувалось за схемою «диск-колодка». Як контртіло використовувався бархатний напилек ($25 \text{ зубців на } 1 \text{ см}^2$), виготовлений з інструментальної вуглецевої сталі У13А й твердістю 54–58 HRC.

Дослідний зразок випробувався на зношення в парі з колодкою при заданому навантаженні $G = 1000 \text{ Н}$, частоті обертання $n = 1400 \text{ хв}^{-1}$ та умовах тертя (сухе тертя). Досліджувалась зміна розмірів отворів, зроблених на торцевій поверхні зразка, при випробуваннях зносостійкості. Розрахунки зносостійкості J_s (км/мм) та інтенсивності зношення V_i (мм/км) виконувались за формулами [11]:

$$J_{Si} = \frac{\pi D n t_i}{1000 \Delta_i}, \quad (4)$$

$$V_i = \frac{1}{J_{Si}}, \quad (5)$$

де D – діаметр дослідного зразка (мм); n – частота обертання, хв^{-1} ; t_i – час випробування, хв.; Δ_i – зношення поверхні.

Результати досліджень свідчать про те, що після 15 хв. випробування величина зношення менше у 2,3 рази, зносостійкість більше у 2 рази, інтенсивність зношення менше у 1,8 разів у зразків, що зміцнені методом алюмотермії.

Авторами проведено низку досліджень щодо розроблення та запровадження технологічного процесу виготовлення ступінчастих валів з використанням алюмотермічного зміцнення. Зокрема, для обробки ступінчастого вала, виготовленого зі сталі 40ХН, запропоновано в технологічному процесі як окремі технологічні переходи токарно-гвинторізної операції алюмотермічне зміцнення. Це дозволить зменшити трудомісткість та собівартість виготовлення деталі за рахунок виключення термічної та круглошліфувальної операції.

Висновки.

Використання комбінованих методів зміцнення дозволяє забезпечити збільшення життєвого циклу виробів. Досліджено застосування алюмотермічного зміцнення поверхонь досліджуваних зразків, зокрема визначено режими використання імпульсного електричного струму як джерела живлення та металографічні дослідження зміцненого поверхневого шару. Використання методу «штучних баз» дозволяє суттєво зменшити

трудомісткість досліджень зносостійкості. Результати досліджень свідчать про те, що після 15 хв. випробування величина зношення менше у 2,3 рази, зносостійкість більше у 2 рази, інтенсивність зношення менше у 1,8 разів у зразків, що зміцнені методом алюмотермії. Запровадження технологічних переходів алюмотермічного зміцнення токарно-гвинторізної операції дозволить зменшити тривалість технологічного циклу за рахунок зменшення технологічних операцій.

Список літератури:

1. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія / С.А. Фролов, С.І. Кравченко, С.В. Попов, С.М. Гнітько. – Полтава, 2019. – 201 с.
2. Ющенко К.А. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – К.: НВП «Вид-во Наукова думка» НАН України, 2007. – 558 с.
3. Серета Б.П. Поверхневе зміцнення матеріалів: монографія / Б.П. Серета, Н.Є. Калініна, І.В. Кругляк. Запоріжжя: ЗДІА, 2004. – 230 с.
4. Фесенко А.Г. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин : навч. посібник. / А.Г. Фесенко, К.В. Бечке, С.В. Манжалівський. - Дніпро: РВВ ДНУ, 2015. - 104 с.
5. Тулупов В., Онищук С. Використання енергозберігаючих технологій у важкому машинобудуванні // Технічні науки та технології. – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – № 4(30). – С. 24–30. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-24-30](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-24-30).
6. Губарь Е.Я. Технология получения покрытий на основе Al_2O_3 с улучшенным комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств / Е.Я. Губарь, А.М. Пономаренко, И.П. Частоколенко, В.Ю. Шматков, В.Ю. Васильченко // Нові матеріали та технології в машинобудуванні. – 2014. – №2. – С. 41-44.
7. Wenzel B.M. Aluminothermic reduction of Cr_2O_3 contained in the ash of thermally treated leather waste / B.M. Wenzel, T.H. Zimmer, C.S. Fernandez, N.R. Marcilio, M. Godinho // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2013. – Vol. 30. – №1. – PP. 141-154.
8. Сівак О.А. Особливості утворення тугоплавких фаз в системі $Al-Cr_2O_3-B_2O_3$ / О.А. Сівак, М.І. Чередник, І.М. Тоцький, О.Ю. Попов, В.А. Макара // Фізика і хімія твердого тіла. – Т. 15. – №4. – 2014. – С. 780-783.
9. Ляшенко Б.А. Повышение износостойкости деталей судовых машин и механизмов покрытиями дискретной структуры. Технологическое обеспечение покрытий дискретной структуры электроконтактным припеканием / Б.А. Ляшенко, Ю.В. Волков, Е.К. Соловых, Л.А. Лопата // Проблемы тертя та зношування. – 2015. - №2 (67). – С. 110-126.
10. Спеціальні методи оброблення робочих поверхонь деталей машин : монографія / Ковалевський С. В., Тулупов В. І. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – 100 с.
11. Тулупов В., Онищук С. Дослідження методу поверхневого зміцнення деталей із використанням алюмотермії // Технічні науки та технології. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – № 2(24). – С. 17-22. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2\(24\)-17-22](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2(24)-17-22).

References (transliterated)

1. Frolov, Ye.A., Kravchenko, S.I., Popov, S.V., Hnitko, S.M. (2019). Tekhnologichne zabezpechennia yakosti produktii mashynobuduvannia. Poltava. 201 s. [in Ukraine].
2. Yushhenko K.A. Inzheneriya poverxni / K.A. Yushhenko, Yu.S. Borysov, V.D. Kuznecov, V.M. Korzh. – K.: NVP «Vyd-vo Naukova dumka» NAN Ukrayiny, 2007. – 558 s. [in Ukraine]
3. Sereda B.P. Poverxneve zmicznennya materialiv: monografiya / B.P. Sereda, N.Ye. Kalinina, I.V. Kruglyak. Zaporizhzhya: ZDIA, 2004. – 230 s. [in Ukraine]
4. Fesenko A.G. Metody poverxneвого zmicznennya u procesi vygotovlennya detalej mashyn : navch. posibnyk. / A.G. Fesenko, K.V. Bechke, S.V. Manzhaliyivskiy. - Dnipro: RVV DNU, 2015. - 104 s. [in Ukraine]
5. Tulupov V., Onyshhuk S. Vykorystannya energozberigayuchykh texnologij u vazhkomu mashynobuduvanni // Texnichni nauky ta texnologiyi. – Chernigiv: NU «Chernigivska politexnika», 2022. – № 4(30). – S. 24–30. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-24-30](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-24-30). [in Ukraine]
6. Gubar E.Ya. Tehnologiya polucheniya pokrytity na osnove Al_2O_3 s uluchshennyim kompleksom fiziko-mehaniicheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv / E.Ya. Gubar, A.M. Ponomarenko, I.P. Chastokolenko, V.Yu. Shmatkov, V.Yu. Vasilchenko // Novi materialy ta texnologiyi v mashynobuduvanni. – 2014. – №2. – S. 41-44. [in Ukraine]
7. Wenzel B.M. Aluminothermic reduction of Cr_2O_3 contained in the ash of thermally treated leather waste / B.M. Wenzel, T.H. Zimmer, C.S. Fernandez, N.R. Marcilio, M. Godinho // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2013. – Vol. 30. – №1. – PP. 141-154.
8. Sivak O.A. Osoblyvosti utvorennia tugoplavkykh faz v systemi $Al-Cr_2O_3-B_2O_3$ / O.A. Sivak, M.I. Cherednyk, I.M. Toczkyj, O.Yu. Popov, V.A. Makara // Fizyka i ximiya tverdogo tila. – T. 15. – №4. – 2014. – S. 780-783. [in Ukraine]
9. Lyashenko B.A. Povishenie iznosostoikosti detalei sudovikh mashin i mekhanizmov pokrytityami diskretnoi strukturi. Tekhnologicheskoe obespechenie pokrititi diskretnoi strukturi elektrokontaktym pripekaniem / B.A. Lyashenko, Yu.V. Volkov, Ye.K. Solovikh, L.A. Lopata // Problemy tertia ta znoshuvannia. – 2015. – №2 (67). – С. 110-126. [in Ukraine]
10. Specialni metody obroblyennya robochyx poverxon detalej mashyn : monografiya / Kovalevskiy S. V., Tulupov V. I. – Kramatorsk : DDMA, 2012. – 100 s. [in Ukraine]
11. Tulupov V., Onyshhuk S. Doslidzhennya metodu poverxneвого zmicznennya detalej iz vykorystanniam alyuotermiyi // Texnichni nauky ta texnologiyi. – Chernigiv : NU «Chernigiv'ska politexnika», 2021. – № 2(24). – S. 17-22. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2\(24\)-17-22](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-2(24)-17-22).

Поступила (received) 06.02.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Тулупов Володимир Іванович (Volodymyr Tulupov) – кандидат технічних наук, доцент кафедри інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3951-364X>; тел.: (093) 137-07-43. e-mail: wladimir.tulupov@gmail.com.

Онищук Сергій Григорович (Serhii Onyshchuk) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8157-6869>; тел.: (093) 636-61-43; e-mail: onishchuk65@gmail.com.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ МАШИН

У роботі теоретично обґрунтовано умови зменшення умовного напруження різання (енергоємності обробки) під час шліфування та лезової обробки деталей транспортних машин з урахуванням кута входу ріжучого інструменту в оброблюваний матеріал. Показано, що в умовах шліфування вони полягають у зміні форми мікрорізів ріжучими зернами: переході від зустрічного шліфування периферією круга до кінематичних схем торцевого і попутного шліфування периферією круга, зменшенні інтенсивності тертя ріжучого зерна із оброблюваним матеріалом та негативного переднього кута ріжучого матеріалу. В умовах лезової обробки вони полягають у застосуванні тангенціального точіння, попутного фрезерування, особливо, торцевою фрезою. Доведено існування екстремуму (максимуму) умовного напруження різання від суми умовного кута тертя ріжучого зерна з оброблюваним матеріалом і негативного переднього кута ріжучого зерна. Визначено діапазони зміни цієї суми, за яких умовне напруження різання набуває найменших значень. Показано, що характер зміни умовного напруження різання обумовлено зміною умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу. Встановлено, що нескінченні значення умовного напруження різання досягаються за умови рівності умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу і кута входу ріжучого інструменту в оброблюваний матеріал. Тому необхідно збільшувати умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу шляхом зниження інтенсивності тертя в зоні різання та негативного переднього кута ріжучого інструмента. Теоретично визначено умови підвищення ефективності лезової обробки шляхом збільшення відношення тангенціальної та радіальної складових сили різання, а також відношення товщини зрізу до радіусу округлення вершини ріжучого інструменту, які полягають у зменшенні тертя в зоні різання та переднього кута ріжучого інструменту. Впровадження на машинобудівному підприємстві технологій високошвидкісного різання прогресивними ріжучими твердосплавними інструментами зі зносостійкими покриттями фірми TaeguTec із застосуванням високооборотних металорізальних верстатів із ЧПУ типу «обробний центр» дозволило підвищити ефективність обробки складнопрофільних поверхонь деталі «Чашка міжколесного диференціала».

Ключові слова: шліфування, точіння, ріжучий інструмент, сила різання, умовне напруження різання, енергоємність обробки

V.O. ZHOVTBRYUKH, F.V. NOVIKOV

INCREASING THE EFFICIENCY OF MECHANICAL PROCESSING OF PARTS VEHICLES

The work theoretically substantiates the conditions for reducing the conditional cutting stress (energy intensity of processing) during grinding and blade processing of parts of transport machines, taking into account the angle of entry of the cutting tool into the processed material. It is shown that under the conditions of grinding, they consist in the change of the shape of microsections by cutting grains: the transition from counter grinding by the periphery of the wheel to the kinematic schemes of end and parallel grinding by the periphery of the wheel, the reduction of the intensity of friction of the cutting grain with the processed material and the negative front angle of the cutting material. In terms of blade processing, they consist in the application of tangential turning, parallel milling, especially with an end mill. The existence of the extremum (maximum) of the conditional cutting stress from the sum of the conditional friction angle of the cutting grain with the processed material and the negative front angle of the cutting grain has been proved. The ranges of change of this amount are determined, at which the conditional cutting stress becomes the smallest. It is shown that the nature of the change in the conditional cutting stress is determined by the change in the conditional shear angle of the processed material. It was established that infinite values of conditional cutting stress are achieved under the condition of equality of the conditional shear angle of the processed material and the angle of entry of the cutting tool into the processed material. Therefore, it is necessary to increase the conditional shear angle of the processed material by reducing the intensity of friction in the cutting zone and the negative front angle of the cutting tool. The conditions for increasing the efficiency of blade processing by increasing the ratio of the tangential and radial components of the cutting force, as well as the ratio of the slice thickness to the radius of rounding of the cutting tool tip, which consist in reducing the friction in the cutting zone and the front angle of the cutting tool, have been theoretically determined. The introduction at the machine-building enterprise of high-speed cutting technologies with progressive cutting carbide tools with wear-resistant coatings of the TaeguTec company with the use of high-speed CNC metal cutting machines of the "machining center" type made it possible to increase the efficiency of processing the complex profile surfaces of the "Cup of the wheel differential".

Key words: grinding, turning, cutting tool, cutting force, conventional cutting stress, processing energy

ЖОВТОБРЮХ В. О., НОВИКОВ Ф. В.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

В работе теоретически обоснованы условия уменьшения условного напряжения резания (энергоемкости обработки) при шлифовании и лезвийной обработке деталей транспортных машин с учетом угла входа режущего инструмента в обрабатываемый материал. Показано, что в условиях шлифования они состоят в изменении формы микросрезов режущими зернами: переходе от встречного шлифования периферией круга к кинематическим схемам торцевого и попутного шлифования периферией круга, уменьшению интенсивности трения режущего зерна с обрабатываемым материалом. В условиях лезвийной обработки они состоят в применении тангенциального точения, попутного фрезерования, особенно, торцевой фрезой. Доказано существование экстремума (максимума) условного напряжения резания от суммы условного угла трения режущего зерна с обрабатываемым материалом и отрицательного переднего угла режущего зерна. Определены диапазоны изменения этой суммы, при которых условное напряжение резания принимает наименьшие значения. Показано, что характер изменения условного напряжения резания обусловлен изменением условного угла сдвига обрабатываемого материала. Установлено, что бесконечные значения условного напряжения резания достигаются при равенстве условного угла сдвига обрабатываемого материала и угла входа режущего инструмента в обрабатываемый материал. Поэтому необходимо увеличивать условный угол сдвига обрабатываемого материала путем снижения интенсивности трения в зоне резания и переднего отрицательного угла режущего инструмента. Теоретически определены условия повышения эффективности лезвийной обработки путем увеличения отношения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания, а также отношения толщины среза к радиусу округления вершины режущего инструмента, которые состоят в уменьшении трения в зоне резания и переднего угла режущего инструмента. Внедрение на машиностроительном предприятии технологий высокоскоростного резания прогрессивными режущими твердосплавными инструментами с износостойкими покрытиями фирмы TaeguTec с применением высокооборотных металлорежущих станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» позволило повысить эффективность обработки сложнопрофильных поверхностей детали «Чашка межколесного дифференциала».

Ключевые слова: шлифование, точение, режущий инструмент, сила резания, условное напряжение резания, энергоемкость обработки

© В. О. Жовтобрюх, Ф. В. Новиков, 2024

Вступ. Сучасний розвиток транспортного машинобудування вимагає забезпечення високої якості та точності механічної обробки деталей транспортних машин. Це пов'язано із підвищенням вимог до

експлуатаційних показників транспортних машин. Особливо це відноситься до таких екологічно чистих транспортних засобів як електромобілі та автомобілі з водневим двигуном, які є автомобілями майбутнього. Попит на них у світі зростає за геометричною прогресією. Це підвищує потребу у виготовленні високоякісних та високоточних деталей, оскільки вимоги до них значно вищі, ніж до деталей автомобілів із двигуном внутрішнього згоряння. Для вирішення цих питань широко застосовують високоефективні технології механічної обробки, до складу яких входять високооборотові металорізальні верстати із ЧПУ типу «обробний центр» та прогресивні лезові ріжучі твердосплавні та керамічні інструменти зі зносостійкими покриттями. У результаті вдається підвищити параметри якості, точності, продуктивності та зменшити трудомісткість і собівартість обробки. Однак, для досягнення суттєвого підвищення ефективності виготовлення цих деталей важливо знати, в першу чергу, технологічні можливості процесів обробки матеріалів різанням, особливо на фінішних операціях, які визначають рівень технологічних показників деталей машин. Тому в роботі вирішується актуальна задача теоретичного обґрунтування технологічних можливостей високоякісної та високоточної обробки деталей транспортних машин майбутнього.

Аналіз основних досягнень та літератури. Під час фінішної обробки деталей машин широко застосовують метод шліфування, який дозволяє зменшити сили різання, покращити точність і шорсткість оброблюваних поверхонь. У більшості випадків метод шліфування є остаточним, що забезпечує необхідні показники якості та точності оброблюваних поверхонь [1, 2]. Однак, як показує практика, метод шліфування характеризується високою тепловою напруженістю у зв'язку із інтенсивним тертям ріжучих зерен і зв'язки круга із оброблюваним матеріалом. Це призводить до появи на оброблюваних поверхнях припикань, мікротріщин та інших температурних дефектів, усунути які не завжди вдається наступним абразивним або алмазним доведенням [3, 4]. Тому актуальним є завдання зменшення силової та теплової напруженостей процесу шліфування [5 - 7]. У роботах [8, 9] на основі виконаних розрахунків напружено-деформованого стану зони різання показано визначальну роль процесів тертя у формуванні силової напруженості процесів абразивної та лезової обробки. Встановлено [10 - 12], що для її зниження необхідно використовувати ефективні технологічні середовища, більш досконалі конструкції шліфувальних кругів, що мають високу ріжучу здатність, наприклад, переривчасті шліфувальні круги із синтетичних надтвердих матеріалів, прогресивні методи правлення шліфувальних кругів. Також ефективно наносити зносостійкі покриття на робочі поверхні ріжучих лезових інструментів. У роботі [13] показано можливість зниження силової напруженості процесу різання завдяки вибору раціональних значень кута входу ріжучого зерна в оброблюваний матеріал під час абразивної обробки, а у роботі [14] – шляхи зменшення енергоємності механічної обробки. Однак, як правило, ці завдання вирішуються експериментальним шляхом, що дозволяє отримати часткові рішення для конкретних умов обробки, а це обмежує можливості узагальненого теоретичного аналізу закономірностей механіки процесу різання та порівняння фізичних і технологічних параметрів абразивної та лезової обробки. Крім того, у науково-технічній літературі недостатньо розкрито фізичні умови зниження силової та теплової напруженості процесів шліфування і лезової обробки з точки зору управління умовами утворення мікрорізів та зменшення енергоємності обробки. Тому ця робота є подальшим розвитком роботи [13], в якій проведено поглиблений теоретичний аналіз умов зниження силової напруженості процесів механічної обробки.

Мета дослідження, постановка проблеми. Метою дослідження є теоретичне визначення основних напрямів підвищення ефективності абразивної та лезової обробки деталей транспортних машин завдяки зниженню енергоємності обробки, особливо, шляхом зміни кінематики утворення мікрорізів у процесі різання.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- розробити спрощені математичні моделі визначення енергоємності обробки під час абразивної та лезової обробки;
- теоретично обґрунтувати умови зменшення енергоємності обробки (умовного напруження різання) для різних кінематичних схем абразивної та лезової обробки,
- розробити практичні рекомендації щодо раціонального застосування ефективних технологій механічної обробки транспортних деталей та впровадити їх у виробництво.

Матеріали дослідження. У роботі [13] наведено аналітичну залежність для визначення енергоємності обробки, що дорівнює умовному напруженню різання σ , яке отримано з позиції мікрорізання зернами шліфувального круга та стружкоутворення без урахування тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсуб} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \psi_1}{[1 - \sin(\alpha + \psi_1)]}, \quad (1)$$

де $\tau_{зсуб}$ – межа міцності на зсув оброблюваного матеріалу, Н/м²; α – кут входу абразивного зерна в оброблюваний матеріал; $\psi_1 = \psi + \gamma$; ψ – умовний кут тертя ріжучого зерна з оброблюваним матеріалом ($\operatorname{tg} \psi = f$ – коефіцієнт тертя); γ – негативний передній кут ріжучого зерна.

Як витікає із залежності (1), зменшити умовне напруження різання σ (енергоємність обробки) можна, головним чином, шляхом збільшення знаменника залежності (1) завдяки зменшенню тригонометричної функції $\sin(\alpha + \psi_1)$, тобто зменшенню суми кутів $(\alpha + \psi_1) = (\alpha + \psi + \gamma)$. Для цього необхідно зменшити кути α , ψ і γ , що досягається зміною форми мікрорізів ріжучими зернами: переходом від зустрічного шліфування

периферією круга ($\alpha > 0$, рис. 1,а) до кінематичних схем торцевого і попутного шліфування периферією круга, які реалізують умови $\alpha = 0$ і $\alpha < 0$ (рис. 1,б), зменшенням інтенсивності тертя ріжучого зерна з оброблюваним матеріалом і зменшенням негативного переднього кута ріжучого зерна γ шляхом застосування кругів із синтетичних надтвердих матеріалів, що характеризуються високою гостротою ріжучих кромки, а також застосуванням ефективних методів правлення шліфувального круга у процесі шліфування, усуваючи своєчасно із робочої поверхні круга затуплені зерна [15].

Як видно, найбільшого ефекту обробки можна досягти під час здійснення процесу шліфування за схемою, що реалізує умову $\alpha < 0$, тобто за схемою попутного шліфування, коли товщина зрізу в початковий момент приймає найбільше значення і зменшується в міру врізання ріжучого зерна в оброблюваний матеріал.

Необхідно зазначити, що сума кутів $(\alpha + \psi_1)$ повинна бути меншою за 90° . В іншому випадку процес різання і, відповідно, утворення мікростружок і знімання металу під час шліфування неможливий, оскільки $\sin(\alpha + \psi_1) \rightarrow 1$, а енергоємність обробки $\sigma \rightarrow \infty$, що призведе лише до пружно-пластичного деформування оброблюваного матеріалу без його зрізу. Цим можна пояснити високу силу, а отже, і теплову напруженість процесу шліфування периферією круга, оскільки можливий випадок, коли сума кутів $(\alpha + \psi_1) \rightarrow 90^\circ$, а $\sigma \rightarrow \infty$. Цим також можна пояснити ефективність застосування торцевого шліфування, за яким реалізується умова $\alpha = 0$ і має місце зменшення суми кутів $(\alpha + \psi_1)$, а, відповідно, і умовного напруження різання σ (енергоємності обробки). Завдяки даному фізичному ефекту обробки отримала широке застосування на практиці схема заточування ріжучих лезових інструментів торцевими шліфувальними кругами, виготовленими із синтетичних надтвердих матеріалів, які характеризуються невеликими значеннями негативного переднього кута ріжучого зерна γ . Крім того, синтетичні надтверді матеріали мають найменший коефіцієнт тертя f (найменший умовний кут тертя ріжучого зерна з оброблюваним матеріалом ψ), що сприяє зменшенню тригонометричної функції $\sin(\alpha + \psi_1)$ в залежності (1) і, відповідно, зменшенню умовного напруження різання σ (енергоємності обробки). У результаті під час шліфування забезпечується висока якість оброблених поверхонь, виключається утворення на них різних температурних дефектів (припикань, мікротріщин тощо).

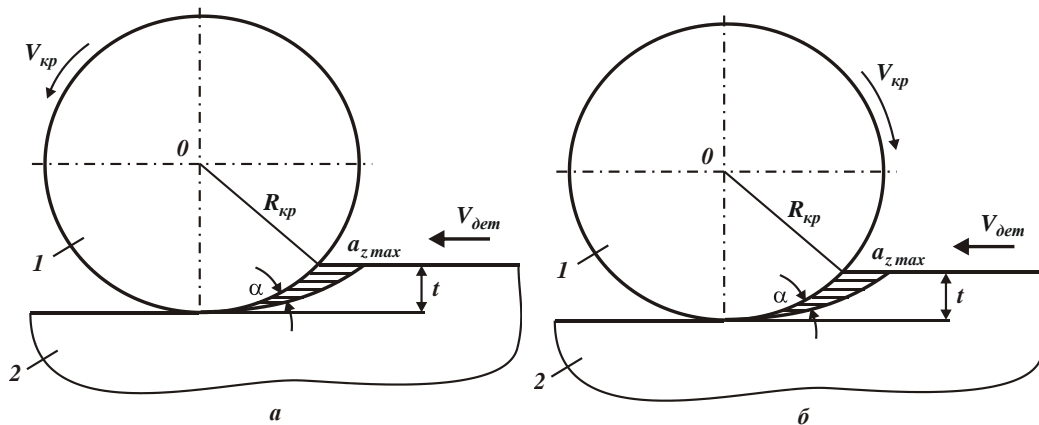


Рис. 1. Розрахункові схеми процесу шліфування: а – зустрічне шліфування (випадок $\alpha > 0$); б – попутне шліфування (випадок $\alpha < 0$); 1 – шліфувальний круг; 2 – оброблювана деталь

Як встановлено раніше, найбільший ефект обробки досягається під час попутного шліфування, коли кут $\alpha < 0$. У цьому випадку зменшуються сума кутів $(\alpha + \psi_1)$ і тригонометрична функція $\sin(\alpha + \psi_1)$, а, відповідно, знаменник залежності (1). Також зменшується тригонометрична функція $\cos \alpha = \cos(-\alpha)$ в чисельнику залежності (1), що створює додатковий ефект зменшення умовного напруження різання σ .

Слід зазначити, що із залежності (1) витікає неоднозначний характер зміни умовного напруження різання σ зі збільшенням кута ψ_1 . Завдяки зменшенню знаменника залежності (1) умовне напруження різання σ збільшується і за значенням $\psi_1 = 90^\circ - \alpha$ прагне до нескінченності. Тригонометрична функція $\cos \alpha$, що знаходиться у чисельнику залежності (1), навпаки, зменшується зі збільшенням кута ψ_1 і за значенням $\psi_1 = 90^\circ$ набуває нульового значення. Отже, в діапазоні $0 < \psi_1 < 90^\circ$ має існувати екстремум функції σ .

Для визначення екстремального характеру зміни умовного напруження різання σ від кута ψ_1 слід підкорити функцію σ необхідній умові екстремуму ($\sigma'_{\psi_1} = 0$).

Для зручності аналізу залежність (1) із урахуванням тригонометричного перетворення $\sin(\alpha + \psi_1) = \sin \alpha \cdot \cos \psi_1 + \cos \alpha \cdot \sin \psi_1$ необхідно подати у вигляді:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{\left(\frac{1}{\cos \alpha \cdot \cos \psi_1} - \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \psi_1 \right)}. \quad (2)$$

Тоді

$$\sigma'_{\psi_1} = \frac{-2 \cdot \tau_{зсув}}{\left(\frac{1}{\cos \alpha \cdot \cos \psi_1} - \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \psi_1 \right)^2} \cdot \left(\frac{\sin \psi_1}{\cos \alpha \cdot \cos^2 \psi_1} - \frac{1}{\cos^2 \psi_1} \right) = 0. \quad (3)$$

Розв'язуючи отримане рівняння (3), визначено екстремальне значення кута ψ_1 :

$$\sin \psi_1 = \cos \alpha. \quad (4)$$

Розрахунками встановлено, що друга похідна σ''_{ψ_1} у точці екстремуму набуває негативного значення. Тому має місце максимум функції σ у точці екстремуму.

В узагальненому вигляді характер зміни функції $\sigma / 2\tau_{зсув}$, яка визначається залежністю (1), зі збільшенням кута ψ_1 показано у табл. 1 та на рис. 2. Як видно, незалежно від значення кута α , функція $\sigma / 2\tau_{зсув}$ набуває нескінченного значення за кутом $\psi_1 = 90^0 - \alpha$. Так, за кутом $\alpha = 0$ нескінченне значення функції $\sigma / 2\tau_{зсув}$ досягається за значенням $\psi_1 = 90^0$ (рис. 2, а); за кутом $\alpha = 45^0$ – відповідно, за значенням $\psi_1 = 45^0$ (рис. 2,б); за кутом $\alpha = -45^0$ – відповідно, за значенням $\psi_1 = 135^0$ (рис. 2, в).

Таблиця 1 – Розрахункові значення функції $\sigma / 2\tau_{зсув}$

$\psi_1, ^0$	0	30	45	60	90	135
$\alpha = 0$	1	1,73	2,41	3,72	∞	–
$\alpha = 45^0$	2,41	18	∞	10,1	0	–
$\alpha = -45^0$	0,41	0,48	0,5	0,47	0	∞

За позитивних значень кута α ($\alpha = 0$; $\alpha = 45^0$) екстремум функції $\sigma / 2\tau_{зсув}$ відсутній, а за негативних значень кута α – існує і, відповідно, до залежності (4) і табл. 1, за кутом $\alpha = -45^0$ досягається за значенням кута $\psi_1 = 45^0$.

За значенням кута $\psi_1 = 90^0$ функція $\sigma / 2\tau_{зсув}$ набуває нульового значення як за позитивних, так і негативних значень кута α (крім випадку $\alpha = 0$).

Встановлений характер зміни функції $\sigma / 2\tau_{зсув}$ обумовлено зміною умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β , який у загальному вигляді описується аналітичною залежністю [13]:

$$\beta = \frac{\pi}{4} + \frac{\alpha - \psi_1}{2}. \quad (5)$$

Зі збільшенням кута ψ_1 кут β зменшується, що і визначає збільшення функції $\sigma / 2\tau_{зсув}$. За значенням кута $\psi_1 = 90^0 - \alpha$, за яким функція $\sigma / 2\tau_{зсув}$ набуває нескінченного значення, умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу $\beta = \alpha$. І в цьому випадку кут β дорівнює куту входу абразивного зерна в оброблюваний матеріал α , тобто відсутні процеси різання та стружкоутворення, має місце лише процес пружно-пластичного деформування матеріалу без відділення стружки.

За значенням кута $\psi_1 > 90^0 - \alpha$ кут $\beta < \alpha$. Отже, і в цьому випадку має місце процес пружно-пластичного деформування матеріалу без відділення стружки. Це узгоджується із розрахунковими даними функції $\sigma / 2\tau_{зсув}$ для випадків $\alpha = 0$ і $\alpha = 45^0$, наведених у табл. 1 і рис. 2, а,б. Як видно, у діапазоні зміни кута $\psi_1 < 90^0 - \alpha$ відбуваються процеси різання та стружкоутворення, а в діапазоні $\psi_1 > 90^0 - \alpha$ – процес пружно-пластичного деформування матеріалу без відділення стружки. (рис. 2, а,б).

За кутом $\alpha = -45^0$ зі збільшенням кута ψ_1 , відповідно до залежності (5), умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β зменшується і за значенням кута $\psi_1 = 45^0$ стає рівним нулю, тобто в цьому випадку процеси різання та стружкоутворення переходять у процес пружно-пластичного деформування

матеріалу без відділення стружки. За кутом $\psi_1 > 45^0$ кут β приймає негативні значення, що виключає можливість здійснення процесу різання та стружкоутворення. Отже, в діапазоні зміни кута $\psi_1 < \alpha^*$, де кут α^* визначається із залежності (4), відбуваються процеси різання та стружкоутворення, а в діапазоні зміни кута $\psi_1 > \alpha^*$ – процес пружно-пластичного деформування матеріалу без відділення стружки. Таким чином, використовуючи аналітичну залежність для визначення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β можна науково обгрунтовано підійти до обгрунтування характеру зміни функції $\sigma / 2\tau_{зсув}$.

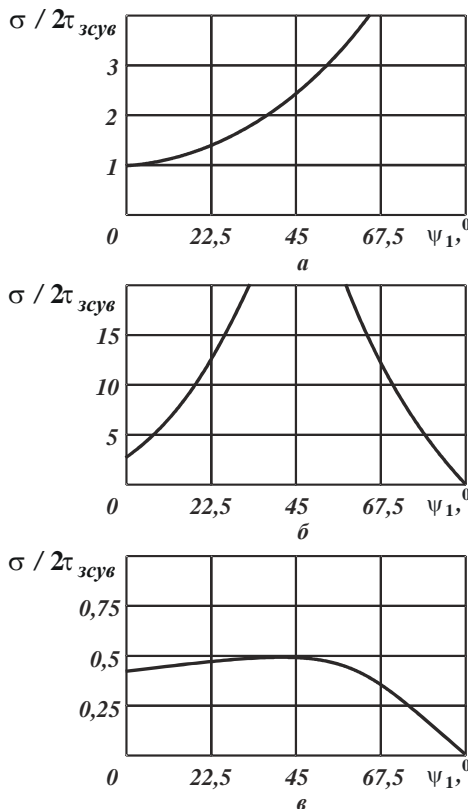


Рис. 2. Характер зміни функції $\sigma / 2\tau_{зсув}$ залежно від кута ψ_1 : а – $\alpha = 0$; б – $\alpha = 45^0$; в – $\alpha = -45^0$

Очевидно, зі збільшенням кута α умовне напруження різання σ (енергоємність обробки) збільшується. Найменші значення σ у цьому разі досягаються за кутом $\alpha = -45^0$. Із цього можна зробити висновок про те, що в залежності (1) переважає знаменник, оскільки саме він визначає умови здійснення процесів різання та стружкоутворення і, відповідно, характер зміни напруження різання σ (енергоємності обробки) від кутів ψ_1 і α . Відомо також, що, аналогічно шліфуванню, точіння також ефективно здійснювати із негативним кутом α . Цим пояснюється ефективність практичного використання тангенціального точіння, коли різання здійснюється зі змінною товщиною зрізу, що змінюється від максимального значення до нуля.

Традиційні схеми точіння реалізують умову $\alpha = 0$. У цьому випадку залежність (1) можна спростити та подати у вигляді:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{\operatorname{tg}\left(45^0 - \frac{\psi_1}{2}\right)}. \quad (6)$$

Із урахуванням відомої формули професора Зворикіна К. О. для визначення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу (під час точіння):

$$\beta = 45^0 - \frac{(\psi - \gamma)}{2}, \quad (7)$$

яка за умови $\alpha = 0$ ідентична залежності (5), залежність (6) для позитивного переднього кута різця γ набуває вигляду:

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{зсув}}{\operatorname{tg}\beta}. \quad (8)$$

Виходячи із залежностей (6) і (8), зменшити умовне напруження різання σ (енергоємність обробки) можна цілком однозначно шляхом зменшення кута ψ_1 або збільшення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β .

Розглядаючи під час точіння кут $\psi_1 = \psi - \gamma$, видно, що зменшити його можна зменшенням умовного кута ψ тертя передньої поверхні різця із стружкою, що утворюється, і зменшенням позитивного переднього кута різця γ . Виходячи із залежності (6), найменше значення σ буде досягтися за кутом $\psi_1 = 0$, тобто за умови $\psi = \gamma$, де γ – позитивний передній кут різця. Безперечно, і під час лезової обробки, як і під час шліфування, можна реалізувати умову $\alpha < 0$, забезпечуючи тим самим зменшення умовного напруження різання σ (енергоємність обробки). Ця умова реалізується, наприклад, під час попутного фрезерування, особливо, торцевою фрезою.

Із залежності (8) витікає, що під час точіння умовне напруження різання σ (енергоємність обробки) набуває завжди менших значень, ніж під час шліфування, оскільки у цьому випадку умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β більше. Це витікає із формули (7) професора Зворикіна К. О., яка в умовах шліфування набуває вигляду

$$\beta = 45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2} \tag{9}$$

внаслідок наявності на ріжучих зернах негативного переднього кута γ . Отже, як зазначалося раніше, зменшення негативного переднього кута ріжучого зерна γ є найважливішою умовою зменшення умовного напруження різання σ (енергоємності обробки) σ . Цим пояснюється те, що в умовах точіння можна досягти значно більшої продуктивності обробки, ніж в умовах шліфування, не допускаючи при цьому утворення на поверхнях оброблюваних температурних дефектів [16]. Тому в останні роки на практиці все ширше на фінішних операціях механічної обробки замість шліфування застосовують сучасні технології високошвидкісного точіння та фрезерування, які забезпечують високі показники продуктивності та якості обробки [17, 18]. Особливо ефективно застосовувати алмазне точіння, яке завдяки високій гостроті ріжучої кромки та низькому коефіцієнту тертя алмазних зерен із оброблюваним матеріалом забезпечує різке зниження сили і температури різання та, відповідно, високоякісну обробку.

Поряд із умовним напруженням різання σ (енергоємністю обробки), найважливішим параметром процесу різання є відношення тангенціальної P_z і радіальної P_y складових сили різання [13]:

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{1}{\text{tg}(\alpha + \psi_1)} \tag{10}$$

У табл. 2 та на рис. 3 показано характер зміни відношення P_z / P_y залежно від кута ψ_1 . Як видно, відношення P_z / P_y зменшується зі збільшенням кута ψ_1 , причому для $\alpha = 0$ – у всьому діапазоні зміни кута ψ_1 (від 0 до 90°). Зі збільшенням кута α ($\alpha = 45^\circ$) діапазон зміни кута ψ_1 звужується (від 0 до 45°), а негативного значення $\alpha = -45^\circ$ – зміщується в зону більших значень кута ψ_1 (від 45° до 90°). Найбільших значень відношення досягає за негативного значення $\alpha = -45^\circ$, коли найбільш ефективно протікають процеси різання та стружкоутворення, особливо, зі збільшеними значеннями кута ψ_1 (за негативного переднього кута ріжучого зерна γ).

Таблиця 2 – Розрахункові значення відношення P_z / P_y

$\psi_1, ^\circ$	0	30	45	60	90
$\alpha = 0$	∞	1,7	1,0	0,55	0
$\alpha = 45^\circ$	1,0	0,28	0	–	–
$\alpha = -45^\circ$	–	–	∞	4,0	1,0

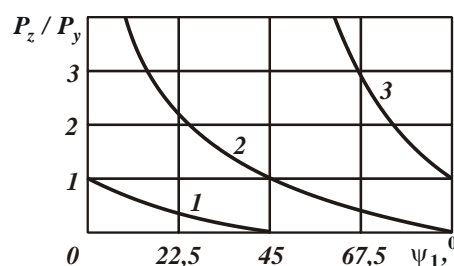


Рис. 3. Характер зміни відношення P_z/P_y залежно від кута ψ_1 : 1 – $\alpha = 0$; 2 – $\alpha = 45^\circ$; 3 – $\alpha = -45^\circ$

Як витікає із залежності (10), зі збільшенням суми кутів $(\alpha + \psi_1)$ відношення P_z/P_y зменшується, що указує на переважання в силівній напруженості процесу різання радіальної P_y складової сили різання. Отже, під час шліфування відношення P_z/P_y буде більше, ніж під час лезової обробки внаслідок більшого кута ψ_1 , оскільки під час шліфування $\psi_1 = \psi + \gamma$, а під час точіння $\psi_1 = \psi - \gamma$. Таким чином, показано, що між умовним напруженням різання σ (енергоємністю обробки) і відношенням P_z/P_y існує зворотний зв'язок: більшому значенню σ відповідає менше значення P_z/P_y . Цим можна пояснити те, що під час шліфування відношення P_z/P_y змінюється в межах $0 \dots 1$, а під час лезової обробки відношення $P_z/P_y > 1$ і може набувати значення до 10.

Невелике значення відношення P_z/P_y під час шліфування обумовлене невеликим відношенням товщини зрізу a_z до радіусу округлення вершини ріжучого зерна R , тобто a_z/R . Відомо, що перехід від процесу пружно-пластичного деформування оброблюваного матеріалу до процесу різання можливий за відношенням a_z/R , що дорівнює $0,04 \dots 0,08$ (за даними професора Крагельського І. В.). Тому з точки зору підвищення ефективності процесу різання необхідно збільшувати відношення a_z/R , відповідно, і відношення P_z/P_y завдяки зменшення кутів α і ψ_1 . Це сприятиме зниженню умовного напруження різання σ (енергоємності обробки).

Радіус заокруглення вершини ріжучого зерна R можна виразити через його негативний передній кут γ (рис. 4). Для цього необхідно встановити кут $\varphi = 90^\circ - \gamma$ за умови:

$$\frac{R - a_z}{R} = \cos \varphi, \tag{11}$$

звідки

$$\frac{a_z}{R} = 1 - \sin \gamma. \tag{12}$$

Отже, зі збільшенням кута γ відношення a_z/R зменшується, що, відповідно, призводить до зниження відношення P_z/P_y та збільшення умовного напруження різання σ (енергоємності обробки). Як показує практика, під час шліфування загостреним алмазним кругом відношення a_z/R може бути збільшене аж до 1. У цьому випадку $\gamma \rightarrow 0$.

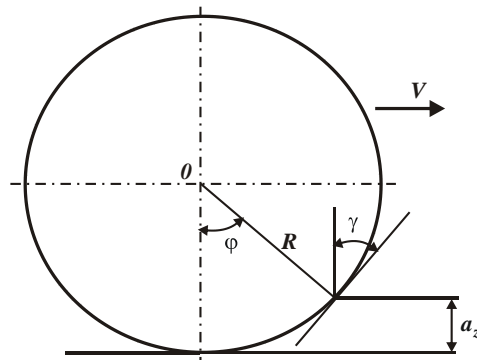


Рис. 4. Розрахункова схема відношення a_z/R

Під час точіння передній кут різця γ набуває позитивного значення, тому залежність (12) набуде вигляду:

$$\frac{a_z}{R} = 1 + \sin \gamma. \tag{13}$$

Отже, відношення a_z/R більше 1, що узгоджується з практикою механічної обробки.

Виходячи із залежності (9), за умови $\beta = 0$ можна встановити максимально можливе значення кута $\psi_1 = \psi + \gamma$, за яким здійснимий процес мікрорізання одиничним зерном. Видно, що ця умова виконується за кутом $\psi_1 = 90^\circ$, тобто за негативним переднім кутом ріжучого зерна $\gamma = 90^\circ - \psi$.

Якщо умовний кут тертя ріжучого зерна з оброблюваним матеріалом $\psi \rightarrow 0$, то кут $\gamma \rightarrow 90^0$. У цьому випадку здійснюватиметься знімання металу фактично затупленим зерном. Зі збільшенням кута ψ граничний негативний передній кут ріжучого зерна γ необхідно зменшувати, тобто утворення мікрорізу відбуватиметься під час мікрорізання більш гострим зерном.

Відношення a_z/R з урахуванням кута $\gamma = 90^0 - \psi$ можна подати у вигляді:

$$\frac{a_z}{R} = 1 - \sin(90^0 - \psi) = 1 - \cos\psi. \quad (14)$$

Як видно, відношення a_z/R однозначно визначається кутом ψ (табл. 3, рис. 5): чим він більший, тим більше відношення a_z/R . із фізичної точки зору це означає, що, відповідно до залежності $\gamma = 90^0 - \psi$, зменшується негативний передній кут ріжучого зерна γ , а це сприяє поліпшенню умов стружкоутворення, збільшенню відношень a_z/R і P_z/P_y , зменшенню умовного напруження різання σ (енергоємності обробки).

Таблиця 3 – Розрахункові значення коефіцієнта тертя $f = tg\psi$, негативного переднього кута ріжучого зерна γ та відношення a_z/R

ψ , градус	0	10	20	30	40	45
f	0	0,176	0,364	0,577	0,839	1,0
γ , градус	90	80	70	60	50	45
a_z/R	0	0,015	0,06	0,134	0,234	0,29

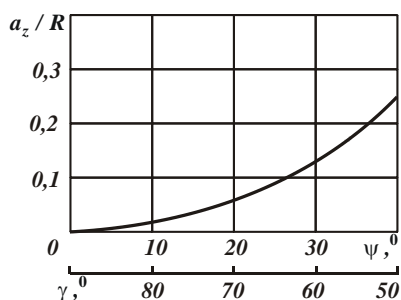


Рис. 5. Залежність відношення a_z/R від умовного кута тертя ріжучого зерна з оброблюваним матеріалом ψ (негативного переднього кута ріжучого зерна γ)

Як відомо, мінімальне значення відношення a_z/R , за яким відбувається перехід від процесу пружно-пластичного деформування матеріалу до процесу різання (під час мікрорізання одиничним зерном), за експериментальними даними професора Богомолова М. І. дорівнює 0,04 ... 0,08, а за експериментальними даними професора Крагельського І. В. дорівнює 0,14 ... 0,17. Із табл. 3, це досягається за значенням кута $15^0 < \psi < 30^0$. Це відповідає коефіцієнту тертя $0,2 < f < 0,4$, який досягається в умовах тертя оброблюваної сталі з абразивним зерном. Таким чином, теоретично обґрунтовано відомі експериментальні дані, що визначають умови здійснення процесу мікрорізання одиничним зерном.

Визначимо умови зменшення тангенціальної P_z і радіальної P_y складових сили різання під час точіння, виходячи з наступних залежностей [15]:

$$P_z = \sigma \cdot S_{зріз}; \quad P_y = \frac{\sigma}{K_{різ}} \cdot S_{зріз} \quad (15)$$

де $K_{різ}$ – коефіцієнт різання, визначається залежністю (10); $S_{зріз} = S \cdot t$ – площа поперечного перетину зрізу, м²; S – подача, м/об.; t – глибина різання, м.

Зменшити P_z і P_y можна зменшенням лише умовного напруження різання σ (енергоємності обробки) σ , оскільки зменшення параметрів режиму різання S і t призводить до зменшення продуктивності обробки, що неефективно. Зменшення P_y передбачає зменшення σ та збільшення $K_{різ}$. Отже, параметри σ і $K_{різ}$ взаємопротилежні, що посилює вплив кута $(\alpha + \psi_1)$, який входить до залежностей (1) і (10), на радіальну P_y складову сили різання, тобто кут $(\alpha + \psi_1)$ більшою мірою впливає на P_y , ніж на P_z .

Під час шліфування в залежностях (15) замість параметра $S_{зріз}$ необхідно розглядати миттєву сумарну площу поперечного перетину зрізу всіма одночасно працюючими зернами круга $S_{мит} = Q/V_{кр}$ [15], де $Q = B \cdot V_{дем} \cdot t$ – продуктивність обробки, м³/с; B – ширина шліфування, м; $V_{дем}$ – швидкість деталі, м / с; t – глибина шліфування, м; $V_{кр}$ – швидкість круга, м/с. Тоді залежності (15) набудуть вигляду:

$$P_z = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}}; \quad P_y = \frac{\sigma}{K_{ш}} \cdot \frac{Q}{V_{кр}} \quad (16)$$

де $K_{ш} = K_{різ}$ – коефіцієнт шліфування ($K_{ш} < 1$).

Із залежностей (16) витікає, що досягти найбільш суттєвого зменшення складових сили різання під час шліфування можна завдяки збільшенню швидкості круга $V_{кр}$. Власне, цим обумовлено основний ефект шліфування, який вигідно відрізняє його від процесу точіння. Зменшення тангенціальної P_z та радіальної P_y складових сили різання під час шліфування завдяки збільшенню швидкості круга $V_{кр}$ зумовлює можливість зменшення пружних переміщень, що виникають у технологічній системі, і підвищення точності обробки. При цьому також зменшуються висотні параметри шорсткості обробленої поверхні [19]. Такого ефекту обробки складно досягти в умовах точіння, що дозволяє розглядати шліфування основним високопродуктивним методом фінішної обробки, який забезпечує високі показники точності оброблюваних поверхонь. Однак, як відомо [15, 20], температура різання під час шліфування визначається, головним чином, умовним напруженням різання (енергоємністю обробки) σ , яке значно більше, ніж під час точіння. Тому домогтися високих показників якості обробки, виключаючи утворення припикань, мікротріщин та інших температурних дефектів, складніше. Отже на фінішних операціях слід застосовувати не тільки процеси шліфування, а й сучасні процеси лезової обробки [17, 18]. Особливо це відноситься до виготовлення високоякісних і високоточних деталей транспортних машин. Так, впровадження у виробництво машинобудівного підприємства технологій високошвидкісного різання прогресивними ріжучими твердосплавними інструментами зі зносостійкими покриттями фірми TaeguTec із застосуванням високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу «обробний центр» дозволило значно підвищити ефективність обробки складнопрофільних поверхонь деталі «Чашка міжколісного диференціала» (рис. 6).

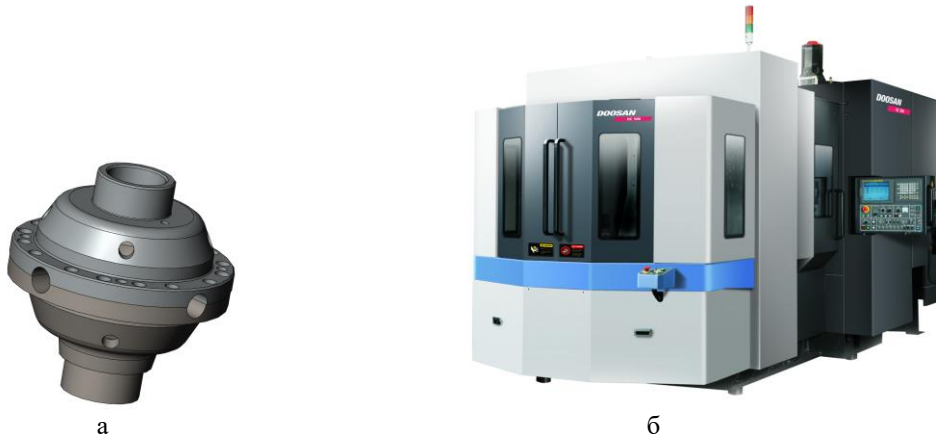




Рис. 6. Деталь «Чашка міжколісного диференціала» (а), вертикальний токарний обробний центр PUMA V400L (б), вертикальний токарний обробний центр із фрезерною функцією PUMA V400ML (в) та горизонтальний фрезерний обробний центр DOOSAN HC 400 (г)

Таким чином, у роботі визначено та обґрунтовано різні механізми формування параметрів точності та якості оброблюваних поверхонь під час абразивної і лезової обробки та надано практичні рекомендації щодо раціонального застосування ефективних технологій механічної обробки деталей транспортних машин.

Висновки. На основі проведених досліджень теоретично встановлено умови зменшення умовного напруження різання (енергоємності обробки) під час шліфування та лезової обробки деталей транспортних машин з урахуванням кута входу ріжучого інструменту в оброблюваний матеріал. Встановлено, що в умовах шліфування вони полягають у зміні форми мікрорізів ріжучими зернами: переході від зустрічного шліфування периферією круга до кінематичних схем торцевого і попутного шліфування периферією круга, зменшенні інтенсивності тертя ріжучого зерна з оброблюваним матеріалом і негативного переднього кута ріжучого матеріалу. В умовах лезової обробки вони полягають у застосуванні тангенціального точіння, попутного фрезерування, особливо, торцевою фрезою. Доведено існування екстремуму (максимуму) умовного напруження різання від суми умовного кута тертя ріжучого зерна з оброблюваним матеріалом і негативного переднього кута ріжучого зерна. Визначено діапазони зміни цієї суми, за яких умовне напруження різання набуває найменших значень. Показано, що характер зміни умовного напруження різання обумовлено зміною умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу. Встановлено, що нескінченні значення умовного напруження різання досягаються за умови рівності умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу і кута входу абразивного зерна в оброблюваний матеріал. Виходячи із цього, необхідно збільшувати умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу шляхом зниження інтенсивності тертя в зоні різання та негативного переднього кута ріжучого зерна. Теоретично визначено умови підвищення ефективності лезової обробки шляхом збільшення відношення тангенціальної та радіальної складових сили різання, а також відношення товщини зрізу до радіусу округлення вершини ріжучого інструменту, які полягають у зменшенні тертя в зоні різання та переднього кута ріжучого інструменту. Наведено результати впровадження у виробництво машинобудівного підприємства технологій високошвидкісного різання прогресивними ріжучими твердосплавними інструментами зі зносостійкими покриттями фірми TaeguTec із застосуванням високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу «обробний центр», що дозволило значно підвищити ефективність обробки складнопрофільних поверхонь деталі «Чашка міжколісного диференціала».

Список літератури

1. Технологія машинобудування : підручник / О. В. Якимов, В. М. Царюк, О. О. Якимов, Г. О. Оборський, В. П. Ларшин, О. В. Самойленко. – Одеса: Астропринт, 2001. – 608 с.
2. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков: ГП УкрНТЦ "Енергосталь", 2016. – 448 с.
3. Теплофизика механічної обробки : підручник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник та ін. – Одеса : Астропринт, 2000. – 256 с.
4. Узунян М. Д. Алмазно-искровое шлифование твердых сплавов / М. Д. Узунян. – Харків : НТУ "ХПІ", 2003. – 359 с.
5. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні : навч. посібник / за ред. А. І. Грабченка. – Харків: ХДПУ, 1999. – 436 с.
6. Лавріненко В. І. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник / В. І. Лавріненко, М. В. Новіков / Під заг. ред. академіка НАНУ М. В. Новікова. – Київ: ІНМ НАН України, 2013. – 456 с.

7. Лавриненко В. И. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки : монография / В. И. Лавриненко, В. Ю. Солод. – Каменское: ДГТУ, 2016. – 529 с.
8. Шлифование труднообрабатываемых материалов кругами из алмазов и эльбора : монография / П. Г. Матюха, В. В. Полтавец, А. В. Бурдин, В. В. Габитов. – Черкассы: Вертикаль, издатель Кандыч С. Г., 2015. – 252 с.
9. Пермяков А. А. Синтез технологических параметров высокопроизводительной обработки зубчатых реек спаренными фрезами / А. А. Пермяков, А. А. Ключко, Ю. А. Синица // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 17 (1239). – С. 71–77.
10. Обработка материалов лезвийным инструментом / под ред. С. А. Клименко. – Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2006. – 316 с.
11. Интегрированные процессы обработки материалов резанием : учебник [для высш. учебн. заведений] / А. И. Грабченко, В. А. Залого, Ю. Н. Внуков и др.; под общ. ред. А. И. Грабченко и В. А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2017. – 451 с.
12. Моделирование систем : монография / Г. А. Оборский, А. Ф. Дашченко, А. В. Усов, Д. В. Митришин. – Одесса: Астропринт, 2013. – 664 с.
13. Новіков Ф. В. Основи струминно-абразивної обробки дрібних деталей : монографія / Ф. В. Новіков, О. О. Анділахай. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2014. – 348 с.
14. Степанов М. С. Сравнительный анализ энергии резания при использовании различных схем шлифования / М. С. Степанов, Ю. В. Тимофеев, В. А. Фадеев // Високі технології в машинобудуванні. Зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – Вип. 2 (13). – С. 108–112.
15. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування : монографія / Ф. В. Новіков. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.
16. Гусарев В. С. Модели процессов. Алгоритмы. Структуры технологических машин : научное издание / В. С. Гусарев. – Одесса: Изд-во "Печатный дом", 2018. – 227 с.
17. Жовтобрюх В. А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.08 / В. А. Жовтобрюх. – Мариуполь, 2012. – 21 с.
18. Жовтобрюх В. А. Проектирование и автоматизированное программирование современных технологий для станков с ЧПУ : монография / В. А. Жовтобрюх, Ф. В. Новиков. – Днепр: ЛИРА, 2019. – 480 с.
19. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке : монография / Ю. К. Новоселов. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 304 с.
20. Новиков Ф. В. Обоснование оптимальной кинематической схемы круглого шлифования по критериям качества и производительности обработки / Ф. В. Новиков, В. А. Анділахай // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Серія: Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 106. – С. 52–67.

Bibliography (transliterated):

1. Tekhnolohiya mashynobuduvannya : pidruchnyk / O. V. Yakymov, V. M. Tsaryuk, O. O. Yakymov, H. O. Obors'kyu, V. P. Larshyn, O. V. Samoylenko. – Odesa: Astroprint, 2001. – 608 s.
2. Sizyy YU. A. Dinamika i teplofizika shlifovaniya / YU. A. Sizyy, D. V. Stalinskiy. – Khar'kov: GP UkrNTTS "Energestal", 2016. – 448 s.
3. Teplofizyka mekhanichnoyi obrobky : pidruchnyk / O. V. Yakymov, A. V. Usov, P. T. Slobodyanyk ta in. – Odesa: Astroprint, 2000. – 256 s.
4. Uzunyan M. D. Almazno-iskrovoye shlifovaniye tverdykh splavov / M. D. Uzunyan. – Kharkiv: NTU "KHPi", 2003. – 359 s.
5. Robochi protsesy vysokyykh tekhnolohiy v mashynobuduvanni : navch. posibnyk / za red. A. I. Hrabchenka. – Kharkiv: KHDPU, 1999. – 436 s.
6. Lavrinenko V. I. Nadtverdi abrazivni ma-terialy v mekhanobrob-tsi: entsyklopedychnyy dovidnyk / V. I. Lavrinenko, M. V. Novikov / Pid zah. red. akademika NANU M. V. Novikova. – Kyiv: INM NAN Ukrayiny, 2013. – 456 s.
7. Lavrinenko V. I. Instrumenty iz sverkhтвердыkh materialov v tekhnolohiyakh abrazivnoy i fiziko-tekhnicheskoy obrabotki : monografiya / V. I. Lavrinenko, V. YU. Solod. – Kamenskoye: DGTU, 2016. – 529 s.
8. Shlifovaniye trudnoobrabatyvayemykh materialov krugami izalmazov i el'bora : monografiya / P. G. Matyukha, V. V. Poltavets, A. V. Burdin, V. V. Gabitov. – Cherkassy: Vertikal', izdatel' Kandych S. G., 2015. – 252 s.
9. Permyakov A. A. Sintez tekhnologicheskikh parametrov vysokoproizvitel'noy obrabotki zubchatykh reyek sparennymi frezami / A. A. Permyakov, A. A. Klochko, YU. A. Sinitsa // Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPi". Zbiryk naukovykh prats'. Seriya: Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni. – Kharkiv: NTU "KHPi". – 2017. – № 17 (1239). – S. 71–77.
10. Obrabotka materialov lezviynym instrumentom / pod red. S. A. Klimenko. – Kiyev: ISM im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy, 2006. – 316 s.
11. Integrirovannyye protsessy obrabotki materialov rezaniyem : uchebnik [dlya vyssh. uchebn. zavedeniy] / A. I. Grabchenko, V. A. Zaloga, YU. N. Vnukov i dr.; pod obshch. red. A. I. Grabchenko i V. A. Zalogi. – Sumy: Universitetskaya kniga, 2017. – 451 s.
12. Modelirovaniye sistem : monografiya / G. A. Oborskiy, A. F. Dashchenko, A. V. Usov, D. V. Mitrishin. – Odessa: Astroprint, 2013. – 664 s.
13. Novіkov F. V. Osnovi struminno-abrazivnoї obrobki dріbnykh detaley: monografiya / F. V. Novіkov, O. O. Andіlahay. – KH. : Vid. KHNEU, 2014. – 348 s.
14. Stepanov M. S. Sravnitel'nyy analiz energii rezaniya pri ispol'zovanii razlichnykh skhem shlifovaniya / M. S. Stepanov, YU. V. Timofeyev, V. A. Fadeyev // Visokі tekhnolohії v mashynobuduvanni. Zb. nauk. pr. – Kharkiv: NTU "KHPi". – 2006. – Vip. 2 (13). – S. 108–112.
15. Novikov F. V. Vysokoproduktyvne almazne shlifuvannya : monografiya / V. V. Novikov. – Kharkiv: Vyd. KHNEU, 2014. – 412 s.
16. Gusarev V. S. Modeli protsessov. Algoritmy. Struktury tekhnologicheskikh mashin : nauchnoye izdaniye / V. S. Gusarev. – Odessa: Izd-vo "Pechatnyy dom", 2018. – 227 s.
17. Zhovtobryukh V. A. Povysheniye effektivnosti mekhanicheskoy obrabotki detaley gidravlicheskikh sistem putem vybora ratsional'nykh parametrov operatsiy po kriteriyu sebestoimosti : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 / V. A. Zhovtobryukh. – Mariupol', 2012. – 21 s.
18. Zhovtobryukh V. A. Proyektirovaniye i avtomatizirovannoye programmirovaniye sovremennykh tekhnolohiy dlya stankov s CHPU : monografiya / V. A. Zhovtobryukh, F. V. Novikov. – Dnepr: LIRA, 2019. – 480 s.
19. Novoselov YU. K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke : monografiya / YU. K. Novoselov. – Sevastopol': SevNTU, 2012. – 304 s.
20. Novikov F. V. Obosnovaniye optimal'noy kinemacheskoy skhemy kruglogo shlifovaniya po kriteriyam kachestva i proizvoditel'nosti obrabotki / F. V. Novikov, V. A. Andilakhay // Visnyk Kharkiv'skoho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. – Seriya: Tekhnichnyy servis APK, tekhnika ta tekhnolohiyi u sil's'kohospodars'komu mashynobuduvanni. – Kharkiv: KHNTUS-H, 2010. – Vyp. 106. – S. 52–67.

Поступила (received) 10.01.2024

Жовтобрюх Валерій Олексійович (Жовтобрюх Валерій Алексеевич, Zhovtobryukh Valeriy Oleksiyovich)

– кандидат технічних наук, доцент закладу вищої освіти кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій Філії Класичного приватного університету у м. Кременчук
Тел. +380503202704, e mail: td@varius.com.ua ORCID: 0009-0007-2438-6082

Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir Vasiliviyth) – доктор технічних наук,

професор кафедри "Здорового способу життя, технологій і безпеки життєдіяльності" Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-067-68-90-342; e-mail: novikovfv@i.ua ORCID: 0000-0001-6996-3356

*СТЕПАНОВ М.С., ІВАНОВА М.С., ЛІТОВЧЕНКО П.І., ІВАНОВА Л.П., СКИДАН Н.П.***АНАЛІЗ ЕНЕРГОНАСИЧЕНОСТІ КРУГЛОШЛІФУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ**

Постійно зростаючі ціни на енергоносії, а також сучасні виклики, пов'язані зі складнощами забезпечення сталого електропостачання є рушійними факторами для досліджень, спрямованих на зниження енергоспоживання металообробним обладнанням. Для ефективного управління та зменшення споживання енергії шліфувальними верстатами запропоновано системи заходів по мінімізації енерговитрат на різання, на переміщення елементів технологічної системи на допоміжне обладнання. Графічно показано характер змінення споживаної потужності в залежності від періоду часу роботи двигунів. Запропоновано при визначенні сумарної потужності технологічної системи шліфувального верстата враховувати потужності електродвигунів приводу обертання шліфувального круга, заготовки, насоса гідроприводу, вентилятора охолодження, насоса змащування підшипників шпинделя, насоса змащування напрямних, насоса подачі МОР, привода магнітного сепаратора, привода фільтра-транспортера очищення МОР.

Ключові слова: шліфувальний верстат, споживання електроенергії, енерговитрати, електродвигун.

**STEPANOV M.S., IVANOVA M.S., LITOVCHENKO P.I., IVANOVA L.P., SKYDAN N.P.
ANALYSING THE ENERGY SATURATION OF CYLINDRICAL GRINDING MACHINES**

Constantly rising energy prices and the current challenges of securing a sustainable power supply are driving research into how to reduce the energy consumption of metalworking equipment. To efficiently manage and reduce energy consumption by grinding machines, a system of measures to minimize energy consumption for cutting, for moving elements of the technological system, and for auxiliary equipment has been proposed. The nature of the change in power consumption depending on the period of engine operation is shown on the graph. When determining the total power of the technological system of a grinding machine, it is proposed to take into account the power of electric motors for driving the rotation of the grinding wheel, workpiece, hydraulic drive pump, cooling fan, spindle bearing lubrication pump, guide lubrication pump, coolant supply pump, magnetic separator drive, coolant cleaning filter-transporter drive.

Keywords: grinding machine, electricity consumption, energy consumption, electric motor.

1. Вступ. Одним з найбільш актуальних шляхів удосконалення технологічних процесів обробки різанням є підвищення енергетичної ефективності металорізальних верстатів при забезпеченні потрібної точності та продуктивності обробки деталей.

Згідно зі звітом Міжнародного енергетичного агентства, на виробничу діяльність припадає 17% світового споживання енергії [1]. Енергоємність технологічних операцій, що виконуються на металорізальному обладнанні, може змінюватися в широкому діапазоні значень. Особливо енерговитратними є операції шліфування, на яких за даними досліджень [2] енергоємність в 10 разів перевищує енергоємність лезової обробки. Для рішення проблеми зниження енергоємності необхідне виконання обов'язкових енергетичних обстежень технологічних систем обробки різанням з метою чіткого визначення енергоємності окремих їхніх споживачів. Наприклад, автори роботи [3] запропонували враховувати енергію, споживану електричним контролером, системою охолодження, обертанням коліс, x-infeed, y-infeed та z-infeed при визначенні сумарного енергоспоживання верстатом. А в роботі [4] зазначається, що споживання електроенергії металорізальним верстатом розподіляється наступним чином: серво-приводи – 17%, гідравлічна система – 27%, система охолодження та змащення – 31%, допоміжні системи – 19%, система контролю – 6 %.

Для проведення вище зазначених обстежень необхідно встановити структуру енерговитрат конкретного верстата і його допоміжних систем.

При рішенні вказаної задачі досягається два позитивних результати:

а) зменшення енергоспоживання верстатом за рахунок інтенсифікації процесу енергозбереження забезпечує зниження собівартості обробки на операціях шліфування;

б) внаслідок виникнення температурних деформацій, як відомо, погіршуються точність круглошліфувальних верстатів [5], тому зниження енергоспоживання і, відповідно, зменшення інтенсивності тепловиділення забезпечує зниження температурних деформацій елементів верстата і, відповідно, підвищення точності обробки деталей.

Таким чином, проблема зниження енергоємності шліфувальних верстатів є особливо актуальною.

2. Мета дослідження. Аналіз елементів шліфувальних верстатів для визначення основних споживачів електроенергії з метою розробки рекомендацій зниження енергоємності шліфувальних операцій.

3. Викладення основного матеріалу та результати. Основними напрямками рішення проблеми зниження енергоємності шліфувальних верстатів є застосування трьох основних комплексних системних заходів по зниженню енергоємності технологічної системи шліфування.

Оскільки головним джерелом тепловиділення у шліфувальному верстаті є зона різання, то зниження енерговитрат у цій зоні має включати систему заходів, структуру яких наведено на рис. 1.



Рис. 1 – Структура системи заходів по мінімізації енерговитрат на різання

Значні енерговитрати приходяться на забезпечення необхідних робочих і допоміжних рухів елементів технологічної системи. Структура заходів по зменшенню цих енерговитрат значно складніша і потребує удосконалення верстатів, схем обробки, застосування сучасних конструктивних і мастильних матеріалів (рис. 2).



Рис. 2 – Структура системи заходів по мінімізації енерговитрат на переміщення елементів технологічної системи

Третім напрямком є зменшення енерговитрат на допоміжне обладнання (рис. 3), а саме: гідравлічні системи мащення і системи застосування МОР, а також системи контролю і керування верстатом.



Рис. 3 – Структура системи заходів по мінімізації енерговитрат на допоміжне обладнання

Для визначення джерел теплоти і ступені їх впливу на загальне теплове поле верстату виконано структурний аналіз енергоспоживання шліфувальним верстатом.

Досвід показує, що основною причиною теплоутворення у шліфувальному верстаті є внутрішні джерела тепла, до яких можна віднести й електродвигуни.

Електродвигуни, як споживачі електричної енергії та частина технологічної системи шліфування, можна поділити на чотири основні групи:

I група – електродвигуни, що забезпечують процес різання (електродвигун приводу обертання шліфувального круга; електродвигун приводу обертання заготовки);

II група – електродвигуни, що забезпечують роботу гідроприводу (електродвигун основного насоса; електродвигун обертання вентилятора охолодження);

III група – електродвигуни, що забезпечують змащування (електродвигун насосів змащування підшипників шпинделя; електродвигун насосів змащування напрямних);

IV група – електродвигуни підсистеми застосування МОР (електродвигун насосу подачі МОР в зону різання; електродвигун магнітного сепаратора очищення МОР; електродвигун переміщення фільтрувальної стрічки фільтра-транспортера очищення МОР).

Робота вищевказаних електродвигунів визначається режимами (параметрами циклу) обробки. Характер змінення споживаної потужності в залежності від періоду часу обробки можна оцінити за допомогою діаграми (рис. 4).

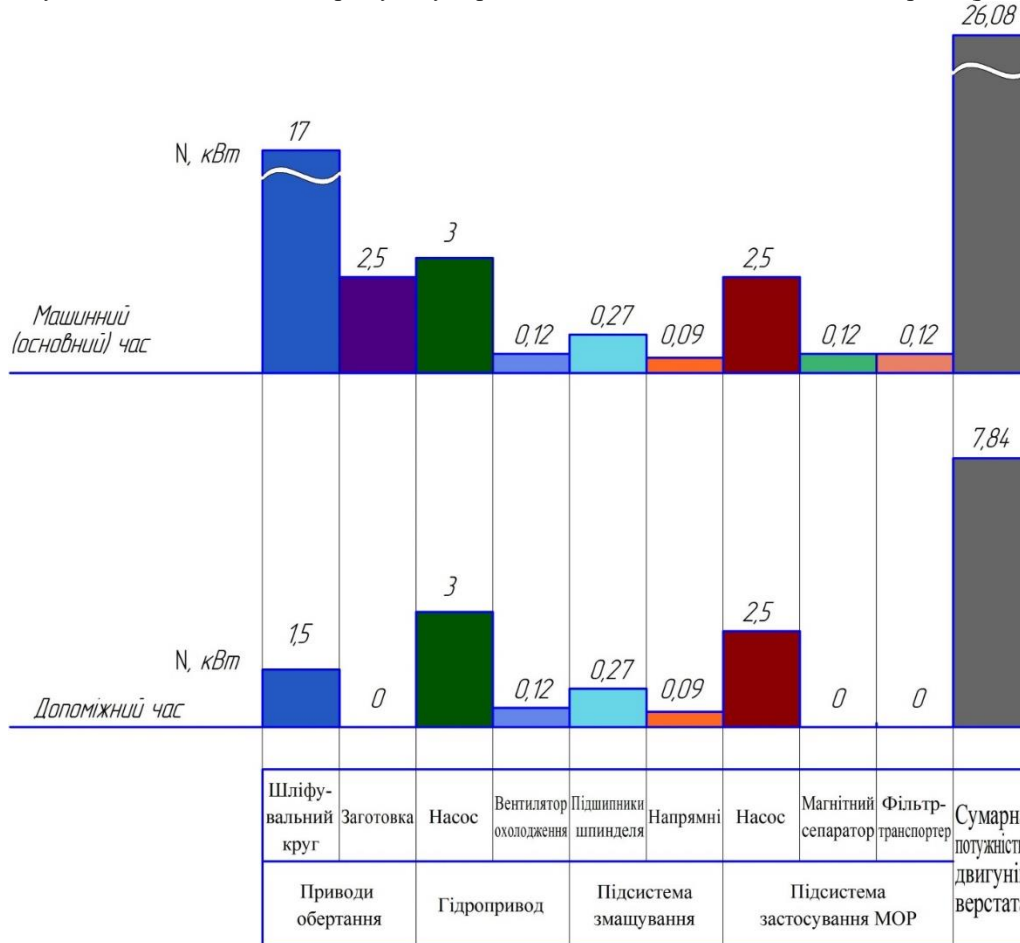


Рис. 4 – Гістограма застосування потужностей електродвигунів круглошліфувального верстата у циклі обробки

Оптимальні параметри процесу шліфування потрібно перевіряти на можливість їх реалізації у певних умовах, тобто на їх належність області допустимих значень. Як відомо, ця область формується комплексом технологічних обмежень, що накладаються на процес шліфування технічними вимогами до якості оброблюваної поверхні, а також обмеженнями потужності приводу верстата. Крім того, для розрахунку режимів різання необхідно знати паспортні дані верстата, в тому числі, потужність приводу обертання шліфувального круга.

Для швидкісного шліфування розроблено нормативи потрібної ефективної потужності шліфування в залежності від величини питомого видалення матеріалу [6, 7].

З врахування сказаного вище, сумарна потужність технологічної системи шліфувального верстата може бути визначена за формулою

$$N_{\Sigma} = N_{шк} + N_z + N_{гп} + N_{во} + N_{зп} + N_{зн} + N_{нМОР} + N_{мс} + N_{фт}, \quad (1)$$

де $N_{шк}$, N_z , $N_{гп}$, $N_{во}$, $N_{зп}$, $N_{зн}$, $N_{нМОР}$, $N_{мс}$, $N_{фт}$ – потужності електродвигунів приводу обертання шліфувального круга, заготовки, насоса гідроприводу, вентилятора охолодження, насоса змащування підшипників шпинделя, насоса змащування напрямних, насоса подачі МОР, приводу магнітного сепаратора, приводу фільтра-транспортера очищення МОР, відповідно.

Аналіз гістограми (рис. 4) показує, що сумарна потужність електродвигунів, які забезпечують функціонування елементів технологічної системи в період машинного часу, більш ніж у 3 рази перевищує сумарну потужність електродвигунів у період допоміжного часу.

Приблизно потужності круглошліфувального верстата витрачається на обертання шліфувального круга (рис. 5). Потужність електродвигуна приводу обертання шліфувального круга коливається у діапазоні від 4 до 30 кВт і більше. Потужність електродвигуна приводу обертання шліфувального круга важких

вальцешліфувальних верстатів може в 6–8 разів перевищувати потужність серійних шліфувальних верстатів (рис. 6).

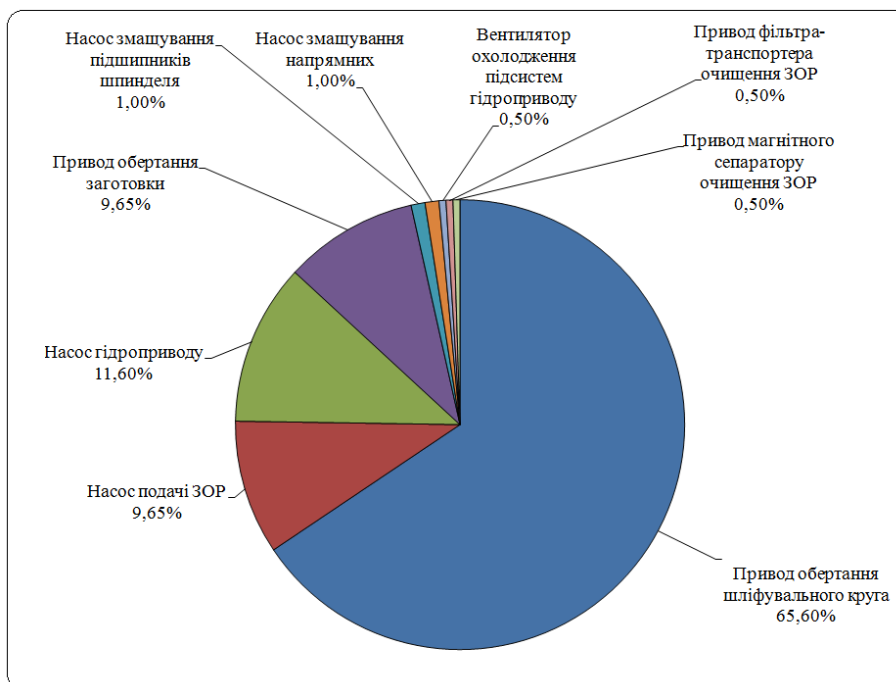


Рис. 5 – Розподіл потужності електродвигунів за характером їх використання в круглошліфувальному верстаті

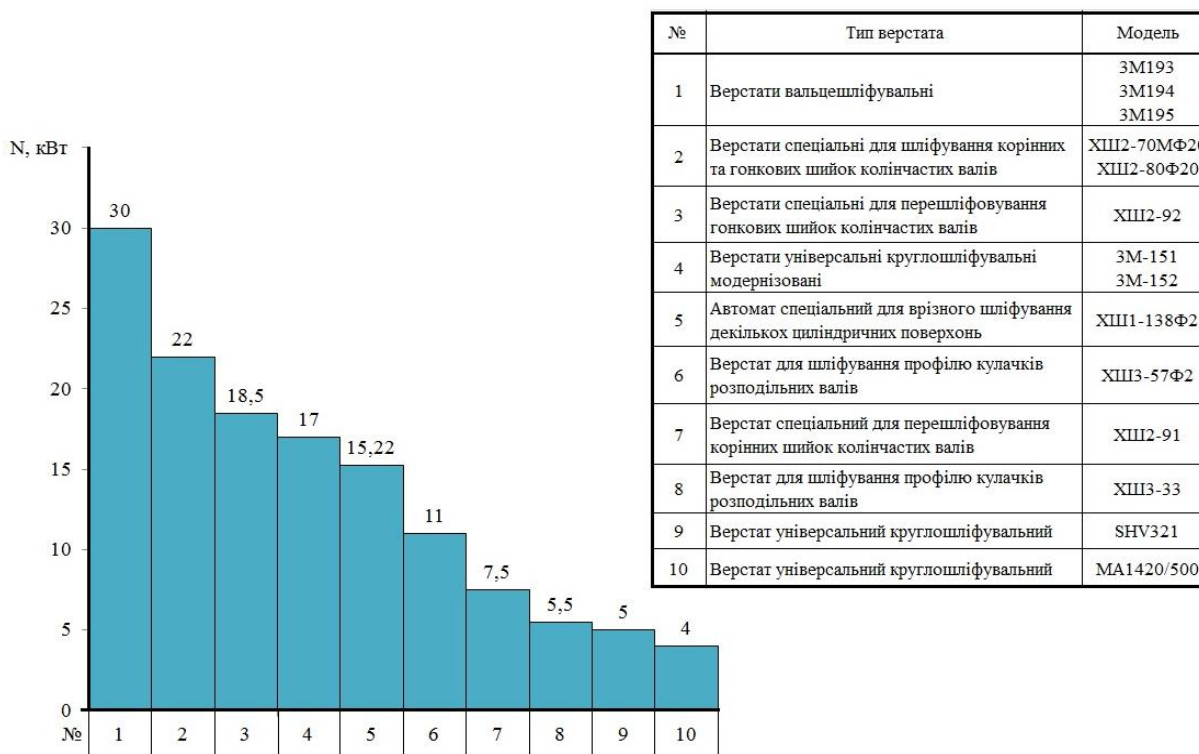


Рис. 6 – Потужність електродвигунів приводу обертання шліфувального круга

Відомо [7], що при шліфуванні практично вся потужність мікрорізання перетворюється у теплову енергію і лише незначна її частка (десяті долі відсотку) перетворюється у приховану енергію зміни кристалічної решітки оброблюваного матеріалу. В цих умовах можна вважати, що головною задачею є зменшення ефективної потужності шліфування, і відповідно, зниження інтенсивності основного джерела тепла, а також застосування менш потужних

електродвигунів.

Як правило, для вирішення цієї проблеми шліфування виконують на оптимальних режимах різання, застосовують ефективні МОР, тощо. Ці заходи вживають для збереження різальної здатності шліфувального круга, яка в процесі різання зменшується, що спричиняє збільшення сили різання та кількості тепла, яке генерується у процесі обробки.

Висновки.

Енергоємність є одним із основних економічних показників при порівняльній оцінці технологічних процесів механічної обробки, причому найбільш енергоємним процесом є абразивна обробка. За рівної продуктивності рівень енергетичних показників процесу може визначатися поєднанням режимів шліфування. Збільшення продуктивності обробки диктує застосування енергонасиченого устаткування, що завжди виправдано з метою забезпечення точності шліфованих деталей. Оснащення верстатного обладнання потужнішими приводами може погіршити теплову обстановку, що призведе до збільшення температурної деформації (зміщення деталей і вузлів щодо один одного) і негативно позначиться на параметрах точності шліфованих деталей (точності розміру, точності геометричної форми).

Список літератури:

12. Energy consumption reduction technology in manufacturing – A selective review of policies, standards, and research / Int. J. Precis. Eng. Manuf. // C.W. Park, K.S. Kwon, W.B. Kim, B.-K. Min and others, 2009, – № 10. – pp. 151–173. DOI: 10.1007/s12541-009-0107-z
13. Подураев В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев. М.: Машиностроение, 1974. – 615 с.
14. Energy Prediction Models and Distributed Analysis of the Grinding Process of Sustainable Manufacturing / Micromachines // Y. Tian, J. Wang, X. Hu, X. Song, J. Han, J. Wang, 2023. – № 14, 1603. DOI: 10.3390/mi14081603
15. An Investigation into Fixed Energy Consumption of Machine Tools / Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing // W. Li, A. Zein, S. Kara, C. Herrmann, Berlin, Heidelberg: Springer. – 2011. – pp. 268–273. DOI:10.1007/978-3-642-19692-8_47
16. Якимов А.В. Теплофизика механической обработки. М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
17. Гидроприводы и гидropневмоавтоматика станков / Под ред. д-ра техн. наук В. А. Федорца.— К. : Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 375 с.
18. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.

References (transliterated)

12. Energy consumption reduction technology in manufacturing – A selective review of policies, standards, and research / Int. J. Precis. Eng. Manuf. // C.W. Park, K.S. Kwon, W.B. Kim, B.-K. Min and others, 2009, – № 10. – pp. 151–173. DOI: 10.1007/s12541-009-0107-z
13. Poduraev V. N. Rezanie trudnoobrabativalyemikh materialov / V. N. Poduraev. M.: Mashinostroenie, 1974. – 615 s.
14. Energy Prediction Models and Distributed Analysis of the Grinding Process of Sustainable Manufacturing / Micromachines // Y. Tian, J. Wang, X. Hu, X. Song, J. Han, J. Wang, 2023. – № 14, 1603. DOI: 10.3390/mi14081603
15. An Investigation into Fixed Energy Consumption of Machine Tools / Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing // W. Li, A. Zein, S. Kara, C. Herrmann, Berlin, Heidelberg: Springer. – 2011. – pp. 268–273. DOI:10.1007/978-3-642-19692-8_47
16. Yakimov A.V. Teplofizika mekhanicheskoi obrabotki. M.: Mashinostroenie, 1975. – 175 s.
17. Gidropivodi i gidropnevmoavtomatika stankov / Pod red. d-ra tekhn. nauk V. A. Fedortsya.— K. : Vishcha shk. Golovnoe izd-vo, 1987. – 375 s.
18. Reznikov A.N. Teplofizika protsessov mekhanicheskoi obrabotki materialov. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 279 s.

Поступила (received) 06.02.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Степанов Михайло Сергійович (Mykhailo Stepanov) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2224-6509>; тел.: (057) 707-66-25. e-mail: mykhaylo.stepanov@khp.edu.ua.

Іванова Марина Сергіївна (Maryna Ivanova) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0848-6805>; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: maryna.ivanova@khp.edu.ua.

Літовченко Петро Іванович (Petro Litovchenko) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4483-597X>, тел. 063-141-65-97, e-mail: pilovchenko1950@gmail.com.

Іванова Лариса Петрівна (Larysa Ivanova) – старший викладач кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6136-6191>, e-mail: larisanangu@gmail.com.

Скидан Наталія Павлівна (Skydan Nataliia) – старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8265-5611>; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: nataliia.skydan@khp.edu.ua.

**ДОБРОТВОРСЬКИЙ С.С., БАСОВА Є.В., АЛЕКСЕНКО Б.О., ПРИХОДЬКО В.О.,
ДОБРОВОЛЬСЬКА Л.Г., БАСОВ В.В.**

ВПЛИВ КОРОТКОІМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ МІКРОСТРУКТУР ТА ТВЕРДІСТЬ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ

В роботі розглянуті питання, пов'язані із технологією короткоімпульсного лазерного оброблення сталі AISI321. Об'єктом дослідження є поверхневі структури, що формуються після короткоімпульсного впливу наносекундного лазера, а також їх фізико-механічні характеристики. Предметом дослідження в роботі є процеси формування періодичних поверхневих структур після короткоімпульсного лазерного впливу.

Було сформульоване припущення про кореляцію характеру формування структурних перетворень в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу при процесі лазерного впливу із малою інтенсивністю лазерного випромінювання, та традиційного нагрівання-охолодження.

Зазначено, що при досягненні відповідник критичних умов опромінення (потужності опромінення, швидкості нагрівання та охолодження, градієнту деформації тощо) відбувається лазерне зміцнення аустенітної сталі із підвищенням твердості, тобто загартування.

Підкреслено, що короткоімпульсний лазерний вплив при невеликих потужностях лазера, викликає такі процеси в поверхневому шарі нержавіючої сталі AISI321, які здебільшого запобігають осадженню карбіду хрому і не зміцнюють матеріал, а поглиненої лазерної енергії ще недостатньо для суттєвого створення мартенситних структур. Також підкреслено, що при багаторазовому короткочасовому накладанні теплових плям, що неодноразово перетинають одна одну, виникає збільшення теплової деформації матеріалу, і, як результат, в поверхневому шарі частково формуються більш міцні кристалічні структури – мартенсит, карбіди та окиси металів, що відповідає процесу загартування.

Ключові слова: твердість, сталь AISI 321, нанолазер, мікроструктура металу, тертя, періодичні структури, LIPSS.

DOBROTVORSKIY S., BASOVA Ye., ALEKSENKO B., PRYKHODKO V., DOBROVOLSKA L., BASOV V. INFLUENCE OF SHORT-PULSE LASER RADIATION ON THE SURFACE MICROSTRUCTURES FORMATION AND HARDNESS OF STAINLESS STEEL

The paper deals with the issues related to the technology of short-pulse laser treatment of AISI321 steel. The object of the study is the surface structures formed after short-pulse exposure to a nanosecond laser, as well as their physical and mechanical characteristics. The subject of the study in the work are the processes of formation of periodic surface structures after short-pulse laser exposure.

The assumption about correlation of the character of formation of structural transformations in the surface layer of the processed material during the process of laser exposure with low intensity of laser radiation, and traditional heating cooling was formed.

It is noted that when the corresponding critical irradiation conditions (irradiation power, heating and cooling rates, strain gradient, etc.) are reached, laser hardening of austenitic steel with hardness increase, i.e. quenching, occurs.

It is emphasised that short-pulse laser exposure at low laser powers causes such processes in the surface layer of AISI321 stainless steel, which mainly prevent the deposition of chromium carbide and do not strengthen the material, and the absorbed laser energy is still insufficient to significantly create martensitic structures. It is also emphasised that the repeated short-term superposition of heat spots repeatedly crossing each other results in an increase in the thermal deformation of the material and, as a result, stronger crystal structures such as martensite, carbides and oxides are formed in the surface layer.

Keywords: hardness, AISI 321 steel, nanolaser, metal microstructure, friction, periodic structures, LIPSS.

Вступ. Питання покращення трибологічних властивостей матеріалів авіаційних агрегатів подвійного призначення (ААПІ) для збільшення їх ресурсу є гострим в умовах сучасних тенденцій розвитку відповідних машинобудівних конструкцій. Саме тому при проектуванні відповідальних елементів ААПІ постає необхідність у вирішенні задач циклічної міцності, довговічності, малозамітності тощо. Не дивлячись на розробку та вдосконалення нових, легких та міцних композиційних матеріалів, метали та сплави залишаються основою при виготовленні ААПІ. Але при цьому слід зазначити, що циклічні навантаження, що мають періодичну дію на металеву конструкцію ААПІ в результаті стають причиною накопичення пошкоджень, появи та розвитку втомних тріщин, та кінцевого результату – руйнуванню поверхні, що піддається циклічним навантаженням. Зважаючи на те, що для ААПІ характерний порівняно невеликий запас міцності, що виражається коефіцієнтом безпеки агрегату, актуальним стає питання пошуку та застосування нових технологій для отримання металевих поверхонь з покращеними трибологічними та міцнісними характеристиками водночас. Серед сучасних технологій можна виділити лазерне оброблення сталевих поверхонь ААПІ, для створення складних упорядкованих мікрорельєфів поверхні. Слід зазначити, що серед найактуальніших досліджень технології лазерного оброблення є, в тому числі і, вивчення закономірностей формування поверхонь з покращеними властивостями отриманих за рахунок короткоімпульсних лазерних впливів у наносекундному часовому діапазоні – LIPSS (Laser-induced periodic surface structures) [1-2].

Аналіз основних досягнень та літератури. Слід зазначити, що індуковані лазером періодичні поверхневі структури (LIPSS) знайшли широке застосування в багатьох галузях завдяки ефективній та гнучкій технології виготовлення, оскільки їх генерація можлива за одну технологічну операцію, що забезпечує простий спосіб наноструктурування поверхні з метою контролю оптичних, механічних та трибологічних властивостей поверхні відповідальних деталей машин. Завдяки ультракоротким періодам опромінення та надвисокій інтенсивності, швидкі лазерні імпульси мають унікальні технологічні переваги, такі як висока точність та гнучкість обробки, адаптивність матеріалу [3, 4]. Технологія надшвидких лазерних імпульсів стала одним з перспективних методів отримання поверхневих мікроструктур і наноструктур [5]. Порівняно з кількістю досліджень, пов'язаних із

механізмами формування LIPSS за допомогою нано- та фемтосекундних лазерних імпульсів, трибологічним характеристикам LIPSS та їхньому застосуванню присвячено доволі мало робіт [6-9].

Мізуно та ін. [6] повідомили про зниження коефіцієнта тертя плівок LIPSS, покритих алмазоподібним вуглецем (DLC - diamond-like carbon), за низьких нормальних навантажень до 130 нН. Пізніше та сама група досліджувала контроль тертя за допомогою додаткових шарів (MoS_2) або додаткових геометричних візерунків на поверхні [7]. Ейхштадт та інші [8] представили результати збільшення коефіцієнта тертя кремнію з покриттям LIPSS для нормальних навантажень у діапазоні мН. Обґрунтування потенціалу застосування LIPSS в області трибології, де показано значне зниження коефіцієнта тертя поверхонь, оброблених короткоімпульсним випромінюванням навели група дослідників в роботі [10]. Технологія LIPSS дозволяє гнучко виготовляти періодично розташовані структури субмікронного періоду, забезпечуючи потужну технологію безконтактної обробки для виготовлення поверхневих решіток на різноманітних матеріалах [11-14].

Важливо відзначити, що технологія лазерного зміцнення відповідальних деталей ААПП стає все більш затребуваною, особливо коли зміцненню підлягає обмежена ділянка складнопрофільної поверхні. Процес зміцнення поверхневого шару короткоімпульсним випромінюванням характеризується швидким нагрівом до температур правління поверхневого шару матеріалу із подальшим надшвидким його охолодженням за рахунок відведення тепла до основного об'єму матеріалу.

Формування LIPSS є досить складним процесом, механізм якого ще не з'ясований. Вплив надшвидких імпульсів і миттєві локальні зміни властивостей матеріалів є динамічними процесами зі зворотними зв'язками, що безпосередньо впливає на трибологічні та міцнісні характеристики формованих структур. Енергія лазерного випромінювання спочатку поглинається електронною системою опромінюваних матеріалів, потім вивільнена енергія передається решітці, що в подальшому викликає різні теплові та деформаційні ефекти, а отже зміни стану поверхневого шару. На період LIPSS впливають довжина хвилі лазера, густина потоку енергії, кількість накладених імпульсів [15-20]. У традиційних технологіях LIPSS завжди виникають періодичні структури через розподілене світлове поле, спричинене великою кількістю окремих частинок і поверхневих дефектів під час лазерної абляції, що ускладнює забезпечення однорідності при обробці поверхонь з великою площею. У той же час, технологія LIPSS все ще стикається з серйозними проблемами контролю однорідності формування поверхневих структур [21-22], що безпосередньо впливає на однорідну твердість всієї обробленої поверхні.

Мета дослідження, постановка задачі. У цій статті розглядаються фізико-механічні властивості (твердість) оброблених наносекундним лазерним випромінюванням (з покриттям LIPSS великої площі) зразків зі сталі AISI 321.

Матеріали та методи. Для експериментів були вирізані пластини з нержавіючої сталі AISI 321. Габаритні розміри пластин становили 35x55x1,5 мм. Поверхня в отриманому стані мала характерну для сталі гладку дзеркальну поверхню. Хімічний склад сталі (у вагових %): Fe 67,0; Cr 17,0...19,0; Ni 9,0...11,0; Mn <2,0; Si <0,8; Ti 0,6...0,8. Для отримання поліморфної шорсткості поверхні використовували лазерну установку з волоконним ітербієвим лазером інфрачервоного діапазону (довжина хвилі 1064 нм) і двовісним гальванометричним сканером BM 2500+ [23]. У цьому дослідженні використовували лазерний вплив із тривалістю імпульсу 100 нс, частотою повторення 20-100 кГц і піковою потужністю до 0,3 МДж у режимі TEM₀₀. Зразки обробляли стратегією растрового оброблення «зігзаг» з щільністю паралельних ліній до 1,25 мкм [2].

Твердість поверхневого шару після лазерного сканування досліджували на сучасній універсальній машині – твердомірі за Віккерсом фірми ZwickRoell (Німеччина) (рис. 1), що базується на технологіях, які використовують інноваційні мехатронні компоненти. Випробовування відповідали діючим промисловим стандартам: ISO 6506, ISO 6507, ISO 4545, ASTM E384, ASTM E92, ASTM E10. Зразки досліджували на повітрі за кімнатної температури, використовуючи алмаз у формі піраміди як індентор, щоб наносити відбиток на випробовуваний матеріал. Зусилля натиску – 1 кг. Аналіз даних відбитків проводився автоматично з використанням вбудованого програмного забезпечення (рис.2).

При плануванні експерименту було враховано модель лазерного короткоімпульсного впливу на оброблюваний матеріал. Модель лазерного впливу на пластину з нержавіючої сталі побудовано в розрахунковому середовищі COMSOL Multiphysics® [24] (рис.3).

Тепловий потік до поверхні матеріалу розглядався як:

$$F = \frac{2P_{laser}}{\pi R_{spot}^2} \exp\left(-\frac{2\sqrt{(x - x_{coordinate})^2 + (y - y_{coordinate})^2}}{R_{spot}}\right)$$

де

P_{laser} - потужність лазера, Вт,

R_{spot} - радіус променя (25 μm),

$x, y_{coordinate}$ - координата пластини, куди сфокусовано промінь у цей момент часу.

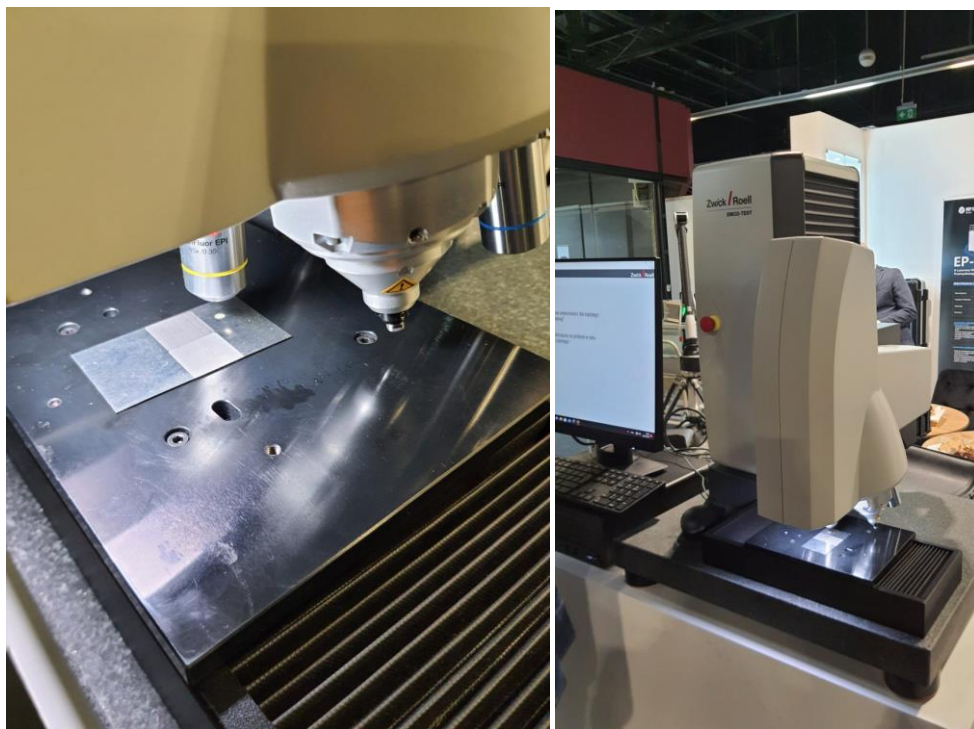


Рис. 1 – Твердомір за Віккерсом фірми ZwickRoell із зразками досліджуваної сталі AISI 321

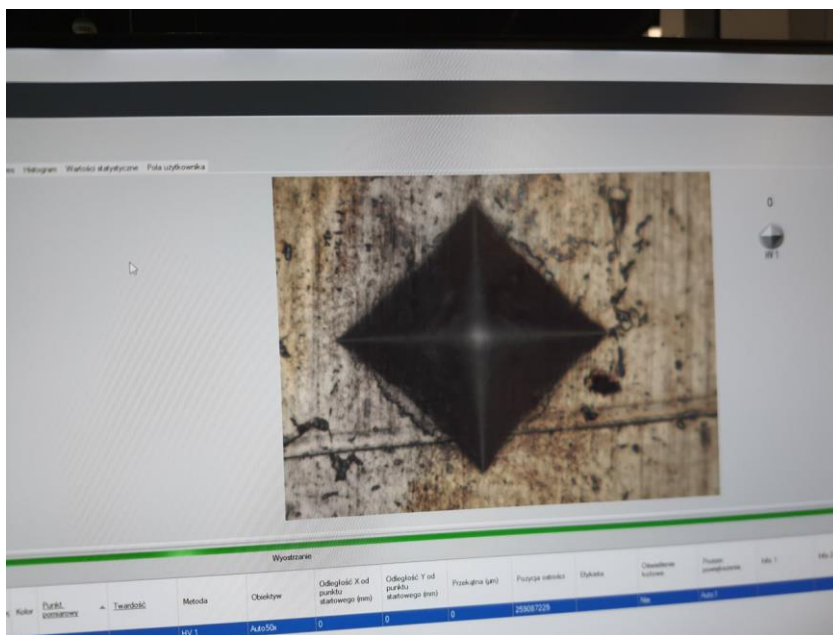


Рис. 2 – Демонстрація автоматичного аналізу відбитку на випробовуваному матеріалі – сталі AISI 321

Результати експерименту. Дослідження проводились на зразку сталі AISI 321 (рис.4), що піддавався обробці при різних потужностях лазера і швидкостях сканування (рис.4, поз. 1-4). В якості еталонної поверхні була прийнята необроблена ділянка зразку (рис.4, поз.5).

Ділянка (1) оброблювалася скануванням по траєкторії «зигзаг» з потужністю лазера 7,5 Вт, для досягнення низького рівня енергетичного вкладу. Швидкість сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц.

Ділянка (2) оброблювалася скануванням по траєкторії «зигзаг» з потужністю лазера 10 Вт, для досягнення зниженого рівня енергетичного вкладу. Швидкість сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц.

Ділянка (3) оброблювалася скануванням по траєкторії «зигзаг» з потужністю лазера 12,5 Вт, для досягнення помірного рівня енергетичного вкладу. Швидкість сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц.

Ділянка (4) оброблювалася скануванням по траєкторії «зигзаг» з потужністю лазера 15 Вт, для досягнення високого рівня енергетичного вкладу. Швидкість сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц.

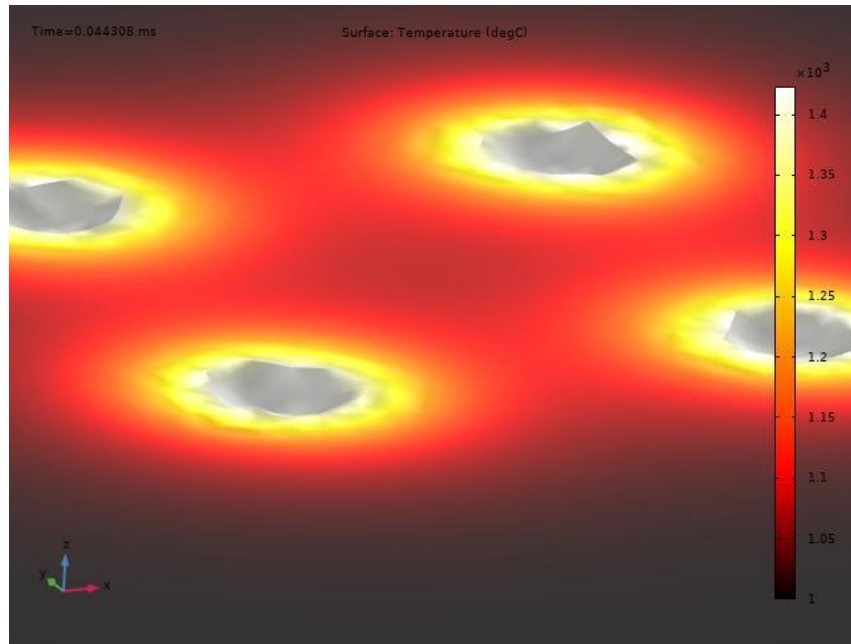


Рис. 3 – Комп'ютерне моделювання теплових полів при періодичному лазерному впливі на оброблюваний матеріал

Метою цього експерименту було всебічне розуміння впливу різних комбінацій енергії та потужності лазера на твердість поверхневого шару матеріалу і формування мікро- і наноструктур.

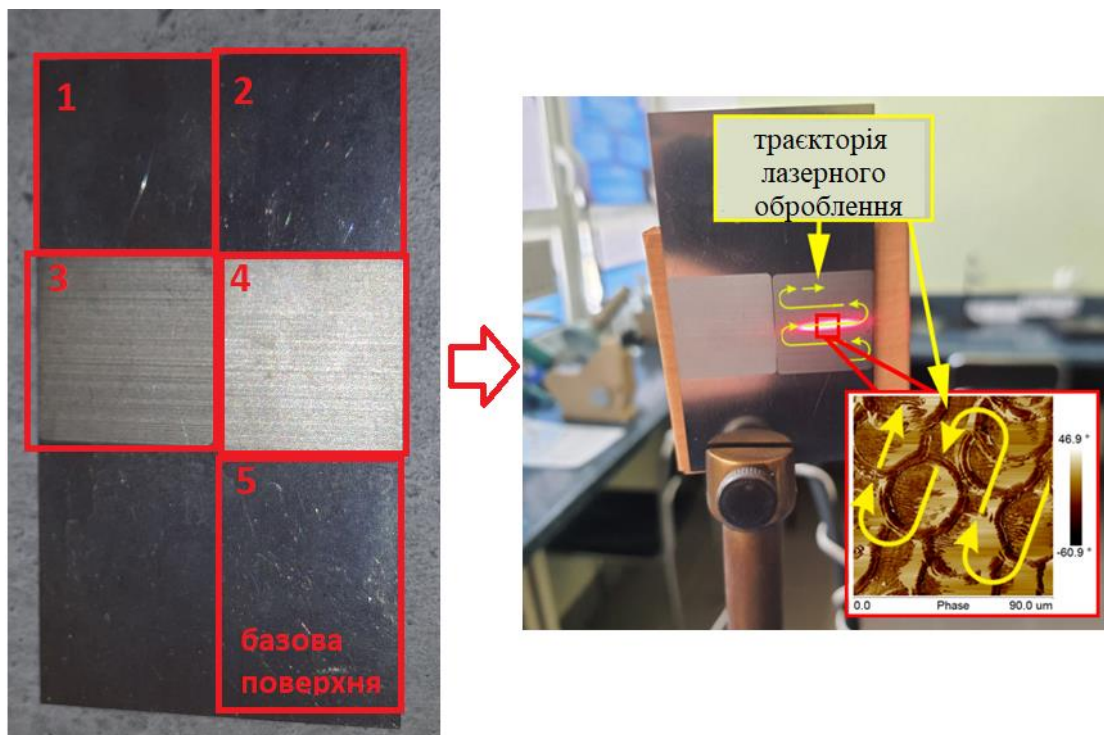


Рис. 4 – Зразок сталі AISI 321: 1-4 – ділянки, що підлягали різним режимам лазерного короткоімпульсного оброблення, 5 – ділянка необробленого матеріалу

Випробовування твердості в експерименті проводилося з використанням твердоміра по Віккерсу для комплексного оцінювання зміни твердості сталі AISI321 після різних процесів лазерної поверхневого оброблення. Автоматичне проведення вимірів дало змогу уникнути похибки вимірювання та отримати точний результат визначення твердості (рис.5).

Specimen	Point No	Hardness	Method	Diagonal
Próbka 22	1	184	HV 1	100,410
	2	181	HV 1	101,296
	3	176	HV 1	102,584
	4	219	HV 1	92,027
	5	186	HV 1	99,924

Рис. 5 – Протокол автоматизованого вимірювання твердості по Віккерсу: 1-5 ділянки зразка відповідно до (рис.2)

На рис. 6, 7, 8, 9 показані мікроструктури поверхневого шару сталевого зразка після різного енергетичного впливу наносекундного лазерного оброблення із результатами аналізу твердості. Слід зазначити, що в результаті впливу лазерного променя в металі утворюється зона термічного впливу. Структурні та фазові перетворення в зоні термічного впливу призводять до формування різних за структурою шарів.

На рис. 6 видно, що в умовах низької потужності (7,5 Вт) спостерігається поверхнева структура, що має здебільшого випадковий характер, та мало відрізняється від базової поверхні. Однак відповідно до результату вимірювання було визначено, що твердість ділянки (1) (рис.4) дещо зменшилась до 184 HV (рис. 5). Це може пояснюватися тим, що через малий енергетичний вплив імпульсного лазерного оброблення у поверхневому шарі відбулися незначні зміни мікроструктури, що характеризується зниженням твердості в зоні термічного впливу внаслідок часткової дестабілізації аустеніту та одночасного стабілізуванню аустенітної фази за рахунок наявності Ni у хімічному складі оброблюваного матеріалу. Це, напевне, також є результатом того, що із-за низької потужності лазера, та, відповідно недостатньої температури для значного зменшення сталості аустенитових структур відбувається незначне зниження вмісту вуглецю в обробленому шарі.

На рис.6 представлений результат визначення твердості на ділянці (2) (рис.4), величина якої також зменшилась до 181 HV. Тут важливо зазначити, що поверхнева структура вже має характеристику, що відповідає симбіозу періодичних і випадкових структур.

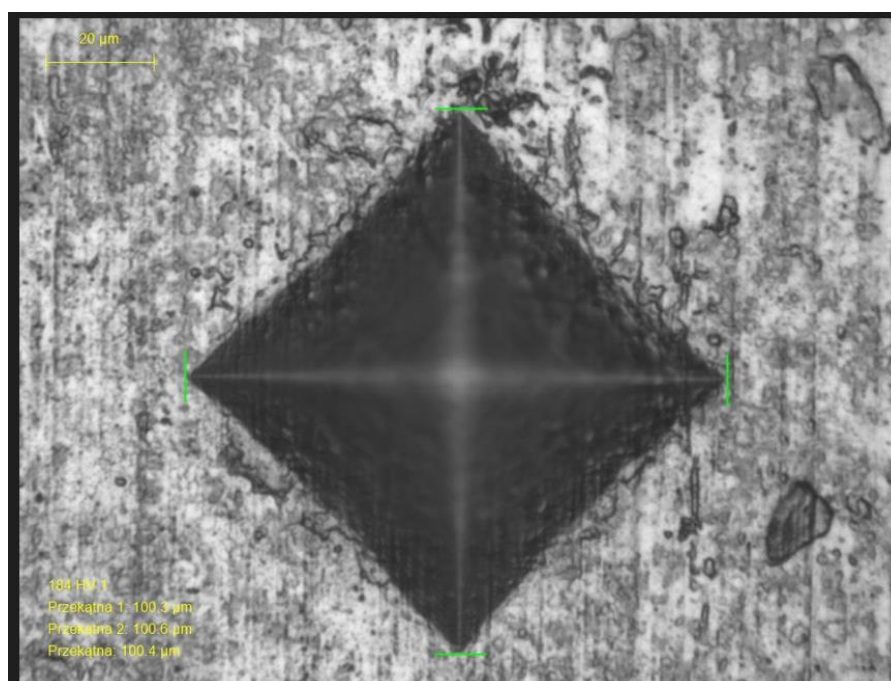


Рис. 6 – Вимірювання твердості ділянки (1), що оброблена з потужністю лазера 7,5 Вт, швидкістю сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц

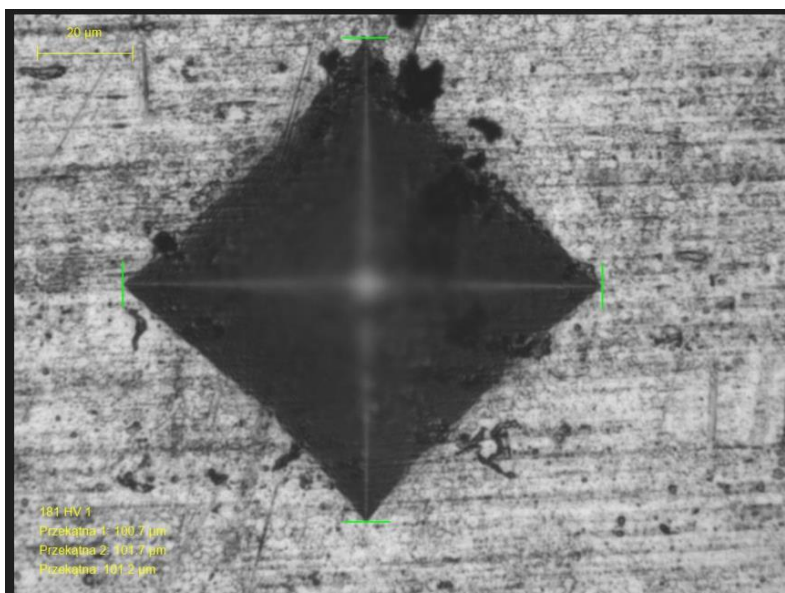


Рис. 7 – Вимірювання твердості ділянки (2), що оброблена з потужністю лазера 10 Вт, швидкістю сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц

Аналіз мікроструктури ділянки (2) показав наявність початкової фази створення періодичних структур за рахунок розплавлення тонкого поверхневого шару матеріалу. Подальше зменшення твердості може бути пояснене збільшенням потужності оброблення та, відповідно, збільшенням температури в зоні опромінення, що, в свою чергу, впливає на неосаджений вуглець в поверхневому шарі матеріалу.

Аналіз ділянки (3) (рис.4) дозволив визначити наявність візуалізованих періодичних структур (рис.7), що є шуканим ефектом. На цій ділянці відзначається подальше зменшення поверхневої твердості обробленого матеріалу до 176 HV (рис. 5).

Причини зниження поверхневої твердості ділянок 1-3 при підвищенні потужності оброблення та температури в зоні опромінення можливо пояснювати наступним чином. Відомо, що при традиційному термічному обробленні аустенітні сталі, до яких належить і AISI321, не піддаються закалюванню. А навпаки, зі збільшенням температури оброблення ще більше пом'якшуються. Це пов'язано із тим, що для аустенітних нержавіючих сталей теплова обробка є пом'якшувальною термічною операцією, що супроводжується вивільненням неосадженого вуглецю.

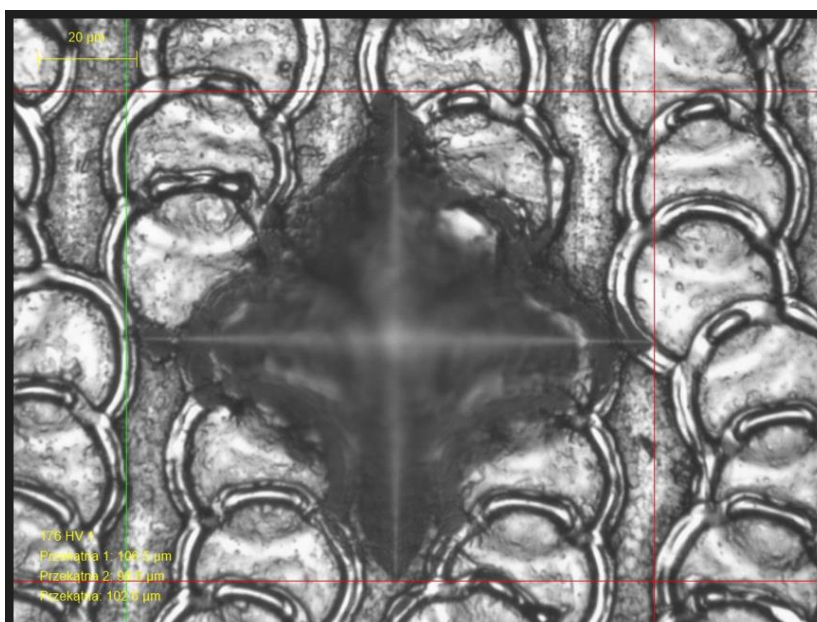


Рис. 8 – Вимірювання твердості ділянки (3), що оброблена з потужністю лазера 12,5 Вт, швидкістю сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц

Аналіз результатів дослідження ділянки (4) (рис.9) показав, що навідміну від попередніх ділянок (1) (рис. 6), (2) (рис.7), (3) (рис.8) ця поверхня має значні структурні зміни, які характеризуються більш розвинутою поверхнею та збільшеною твердістю дослідного зразка. Слід зазначити, що зі збільшенням потужності лазерного оброблення збільшуються як глибина, так і ширина зони зміцнення. Збільшення потужності до 15 Вт за інших рівних умов оброблення призводить до температурних умов, за яких можливо відбувається створення фазових структур із вмістом карбідів Ti, Cr та окисів металів, що і стає причиною збільшення твердості поверхневого шару матеріалу. Важливо зазначити, що за таких умов оброблення (збільшеної потужності лазера, збільшеної температури опромінення) в поверхневому шарі відбуваються структурні зміни, що характеризуються частковим перетворенням аустеніту в мартенсит, який має високу твердість. У підсумку, підвищення твердості обумовлене симбіозом цих двох процесів (створенням мартенситу, карбідів і окисів металів), тобто реалізується процес лазерного загартування або наклепу. Однак слід відзначити, що механізм лазерного загартування принципово відрізняється від механізму наклепу поверхні аустенітної нержавіючої сталі, що реалізується на ній при холодному пластичному деформуванні.

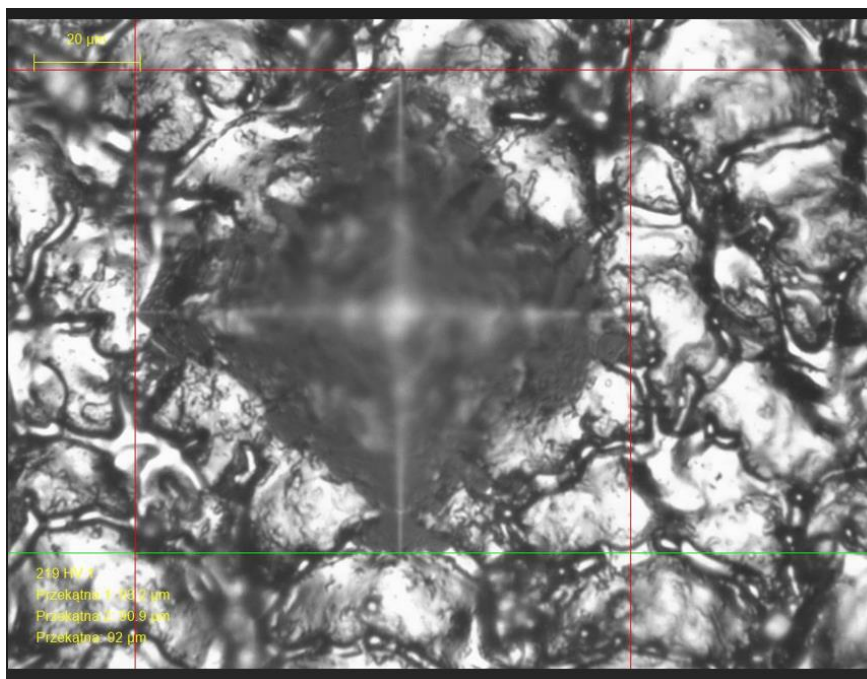


Рис. 9 – Вимірювання твердості ділянки (3), що оброблена з потужністю лазера 15 Вт, швидкістю сканування – 150 мм/хв, частотою лазерних імпульсів – 40 кГц

Висновки. Відомо, що при традиційних методах нагрівання та охолодження аустенітних сталей, в тому числі сталі AISI321, не відбувається формування загартованих структур із високою твердістю. Окрім того слід зазначити, що при зменшенні вмісту вуглецю нижчим за 0,03 %, утворення мартенситу в сталі взагалі не відбувається, а сталь є повністю аустенітною за кімнатної температури.

Можемо припустити, що за малої інтенсивності лазерного випромінювання, процеси, що мають місце в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу, напевне, відповідають характеру традиційного нагрівання-охолодження. Однак при досягненні відповідних критичних умов опромінення (потужності опромінення, швидкості нагрівання та охолодження, градієнту деформації тощо) відбувається лазерне зміцнення аустенітної сталі із підвищенням твердості, тобто загартування. В основі механізму підвищення твердості лежать процеси часткового перетворення аустеніту в мартенсит та утворення твердих карбідів та окисів в поверхневому шарі обробленого металу.

Таким чином можна зазначити, що короткоімпульсний лазерний вплив при невеликих потужностях лазера, викликає такі процеси в поверхневому шарі нержавіючої сталі AISI321, які здебільшого запобігають осадженню карбиду хрому і не зміцнюють матеріал, а поглиненої лазерної енергії ще недостатньо для суттєвого створення мартенситних структур. Це також стає результатом наявної роботи міжкристалічних дрібних частинок TiC, що, в свою чергу, виконують подвійну функцію: вони запобігають сенсibilізації та міжкристалітній корозії, а також покращують опір сталі AISI 321 до корозії [25]. Однак при багаторазовому короткочасовому накладанні теплових плям, що неодноразово перетинають одна одну, виникає збільшення теплової деформації матеріалу, і, як результат, в поверхневому шарі формуються більш міцні кристалічні структури – мартенсит, карбіди та окиси металів.

Подяки. Загальний підхід розвинуто в рамках науково-дослідного проекту "Формування і трансформація періодичних нановуглецевмісних структур на поверхні металів короткоімпульсними лазерними, мікрохвильовими і плазмовими методами" (ДР. № 0124U000481). Автори також висловлюють подяку співробітникам "Лабораторія лазерних технологій" АТ ФЕД за допомогу в підготовці зразків для досліджень та менеджеру польського представництва фірми Zwick Roell Міхалу Котульські (Michal Kotulski) за можливість проведення експерименту на високоякісному обладнанні.

Список літератури:

1. Dobrotvorskiy, S. et al. (2023). Computer Modelling and Comparative Analysis of Surface Microrelief Inspection by the Method of Scattering of a Laser Beam During Its Small-Angle Sliding Incidence. In: Cioboată, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. ICoRSE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 762, pp. 237–252. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7_20.
2. Dobrotvorskiy, S. et al. (2023). The Relief of the Structured by Nanosecond Laser Stainless Steel Surface Inspection by Sliding Reflection of a Laser Beam. In: Balog, M., Iakovets, A., Hrehova, S. (eds) EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice. EAI ARTEP 2023. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing, pp. 65–77. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_5
3. Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, Hayasaki Y, Mizeikis V, Buividas R, et al. Ultrafast Laser Processing of Materials: From Science to Industry. *Light Sci Appl*, 5(8), e16133 (2016). <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.133>
4. Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast Lasers-Reliable Tools for Advanced Materials Processing. *Light Sci App*, 3(4), e1491 (2014). <https://doi.org/10.1038/lsa.2014.30>
5. Jiang L, Wang A-D, Li B, Cui T-H, Lu Y-F. Electrons Dynamics Control by Shaping Femtosecond Laser Pulses in Micro/nanofabrication: Modeling, Method, Measurement and Application. *Light Sci Appl*, 7(2), 17134 (2018). <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.134>
6. A. Mizuno, T. Honda, J. Kiuchi, Y. Iwai, N. Yasumaru, K. Miyazaki, *Tribol. Online* 1, 44 (2006)
7. N. Yasumaru, Kenzo Miyazaki, J. Kiuchi, *Appl. Surf. Sci.* 254, 2364 (2008)
8. J. Eichstädt, G.R.B.E. Römer, A.J. Huis in't Veld, *Phys. Proc.* 12, 7 (2011)
9. C.-Y. Chen, C.-J. Chung, B.-H. Wu, W.-L. Li, C.-W. Chien, P.-H. Wu, C.-W. Cheng, *Appl. Phys. A* 107, 345 (2012)
10. Bonse J, Koter R, Hartelt M, Spaltmann D, Pentzien S, Höhm S, et al. Femtosecond Laser-Induced Periodic Surface Structures on Steel and Titanium alloy for Tribological Applications. *Appl Phys A*, 17(1), 103–110 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8229-2>
11. Dusser B, Sagan Z, Soder H, Faure N, Colombier JP, Jourlin M, et al. Controlled Nanostructures Formation by Ultra Fast Laser Pulses for Color Marking. *Opt Express*, 18(3), 2913–2924 (2010). <https://doi.org/10.1364/oe.18.002913>
12. Jiang H-B, Zhang Y-L, Liu Y, Fu X-Y, Li Y-F, Liu Y-Q, et al. Bioinspired FewLayer Graphene Prepared by Chemical Vapor Deposition on Femtosecond Laser-Structured Cu Foil. *Laser Photon Rev*, 10(3), 441–450 (2016). <https://doi.org/10.1002/lpor.201500256>.
13. Drevinskas R, Beresna M, Zhang J, Kazanskii AG, Kazansky PG. Ultrafast Laser-Induced Metasurfaces for Geometric Phase Manipulation. *Adv Opt Mater*, 5(1), 1600575 (2017). <https://doi.org/10.1002/adom.201600575>
14. Wang L, Chen Q-D, Cao X-W, Buividas R, Wang X, Juodkazis S, et al. Plasmonic Nano-Printing: Large-Area Nanoscale Energy Deposition for Efficient Surface Texturing. *Light Sci Appl*, 6(12), e17112 (2017). <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.112>
15. Miyagawa, R., Kamibayashi, D., Nakamura, H. et al. Crystallinity in periodic nanostructure surface on Si substrates induced by near- and mid-infrared femtosecond laser irradiation. *Sci Rep* 12, 20955 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25365-1>.
16. Shinonaga, T., Tsukamoto, M. & Miyaji, G. Periodic nanostructures on titanium dioxide film produced using femtosecond laser with wavelengths of 388 nm and 775 nm. *Opt. Express* 22, 14696 (2014). <https://doi.org/10.1364/OE.22.014696>
17. Bonse, J. & Kruger, J. Pulse number dependence of laser-induced periodic surface structures for femtosecond laser irradiation of silicon. *J. Appl. Phys.* 108, 034903 (2010). <https://doi.org/10.1063/1.3456501>
18. Miyaji, G. & Miyazaki, K. Nanoscale ablation on patterned diamondlike carbon film with femtosecond laser pulses. *Appl. Phys. Lett.* 91, 123102 (2007). <https://doi.org/10.1063/1.2784966>
19. Hashida, M., Ikuta, Y., Miyasaka, Y., Tokita, S. & Sakabe, S. Simple formula for the interspaces of periodic grating structures selforganized on metal surfaces by femtosecond laser ablation. *Appl. Phys. Lett.* 102, 174106 (2013). <https://doi.org/10.1063/1.4803940>
20. Nivas, J. et al. Effects of ambient air pressure on surface structures produced by ultra-short laser pulses irradiation. *Opt. Lett.* 42, 2710–2713 (2017). <https://doi.org/10.1364/OL.42.002710>
21. Sun Q, Liang F, Vallée R, Chin SL. Nanograting Formation on the Surface of Silica Glass by Scanning Focused Femtosecond Laser Pulses. *Opt Lett*, 33(22), 2713–2725 (2008). <https://doi.org/10.1364/ol.33.002713>.
22. Bonse J, Krüger J, Höhm S, Rosenfeld A. Femtosecond Laser-Induced Periodic Surface Structures. *J Laser Appl* (2012) 24(4):042006. <https://doi.org/10.2351/1.4712658>
23. Sotnikov, V.T., Dobrotvorskiy, S.S., Zapechelnuk, E.F., Dobrotvorskiy, M.V.: Self-oscillations of the emission of charged particles from the surface of optical transparent media with nonlinear absorption of laser radiation. *Surface. Physics, chemistry, mechanics*, 9, 103–110 (1986).
24. COMSOL User's Guide. Ray Optics Module. COMSOL© (2022). <https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.roptics/RayOpticsModuleUsersGuide.pdf>, last accessed 2024/02/02
25. Moura, V., Kina, A. Y., Tavares, S. S. M., Lima, L. D., & Mainier, F. B. (2007). Influence of stabilization heat treatments on microstructure, hardness and intergranular corrosion resistance of the AISI 321 stainless steel. *Journal of Materials Science*, 43(2), 536–540. doi:10.1007/s10853-007-1785-5

Bibliography (transliterated):

1. Dobrotvorskiy, S. et al. (2023). Computer Modelling and Comparative Analysis of Surface Microrelief Inspection by the Method of Scattering of a Laser Beam During Its Small-Angle Sliding Incidence. In: Cioboată, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2023. ICoRSE 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 762, pp. 237–252. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40628-7_20.
2. Dobrotvorskiy, S. et al. (2023). The Relief of the Structured by Nanosecond Laser Stainless Steel Surface Inspection by Sliding Reflection of a Laser Beam. In: Balog, M., Iakovets, A., Hrehova, S. (eds) EAI International Conference on Automation and Control in Theory and Practice. EAI ARTEP 2023. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing, pp. 65–77. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31967-9_5
3. Malinauskas M, Žukauskas A, Hasegawa S, Hayasaki Y, Mizeikis V, Buividas R, et al. Ultrafast Laser Processing of Materials: From Science to Industry. *Light Sci Appl*, 5(8), e16133 (2016). <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.133>

4. Sugioka K, Cheng Y. Ultrafast Lasers-Reliable Tools for Advanced Materials Processing. *Light Sci App*, 3(4), e1491 (2014). <https://doi.org/10.1038/lsa.2014.30>
5. Jiang L, Wang A-D, Li B, Cui T-H, Lu Y-F. Electrons Dynamics Control by Shaping Femtosecond Laser Pulses in Micro/nanofabrication: Modeling, Method, Measurement and Application. *Light Sci Appl*, 7(2), 17134 (2018). <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.134>
6. A. Mizuno, T. Honda, J. Kiuchi, Y. Iwai, N. Yasumaru, K. Miyazaki, *Tribol. Online* 1, 44 (2006)
7. N. Yasumaru, Kenzo Miyazaki, J. Kiuchi, *Appl. Surf. Sci.* 254, 2364 (2008)
8. J. Eichstaedt, G.R.B.E. Roemer, A.J. Huis in't Veld, *Phys. Proc.* 12, 7 (2011)
9. C.-Y. Chen, C.-J. Chung, B.-H. Wu, W.-L. Li, C.-W. Chien, P.-H. Wu, C.-W. Cheng, *Appl. Phys. A* 107, 345 (2012)
10. Bonse J, Koter R, Hartelt M, Spaltmann D, Pentzien S, Höhm S, et al. Femtosecond Laser-Induced Periodic Surface Structures on Steel and Titanium alloy for Tribological Applications. *Appl Phys A*, 17(1), 103–110 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00339-014-8229-2>
11. Dusser B, Sagan Z, Soder H, Faure N, Colombier JP, Jourlin M, et al. Controlled Nanostructures Formation by Ultra Fast Laser Pulses for Color Marking. *Opt Express*, 18(3), 2913–2924 (2010). <https://doi.org/10.1364/oe.18.002913>
12. Jiang H-B, Zhang Y-L, Liu Y, Fu X-Y, Li Y-F, Liu Y-Q, et al. Bioinspired FewLayer Graphene Prepared by Chemical Vapor Deposition on Femtosecond Laser-Structured Cu Foil. *Laser Photon Rev*, 10(3), 441–450 (2016). <https://doi.org/10.1002/lpor.201500256>
13. Drevinskas R, Beresna M, Zhang J, Kazanskii AG, Kazansky PG. Ultrafast Laser-Induced Metasurfaces for Geometric Phase Manipulation. *Adv Opt Mater*, 5(1), 1600575 (2017). <https://doi.org/10.1002/adom.201600575>
14. Wang L, Chen Q-D, Cao X-W, Buividas R, Wang X, Juodkazis S, et al. Plasmonic Nano-Printing: Large-Area Nanoscale Energy Deposition for Efficient Surface Texturing. *Light Sci Appl*, 6(12), e17112 (2017). <https://doi.org/10.1038/lsa.2017.112>
15. Miyagawa, R., Kamibayashi, D., Nakamura, H. et al. Crystallinity in periodic nanostructure surface on Si substrates induced by near- and mid-infrared femtosecond laser irradiation. *Sci Rep* 12, 20955 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25365-1>
16. Shimonaga, T., Tsukamoto, M. & Miyaji, G. Periodic nanostructures on titanium dioxide film produced using femtosecond laser with wavelengths of 388 nm and 775 nm. *Opt. Express* 22, 14696 (2014). <https://doi.org/10.1364/OE.22.014696>
17. Bonse, J. & Kruger, J. Pulse number dependence of laser-induced periodic surface structures for femtosecond laser irradiation of silicon. *J. Appl. Phys.* 108, 034903 (2010). <https://doi.org/10.1063/1.3456501>
18. Miyaji, G. & Miyazaki, K. Nanoscale ablation on patterned diamondlike carbon film with femtosecond laser pulses. *Appl. Phys. Lett.* 91, 123102 (2007). <https://doi.org/10.1063/1.2784966>
19. Hashida, M., Ikuta, Y., Miyasaka, Y., Tokita, S. & Sakabe, S. Simple formula for the interspaces of periodic grating structures selforganized on metal surfaces by femtosecond laser ablation. *Appl. Phys. Lett.* 102, 174106 (2013). <https://doi.org/10.1063/1.4803940>
20. Nivas, J. et al. Effects of ambient air pressure on surface structures produced by ultra-short laser pulses irradiation. *Opt. Lett.* 42, 2710–2713 (2017). <https://doi.org/10.1364/OL.42.002710>
21. Sun Q, Liang F, Vallée R, Chin SL. Nanograting Formation on the Surface of Silica Glass by Scanning Focused Femtosecond Laser Pulses. *Opt Lett*, 33(22), 2713–2725 (2008). <https://doi.org/10.1364/ol.33.002713>
22. Bonse J, Krüger J, Höhm S, Rosenfeld A. Femtosecond Laser-Induced Periodic Surface Structures. *J Laser Appl* (2012) 24(4):042006. <https://doi.org/10.2351/1.4712658>
23. Sotnikov, V.T., Dobrotvorsky, S.S., Zapechelnuk, E.F., Dobrotvorskaya, M.V.: Self-oscillations of the emission of charged particles from the surface of optical transparent media with nonlinear absorption of laser radiation. *Surface. Physics, chemistry, mechanics*, 9, 103-110 (1986).
24. COMSOL User's Guide. Ray Optics Module. COMSOL© (2022). <https://doc.comsol.com/6.1/doc/com.comsol.help.ropics/RayOpticsModuleUsersGuide.pdf>, last accessed 2024/02/02
25. Moura, V., Kina, A. Y., Tavares, S. S. M., Lima, L. D., & Mainier, F. B. (2007). Influence of stabilization heat treatments on microstructure, hardness and intergranular corrosion resistance of the AISI 321 stainless steel. *Journal of Materials Science*, 43(2), 536–540. doi:10.1007/s10853-007-1785-5

Поступила (received) 10.02.2024

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Добротворський Сергій Семенович (Sergey Dobrotvorskiy) – доктор технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: sdobro50@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1223-1036

Басова Євгенія Володимирівна (Yevheniia Basova) – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8549-4788

Алексенко Борис Олександрович (Borys A. Aleksenko) – докторант кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: ttm777@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9680-9370

Приходько Вадим Олександрович (Vadym Prykhodko) – аспірант кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0000-0003-2094-7472

Добровольська Людмила Георгіївна (Ludmila Dobrovolska) - кандидат технічних наук, доцент кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: lyudmyla@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8318-8552

Басов Віктор Вікторович (Viktor Basov) – інженер-механік, м.Харків; e-mail: basovkd@gmail.com, ORCID: 0009-0007-2889-3946

*ПЕТРАКОВ Ю.В., МИГОВИЧ А.В.***МОДЕЛЮВАННЯ КОНТУРНОГО 2.5-D ФРЕЗЕРУВАННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧИСЛОВИМ ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ**

В статті розглянутий новий метод моделювання взаємодії кінцевої фрези із заготовкою при контурному 2,5-D фрезеруванні з метою визначення головного параметру процесу – швидкості видалення матеріалу. Представлений алгоритм підготовки даних та математична модель зачеплення фрези із заготовкою, які дозволяють визначити миттєвий об'єм матеріалу інструменту, що видаляється і визначає силу різання за механістичною моделлю під час оброблення. Для моделювання використовується представлення заготовки та інструменту у вигляді полігонів, а процес різання реалізується з використанням логічних операцій "перетинання" та "різниця". Такий підхід дозволяє виявити об'єм матеріалу, що видаляється інструментом під час певної ітерації моделювання з урахуванням геометрії його лез, та відобразити нову геометричну форму заготовки після видалення матеріалу з неї. Така нова форма буде використовуватись для моделювання наступного кроку алгоритму, що забезпечує неперервність процесу. Застосування розробленого алгоритму та математичної моделі дозволяє отримати коректні дані про миттєвий об'єм видаленого матеріалу, що в подальшому використовується для прогнозування сили різання і вирішення задачі оптимізації процесу контурного 2,5D фрезерування.

Ключові слова: моделювання контурного 2,5D фрезерування, зачеплення фрези-заготовка, швидкість видалення матеріалу, САМ-системи, верстати з ЧПК.

*PETRAKOV Y. V., MYGOVICH A. V.***SIMULATION 2.5-D COUNTUR MILLING ON CNC-MACHINE**

The article discusses a new method of modeling the cutter workpiece engagement during contour 2.5-D milling in order to determine the main process parameter - the material removal rate. A data preparation algorithm and a mathematical model of the engagement of the milling cutter with the workpiece are presented, which allow determining the instantaneous volume of the removed tool material and determining the cutting force according to the mechanical model during machining. For simulation, the representation of the workpiece and the tool in the form of polygons is used, and the cutting process is implemented using the logical operations "intersection" and "difference". This approach allows you to detect the volume of material removed by the tool during a certain simulation iteration, taking into account the geometry of its flutes, and to display the new geometric shape of the workpiece after removing material from it. Such a new form will be used to model the next step of the algorithm, which ensures the continuity of the process. The application of the developed algorithm and mathematical model allows obtaining correct data on the instantaneous volume of removed material, which is subsequently used to predict the cutting force and solve the problem of optimizing the contour 2.5D milling process.

Keywords: simulation of contour 2.5D milling, cutter-workpiece engagement, material removal rate, CAM systems, CNC machines.

Вступ

Процес контурного 2,5D фрезерування широко застосовується під час обробки внутрішніх та зовнішніх поверхонь штампів, кишень деталей авіаційної промисловості, прес-форм та інших деталей на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК). Процес різання характеризується постійною зміною умов геометричної взаємодії інструменту та заготовки, результатом якої є зміна сили різання та деформації технологічної обробної системи (ТОС). Відомо, що під час керування процесом різання на верстатах з ЧПК використовується управляюча програма, яка розробляється в САМ-системах (Computer Aided Manufacturing). Отже, найпростішим способом впливу на процес різання на верстаті ЧПК є управління саме через таку програму. Такий підхід управління має назву - управління за апріорною інформацією і спирається на дані, що є відомі перед початком оброблення. Моделювання процесу обробки є невід'ємною частиною управління за апріорною інформацією та дозволяє визначити найважливіші недостатні параметри для проектування управляючої програми і вдосконалювати процес при витраті мінімальних ресурсів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Управління процесом різання вимагає геометричного моделювання зачеплення фрези із заготовкою за траєкторією формоутворення. Дослідниками використовуються різні методи геометричного моделювання взаємодії зачеплення інструмент-заготовка, серед яких найбільш часто застосовуються моделювання на основі алгоритму буфера глибини (Z-буфера), октантного дерева, точкового методу, що є дискретними представленнями об'єктів; алгоритму конструктивної твердотільної геометрії і аналітичного методу.

Алгоритм воксельного та октантного (бінарного) дерева використовує декомпозиційну об’ємну модель, представлену як сукупності простих тіл, наприклад кубів. Одне і те ж тіло може бути описане багатьма методами. Воксельне уявлення та уявлення октантного дерева є типовими декомпозиційними моделями з відповідними структурами даних [1].

Воксельне подання тіла реалізується найпростіше. Суть полягає у створенні навколо опрацьованого об’єкта початкового куба та його подальшого поділу трьома сімействами перпендикулярних до відповідних осей прямокутної системи координат площин на менші куби з розмірами сторін, що визначаються потрібною точністю відтворення вихідної фігури. Елементом тривимірного масиву, число яких дорівнює кількості сформованих кубиків, присвоюються значення 1 або 0 у залежності від перетину останніх тілом чи ні. Головний недолік розглянутого способу, для довільних геометричних об’єктів, полягає в суттєвих потребах обчислювальних ресурсів щоб забезпечити високу точність моделювання [2].

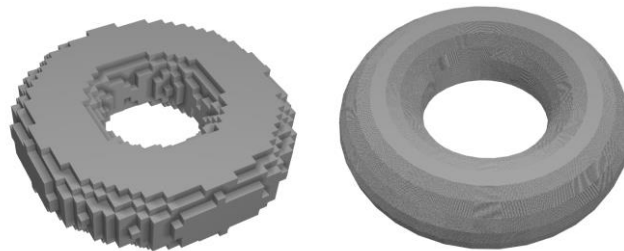


Рис. 1 – Візуалізація воксельного подання фігури тор різним розміром вокселів

Переваги воксельного подання включають максимальну точність опису об’ємних тіл довільної форми, моделювання складних фігур зі змінною кривизною поверхні та розрахунок параметрів об’ємного тіла, таких як маса та моменти інерції, через додавання параметрів вокселів. Також легко отримується результат булевих операцій. Головний недолік - збільшення обсягу пам’яті при збільшенні точності моделювання.

Уявлення октантного дерева схоже до воксельного через те, що тіло описується як сукупність шестигранників. Цей метод потребує менш серйозні вимоги до пам’яті.

При використанні октантного дерева початковий куб ділиться на вісім рівних кубів поперечними площинами. Назва уявлення походить від того, що об’єм маленького куба у вісім разів менше обсягу вихідного [1].

Якщо поточний кубик повністю належить тілу, то приймає значення 1. Якщо ні, то йому надається значення 0, дана вершина дерева не ділиться. У протилежному випадку описана процедура повторюється до присвоєння всім кінцевим вершинам значень 1 або 0 чи досягнення потрібних мінімальних розмірів кубиків (рис.2) [2].

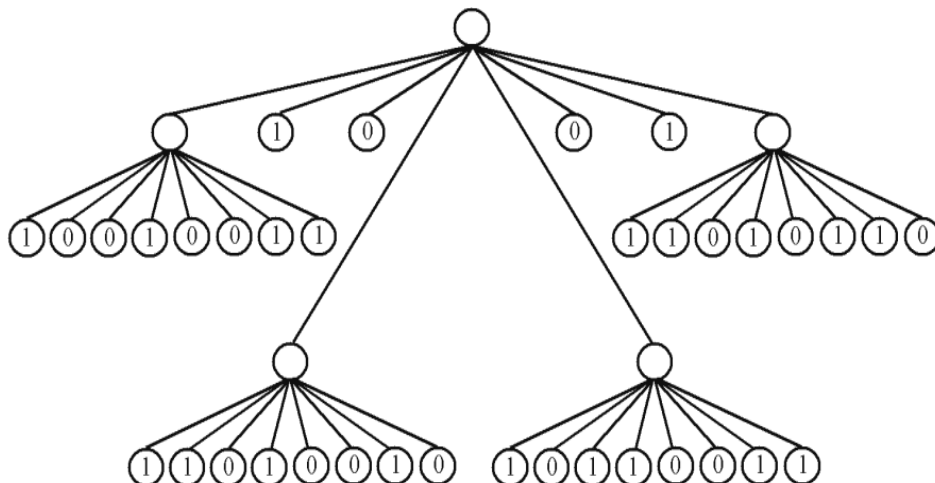


Рис. 2 – Приклад октантного дерева [2]

Недоліками процедури формування октантного дерева є необхідності в проведенні складних обчислень за геометричними співвідношеннями. Через необхідність визначення місцезнаходження конкретного октанту: усередині тіла, зовні або на їх межі.

Для геометричного моделювання подібних задач взаємодії може бути використаний алгоритм декселів та буфера глибини [3]. Основна ідея систем на основі декселів (елементів глибини) полягає в тому, щоб дискретизувати об'єкт не за допомогою кубодів (вокселів), а за допомогою паралельних сегментів ліній, які розташовані на регулярній сітці. Ці відрізки лінії можуть мати різну довжину, визначену їх початковою та кінцевою точками [4]. Такий метод був реалізований для опису взаємодії зачеплення інструмент-заготовка в модулі з відкритим доступом для мови програмування C++ Dystamill та проведеними за допомогою нього дослідженнями з моделювання сили різання під час 2.5D фрезерування [5, 6].

Якщо елементи використовуються лише в одному напрямку та мають однакове початкове значення [7], то для моделювання здійснюється вибір напрямку проектування, а перпендикулярно напрямку проектування обирається площина проектування, на яку наносять рівномірну сітку з перетинів прямих. Такий метод достатньо поширений в області моделювання процесів різання. Метод був застосований американською фірмою CGTech в своєму програмному продукті Vericut [7]. Цей підхід дуже простий у реалізації та має менший час обчислення, ніж воксельний підхід. Однак, недоліком є те, що не всі геометричні форми заготовки можуть бути змодельовані цим методом.

Для моделювання тривимірних об'єктів використовуються такі методи твердотілого моделювання, як Constructive Solid Geometry (CSG) або Boundary Representation (B-Rep) [1, 3]. Ці методи були розроблені в середині 1960-х років, коли системи CAD/CAM вимагали моделей, що містять геометричні розміри деталей. Дерево CSG використовує Булеві операції для представлення об'єктів. Всі операції проведені над об'єктом, що моделюється, в подальшому записується в дерево створення.

Моделювання взаємодії зачеплення інструмент-заготовка, використовуючи ці методи, є вельми доцільне через свою точність та зменшує час опрацювання, на відміну від вище перелічених [4]. Але необхідно зазначити, що для використання такого підходу необхідно використовувати геометричні ядра, які, як правило, є комерційними (такі, як Parasolid).

Також необхідно згадати про точковий метод, що використовується для моделювання об'єктів, які були подані кінцевим методом [8, 3]. Відповідно метод дискретно описує об'єкт за допомогою трьохвимірного масиву точок. Використання цього метода збільшує точність моделювання та зменшить час в порівнянні з кінцевим методом.

Окрім вище наведених методів, для розрахунку взаємодії інструмента і заготовки з метою визначення площі перетину недеформованої стружки також використовується аналітичний підхід. Точність такого підходу, в свою чергу, залежить від апроксимованої інформації про поверхню заготовки та траєкторію руху фрези [3]. Такий метод можна вважати найшвидшим, але його можливості обмежуються тільки деякими випадками обробки [9].

Отже, необхідно допрацювати наведений в [10] алгоритм взаємодії зачеплення інструмент-заготовка при моделюванні видалення припуску для можливості його універсального застосування та розробити способи підготовки інформації до моделювання.

Мета і задачі дослідження

Метою роботи є підготовка вихідних даних для моделювання процесу контурного 2,5D фрезерування, на підставі даних отриманих з САМ-системи, таких, як модель заготовки та управляюча програма. Розробити метод отримання траєкторії формоутворення, цифрової моделі контуру заготовки, інструментальної вихідної поверхні, допрацювати алгоритм видалення припуску при взаємодії фрези та заготовки.

Відповідно для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- дискретно відобразити траєкторію руху інструмента;
- відобразити контур заготовки та інструментальної поверхні;
- допрацювати принцип взаємодії фрези з заготовкою для моделювання видалення припуску з урахуванням гвинтової лінії лез фрези та відобразити поверхню утворену нею;
- втілити розроблені процедури в прикладну програму, та перевірити їх працездатність.

Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження представляє собою процес контурного 2,5D фрезерування, що здійснюється за допомогою NC-програм на станках з ЧПК. Предметом дослідження є теоретичні методи аналізу геометричної взаємодії між фрезою та заготовкою, що допомогло встановити відповідні математичні моделі. Такі теоретичні розробки лягли в основу створення нового програмного забезпечення для моделювання процесу видалення матеріалу за допомогою кінцевої фрези на верстатах з ЧПК.

Принципи моделювання контурного фрезерування були розроблені з урахуванням апріорної інформації, отриманої від САМ-систем. Вхідні дані конвертуються в цифрові масиви, які представляють траєкторію формоутворення, вихідну інструментальну поверхню та заготовку.

Результати дослідження

Як відомо, для управління верстатами з числовим програмним керуванням використовуються керуючі програми, записані у вигляді G-кодів. У більшості випадків, системи ЧПК базуються на стандарті ISO 6983/DIN 66025, який визначає траєкторію руху фрези за допомогою команд (G01 – прямолінійний рух, G02, G03 – дуговий рух і т.д.). Дискретизація траєкторії руху інструмента відбувається за попередньо розробленими алгоритмами, які описані в [10, 11]. Вони були втілені в прикладну програму, результати функціонування якої за вихідною інформацією з управляючої програми представлені на рис. 3, де лінією 1 зображена дискретизована траєкторія.

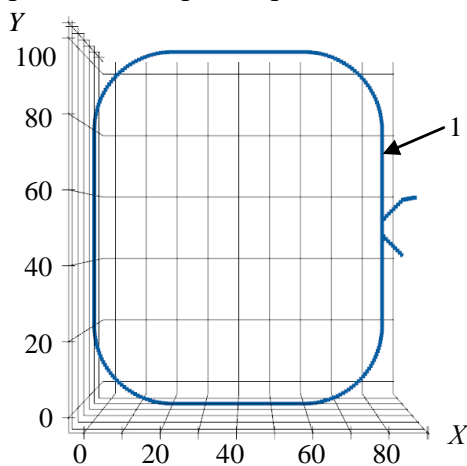


Рис. 3. – Дискретизована траєкторія формоутворення

Дискретизація застосовується лише для переміщень, які є робочими, оскільки при холостих переміщеннях вона не має сенсу, тому що різання не відбувається. Траєкторія руху інструменту представлена у вигляді множини P , яка складається з точок P_i , за якими переміщується інструмент:

$$P = \bigcup_{i=1}^n P_i . \quad (1)$$

Кожна розрахована точка записується в масив цифрових даних у вигляді:

G:..., X:..., Y:..., Z:..., I:..., J:..., F:..., S:...;

Цей запис є універсальним, оскільки він дозволяє зберігати значення, отримані з будь-якої команди. Для моделювання взаємодії фрези та заготовки та зрізування припуску використовується алгоритм [12], Vatti Polygon Clipping – це алгоритм обрізання полігонів, який був розроблений Vatti B.R. Полігон – фігура, яка складається з трьох або більше точок, які зветься вершинами, і з'єднаних між собою відрізками, які називаються ребрами.

Цей алгоритм працює з двома полігонами, що лежать на площині – «subject polygon» базовий полігон та «clip polygon» той полігон, що обрізає [13]. Мета полягає у тому, щоб визначити множину точок перетину базового з обрізаючим полігоном.

Отже, для моделювання необхідно створити проекцію 3D-моделі заготовки на площину. Цей відбиток представляє собою переріз 3D-моделі на висоті, заданій управляючою програмою. На площині заготовка та інструмент будуть представлені у вигляді базового та обрізного полігонів.

Метод дозволяє моделювати процес обробки заготовки, використовуючи набір логічних операцій, таких як перетин (\cap) та відмінність (\setminus), для полігонів на площині. Операція перетину допомагає створити полігон, який описує фігуру, що вилучається інструментом протягом відповідної ітерації моделювання, тоді як операція відмінності дозволяє отримати оновлену геометричну форму заготовки після видалення матеріалу з неї.

Послідовність моделювання процесу оброблення представлена на прикладі деталі, тривимірною моделлю якої показана на рис. 4.

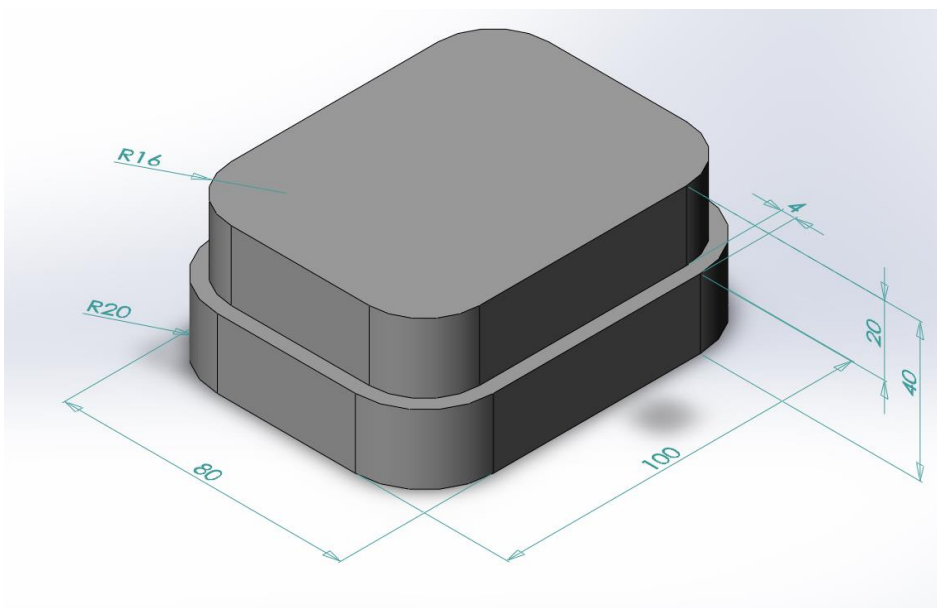


Рис. 4 – 3D-модель деталі

Моделювання відбувається на площині 2 (рис. 5), де спочатку розташовано проекцію заготовки 1 у формі полігону W . Фреза 3 зображена, як полігон T і переміщується відповідно до заздалегідь дискретизованої траєкторії 4.

Нехай під час певної ітерації моделювання процесу зрізування припуску переріз інструмента T знаходиться в точці P_i , яка відповідає одній з точок траєкторії руху інструмента. Тоді нова фігура $Tf_{z,i}$, що відображає видалення матеріалу одним зубом фрези, буде сформована шляхом протягування полігону T до точки P_{fz} (рис. 6). Дистанція між P_i та P_{fz} характеризується величиною подачі на зуб і обчислюється за наступним виразом:

$$f_z = \frac{F_{xe}}{n \cdot S}, \quad (2)$$

де F_{xe} – хвилинна подача (мм/хв), n – кількість зубів фрези, S – швидкість шпинделя (об/хв).

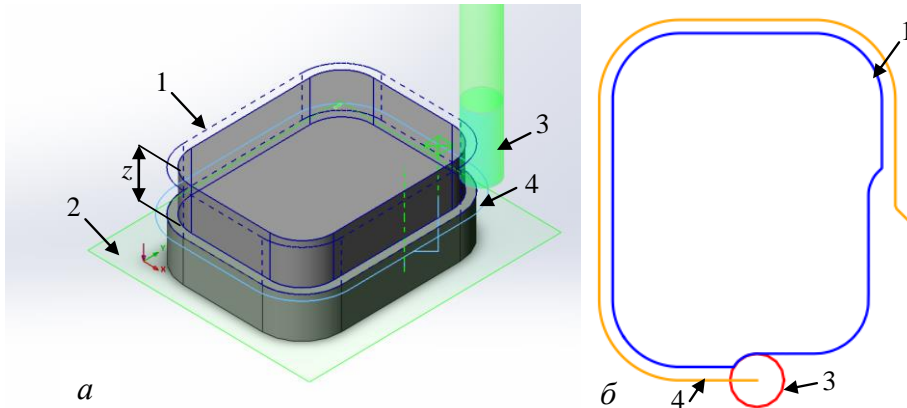


Рис. 5. – Результати моделювання:
а) візуалізація оброблення (САМ-система), б) контур фрезерування

Отже, полігон R_i , який отриманий в результаті операції перетину полігонів W_i та Tf_{z_i} , відображає фігуру, що відповідає матеріалу, видаленому під час даної ітерації:

$$R_i = W_i \cap T_{fz_i}, \quad (3)$$

Полігон W_{i+1} , що описує заготовку на поточній ітерації моделювання утворюється в результаті виконання операції різниці полігону заготовки W_i і фігури, що за аналогією з фігурою T_{fz} має початком точку P_i та протягує полігон T по траєкторії формоутворення, але робить це до наступної точки траєкторії P_{i+1} . Така фігура буде мати назву Tr_i

$$W_{i+1} = W_i - Tr_i, \quad (4)$$

Таким чином знаходиться контур заготовки після моделювання оброблення на кожній ітерації та відбувається підготовка до наступного кроку.

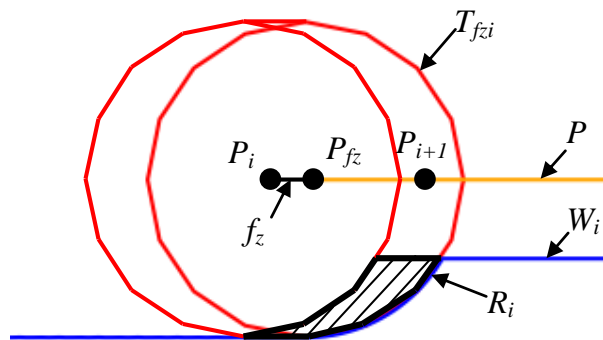


Рис. 6. Моделювання процесу зрізування матеріалу

Для урахування спірального розташування зуба фрези за висотою необхідно встановити взаємодію кожного зуба фрези в області дуги різання відповідно до кута α нахилу спіральної канавки. З метою вирішення цього завдання фреза представляється своїми перетинами на вибраних висотах h_{ij} (рис. 7, а), які відокремлюють значення висоти контакту інструмента із заготовкою z . Для обчислення площі на кожному заданому рівні висоти, потрібно модифікувати полігон T_{fz} . Відповідно до (3), полігон T_{fz} складається з двох кіл, які відображають видалення матеріалу під час переміщення фрези вздовж траєкторії довжиною

f_z , слід знайти точки на гвинтових лініях, які проектується на площину висоти, що розглядається, і після застосування формули (3) отримати полігон R_{ij} відповідно до цих точок на кожному рівні висоти.

Точки D_{ij} та C_{ij} (рис. 7, б), що обмежуватимуть полігон T_{fz} проектується з гвинтової лінії лез фрези відповідно для кожного кола, що формує фігуру T_{fz} , з центів кіл P_i, P_{i+1} , до D_i, C_i проводяться лінії кути між якими і віссю x системи координат управляючої програми будуть кутами θ повороту радіус-вектора, що лежить в основі гвинтової лінії. Надалі координати точок D_i та C_i на відповідних висотах h_{ij} будуть знаходитися за формулами що параметрично описують гвинтову лінію:

$$\begin{cases} x(t) = r * \cos(t + \theta) \\ y(t) = r * \sin(t + \theta), \\ h_{ij}(t) = p * t / (2 * \pi) \end{cases} \quad (5)$$

де r – радіус фрези, θ – кут повороту радіус-вектора, t – параметр, кут що утворює гвинтову лінію, знаходиться, як $t = (2 * \pi * h_{ij}) / p$; p – крок гвинта ($p = 2 * \pi * R * \tan(\alpha)$), α – кут підйому гвинтової лінії.

Відповідно вихідний полігон R_{ij} , для опису видаленої площі на кожній заданій висоті h_i буде отримуватись із взаємодії полігона, що описує заготовку W_i і модифікованого полігона T_{fz} , що обмежується гранню, утвореною точками D_{ij} і C_{ij} , а його площа S буде знаходитися за допомогою формули площі Гауса:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left| \left(\sum_{i=1}^{n-1} x_i y_{i+1} \right) + x_n y_1 - \left(\sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} y_i \right) - x_1 y_n \right|, \quad (6)$$

де S_{ij} – площа полігона, n – кількість сторін полігона, $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$ – координати вершин багатокутника.

В свою чергу, аналог швидкості видалення припуску – об’єм матеріалу видалений на певній ітерації руху фрези, може бути визначений, як сума об’ємів розрахованих через формулу:

$$MRR_i = \sum_{j=1}^{N-1} \left(\frac{h_{ij}}{3} \right) * (S_{ij} + S_{i(j+1)} + \sqrt{S_{ij} * S_{i(j+1)}}), \quad (7)$$

де, N – кількість пар перерізів на висоті; j – індекс, який відображає пару перерізів (значення від 1 до $N-1$); h_i – відстань між парою перерізів на висоті, що відповідає індексу i ; S_{ij} – площа полігона R_{ij} в основі; $S_{i(j+1)}$ – площа полігона R_{ij} в вершині фігури об’єм якої розраховується. В залежності від необхідної точності моделювання кількість перерізів N може змінюватися.

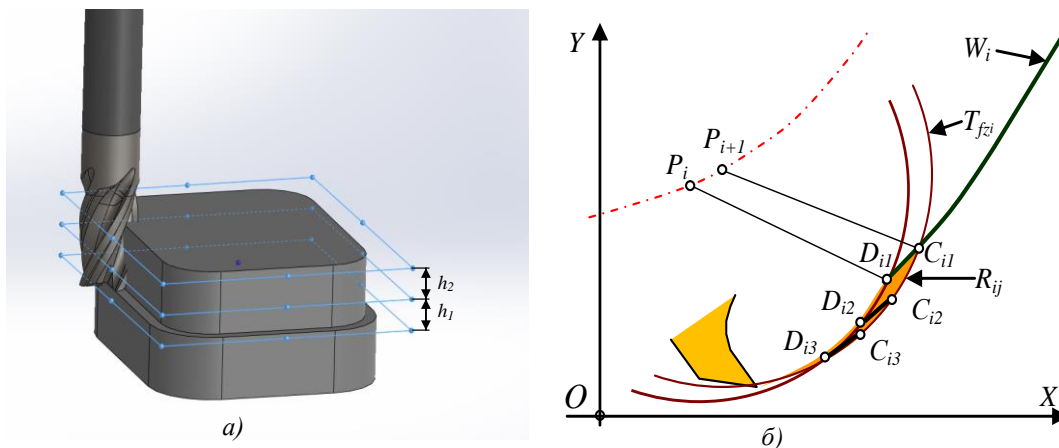


Рис. 7. – Визначення площі видаленого матеріалу по висоті взаємодії фрези і заготовки

В роботі було застосовано алгоритм моделювання процесу видалення матеріалу із заготовки під час 2,5D контурного фрезерування при чорновому обробленні. Вхідні дані для моделювання включають інструмент – кінцеву фрезу $\varnothing 16$ мм, ріжуча висота 32 мм з 4 зубами, кутом нахилу леза 30° , виготовлену з суцільного карбїду A20 Solid carbide. Припуск, який видаляється, має ширину 4 мм і висоту 20 мм, а матеріал заготовки – Сталь 45.

На рис. 8, зліва зображена управляюча програма в G-кодах. Створена програма для моделювання, здатна підтримувати будь-яку управляючу програму, розроблену в САМ-системі. У вікні справа відображено моделювання процесу різання, а знизу розташований графік зміни аналогу швидкості видалення матеріалу відповідно до траєкторії формоутворення.

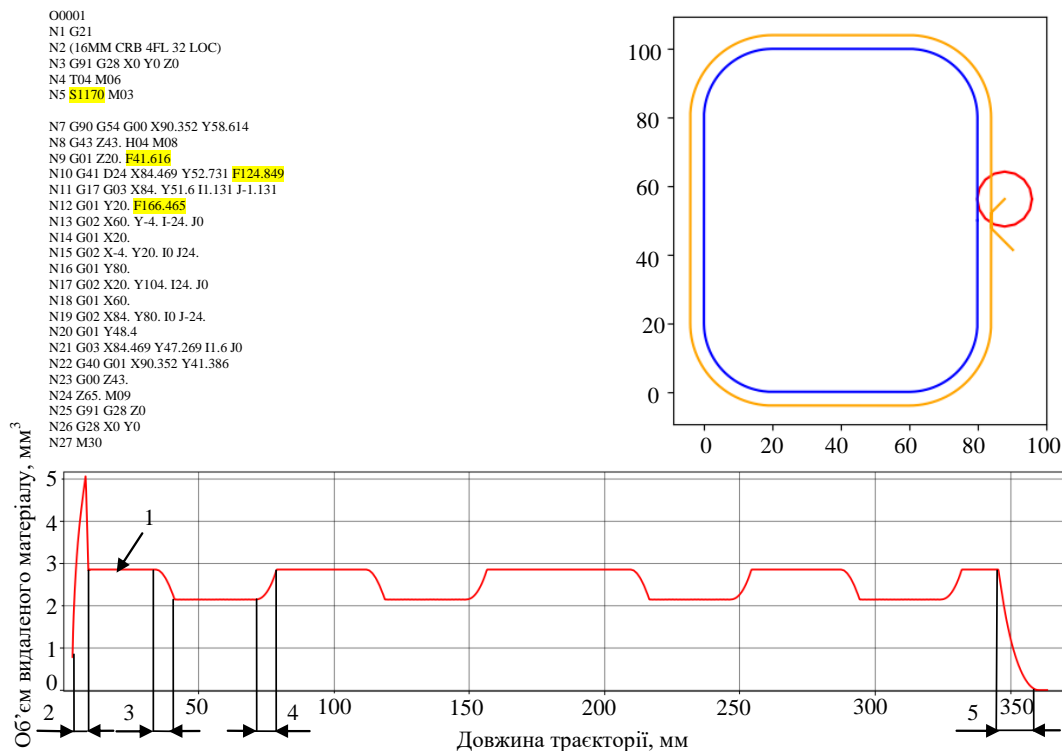


Рис. 8. – Інтерфейс програми моделювання чорнового проходу при контурному фрезеруванні

Після завантаження та аналізу початкового файлу керівної програми для верстата з ЧПК, розробленої в середовищі САМ-системи CAMWorks, система автоматично відображає траєкторію переміщення інструменту. Водночас, ділянки, де відбувається видалення матеріалу заготовки, розбиваються дискретно. Дискретність встановлюється користувачем. Контур заготовки автоматично створюється на основі завантаженої 3D-моделі у форматі STL. Інформацію про інструмент вводить користувач, а величина z , яка є висотою різання, визначається системою автоматично внаслідок аналізу траєкторії формоутворення та завантаженої моделі заготовки.

Під час моделювання в кожній точці траєкторії переміщення інструменту встановлюється аналог швидкості видалення матеріалу, а графік зміни відображається у вікні моделювання інтерфейсу (лінія 1 на рис. 8). Моделювання процесу фрезерування можна розділити на такі етапи: ділянка 2 – вхід інструменту, ділянка 3 – початок обробки дуги, 4 – завершення обробки дуги, 5 – вихід зі зони різання.

Результати та їх обговорення

Розроблена математична модель на основі геометричної взаємодії фрези із заготовкою дозволяє знайти аналог швидкості видалення припуску при контурному фрезеруванні. Розроблені алгоритми підготовки та моделювання процесу видалення припуску, втілені в

прикладну програму, що дозволяє їх використовувати для прогнозування процесу контурного фрезерування і в подальшому розробити управління для стабілізації швидкості видалення припуску за формоутворюючою траєкторією. Це дасть можливість оптимізувати операції контурного фрезерування за критерієм максимуму продуктивності при виконання всіх вимог за якістю оброблення.

Для реалізації такого методу необхідно розробити алгоритми, які дозволять модифікувати управляючу програму, створену у САМ-системі, з метою керування процесом різання шляхом зміни режимів різання за траєкторією формоутворення.

Висновки

1. Розроблено метод дискретизації траєкторії руху інструмента що дозволяє моделювати процес контурного 2,5D фрезерування та був успішно втілений в прикладній програмі.
2. Запропоновані принципи моделювання та видалення припуску на основі точкової моделі взаємодії фрези та заготовки з урахуванням гвинтової лінії лез фрези, що забезпечує універсальність використання програми для моделювання та підвищує її практичну значимість для обробки різноманітних контурів.
3. Проведено втілення розроблених методів в прикладну програму та перевірено їх функціональність, що підтверджує адекватність розроблених методів та можливість їх застосування для моделювання контурного 2,5D фрезерування з метою прогнозування результатів при технологічній підготовці виробництва.

References

1. Meagher D. Geometric Modeling Using Octree-Encoding. Computer Graphics and Image Processing, vol.19, Jun. 1982, pp. 129-147. doi: [https://doi.org/10.1016/0146-664X\(82\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0146-664X(82)90104-6)
2. Virchenko G., Martynov V., Sergeychuk O., Usenko V. (2018). Applying Using Structural-Parametric Geometric Models for Rational Design of Technological Processes. Mechanical Engineering. International Journal of Engineering & Technology, 7(4.8), 570-574. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27308>
3. Altintas Y., Kersting P., Biermann D., Budak E., Denkena B., Lazoglu I. Virtual process systems for part machining operations. CIRP Annals, vol. 63 (2), pp.585–605, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.007>
4. Boz Y., Erdim H., Lazoglu I. A comparison of solid model and three orthogonal dexelfield methods for cutter-workpiece engagement calculations in three and five-axis virtual milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 81 (5-8), pp.811–823, 2015. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7251-7>
5. Dambly V., Rivière-Lorphèvre É., Verlinden O. Tri-Dexel Based Cutter-Workpiece Engagement Determination For Robotic Machining Simulator. Procedia CIRP, vol. 107, pp. 1059-1064, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.108>.
6. Huynh H.N., Rivière-Lorphèvre E., Ducobu F., Ozcan A., Verlinden O. Dystamill: a framework dedicated to the dynamic simulation of milling operations for stability assessment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 98(5-8), pp. 2109–2126, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2357-3>
7. Fussell B.K., Jerard R.B., Hemmett J.G., Modeling of cutting geometry and forces for 5-axis sculptured surface machining. Computer-Aided Design, vol. 35, pp. 333-346, 2003. doi: [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(02\)00055-6](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(02)00055-6)
8. Kersting P., Biermann D. Modeling techniques for simulating workpiece deflections in NC milling. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 7(1), pp. 48–54, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.08.002>
9. Tunc L.T., Budak E. Extraction of 5-axis milling conditions from CAM data for process simulation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 43(5-6), pp. 538–550, 2008. doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1735-7>
10. Petrakov Y., Korenkov V., Myhovych A. Technology for programming contour milling on a CNC machine. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, vol. 2(1 (116), pp. 55–61, 2022. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.255389>
11. Petrakov Y.V., Myhovych A.V. Design of digital arrays of shape-forming trajectories - a prerequisite for contour milling simulation. Innovations of Youth in Mechanical Engineering, vol. 3, pp. 398-401, 2021. doi: <https://doi.org/10.20535/2708-3926.2021.3.229929>
12. Vatti B.R. A generic solution to polygon clipping. Communications of the ACM, vol. 35(7), pp. 56–63, Jul. 1992. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/129902.129906>
13. Max K. Agoston. Computer Graphics and Geometric Modeling: Implementation and Algorithms. Springer Science & Business Media, 2005. <https://www.hive.co.uk/Product/Max-K-Agoston/Computer-Graphics-and-Geometric-Modelling--Mathematics/18275071>

Відомості про авторів / About the Authors

Петраков Юрій Володимирович (Yuri Petrakov) – професор, доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, E-mail: ypetrakov.86@gmail.com, тел.: +38 (068)-356-54-79, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0525-4769>

Мигзович Артур Володимирович (Artur Myhovych) – аспірант кафедри технології машинобудування НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, E-mail: arthurmygovych@gmail.com, тел.: +38 (095)-126-91-55 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8687-6879>

УДК 621.923

DOI: 10.20998/2079-004X.2024.1(9).9

ГАСАНОВ М.І., РУДНЕВ А.В., КОТЛЯР О.В., ТИТАРЕНКО О.В., КОРЧАГИН І.Г.

ОЦІНКА ЗМАЩУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТВЕРДИХ ЗМАЩУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ АЛМАЗНОМУ ШЛІФУВАННІ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Проаналізовано результати досліджень сил різання при алмазному шліфуванні матеріалів, що використовуються при виготовленні та ремонті авіаційної техніки: титанового сплаву ВК6 та жароміцної дисперсійно-твердіючої високолегованої нержавіючої сталі 10X11H23T3MP. Шліфування проводилося з використанням твердих змащувальних матеріалів, що були розроблені авторами. Отримані результати дозволяють стверджувати, що тверді змащувальні матеріали здатні ефективно зменшувати роботу тертя. Стеаринову кислоту слід вважати основою для створення ТЗМ з подальшим удосконаленням їх складу.

Ключові слова: алмазне шліфування, тверді змащувальні матеріали, важкооброблювані матеріали, титановий сплав, жароміцна дисперсійно-твердіюча високолегована нержавіюча сталь.

HASANOV M.I., RUDNEV A.V., KOTLYAR O.V., TYTARENKO O.V., KORCHAGIN I.G.

ASSESSMENT OF THE LUBRICATING CAPACITY OF SOLID LUBRICATING MATERIALS IN DIAMOND GRINDING OF HEAVY-PROCESSED MATERIALS

The results of research on cutting forces during diamond grinding of materials used in the manufacture and repair of aircraft equipment: titanium alloy VK6 and heat-resistant dispersion-hardening high-alloy stainless steel 10X11H23T3MP were analyzed. Grinding was carried out using solid lubricating materials developed by the authors. The obtained results allow us to state that solid lubricating materials are able to effectively reduce friction. Stearic acid should be considered the basis for the creation of TZM with further improvement of their composition.

Keywords: Key words: diamond grinding, hard lubricating materials, hard-to-machine materials, titanium alloy, heat-resistant dispersion-hardening high-alloy stainless steel.

Вступ. Всі передові досягнення військової техніки, зокрема авіаційної, ґрунтуються на широкому використанні конструкційних матеріалів з високою міцністю, жаро- та корозійною стійкістю, високим опором втомі та незмінними фізико-механічними характеристиками у широкому діапазоні температур. Це, в першу чергу, високоміцні титанові сплави та нержавіючі жаростійкі сталі, леговані нікелем (більше 20%). Серед загального переліку відповідальних деталей авіабудування особливо виділяють силові деталі та зварні вузли планерів (силові балки, лонжерони, шпангоути, вузли навіснагрегатів, нервюри, рейки закрилків та передкрилків), силові деталі та вузли шасі (підкоси, коромисла візка, шліц-шарніри, гальмівні важелі) [1]. Унікальні властивості зазначених сплавів роблять їх незамінними для вузлів шасі, лопаток турбін авіадвигуна та деталей вихрової камери згоряння [2].

З технологічної точки зору виготовлення таких складних елементів сучасної техніки є непростим завданням, оскільки матеріали погано виливаються, обробляються тиском, зварюються та піддаються різанню – в цілому відносяться до важкооброблюваних. Забезпечити високу якість поверхні при всій складності форми деталі вдається тільки за умов особливого підходу щодо її формування на всіх етапах виробництва. При цьому на завершальні (фінішні) етапи покладається найбільша відповідальність за створення мікрогеометричного профілю поверхні.

Процеси фінішної абразивної обробки – шліфування – для більшості деталей з важкооброблюваних сплавів стали єдиною можливістю забезпечити точність форми та розмірів, здобути необхідну шорсткість поверхні та фізико-механічні властивості поверхневого шару і гарантувати таким чином високу функціональність, надійність та довговічність деталей. Однак, саме процеси шліфування через значну енергоємність потребують значних витрат на свою реалізацію (20-25% від загальних витрат на виробничий процес [3]), які переважно пов'язані з використанням значної кількості мастильно-охолоджувальних речовин та зменшенням їх шкідливого впливу. Зважаючи на світові тенденції щодо підвищення екологічності виробництва [4] та піклування про природні ресурси, все більш актуальними стають технології мінімального [5] та твердого змащування, використання багат шарових абразивних кругів з зернами різного розміру та форми [6], оптимізація параметрів режиму шліфування з урахуванням стану поверхні шліфувального інструменту [7].

Результати попередніх досліджень [8], переконливо засвідчили ефективність використання твердих змащувальних матеріалів (стеарин технічний, себацинова кислота та їх суміш, суміш стеаринової кислоти та дисульфід молібдену) при алмазному шліфуванні твердого сплаву (ВК6) при швидкості різання до 25 м/с. Найкращі показники якості поверхні порівняно з обробкою без змащування були отримані на зразках жароміцної сталі [9]. Розширення технологічних можливостей шліфування важкооброблюваних матеріалів за рахунок вивчення силових характеристик процесу при використанні твердих змащувальних матеріалів іншого

складу з оцінкою їх змащувальної здатності – важлива задача більш широкого впровадження ТЗМ на найбільш відповідальних фінішних етапах обробки.

Матеріали дослідження.

Для проведення експериментальних досліджень вибрані стратегічно важливі для авіабудування важкооброблювані матеріали: титановий сплав ВТ22 та жароміцна дисперсійно-твердіюча високолегована нержавіюча сталь 10X11Н23ТЗМР.

Таблиця 1 – Состав титанового сплаву ВТ22.

C	Fe	N	O	Si	Zr	V	Mo	Cr	Al
(Max)									
0,1	1,5	0,05	0,2	0,15	0,3	4–5,5	4–5,5	0,5–2	4,4–5,9

Таблиця 2 – Состав нержавеющей стали 10X11Н23ТЗМР.

C	Al	Si	B	S	P	Cr	Ni	Ti	V	Mo
(Max)										
0,1	0,8	0,6	0,02	0,01	0,025	10–15	21–25	2,6–3,2	4–5,5	1–1,6

Відповідно до класифікації [10] зазначені матеріали є представниками 2-х різних груп матеріалів, шліфування яких викликає труднощі через їх особливі властивості. Так, обробка сплаву ВТ22 ускладнюється високою хімічною активністю, низькою теплопровідністю, поганими антифрикційними властивостями, що обумовлює його налипання на круги, високу температуру у зоні шліфування та погіршення якості поверхні. Схожі проблеми виникають при шліфуванні жароміцних корозійностійких сталей, які підсилюються через їх високу в'язкість та ще більш низьку теплопровідність (12 Вт/м·К проти 22 Вт/м·К у ВТ22).

Площа поверхні шліфування експериментальних зразків із сплаву ВТ22 – 200 мм² (прямокутник 10 x 20 мм); із нержавіючої сталі – 255 мм² (коло Ø 18 мм).

Механічну обробку здійснювали методом алмазного шліфування (АШ) кругами з бакелітовою зв'язкою: АС4 50/40 100% В2-01 на модернізованому універсально-заточному верстаті мод. ЗД642Е.

Технологічні режими шліфування були вибрані на основі літературних даних [11, 12] та результатів власних попередніх досліджень. Зокрема, швидкість різання складала 25 м/с, подовжня швидкість – 1 м/хв. Шліфування проводили за жорсткою схемою при поперечних подачах 0,005; 0,01; 0,015 мм/дв.хід. Ці режими прийняті як такі, що можуть забезпечувати задовільну якість усіх важкооброблюваних матеріалів при фінішному шліфуванні. Вибір показника поперечної подачі в якості досліджуваного параметру ґрунтувалось на відомих даних [13] про його провідну роль у формуванні контактної температури в зоні шліфування, а, відповідно, й у впливі на якість оброблюваної поверхні і технологічні показники процесу.

Вибір і формування експериментального складу ТЗМ для досліджень проводили з урахуванням аналізу літературного огляду [14]. Зокрема, було взято до уваги, що основним наповнювачем сучасних екологічних ТЗМ є насичені вуглеводи та їх похідні, наприклад, стеаринова кислота. В якості антифрикційних, протизносних модифікаторів ефективно використовувати речовини з гексагональною структурою – графіт, дисульфід молібдену, нітрид бору і т.п. Рациональна концентрація вмісту мінеральних добавок знаходиться зазвичай в межах 20...40 %. Для проведення досліджень була вибрана композиції зі складових, наведених у таблиці 1. ТЗМ використовували у вигляді олівця Ø12 мм. Змащування здійснювали шляхом його дотику впродовж 1...2 с до алмазного круга в робочому режимі через кожні 2 подвійні ходи на 3-му.

Таблиця – Состав експериментальних твердих змащувальних матеріалів

Компоненти	Хімічна формула	Склад, %, в ТЗМ, №					
		1	2	3	4	5	6
Стеаринова кислота	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ CO ₂ H	-	65	100	90	80	65
Азелаїнова кислота	CO ₂ H(CH ₂) ₇ CO ₂ H	-					
Дисульфід молібдену	MoS ₂	-	35				
Нітрид бору гексагональний	BN	-				20	35

Дзвінна бронза	Cu – 78...82% Sn – 18...22%	-			10		
----------------	--------------------------------	---	--	--	----	--	--

Вплив ТЗМ на процеси шліфування оцінювали за тангенціальною складовою сили різання R_z , яка визначає зусилля на подолання пружної та пластичної деформації оброблюваного матеріалу та зношення абразивних зерен і зв'язки. Вимірювання проводили за жорсткою схемою шліфування за допомогою лабораторного експериментального однокомпонентного динамометра.

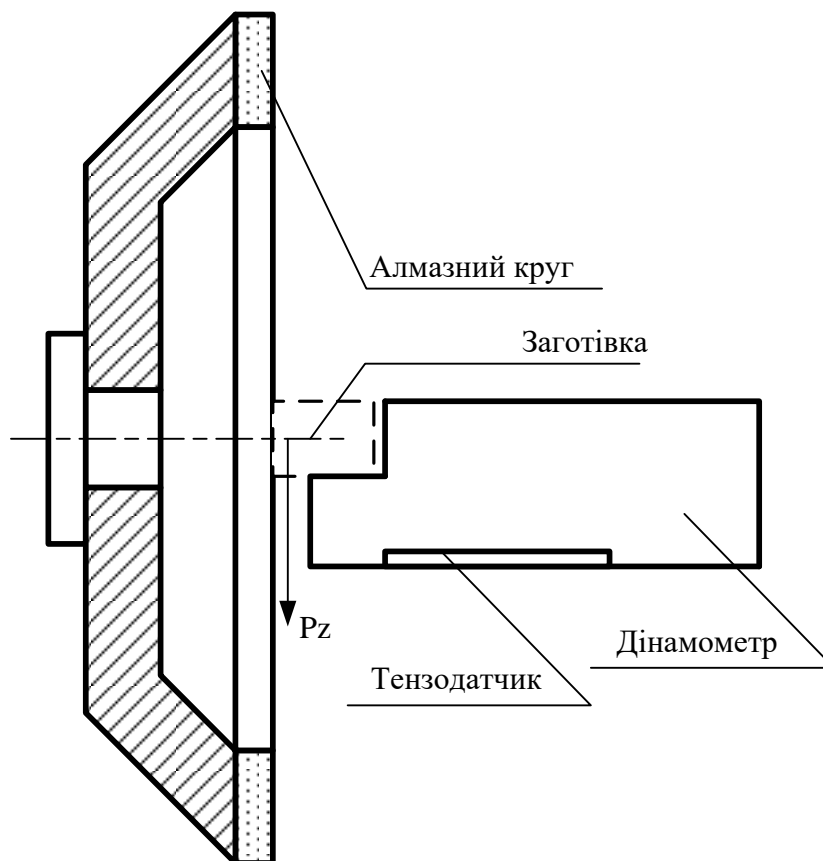


Рис. 1 – Принципова схема експериментальної установки

Результати.

Аналіз результатів досліджень, представлених на рис. 2 – 3, дозволяє стверджувати, що в умовах алмазного шліфування, сухого та з використанням ТЗМ, тангенціальна складова сили різання прогнозовано зростає зі збільшенням поперечної подачі [15]. Зазвичай, залежності складових сил різання від поперечної подачі мають нелінійний характер [16] з різним ступенем пропорційності на окремих ділянках досліджувальних значень R_z .

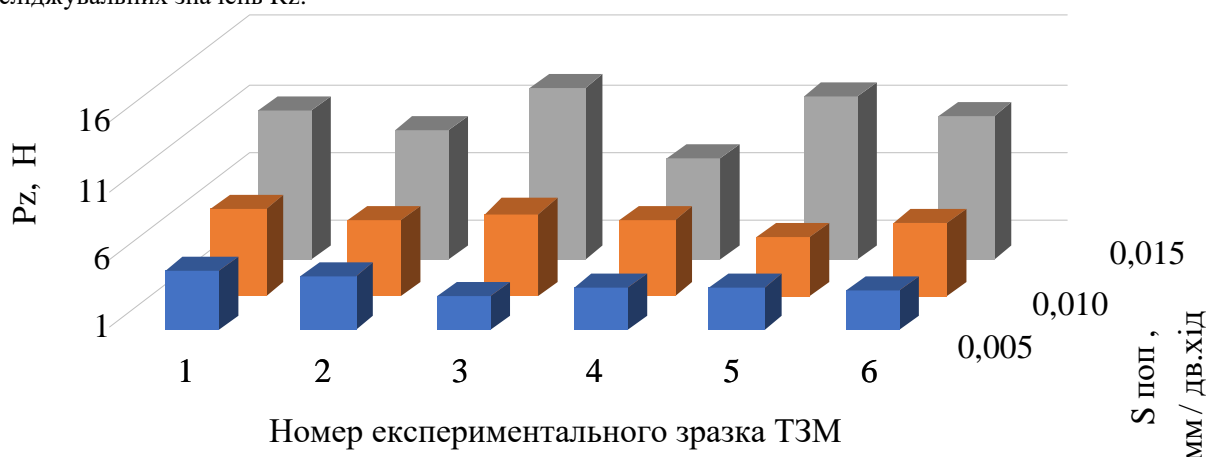


Рис. 2 – Вплив складу твердозмащувальних матеріалів на тангенціальне зусилля алмазного шліфування титанового сплаву BT22

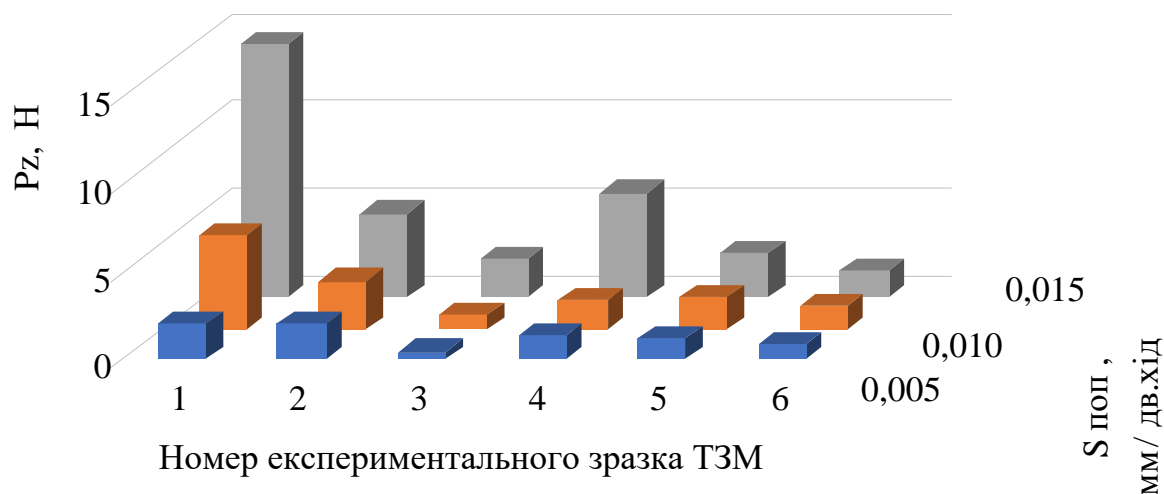


Рис. 3 – Вплив складу твердих мастил на тангенціальну силу алмазного шліфування сталі 10X11H23T3MP

При сухому шліфуванні найменшими значеннями Rz характеризується обробка сталі 10X11H23T3MP (рис. 3) при подачі 0,005 мм/подв.хід. Суттєво більші (в 2 рази) ці значення для сплаву BT22 (рис. 2). Подальше збільшення подачі до 0,01 мм/подв.хід зменшує різницю між матеріалами на 40 %, а при подачі 0,015 мм/подв.хід спостерігається аномально високе значення тангенціальної сили – 14,5 Н на сталі, що в 1,3 рази більше за титановий сплав. Відповідальними за таке збільшення сил є особливі фізико-механічні властивості матеріалів – висока в'язкість, схильність до налипання, адгезійна активність, зокрема, титанового сплаву. Це все призводить до появи так званих «непродуктивних» сил тертя, які для сталі є дуже вагомими. На відміну від продуктивних складових сили різання – зсуву, мікроруйнування та вторинного різання, які пропорційні подачі, непродуктивні сили практично від неї не залежать [17].

Змащування шліфувального круга досліджувальними складами ТЗМ (№№1 – 6) призвело до однозначного зменшення сили Rz при обробці високолегованої сталі практично на всіх режимах обробки титанового сплаву. Це свідчить про ефективність змащувальної дії ТЗМ в цілому, що проявляється у зменшенні сил тертя між поверхнею зразка та шліфувальним кругом.

Найкращий результат по зменшенню сили різання, а відповідно і енергетичних затрат, досягнуто при шліфуванні сталі 10X11H23T3MP практично з усіма використаними ТЗМ. Навіть якщо виключити режим з подачею 0,015 мм/подв. хід, де значення вихідної, «сухої» сили Rz складало аномально високе значення, на менших подачах (0,005 і 0,010 мм/подв. хід) покращення було суттєвим – в залежності від режиму обробки і складу ТЗМ в загальному випадку значення сили Rz падало в 1,6...6,6 разів. Пріоритетність ефективності дії ТЗМ залежала від подачі. Так, при подачах 0,005 і 0,010 мм/подв. хід кращий результат забезпечив ТЗМ №3 (СтК 100%), а при подачі 0,015 мм/подв. хід – ТЗМ №6 (СтК 65% +BN 35%).

Ефективність дії ТЗМ при шліфуванні сплаву BT22 була порівняно нижча, а при використанні ТЗМ №3, 5 і 6 проявлялась тільки на подачах 0,005 і 0,010 мм/подв. хід, що частково підтверджує тезу дослідників [17] про перевагу ролі сил тертя саме за малих подач. В цілому діапазон коефіцієнтів зменшення Rz при обробці BT22 в залежності від режиму і складу ТЗМ складав 1,1...1,7. Максимальне значення забезпечив ТЗМ №3 (СтК 100%), мінімальне – ТЗМ №2 (СтК 65% + MoS₂ 35%).

Порівняння результатів досліджень сил різання і значень постконтактної температури [17] показує, що між ними існує якісна кореляція – більшому значенню T_п відповідає більше значення Rz при обробці одного й того ж матеріалу з ТЗМ і без нього. Це дає можливість попередньої оцінки впливу змащування на силові характеристики процесу шліфування з використанням показника постконтактної температури.

Висновки.

Новітні способи підвищення екологічності фінішних процесів обробки важкооброблюваних матеріалів фокусуються на зменшенні використання шкідливих речовин та водних ресурсів. Представлене експериментальне дослідження присвячено розгляду альтернативного способу змащування за рахунок використання композиції із твердих речовин.

На основі результатів експериментальних даних алмазного шліфування титанового сплаву BT22 та жароміцної нержавіючої сталі 10X11H23T3MP отримані наступні висновки:

1. Ефективність твердих змащувальних матеріалів, що мають забезпечити кращі умови шліфування, доцільно оцінювати за тангенціальною складовою сили різання, яка в цілому характеризує роботу тертя.
2. Використання ТЗМ найбільш ефективно при обробці жароміцної нержавіючої сталі 10X11H23ТЗМР, особливо в діапазоні подач 0,005 – 0,01 мм/подв.хід. при використанні ТЗМ №3 на основі стеаринової кислоти. Відповідні значення тангенціальної складової складають 0,45 – 0,8 Н. Стабільно хорошу змащувальну здатність у всьому діапазоні подач показав ТЗМ №6 (СтК 65% +BN 35%).
3. Змащувальна здатність досліджених складів ТЗМ при обробці титанового сплаву ВТ 22 дещо гірша порівняно зі сталлю 10X11H23ТЗМР, однак, при подачах до 0,01 мм/подв.хід вони теж здатні ефективно зменшувати роботу тертя. Найкращі результати отримані при використанні ТЗМ №3 на основі стеаринової кислоти – 2,5...6,0 Н. Шліфування зі збільшеними подачами (0,015 мм/подв.хід) доцільно здійснювати з ТЗМ №4 (СтК90% +Бр10%).
4. Всі п'ять з досліджених складів ТЗМ здатні ефективно покращувати умови шліфування важкооброблюваних матеріалів, особливо в діапазоні невеликих подач. Стеаринову кислоту слід вважати основою для створення ТЗМ з подальшим удосконаленнями складу. Наступні дослідження мають на меті оцінку змащувальної здатності запропонованих ТЗМ у більш продуктивних процесах шліфування зі швидкостями більшими за 25 м/с.

Список літератури:

1. Пустырский С.В., Яковлев А.Л., Ночовная Л.А. Преимущества и применение высокопрочных титановых сплавов и перспективные направления при разработке новых // Вестник машиностроения, 2018, С.68 –71.
2. T. Zhu et al., Research progress of eco-friendly grinding technology for aviation nickel-based superalloys, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 126(2023) 2863–2886.
3. M. N. Sharif et al., Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 89 (5-8) (2023) 2447–2479.
4. M. R. Caiet al., Lubricating a bright future: Lubrication contribution to energysaving and low carbon emission, Sci. China. Tech. Sci., 56 (2013) 2888-2913.
5. S. H. Ali et al., Recent developments in MQL machining of aeronautical materials: A comparative review, Chin. J. Aeronaut., (2024), <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.01.018>.
6. D. Lipi'nski et al., Analysis of the Cutting Abilities of the Multilayer Grinding Wheels – Case of Ti-6Al-4V Alloy Grinding, Materials 15 (1) (2022) 1-13.
7. W. Kacalak et al., Selected Aspects of Precision Grinding Processes Optimization, Materials 17 (2024) 607-624.
8. A. Rudnev et al., Diamond Spark Grinding of Hard Alloys Using Solid Lubricants, Advances in Design, Simulation and Manufacturing (DSMIE), Lecture Notes in Mechanical Engineering (2021) 114 – 122.
9. E. Sevidova et al., An impact of Solid Lubrication on the Diamond Grinding Characteristics of Difficult-to-Machine Materials, Advances in Design, Simulation and Manufacturing (DSMIE), Lecture Notes in Mechanical Engineering (2023) 337 – 346.
10. Кашук В.А., Верещагин А.Г. Справочник шлифовщика. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.
11. Захаренко И. П. Алмазные инструменты и процессы обработки. – Киев: Техніка, 1980. –215 с., Библиогр.: 209 –213 с.
12. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / под общ. ред. Л.В. Худобина. - М.: Машиностроение, 2006.-544 с.
13. Худобин И.Л. О демпфирующем действии СОЖ при шлифовании // Вестник машиностроения. 1981. № 5. С. 55–57.
14. V. Panaioti et al., Assessing the Effectiveness of Solid Lubricants, Russ. Engin. Res., 38 (6)(2018) 493–497.
15. V. Panaioti, Applying Solid Lubricant to the Grinding-Wheel Surface, Russ. Engin. Res. 37 (4) (2017) 359–362.
16. B.P. Ravuri et al., Performance evaluation of grinding wheels impregnated with graphene nanoplatelets, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 85(2016) 2235–2245.
17. Sevidova, E., Rudnev, A., Gasanov, M., Kotliar, A., Titarenko, O. An impact of Solid Lubrication on the Diamond Grinding Characteristics of Difficult-to-Machine Materials. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – pp. 337 – 346.

Bibliography (transliterated):

1. Pustyrsky S.V., Yakovlev A.L., Nochovnaya L.A. Advantages and application of high-strength titanium alloys and promising directions in the development of new ones // Bulletin of Mechanical Engineering, 2018, pp. 68–71.
2. T. Zhu et al., Research progress of eco-friendly grinding technology for aviation nickel-based superalloys, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 126(2023) 2863–2886.
3. M. N. Sharif et al., Potential of alternative lubrication strategies for metal cutting processes: a review, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 89 (5-8) (2023) 2447–2479.
4. M. R. Caiet al., Lubricating a bright future: Lubrication contribution to energy saving and low carbon emission, Sci. China. Tech. Sci., 56 (2013) 2888-2913.
5. S. H. Ali et al., Recent developments in MQL machining of aeronautical materials: A comparative review, Chin. J. Aeronaut., (2024), <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.01.018>.
6. D. Lipi'nski et al., Analysis of the Cutting Abilities of the Multilayer Grinding Wheels – Case of Ti-6Al-4V Alloy Grinding, Materials 15 (1) (2022) 1-13.
7. W. Kacalak et al., Selected Aspects of Precision Grinding Processes Optimization, Materials 17 (2024) 607-624.
8. A. Rudnev et al., Diamond Spark Grinding of Hard Alloys Using Solid Lubricants, Advances in Design, Simulation and Manufacturing (DSMIE), Lecture Notes in Mechanical Engineering (2021) 114 – 122.
9. E. Sevidova et al., An impact of Solid Lubrication on the Diamond Grinding Characteristics of Difficult-to-Machine Materials, Advances in Design, Simulation and Manufacturing (DSMIE), Lecture Notes in Mechanical Engineering (2023) 337 – 346.
10. Kashchuk V.A., Vereshchagin A.G. Grinder's Handbook. – М.: Mashinostroenie, 1988. – 480 p.
11. Zakharchenko I. P. Diamond tools and processing. – Kyiv: Tekhnika, 1980. –215 p., Bibliography: 209–213 p.

12. Lubricating and cooling technological means and their application in cutting processing: reference book / under the general editorship of L. V. Khudobin. - M.: Mashinostroenie, 2006.-544 p.
13. Khudobin I. L. On the damping effect of coolant during grinding // Bulletin of mechanical engineering. 1981. No. 5. P. 55–57.
14. V. Panaiotti et al., Assessing the Effectiveness of Solid Lubricants, Russ. Engin. Res., 38 (6)(2018) 493–497.
15. V. Panaiotti, Applying Solid Lubricant to the Grinding-Wheel Surface, Russ. Engin. Res. 37 (4) (2017) 359–362.
16. B. P. Ravuri et al., Performance evaluation of grinding wheels impregnated with graphene nanoplatelets, Int. J Adv. Manuf. Technol.,85(2016) 2235–2245.
17. Sevidova, E., Rudnev, A., Gasanov, M., Kotliar, A., Titarenko, O. An impact of Solid Lubrication on the Diamond Grinding Characteristics of Difficult-to-Machine Materials. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – pp. 337 – 346.

Поступила (received) 17.09.2024

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гасанов Магомедсмін Ісамагомедович (Hasanov Magomedemin) – доктор технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: kh.hpi.hasanov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2161-2386

Руднев Олександр Віталійович (Rudnev Aleksandr) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф.Семко Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-61-43; e-mail: aleksandr1827.64@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4091-6748

Котляр Олексій Віталійович (Kotlyar Oleksii) – доцент кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: Alexey_kotliar@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7664-0395

Титаренко Оксана Валеріївна (Titarenko Oksana) – доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України м. Харків; тел.: +38 (057) 707-61-43; e-mail: oksanatitarenko4179@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6811-7537

Корчагин Ілля Геннадійович (Korchagin Ilya) – аспірант кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: ORCID:

ЧУХЛІВ В.Л., ПАЛІЄНКО В.О.**ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ КУВАННЯМ**

Анотація. У статті розглянуті способи виготовлення колінчастих валів різними методами і основну увагу приділено способу кування. Розглянуті різні підходи отримання колінчастих валів, враховуючи вимоги до кінцевого виробу. Виконана дослідження процесу кування колінчастих валів за допомогою моделювання схем кування з використанням технологічного інструменту пережитки. Це дозволило візуалізувати різні аспекти технологічного процесу та з'ясувати, які методи та схеми передачі є найбільш раціональними для отримання колінчастого валу куванням. На основі отриманих даних були отримані висновки, які вказують на те, які підходи та методи виробництва колінчастих валів є раціональними при зменшенні кількості технологічних переходів. Результати дослідження можуть бути корисними для виробництв, які займаються куванням колінчастих валів, допомагаючи їм обрати найбільш раціональні методи та схеми передавання металу при куванні колінчастих валів для покращення виробничого процесу та зниження витрат.

Ключові слова: колінчастий вал, моделювання, кування, передача металу, деформація.

CHUKHLIV V. L., PALIENKO V. O.
IMPROVING THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING CRANKSHAFTS BY FORGING

Abstract. The article discusses the methods of manufacturing crankshafts by various methods and focuses on the forging method. Different approaches to producing crankshafts are considered, taking into account the requirements for the final product. A study of the crankshaft forging process was carried out by modelling forging schemes using the technological tool vestiges. This made it possible to visualise various aspects of the technological process and find out which methods and transmission schemes are the most rational for producing a crankshaft by forging. Based on the data obtained, conclusions were drawn that indicate which approaches and methods of crankshaft production are rational while reducing the number of technological transitions. The results of the study can be useful for industries engaged in crankshaft forging, helping them to choose the most rational methods and schemes of metal transfer during crankshaft forging to improve the production process and reduce costs.

Keywords: crankshaft, modelling, forging, metal transfer, deformation.

Вступ. Передача металу, як процес ковальських робіт, отримала широке розповсюдження в виготовленні великих колінчастих валів. Способів виготовлення колінчастих валів досить багато, найпоширенішим є штампування, але для виготовлення габаритних колінчастих валів застосовують кування. На якість отриманої продукції найбільший вплив має раціональний режим кування, який може бути розроблений в залежності від оптимізації схем деформації шляхом математичного моделювання з подальшим їх застосуванням у реальних промислових умовах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Виробництво колінчастих валів відрізняється технологією їх виготовлення.

В одиничному і дрібносерійному виробництві для колінчастих валів заготовками є поковки. Розміри кінцевої деталі і форма сильно відрізняються від готових форм колінчастих валів. Поковки виготовляють на потужних гідравлічних пресах.

У серійному і великосерійному виробництві заготовки отримують гарячим штампуванням, що має наступні технологічні переходи: попереднє й остаточне штампування, обрізка облою (обрізний штамп), гаряче правлення в штампах. Невеликі колінчасті вали виготовляють із прутка - обробкою металів різанням.

Зі збільшенням розмірів поковки трудомісткість отримання виробу методом кування і штампування зростає. Виготовлення колінчастого вала гнуттям з висаджуванням вирізняється високою продуктивністю і дає підвищення міцності і при такій обробці вал зазнає вигину та осевого стиснення в місці формування коліна.

Для аналізу останніх досліджень було розглянуто основні технології виготовлення валів, різний підхід до формування готового виробу. Є основні методи виготовлення колінчастих валів, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Колінчасті вали зазвичай виготовляють наступними способами: штампуванням, литтям, механічною обробкою та куванням. Механічна обробка заготовки колінчастих валів відрізняється значними відходами металу під час різання. Але все вище сказане відноситься до колінчастих валів, які переважно мають масу до 500кг, а колінчасті вали які мають більшу масу можна зробити куванням.

Методи виготовлення колінчастих валів литтям розглянуті в багатьох публікаціях. Зокрема, у роботі [1] розглянутий новий спосіб отримання колінчастих валів литтям, який забезпечує отримання валів, що мають поліпшену здатність до балансування обертанням, яка може бути виміряна з підвищеною точністю. А в роботі [2] представлений спосіб отримання литих порожнистих колінчастих валів для двигунів внутрішнього згорання, що дає змогу зменшити масу за рахунок втягування серцевини, а також може усунути необхідність механічної обробки масляних каналів. В роботі [3] увагу зосереджено на застосуванні ізотермічно-загартованого чавуну з кулястим графітом у колінчастому валу та особливостям його застосуванні в двигуні. У роботі [4] зосередилися на зменшенні дефектів лиття та формування, які в основному виникають під час металургійного процесу, є змога описати деякі з тих серйозних проблем, які можуть перешкоджати процедурі лиття, а саме градієнт температури, різниця в часі затвердіння сплаву, площа поверхні ливарного матеріалу, вплив різного об'єму

розплавленого металу та форма отвору, яка повинна бути квадратною, а не конічною, щоб підвищити продуктивність процесу лиття. До переваг виготовлення валів литтям можна віднести простоту та швидкість виготовлення, отримання будь-якої форми продукції. Зокрема лиття має свої недоліки до яких можливо віднести якість отриманої продукції, при виготовленні з'являються дефекти лиття, які в принципі виправляються куванням. Також, розбити литу структуру та дендрити після лиття можна куванням.

Виготовлення колінчастих валів штампуванням є досить вивченим та поширеним методом виготовлення, але цей спосіб підходить для валів, які мають масу до 500 кг і для габаритних валів зазвичай використовують спосіб кування. В роботі [5] розглянутий спосіб виготовлення шатуна для колінчастого вала двигуна внутрішнього згорання, в якому колінчастий вал складається з окремо виготовлених частин. Колінчастий вал відштампований з напівфабрикату і має центральний отвір для отримання шийки колінчастого вала, а також центральний розташований отвір для отримання пальця колінчастого вала. При штампуванні деформація відбувається на кожному етапі, щоб забезпечити потік металу в порожнину штампа, як у верхньому, так і в нижньому штампі. В роботі [6] виявили що на кожному етапі штампування заготовка рухається в певному напрямку з певною швидкістю і метал заповнює всю порожнину штампа. Отримання колінчастого вала методом [7] призводить до того, що матеріал між матрицями розміщується таким чином, щоб сформувати елементи колінчастого вала і в той же час правильно позиціонує колінчастий палець по відношенню до шийок. В роботі [8] дається оцінка попередніх досліджень і рішень з лазерного наплавлення, які в даний час пропонуються для ремонту судових колінчастих валів. У роботі [9] розробили метод зміцнення штампованих колінчастих валів, включаючи розробку машини для випробування на втому колінчастих валів і досягли проектної міцності штампованих колінчастих валів, яка на 15% вища, ніж у кованих виробів. Вимоги при штампуванні колінчастих валів зазвичай дуже високі і у роботі [10] виявили, що в процесі виробництва необхідно дотримуватись вимог до якості продукції, а також надзвичайно високі вимоги пред'являються до однорідності і стабільності розмірів поковок в одній і тій ж партії. У роботі [11] проводиться аналіз штампування шестициліндрового колінчастого вала, що виготовлений гарячим штампуванням.

Виготовлення різанням є одним з способів для фінішної обробки колінчастих валів і розглянемо методи виробництва валів різанням. В [12] розглянуто процес виготовлення деталі з заготовки, що забезпечує гнучкість конструкції. Процес виготовлення заготовки значно полегшує розміщення шийок саме там, де їх хоче бачити конструктор і для цього процесу потрібні такі інструменти, як токарний верстат, формувач, прецизійні свердла, фрезерний верстат. При механічній обробці колінчастого вала в роботі [13] задіяно багато машин і кожна операція іноді має більше ніж один верстат і тривалість циклу змінюється від однієї операції до іншої, залежно від типу процесу. В роботі [14] розглянута обробка кожної шийки колінчастого вала, що підлягає належному балансуванню навіть під час роботи і при цьому кожен елемент колінчастого вала потребує поглибленого аналізу. Недоліками механічної обробки є те, що під час обробки різанням відбувається перерізання волокон металу.

Тепер розглянемо спосіб отримання крупних колінчастих валів куванням. В куванні, як і в попередніх способах є недоліки і до них можна віднести складність технологічного процесу. В роботі [15] розглянутий спосіб виготовлення колінчастого вала за допомогою інструменту у вигляді вузького бойка і розроблені рекомендації по застосуванню тонкого деформуючого інструменту для отримання шатунної шийки колінчастого вала за визначеними схемами кування. В [16] розглянутий спосіб отримання колінчастого вала методом кування, що дає змогу максимально зберегти волокнисту структуру металу при виконанні всіх технологічних операцій. В роботі [17] розглянутий спосіб кування габаритних злитків за допомогою осаджування профільованих заготовок. В роботі [18] показано, що після попереднього протягування відбувається закриття осьової пористості зливка і також встановлено параметр оцінки закриття порожнин при куванні, який враховує напружений стан та гідростатичні напруження в заготовці при осаджуванні. Виявлено, що при осаджуванні вздовж осі зливка без попереднього протягування не впливає на заварювання осьової пористості. В даних роботах [19, 20] розглянутий спосіб отримання шатунних шийок обтискаючи заготовку шістьма тонкими бойками. Цей спосіб дозволяє спрофілювати заготовку до форми, наближеної до кінцевої. Маса поковки складає декілька десятків тон, вихідною заготовкою є зливки, першим етапом є осаджування, а далі протягування до необхідних розмірів і потім профілюють складним інструментом. В роботі [21] розглянутий спосіб отримання колінчастих валів за допомогою викрутних пресів, що дає змогу здійснити формоутворення поковки з розташуванням всіх корінних та шатунних шийок в одній площині і після цього зробити розворот шатунних шийок на заданий кут. У роботі [22] розглянуті способи кування, які застосовуються на сьогоднішній день. Процес кування може відрізнятись від конструктивних особливостей вала. Відмінності сильно помітні при куванні багатоколінчастого вала, але при куванні одноколінчастого вала спосіб виконання тільки один. В роботі [23] виконан аналіз методом скінченних елементів (МСЕ) в програмному забезпеченні ANSYS шляхом накладання на вал навантаження та обмежень відповідно до умов роботи двигуна. Аналіз виконується для визначення місця критичного руйнування колінчастого вала.

В розглянутих роботах недостатньо вивчено вплив параметрів формозміни на геометрію отриманого виробу при куванні. Зокрема, мало вивчений вплив геометрії інструмента на перерозподіл металу під час деформації при виконанні операції передавання при куванні.

Постановка задачі. Основною метою цього дослідження є вивчення процесу формозміни при отриманні

колінчастого валу методом вільного кування. Було проведено теоретичне дослідження методом комп'ютерного моделювання на основі аналізу технологічних схем виробництв поковок колінчастих валів. Була обрана заготовка під кування, яка має квадратний поперечний переріз. Довжина заготовки 5000 мм зі стороною квадрату 1000 мм. В якості матеріалу була обрана легвана сталь – Сталь 40ХН2МА. Температурний інтервал кування від 1200°C до 800°C. Для зменшення бочкоподібності поковки підігрівають бойки або плити, а також технологічний інструмент пережимку до 300°C. Пережимка потрібна для перерозподілу металу під час деформації. Для моделювання процесу деформації металу використовувався програмний комплекс QForm3D.

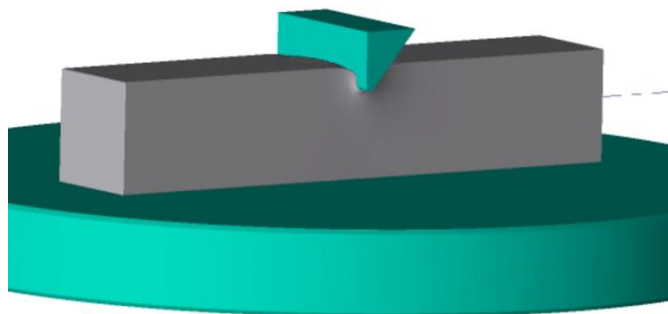


Рис. 1 – Загальний вигляд процесу вдавлювання пережимки в програмі QForm3D

Процес деформації проходить наступним чином - в заготовку, яка знаходиться на осадочній плиті, вдавлюється пережимка (рис. 1) на глибину 200мм потім її перевертають на 180° (рис. 2) та роблять ще одну засічку пережимкою. Для досліді слід витримати відстань між засічками, яку варіюють наступним чином 0, 100, 200, 300, 400, 500, 600 мм.

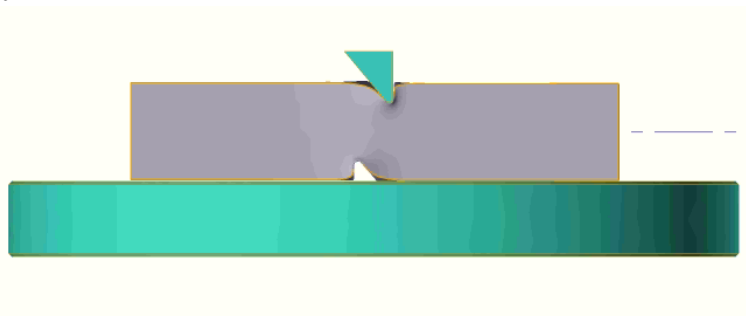


Рис. 2 – Процес деформації заготовки пережимкою з двох сторін при дотриманні розміру між засічками

Для аналізу формозміни металу треба визначити основні розміри поковки колінчастого валу та їх співвідношення. Для цього треба знайти залежність факторів та розмірів. На рис. 3 схематично зображена поковка, на якій позначені геометричні параметри у вигляді літер і тим самим ми описали саму заготовку. Таким чином ми можемо визначити раціональні параметри вдавлювання пережимки та визначити відстань між ними.

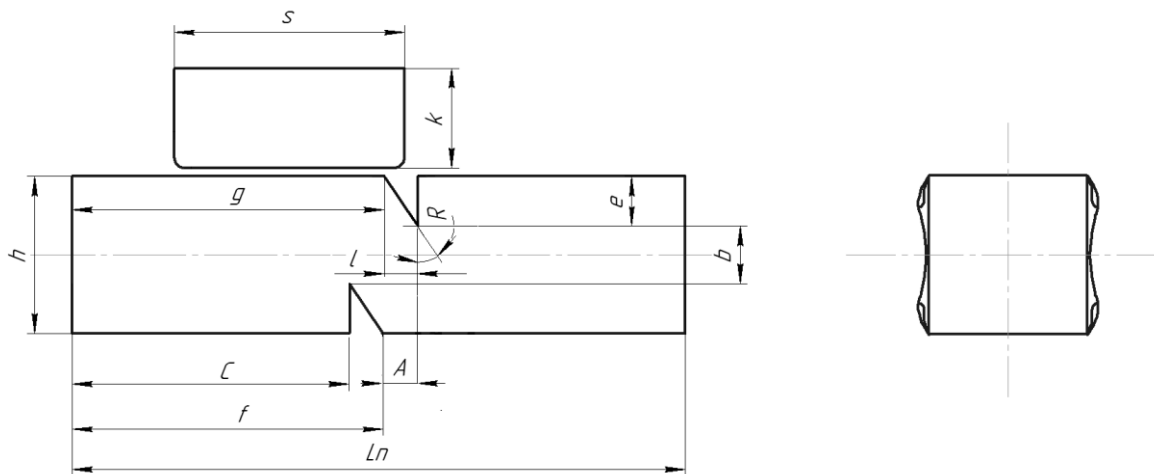


Рис. 3 – Геометричні параметри заготовки до деформації у поперечному перетині

Визначення співвідношення розмірів заготовки та інструменту дозволило зробити графічні залежності зміни геометричних розмірів заготовки при використанні різної відстані між пережимками та різного ступіню деформації. Для аналізу ми беремо залежності та аналізуємо, який вплив мають ці співвідношення. Дослідження взаємовпливу цих співвідношень дає змогу визначити раціональну глибину впровадження інструменту.

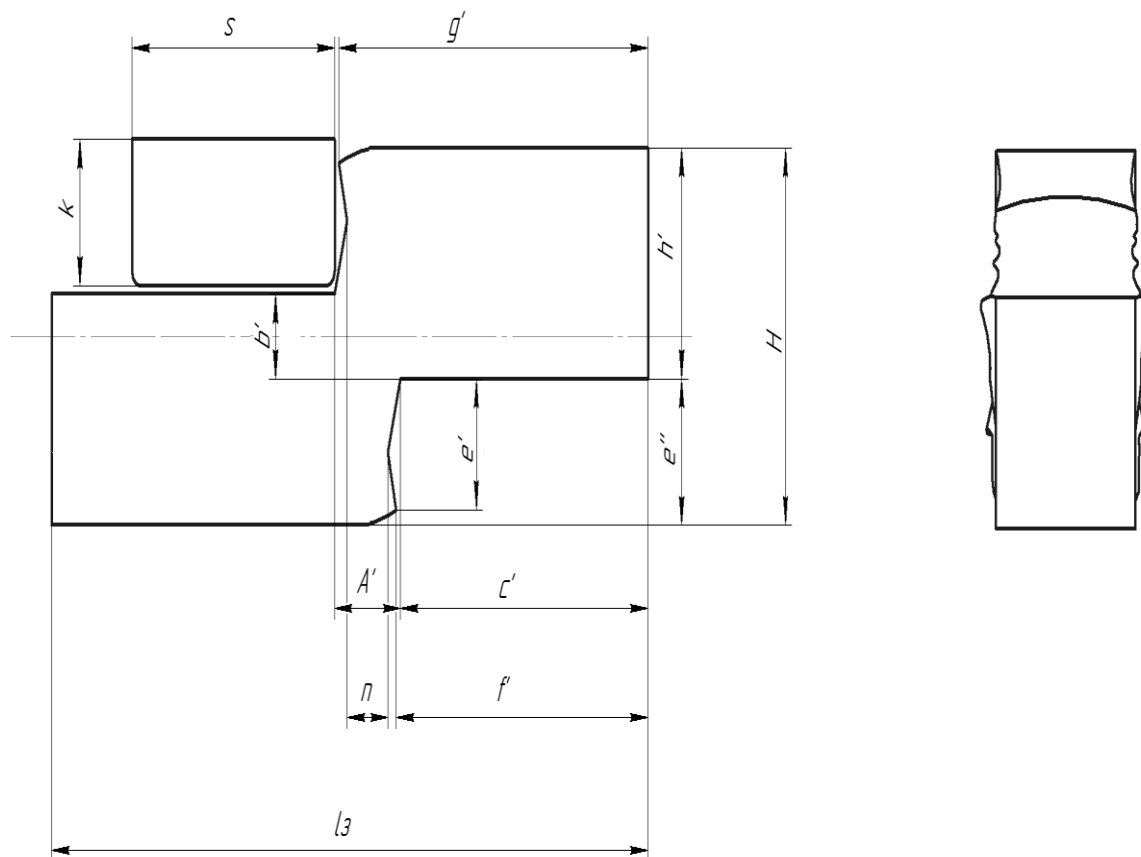


Рис. 4 – Геометричні параметри поковки у поперечному перетині після деформації

Основними геометричними параметрами в даному випадку (рис. 3-4) є:

- A – відстань між пережимками;
- e – глибина занурення пережимки;
- h` - висота продеформованої поковки;
- h – висота заготовки;
- b – відстань між зануренням пережимок до деформації;
- b` - відстань між зануренням пережимок після деформації;
- g – відстань від прямої частини намітки до краю;
- g` - відстань від похилої частини намітки до краю;
- c - відстань від намітки до краю заготовки;
- c` - відстань від намітки до краю поковки.

Основні параметри, які описують співвідношеннями:

- $h/h`$ - відношення висоти заготовки до висоти поковки;
- $b/b`$ - відношення розміру заготовки та поковки між намітками;
- $c/c`$ - відношення довжини нижньої половини заготовки до нижньої половини поковки;
- $g/g`$ - відношення довжини верхньої половини заготовки до верхньої половини поковки.

Для аналізу ми беремо обрані залежності та аналізуємо, який вплив мають ці співвідношення на формозміну металу. Дослідження відстані між зануреннями та глибиною занурення пережимки дає змогу визначити раціональну глибину впровадження інструменту. Потім ми будемо графіки залежностей і аналізуємо кожен етап формозміни металу при використанні технологічного інструменту пережимки, а також

визначаємо деформаційні умови максимального наближення форми і розмірів поковки до готового виробу.

На рис. 5 ми бачимо, що типорозмір висоти отриманого коліна (g/g') змінюється пряmlinійно для кожного випадку використання різних відстаней, однак кожен випадок має характерну чисельну величину, яка значно відрізняється для кожного випадку кування.

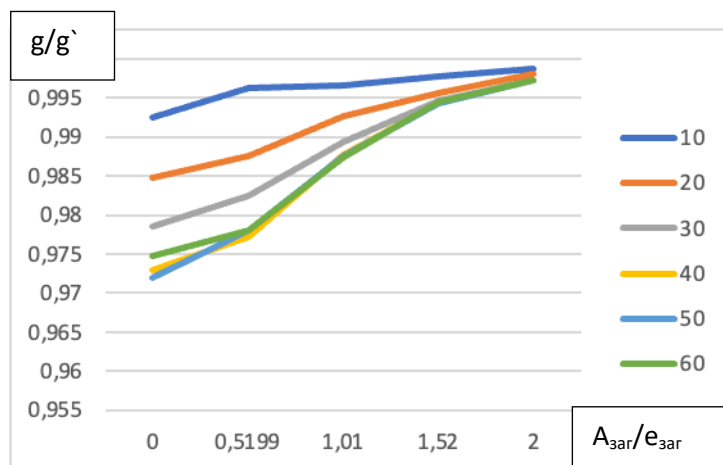


Рис. 5 – Графічна залежність відстані від прямої частини намітки до краю після деформації (g/g')

З графічної залежності на рис. 6 спостерігаємо те, що графіки мають майже пряmlinійну залежність для різних співвідношень при незначному їх зниженні зі збільшенням відносної відстані між пережимками. При цьому на рис. 7 показаний характерний приклад отримання колінчастого валу з одним коліном, який можливо отримати при використанні розробленого технологічного процесу з технологічним інструментом пережимкою з послідуною деформацією металу при передаванні під час кування.

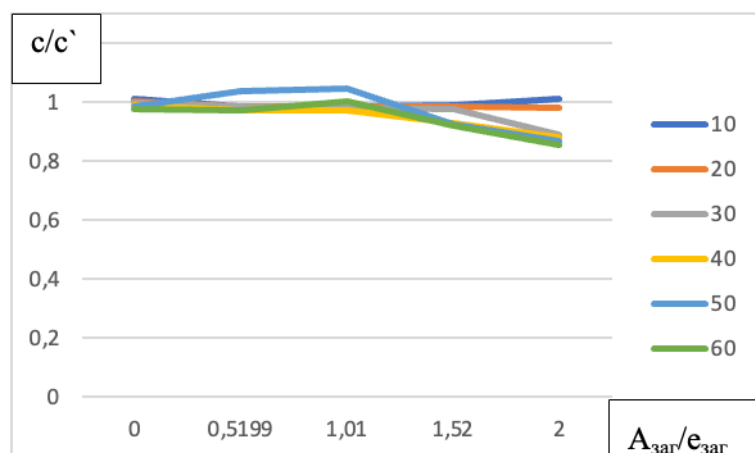


Рис. 6 – Графічна залежність відстані між намітками до деформації та після деформації

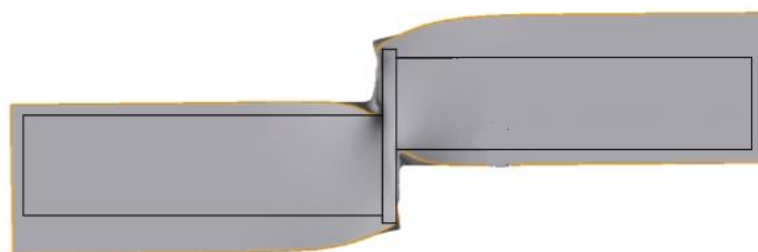


Рис. 7 – Схематичне зображення одного коліна валу, який можливо отримати при передаванні металу

Висновки.

Проведено комп'ютерне моделювання технологічного процесу деформування колінчастого валу. Побудовані графіки які показують вплив інструмента при визначених параметрах деформування колінчастого валу.

Сучасна технологія виготовлення поковок колінчастих валів вільним куванням складається в основному з операції протягування та передачі. Отримання шатунної шийки вільним куванням можливе, як правило її закривали ковальським напуском, таким методом збільшували металосміність виготовлення однієї поковки. Визначення деформаційних умов максимально дозволяє наблизити форму поковки до форми готового виробу з метою зменшення витрат металу на виготовлення.

Список використаної літератури

1. Patent US6,415,847B1, Jul.9,2002. Crankshaft casting pattern and method // Gene Frederic Baltz, Olmsted Falls; Jerome John Grzincic; Ronald John Nakoneczny, Olmsted; Thomas Eugene Sattler, Medina, all of OH (US).
2. Song Liu. Foundry and Development of Ductile Iron Crankshaft. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2015, 9, p. 791-796
3. Patent WO 2005/099933, 27.10.2005 Gazette 2005/43 Cast hollow crankshaft and method of manufacturing the same // Kabushiki Kaisha Riken Chiyoda-ku, Tokyo Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha Toyota-shi, Aichi-ken
4. Zayyad Abubakar, Najeeb Ullah. Minimization of shrinkage defect in crankshaft casting. Department of Mechanical & Chemical Engineering (MCE) Islamic University of Technology (IUT), OIC Board Bazar, Gazipur Bangladesh.
5. Patent US 6,763,586 B2, Jul.9, 20, 2004. Method of producing a crank arm for a crankshaft // Harald Schliemann, Waiblingen (DE). Arno Roos, Waiblingen (DE). *United States Patent Crankshaft*
6. Zbigniew Siemiatkowski Kazimierz Pulaski // Computerised grinding procedure for large scale crankshaft machining. *MATEC Web Conf. Vol. 252, 2019. III International Conference of Computational Methods in Engineering Science (CNES18)*.
7. R.J. H. Hunt and J. E.Russell // Crankshaft forging: an evaluation of continuous grain flow. *Proc Instn Mech Engrs 1966-67, Vol. 181, Pt. 3H*.
8. Toms Torims, Guntis Pikursm Andris Ratkus, Andris Logins, Janis Valcans, Stepan Sklariks // Development of Technological Equipment to Laboratory Test In-situ Laser Cladding for Marine Engine. *Procedia Engineering Volume 100, 2015, Pages 559-568*.
9. Mr. Chisao Otani // Manufacture of forged crankshafts - Crankshafts from Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation. *Journal of the JIME Vol. 48, No. 1(2013)*
10. Forging Technology and improvement of passenger car crankshaft: веб-сайт. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/forging-technology-improvement-passenger-car-crankshaft> (дата звернення: 20.02.2024).
11. Arunesh Chandra, Pankaj Chandna. // Quality tools to reduce crankshaft forging defects: an industrial case study. *Journal of Industrial and Systems Engineering Vol. 3, No. 1, pp 27-37 Spring 2009*
12. Prajakta P. Pawar, Dr. Santosh D. Dalvi, Santosh Rane, Dr. Chandra Babu Divakaran // Evaluation of Crankshaft Manufacturing Methods - An Overview of Material Removal and Additive Processes. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*
13. Abass Enzi, Sardar Asif Khan // Automated Production Line Reliability Analysis of the Crankshaft Manufacturing Process. *Advances in Science and Technology Research Journal 2022, 16(1), p.15-27*
14. Karel Jerábek, Terezie Vondráčková, Vera Vostová // Increase of the Effective Production of Crankshafts for Ship Engines. DOI 10.17818/NM/2016/4.6 UDK 629.5:51
15. Клемшов Є.С. Розвиток теоретичних та технологічних основ металозаощаджувального процесу кування шатунної шийки великогабаритних колінчастих валів : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.03.05 “Процеси та машини обробки тиском”. – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2019.
16. The method of forging an engine crankshaft. Zhao Yin Shi Lumeng State Intellectual Property Office of the People's Republic of China Application Publication Number CN 103691873 A (43) Application Publication Date 2014-04-02
17. Олег Марков, Антон Хващинський, Антон Мусорін, Марина Маркова, Антон Лисенко Дослідження нового способу кування великих злитків на основі осадження профільованих заготовок *Технічні науки та технології №1(27), 2022 С. 47-48*.
18. Формирование прогнозируемых показателей качества поковок в условиях ОАО «Арсело-рМиттал Кривой Рог» / В. Л. Чухлеб, Д. Ю. Клюев, И. С. Прокопенко, А. В. Ашкелянец // Обра- ботка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – No 1 (26). – С. 103-106.
19. Computer simulation of technological chain by free forging [Електронний ресурс] / В.Маšek, Z. Nový, D. Kešner, L. Meyer. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.researchgate.net/publication/268432694/download>.
20. Mašek V. 3d simulace péčování a prodlužování kovářského ingotu i 45 [Електронний ресурс] / В. Mašek, Z. Nový, D. Kešner – Режим доступу до ресурсу: 150 <https://docplayer.cz/16519172-3d-simulace-pechovani-a-prodluzovani-kovarskeho-ingotui-45.html>
21. Володин И.М. Особенности проектирования технологи изготовления поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей / И.М. Володин, В.С. Мартюгин // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. 2008. - № 1 (19). - С. 196 – 200.
22. Соколов Л.Н. Атлас технологических процессовковки крупных поковок: учеб. пособие для студентов специальности «Обработка металлов давлением» по дисциплине «Технологияковки» Ч. 3 / Л.Н. Соколов, И.С. Алиев, О.Е. Марков, Л.И. Алиева – Краматорск: ДГМА, 2007. - 172 с.
23. A. Dindore, G. Badiger, Optimization of crankshaft by modification in design and material, *Int. Res. J. Eng. Technol.* 7 (3) (2020) 3321–3325.

Bibliography (transliterated):

1. Patent US6,415,847B1, Jul.9,2002. Crankshaft casting pattern and method // Gene Frederic Baltz, Olmsted Falls; Jerome John Grzincic; Ronald John Nakoneczny, Olmsted; Thomas Eugene Sattler, Medina, all of OH (US).
2. Song Liu. Foundry and Development of Ductile Iron Crankshaft. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2015, 9, p. 791-796
3. Patent WO 2005/099933, 27.10.2005 Gazette 2005/43 Cast hollow crankshaft and method of manufacturing the same // Kabushiki Kaisha Riken Chiyoda-ku, Tokyo Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha Toyota-shi, Aichi-ken
4. Zayyad Abubakar, Najeeb Ullah. Minimization of shrinkage defect in crankshaft casting. Department of Mechanical & Chemical Engineering (MCE) Islamic University of Technology (IUT), OIC Board Bazar, Gazipur Bangladesh.
5. Patent US 6,763,586 B2, Jul.9, 20, 2004. Method of producing a crank arm for a crankshaft // Harald Schliemann, Waiblingen (DE). Arno Roos, Waiblingen (DE). *United States Patent Crankshaft*
6. Zbigniew Siemiatkowski Kazimierz Pulaski // Computerised grinding procedure for large scale crankshaft machining. *MATEC Web Conf. Vol. 252, 2019. III International Conference of Computational Methods in Engineering Science (CNES18)*.
7. R.J. H. Hunt and J. E.Russell // Crankshaft forging: an evaluation of continuous grain flow. *Proc Instn Mech Engrs 1966-67, Vol. 181, Pt. 3H*.
8. Toms Torims, Guntis Pikursm Andris Ratkus, Andris Logins, Janis Valcans, Stepan Sklariks // Development of Technological Equipment to Laboratory Test In-situ Laser Cladding for Marine Engine. *Procedia Engineering Volume 100, 2015,*

Pages 559-568.

9. Mr. Chisao Otani // Manufacture of forged crankshafts - Crankshafts from Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation. Journal of the JIME Vol. 48, No. 1(2013)
10. Forging Technology and improvement of passenger car crankshaft: веб-сайт. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/forging-technology-improvement-passenger-car-crankshaft> (дата звернення: 20.02.2024).
11. Arunesh Chandra, Pankaj Chandna. // Quality tools to reduce crankshaft forging defects: an industrial case study. *Journal of Industrial and Systems Engineering* Vol. 3, No. 1, pp 27-37 Spring 2009
12. Prajakta P. Pawar, Dr. Santosh D. Dalvi, Santosh Rane, Dr. Chandra Babu Divakaran // Evaluation of Crankshaft Manufacturing Methods - An Overview of Material Removal and Additive Processes. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*
13. Abass Enzi1, Sardar Asif Khan // Automated Production Line Reliability Analysis of the Crankshaft Manufacturing Process. *Advances in Science and Technology Research Journal* 2022, 16(1), p.15–27
14. Karel Jerábek, Terezie Vondráčková, Vera Vostová // Increase of the Effective Production of Crankshafts for Ship Engines. DOI 10.17818/NM/2016/4.6 UDK 629.5:51
15. Klemeshov E.S. Rozvytok teoretichnih ta tehnologichnih osnov metalozashadgvalnogo procesy kvvanna shatynnoi shyiki velukogabarynyh kolinchatuh valiv: dissertacia na zdobytu naykovogo stypena kandudata tehnicnih nayk (doctora filosofii) – *Nacionalna metalyrgiina academia Ukrainu, Dnipro, 2019.*
16. The method of forging an engine crankshaft. Zhao Yin Shi Lumeng State Intellectual Property Office of the People's Republic of China Application Publication Number CN 103691873 A (43) Application Publication Date 2014-04-02
17. Doslidzhenia novogo sposoby kevanna velukuh zlutkiv na osnovi osadgenna profilovanuh zagotovok // Oleg Markov, Anton Hvashinskiy, Anton Mysorin, Marina Markova, Anton Lysenko. *Tehnicni nauku ta tehnologii* №1(27), 2022 С. 47-48
18. Formirovanie prognoziryemuh pokazatelei kachestva pokovok v yslovieh OAO Arselo-rMittal Krivoi Rog // V.L Chyhleb, D. Klyev, I. Prokopenko, A. Ashkelyanec. // *Obrabotka materialov davleniem* : sb. Naych. Tr. – Kramatorsk: DGMA, 2011. - No 1 (26). – С. 103-106.
19. Computer simulation of technological chain by free forging [Електронний ресурс] / В.Маšek, Z. Nový, D. Kešner, L. Meyer. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.researchgate.net/publication/268432694/download>.
20. Маšek В. 3d simulace pëchování a prodlužování kovářského ingotu i 45 [Електронний ресурс] / В. Маšek, Z. Nový, D. Kešner – Режим доступу до ресурсу: 150 <https://docplayer.cz/16519172-3d-simulace-pechovani-a-prodluzovani-kovarskeho-ingotui-45.html>
21. Osobenosti proektirovania tehnologii izgotovlenia pokovok kolenchatuh valov bolshegryznuh avtomobilei / I. Volodin, V. Martugin // *Obrabotka materialov davleniem. Sbornik naychnuh trydov.* 2008. - № 1 (19). - С. 196 – 200.
22. L. Sokolov. Atlas tehnologicheskikh procesov kovki krypnuh pokovok: ycheb. Posobie dla studentov specialnosti "Obrabotka metallov davleniev" po discipline "Tehnologia kovki" Ch. 3 / L. Sokolov, I. Aliev, O. Markov, L. Alieva – Kramatorsk: DGMA, 2007. – 172 p.
23. A. Dindore, G. Badiger, Optimization of crankshaft by modification in design and material, *Int. Res. J. Eng. Technol.* 7 (3) (2020) 3321–3325.

Відомості про авторів / About the Authors

Чухліб Віталій Леонідович (Chukhlib Vitalii) - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском" Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; e-mail: profdnepro@gmail.com.

Палієнко Володимир Олексійович (Paliienko Volodymyr) – аспірант кафедри "Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском" Навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; e-mail: mustmix13@gmail.com.

КЛОЧКО О.О., ЗАКОВОРОТНИЙ О.Ю., НАБОКА О.В., ГЛАВЧЕВА Ю.М., ЄВСЮКОВА Ф.М.

СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ТА АДИТИВНІ АМ-ТЕХНОЛОГІЇ

У статті сформувано завдання до розробки технології виготовлення та контролю зубчастих коліс в сучасних умовах виробництва. Для чого було досліджено види зубчастих передач та їх особливості. Приведено дослідження впливу параметрів точності зубчастих коліс на технологічний процес. Для цього детально проаналізовано ступені точності та модулі зубчастих коліс. Надані рекомендації що до технологічного забезпечення при виготовленні зубчастих коліс. АМ-технології сьогодні найбільш динамічно розвиваюча галузь матеріального виробництва, яка дає можливість отримувати нові властивості виробів, економити час та матеріали при їх виготовленні. Ступінь впровадження цих технологій як надійний індикатор реальної індустріальної потужності держави. Характерною тенденцією останніх років є постійний ріст асортименту та кількості деталей, що виготовляються за адитивними технологіями. І особливо важливим є прогрес у найбільш важкому та інноваційному секторі АМ-технологій – «виросуванні» виробів із металу.

Ключові слова: точність, технологічний процес, зубчаста передача, с колесо, модуль, ступінь точності, АМ-технології

KLOCHKO O.O., ZAKOVOROTNY O.YU., NABOKA O.V., GLAVCHEVA YU.M., YEVSYUKOVA F.M. A MODERN APPROACH TO THE TECHNOLOGICAL SUPPORT OF THE MANUFACTURE OF GEAR WHEELS AND ADDITIVE AM-TECHNOLOGIES

In the article, the task of developing a technology for the manufacture and control of gear wheels in modern production conditions is formulated. What were the types of gears and their features studied for? The study of the influence of the parameters of the accuracy of gear wheels on the technological process is given. For this, the degrees of accuracy and modules of gear wheels were analyzed in detail. Recommendations for technological support in the manufacture of gear wheels are provided. Today, AM technology is the most dynamically developing branch of material production, which makes it possible to obtain new properties of products, save time and materials during their manufacture. The degree of implementation of these technologies as a reliable indicator of the real industrial capacity of the state. A characteristic trend of recent years is the constant growth of the range and number of parts manufactured using additive technologies. And especially important is the progress in the most difficult and innovative sector of AM technologies - the "growing" of metal products.

Keywords: accuracy, technological process, gear transmission, c wheel, module, degree of accuracy, AM technologies

Вступ. Зубчасті передачі є невід'ємною та надважливою складовою сучасного машинобудування, оскільки забезпечують передачу крутного моменту і руху між різними частинами машин та механізмів. ЗП використовуються у широкому спектрі застосувань, від автомобільної та аерокосмічної промисловості до важкої техніки, гірничодобувної промисловості та енергетики.

В Україні зберігається значний потенціал для розвитку виробництва зубчастих коліс завдяки наявності потужної металургійної бази та великому досвіду в машинобудуванні. Вітчизняні виробники виробляють фактично всі типи даних виробів, та є одними з небагатьох підприємств Європи та світу, хто може забезпечити виробництво крупномодульних зубчатих коліс з зовнішніми діаметрами до 12 метрів.

Аналіз літератури. Точність та якість зубчастих передач (ЗП) та їх складових елементів – зубчастих коліс (ЗК) – основні вимоги для правильного та довговічного функціонування останні. Оброблення ЗК є одним з найскладніших видів технологічних процесів механічної обробки, який вимагає використання спеціалізованого обладнання і верстатів та, відповідно, дорогого спеціального оброблювального інструменту [1, 8, 11, 12, 16, 18]. Таким чином завданням розробки технології виготовлення зубчастих коліс є: вибір оптимальних методів обробки та відповідного технологічного обладнання і інструментів, що забезпечать економію матеріалу; якість, продуктивність і стабільність процесу, знизять собівартість і трудомісткість.

Для вирішення цього завдання розглянемо види зубчастих з'єднань (рис.1) Розрізняють зубчасті передачі зовнішнього і внутрішнього зчеплення. Зубчасті циліндричні передачі зовнішнього зачеплення мають спряжені колесо і шестерню зовнішнього зачеплення, що обертаються в протилежних напрямках.

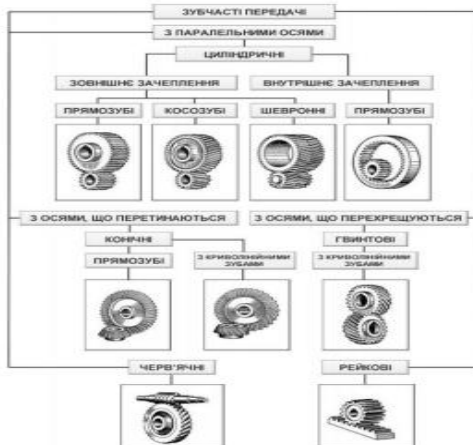


Рис. 1 – Класифікація зубчастих передач

© О.О. Ключко, О.Ю. Заковоротний, О.В. Набока, Ю.М. Главчева., Ф.М. Євсюкова, 2024

Зубчасті передачі внутрішнього зачеплення мають одне колесо внутрішнього зачеплення і одну шестерню зовнішнього зачеплення, що обертаються в одному напрямку.

Важко навантажені передачі працюють при незначній частоті обертання коліс, в той же час передають значні крутні моменти, а на зуби діють великі питомі навантаження. Для таких передач (наприклад редукторів) важливо забезпечити мінімальну деформацію зубів, виключити поломку і викришування поверхневого шару зубів. Відповідно ці передачі умовно можна класифікувати як дуже тихохідні (з коловою швидкістю до 0,5 м/с і тихохідні, колова швидкість яких коливається в межах 0,5 - 3 м/с). Швидкісні передачі в основному призначені для передачі крутного моменту. Швидкісні передачі можна умовно розділити на середньошвидкісні ($V = 3 - 15$ м/с), швидкісні ($V = 15 - 40$ м/с) і високошвидкісні ($V = 40 - 100$ м/с і більше). Вимоги до рівня шуму, а отже, і до якості виготовлення у таких коліс підвищені. Точність зубчастих коліс, розміри і модуль зубчастих коліс істотно впливають на технологічний процес оброблення, рівень шуму в передачі, плавність і довговічність її роботи [2, 3, 4, 5, 6, 8]. До основних показників точності зубчастих коліс можна віднести такі.

Методи дослідження. У відповідності до стандарту ГОСТ 1643-81 встановлено дванадцять ступенів точності зубчастих коліс і передач, які позначаються в порядку спадання точності цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 і 12. Для ступенів точності 1 і 2 допуски і граничні відхилення не наводяться, так як ці ступені передбачені для подальшого розвитку. Для кожного ступеня точності зубчастих коліс і передач встановлюються норми кінематичної точності, плавності роботи і контакту зубів зубчастих коліс в передачі. Допускається комбінування норм кінематичної точності, норм плавності.

Нормований стандартами модуль лежить у межах $m = 1...55$ мм, але в багатьох випадках він може досягати і значно менших і більших значень. Діаметр зовнішнього кола може досягати 6300 мм і більше, до 12000 мм (як наводилось раніше). Перший і другий ступінь точності є найбільш точними та перспективними і не використовуються в даний час. Одинадцятий та дванадцятий ступінь точності використовуються у невідповідних передачах відкритих вантажних механізмів. Найбільш широко у машинобудуванні використовуються колеса з 5 по 9 ступень точності залежно від галузі застосування виробу.

Термін «модуль зубчастого колеса» визначає основний розмір зуба зубчастого колеса, який дозволяє характеризувати його геометрію і взаємодію з іншими зубчастими колесами в передачі.

Класифікація зубчастих коліс за модулями є важливою характеристикою їх призначення, конструкції та застосування. Основними параметрами для класифікації є розмір модуля, які визначають розміри зубів коліс. Нижче наведено основні категорії класифікації зубчастих коліс за модулями (хоча дане розбиття носить доволі умовний характер):

- **Мілкий модуль:**

Мілкомодульні зубчасті колеса зазвичай мають модулі в межах від 0.1 до 1.0 мм (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 і 0.9). Ці колеса використовуються в техніці, де вимоги до точності і компактності надзвичайно високі. Застосовуються в механізмах, де потрібно забезпечити надмалий розмір, високу точність і легкість конструкції. Наприклад, у приладобудуванні, обладнанні оборонного призначення, побутовій техніці, годинниках, дрібних механізмах та інших точних пристроях. Процес виготовлення мілкомодульних зубчастих коліс може вимагати високоточних технологій, таких як електроерозійна обробка або обробка на верстатах з ЧПК, для досягнення необхідної точності зубів. Такі зубчасті колеса дозволяють досягати високої щільності передачі руху в обмеженому просторі, що особливо важливо в багатьох сучасних технологіях. Цікаво, що контроль точності та якості для даного типу ЗК також дуже складний і делікатний відрізняється від ЗК з середнім модулем. Основними видами контролю точності розмірів таких виробів є оптичний метод (мікроскопи, проектори, мультисенсорні координатно-вимірювальні машини (КВМ), високоточне сканування та інспекція розмірів по САД-моделі лазерними та оптичними сканерами зі структурним світлом).

- Невеликий модуль (модуль 1,0 ... 2,0 мм)
- Середній модуль (модуль 2,0 ... 5,0 мм)
- Великий (крупний) модуль (модуль 5.0 і більше):

Крупномодульні ЗК використовуються у важкій техніці, верстатобудуванні, металургії, енергетичному секторі, гірничодобувній промисловості, а також у важких машинах, таких як екскаватори, крупні крани тощо. Зубчасті колеса з великими модулями виготовляються з високоякісних сталей і чавунів, часто проходять термічну обробку, що підвищує їхню міцність і зносостійкість. По оцінці національних виробників крупномодульними ЗК є колеса з модулями від 10...16 мм та відповідними великими зовнішніми діаметрами. В Україні успішно виготовляють зубчасті колеса з модулями 16, 22, 25, 32 мм та зовнішніми діаметрами до 12 000 мм. Унікальними проектами були виготовлення ЗК з модулями 65 та навіть 72 мм, для яких застосовувались відмінні від традиційних методів обробки та відповідного контролю точності та якості (рис. 2) [7, 9, 10, 11, 15, 17]

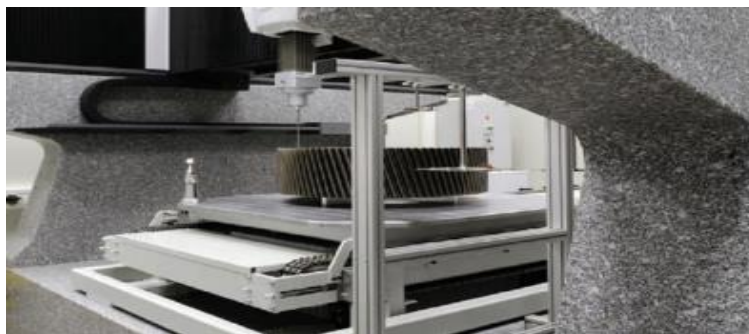


Рис. 2 – Вимірювання крупномодульного зубчастого колеса на координатно-вимірювальній машині зі спеціальним модулем

Деякі зубчасті колеса можуть мати нестандартні або спеціальні модулі, які розробляються відповідно до конкретних вимог замовників або для специфічних застосувань.

Вплив модуля на виготовлення зубчастих коліс:

Замовники та виробники зубчастих коліс повинні враховувати модуль при проектуванні механізмів, адже він впливає на розмір, навантажувальну здатність і експлуатаційні характеристики зубчастих коліс.

4. Результати дослідження. Вибір модуля визначає методи технології обробки формоутворення зубів, які можуть бути застосовані, а також типи матеріалів, що використовуються для виготовлення зубчастих коліс.

При виборі технологічного забезпечення для виготовлення крупномодульних зубчастих коліс необхідно охоплювати всі аспекти, пов'язані з процесом їх виробництва, включаючи проектування, вибір матеріалу, технології обробки, контроль якості та оптимізацію виробничих процесів (рис. 3).



Рис. 3 – Цикл виготовлення зубчатого колеса

Сформулюємо ключові елементи, які можна віднести до **технологічного забезпечення**:

Вибір матеріалів: Використання відповідних матеріалів (вуглецеві та леговані сталі, чавуни, композити) для забезпечення необхідної зносостійкості, міцності та довговічності зубчастих коліс.

Проектування та конструювання: Розробка CAD-моделей зубчастих коліс з урахуванням навантаження, розміру, модуля та геометрії зубів, що забезпечує оптимальні параметри для виготовлення. Проектування технологічної оснастки для оптимального розташування заготовки на верстаті, її якісної та безпечної загрузки-вигрузки. Використання CAD-CAM систем для об'єктоорієнтованого програмування та написання керуючих програм для ЧПК.

Технології виготовлення заготовок: Вибір методів отримання заготовок (лиття, кування, штампування, прокатування) відповідно до вимог якості, характеристик кінцевого продукту, мінімізації машинного часу обробки, кількості відходів та енергозбереження.

Механічна обробка: Застосування відповідних методів технологій нарізання зубів та обробки коліс, вибір технологічного обладнання і інструменту.

Фінішна обробка: Проведення операцій шліфування, притирки або обкатування, щоб досягти необхідних допусків і покращити поверхневу якість зубів.

Технологічний і метрологічний контроль точності і якості: Впровадження сучасних методів контролю і відповідного обладнання для перевірки загальної точності геометрії, форм і профілів зубів, а також визначення механічних властивостей матеріалів (таких як стаціонарні і портативні координатно-вимірювальні машини, контурографи, твердоміри, профілометри-профілографи, засоби неруйнівного контролю тощо).

Автоматизація та покращення процесів обробки:

Використання засобів автоматизації для підвищення точності і зменшення витрат на виробництво, а також автоматизованих станочних систем технологічного контролю для оперативного моніторингу і коригування

параметрів обробки і ріжучого інструменту (шпиндельні датчики прив'язки заготовки на технологічну операцію та міжопераційного контролю, датчики наладки і контролю зносу інструменту, датчики контролю температури заготовки тощо).

Стала доступною велика кількість конкуруючих технологій виготовлення зубчастих коліс, що дозволяють зробити 3D-модель. Основні відмінності 3D-моделей виготовлення зубчастих коліс стосуються етапу побудови шарів при створенні деталі. Деякі технології використовують плавлення або розм'якшення матеріалу для виробництва шарів (SLS, FDM), інші — використовують рідкі матеріали, які твердіють за різними принципами.

Загальна характеристика

Аддитивні технології (АМ-технології) виготовлення зубчастих коліс можна розрізнити за:

- методом фіксації шару: фотополімеризація, сплавлення, склеювання;
- типом конструктивних матеріалів: рідкі, сипучі, ниткоподібні чи пруткові, листові або плівкові;
- ключовою технологією: лазерні, нелазерні.

За класифікацією стандарту ASTM F2792/1549323-1 адитивні технології в т.ч. виготовлення зубчастих коліс поділені на 7 категорій [8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18].

1. MaterialExtrusion – видавлювання матеріалів або пошарове нанесення розплавленого конструкційного матеріалу через екструдер.
2. MaterialJetting – розбризкування або пошарове струменеве нанесення конструкційного матеріалу.
3. BinderJetting – розбризкування або пошарове струменеве нанесення зв'язуючого матеріалу.
4. SheetLamination – з'єднання листових матеріалів або пошарове формування виробу з листових конструкційних матеріалів.
5. VatPhotopolymerization – фотополімеризація у ванні або пошарове затвердження фотополімерних смол.
6. PowderBedFusion – розплавлення матеріалу в попередньо сформованому шарі або послідовне формування шарів порошкових конструкційних матеріалів і вибіркоче (селективне) спікання частин конструкційного матеріалу.
7. Directedenergydeposition – прямий підвід енергії безпосередньо в місце конструювання або пошарове формування виробу методом внесення конструктивного матеріалу безпосередньо в місце підведення енергії.

АМ-технології сьогодні найбільш динамічно розвиваюча галузь матеріального виробництва, яка дає можливість отримувати нові властивості виробів, економити час та матеріали при їх виготовленні. Західні аналітики розглядають ступінь впровадження цих технологій як надійний індикатор реальної індустріальної потужності держави.

Характерною тенденцією останніх років є постійний ріст асортименту та кількості деталей, що виготовляються за адитивними технологіями. І особливо важливим є прогрес у найбільш важкому та інноваційному секторі АМ-технологій – «виросуванні» виробів із металу. Наприклад, компанія «Боїнг» десятками тисяч виготовляє сотні найменувань деталей для військових та комерційних літаків, а Дженерал Електрик планує протягом 5...10 років наростити обсяги виробництва АМ-технологіями та досягнути виготовлення приблизно половини деталей енергетичних турбін та авіадвигунів цими методами.

Перехід на цифровий опис виробу – CAD і використання АМ-технології здійснив кардинальні зміни в ливарному виробництві. Отримання ливарних синтез-форм та синтез-моделей шляхом пошарового нарощування радикально скоротило термін створення першого дослідного зразка деталі. Наприклад, термін створення блоку циліндрів автомобільного двигуна традиційними методами становить близько 6 місяців. Основний час витрачається на створення модельного оснащення. Використання АМ-технології для «виросування» ливарної моделі скорочує термін отримання першої відливки блоку циліндрів до двох тижнів. Тобто в 10...15 разів.

Окрім суттєвого скорочення часу, перевагами методу є раціональне використання матеріалів. При виготовленні деталей складної форми традиційними методами відношення маси використаного матеріалу до готового виробу може сягати 15...20 разів. Застосування адитивних технологій для виготовлення аналогічних деталей дозволяє звести цей показник до 1,5...2,0.

Машини, які за адитивними технологіями створюють виготовлення зубчастих коліс з металу – верх інженерного мистецтва, адже в них сконцентровано найпередовіші знання з металургії, лазерної техніки, оптики, електроніки, систем управління, вимірювальних пристроїв, механіки, вакуумної техніки та інших.

Використання адитивних технологій дозволяє втілити в життя найвибагливіші ідеї конструктора, створити якісно нові машини та досягнути суттєвого прогресу в машинобудуванні.

Області використання

Технології в конструюванні і прототипуванні

- Для швидкого прототипування, тобто швидкого виготовлення прототипів моделей і об'єктів для подальшого доведення. Вже на етапі проектування можна кардинальним чином змінити конструкцію вузла або об'єкта в цілому. У інженерії такий підхід здатний істотно знизити витрати у виробництві і освоєнні нової продукції.

Технології у промисловому виробництві

- Для швидкого виробництва — виготовлення зубчастих коліс з матеріалів, які підтримуються

3D-принтерами. Це відмінне рішення для малосерійного виробництва.

Моделювання виготовлення зубчастих коліс плавленням

Fused Deposition Modeling — FDM. Основною частиною принтера, що з'явився на ринку в 1991 р., є екструдована голівка. У ній матеріал (ливарний віск або пластик, що надходить з котушок) нагрівається до температури плавлення і подається в зону друку. Голівка переміщується по двох координатах, синтезуючи певний шар моделі. Потім платформа опускається, створюється новий шар і т. д. Переваги технології: легкість перебудови з одного нетоксичного матеріалу на інший, низькі витрати і досить висока продуктивність, малі температури переробки, а також мінімальне втручання оператора у функціонування обладнання, можливість створення кольорових моделей, відносно точний процес. Недоліки: між шарами утворюються шви; голівка екструдера повинна постійно рухатися, інакше матеріал застигне і засмітить її; можливе розшарування у разі температурних коливань протягом циклу обробки; груба вихідна поверхня. Орієнтовна вартість FDM-принтера розпочинається від 500 доларів США, в окремих випадках власники принтерів можуть виготовити їх що знизить їх вартість до 200 доларів США.

Друк FDM підходить для наступних видів пластику:

- ABS-пластик (похідна нафти, термопластична смола);
- PLA-пластик (полілактид (полімолочна кислота, PLA), виробляється із зерна);
- HIPS-пластик (удароміцний полістирол);
- PC-пластик (матеріал наповнений вуглецевим волокном, твердий полімер, здатний пропускати світло);
- Laywoo-D3 (полімер);
- Laybrick (імітує текстуру пісчанику);
- PVA: PVAc и PVAI (добре поглинають вологу, можуть розчинятися у воді, використовуються для покращення друку основним пластиком);
- нейлон (легкий та гнучкий пластик).

Етапи друку із застосуванням технології FDM:

1. Моделювання виробу, додавання необхідних текстур.
2. Друк плавним пластиком шляхом екструзії (видавлювання).
3. Постобробка: за допомогою ацетону поверхня виробу робиться гладкою також відділення зайвих елементів таких як підтримки чи кайма.

Попшарове формування об'ємних моделей виготовлення зубчастих коліс з листового матеріалу

Laminated Object Manufacturing — LOM. LOM-технологія була винайдена Михайлом Фейгеном у 1985 р., а сьогодні на її основі виробляють промислові установки такі фірми, як Helisys, Paradigm і Sparx AB. Листовий матеріал (папір, пластик, кераміка, композити або поліестер) розкрояється за заданому контуру за допомогою лазера (можна одночасно розкрювати більше одного аркуша, проте точність при цьому зменшується), а потім нагрівається валик, який здійснює склеювання шарів. При помилці в процесі синтезу об'ємного виробу частину шарів можна видалити.

Переваги технології: LOM-установки, орієнтовна вартість яких коливається в межах 90-250 тис. доларів США, дозволяють застосовувати широкий діапазон недорогих листових матеріалів і синтезувати моделі з мінімальними деформаціями завдяки відсутності фізико-хімічних перетворень. Недоліки: через те, що лазер не завжди повністю прорізає лист, ускладнюється видалення відходів і навіть не виключено пошкодження деталей, а властивості матеріалу можуть змінюватися. Жорстку поверхню виробу важко обробляти через можливість розшарування, а в робочому приміщенні необхідна вентиляція.

Струменева полімеризація

Polyjet and Ployjet Matrix. Процес друку виготовлення зубчастих коліс полягає в наступному. На площину побудови згідно з програмним алгоритмом наноситься рідкий фотополімер блоком друкуючих головок. Блок складається з 8 головок — це 768 сопел малого діаметра, що здатні продукувати близько 16 млн. крапель на хвилину. На друкуючій голівці розміщені дві ультрафіолетові (УФ) лампи, які замінюють лазер в SLA-установках. Після нанесення фотополімеру полімеризується під дію УФ світла. Цим завершується побудова одного шару. Далі площину побудови зміщують на дуже малий рівень і головки створюють наступний шар.

У наш час існують дві платформи обладнання: Іден (англ. Eden) та Коннекс (англ. Connex). Іден підтримує технологію побудови моделей PolyJet, Коннекс — технологію PolyJet Matrix.

Переваги технології: мала товщина шару в 16 мікрон задовольняє навіть ювелірів, які мають підвищені вимоги до деталізації моделей. Як наслідок малої товщини — криволінійність поверхонь. Гладкість висока, роздільна здатність друку 600 x 600 крапок на двоім. Точність виготовлення моделей до 0,1 мм. Можливість виготовляти вертикальні перегородки з товщиною до 0,4 мм. Хоча виробником заявляються 0,6 мм. Дуже висока швидкість виготовлення моделей. Недоліки: менш міцний матеріал.

Топ компанії і їхні технології

- 3D Systems - Stereolithography and Selective Laser Sintering
- HP - Multi Jet Fusion
- Objet Geometries - Polyjet & Ployjet matrix
- Stratasys - Fused Deposition Modeling

Самовідтворення [RepRap](#) Mendel 2.0 (Рис. 4):



Рис. 4 – [RepRap](#) Mendel 2.0

До недавнього часу були науковою фантастикою 3D-принтери, які можуть відтворювати деталі власної конструкції, тобто реплікувати самі себе. Сьогодні це цілком здійснено, і розробка такої машини ведеться проектом [RepRap](#), причому інформація про її конструкції поширюється за умовами ліцензії [GNU General Public License](#).

Проект першого в історії недорогого тривимірного принтера-RepRap, що реплікується (тобто здатний відтворити принаймні частину самого себе), активно реалізується в наші дні англійськими конструкторами університету Бата. «Найголовніша особливість RepRap полягає в тому, що з самого початку він був задуманий як система, що реплікується: принтер, який сам себе роздруковує» (Адріан Бовер, один із співробітників проекту RepRap).

Висновки. В роботі сформульовано та проаналізовано ключові елементи технологічного забезпечення з урахуванням сучасних вимог виробництва і за рахунок використання адитивних технологій виготовлення зубчастих коліс. Доведено, що специфіка виготовлення крупних зубчастих коліс пов'язана з правильним вибором верстатів та спеціалізованого інструменту. На сьогоднішній момент стратегія полягає у тому, щоб отримати необхідну точність та якість виготовлення уже після лезвійної обробки. Це може бути досягнуто за рахунок застосування сучасних верстатів від виробників, що спеціалізуються саме на виготовленні обладнання для зубообробки. АМ-технології сьогодні найбільш динамічно розвиваюча галузь матеріального виробництва, яка дає можливість отримувати нові властивості виробів, економити час та матеріали при їх виготовленні. Західні аналітики розглядають ступінь впровадження цих технологій як надійний індикатор реальної індустріальної потужності держави.

Характерною тенденцією останніх років є постійний ріст асортименту та кількості деталей, що виготовляються за адитивними технологіями. І особливо важливим є прогрес у найбільш важкому та інноваційному секторі АМ-технологій – «виросуванні» виробів із металу. Наприклад, компанія «Боїнг» десятками тисяч виготовляє сотні найменувань деталей для військових та комерційних літаків, а Дженерал Електрик планує протягом 5...10 років наростити обсяги виробництва АМ-технологіями та досягнути виготовлення приблизно половини деталей енергетичних турбін та авіадвигунів цими методами.

Перехід на цифровий опис виробу – CAD і використання АМ-технології здійснив кардинальні зміни в ливарному виробництві. Отримання ливарних синтез-форм та синтез-моделей шляхом пошарового нарощування радикально скоротило термін створення першого дослідного зразка деталі. Наприклад, термін створення блоку циліндрів автомобільного двигуна традиційними методами становить близько 6 місяців. Основний час витрачається на створення модельного оснащення.

Список використаних джерел

1. Гасанов М.І., Заковортний О.Ю., Ключко О.О., Рябченко С.В. Перспектива дослідження процесу швидкісного абразивного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали Міжнародного науково-технічного семінару, 26–27 березня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024. – С. 24–25.
2. Марченко А.П., Гасанов М.І., Кривобок Р.В., Ключко О.О., Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Мироненко С.В., Шаповалов М.В. Моделювання послідовності формування поверхневого шару циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс з регламентованими вихідними параметрами // Нові та нетрадиційні технології в ресурсі - та енергозбереженні: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 6-7 грудня 2023 р., м. Одеса. – Одеса: 2023. – С. 213–216.

3. Klochko A., Basova Y., Gasanov M., Zakovorotny A., Fedorenko V., Myronenko O., Vorontsov B., Ryazantsev A., Protasov R. // Scientific Basis for the Substantiation of Process Regulations for the Micro-Cutting of Hardened Gears / Alexander Klochko, Yevheniia Basova, Magomediemin Gasanov, Alexander Zakovorotny, Vitaly Fedorenko, Oleh Myronenko, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev, Roman Protasov // Journal of Mechanical Engineering - Strojnický casopis. - 2023. - Volume 73.- No. 2. – P. 83 – 92. ISSN: 2450-5471 DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0023>.

4. Майборода В.С., Охрименко О.О., Ключко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Федоренко В.С., Сапон С.П., Манохін А.С., Шаповалов М.В. Процес моделювання контактної взаємодії при швидкісному зубофрезуванні великомодульних зубчастих коліс // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції 20 – 22 червня 2023 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2023. – С. 83–85. ISBN 978-617-7889-45-7.

5. Tripathi, Swikriti; Mandal, Subham Shekhar; Bauri, Sudepta; Maiti, Pralay (2023-02). 3D bioprinting and its innovative approach for biomedical applications. *MedComm* (англ.) **4** (1). ISSN 2688-2663. PMC PMC9790048. PMID 36582305. doi:10.1002/mco2.194. Прочитовано 9 червня 2023.

6. Wang, Zhenzhen; Yang, Yan (13 січня 2021). Application of 3D Printing in Implantable Medical Devices. *BioMed Research International* (англ.) **2021**. с. e6653967. ISSN 2314-6133. PMC PMC7817310. PMID 33521128. doi:10.1155/2021/6653967. Прочитовано 9 червня 2023.

7. Fidanza, Andrea; Perinetti, Tullio; Logroscino, Giandomenico; Saracco, Michela (2022-01). 3D Printing Applications in Orthopaedic Surgery: Clinical Experience and Opportunities. *Applied Sciences* (англ.) **12** (7). с. 3245. ISSN 2076-3417. doi:10.3390/app12073245. Прочитовано 9 червня 2023.

8. Rezaie, Fereshte; Farshbaf, Masoud; Dahri, Mohammad; Masjedi, Moein; Maleki, Reza; Amini, Fatemeh; Wirth, Jonathan; Moharamzadeh, Keyvan та ін. (2023-02). 3D Printing of Dental Prostheses: Current and Emerging Applications. *Journal of Composites Science* (англ.) **7** (2). с. 80. ISSN 2504-477X. doi:10.3390/jcs7020080. Прочитовано 9 червня 2023. {{cite news}}: рекомендується |displayauthors= (довідка)

9. Anadioti, Eva; Musharbash, Leen; Blatz, Markus B.; Papavasiliou, George; Kamposiora, Phophi (27 листопада 2020). 3D printed complete removable dental prostheses: a narrative review. *BMC Oral Health* **20** (1). с. 343. ISSN 1472-6831. PMC PMC7694312. PMID 33246466. doi:10.1186/s12903-020-01328-8. Прочитовано 9 червня 2023.

10. Harding, A.; Pramanik, A.; Basak, A. K.; Prakash, C.; Shankar, S. (1 травня 2023). Application of additive manufacturing in the biomedical field- A review. *Annals of 3D Printed Medicine* (англ.) **10**. с. 100110. ISSN 2666-9641. doi:10.1016/j.stlm.2023.100110. Прочитовано 9 червня 2023.

11. Persaud, Alicia; Maus, Alexander; Strait, Lia; Zhu, Donghui (1 вересня 2022). 3D Bioprinting with Live Cells. *Engineered Regeneration* (англ.) **3** (3). с. 292–309. ISSN 2666-1381. doi:10.1016/j.engreg.2022.07.002. Прочитовано 9 червня 2023.

12. Injectable Hydrogels for 3D Bioprinting (англ.). The Royal Society of Chemistry. 23 липня 2021. ISBN 978-1-78801-883-8. doi:10.1039/9781839163975.

13. Khoshnood, Negin; Zamanian, Ali (1 вересня 2020). A comprehensive review on scaffold-free bioinks for bioprinting. *Bioprinting* (англ.) **19**. с. e00088. ISSN 2405-8866. doi:10.1016/j.bprint.2020.e00088. Прочитовано 9 червня 2023.

14. Pagan, Erik; Stefanek, Evan; Seyfoori, Amir; Razzaghi, Mahmood; Chehri, Behnad; Mousavi, Ali; Arnaldi, Pietro; Ajji, Zineb та ін. (1 липня 2023). A handheld bioprinter for multi-material printing of complex constructs. *Biofabrication* **15** (3). с. 035012. ISSN 1758-5082. doi:10.1088/1758-5090/acc42c. Прочитовано 13 червня 2023. {{cite news}}: рекомендується |displayauthors= (довідка)

15. Segaran, Nicole; Saini, Gia; Mayer, Joseph L.; Naidu, Sailen; Patel, Indravadan; Alzubaidi, Sadeer; Oklu, Rahmi (2021-01). Application of 3D Printing in Preoperative Planning. *Journal of Clinical Medicine* (англ.) **10** (5). с. 917. ISSN 2077-0383. PMC PMC7956651. PMID 33652844. doi:10.3390/jcm10050917. Прочитовано 9 червня 2023.

16. Jin, Zhongboyu; Li, Yuanrong; Yu, Kang; Liu, Linxiang; Fu, Jianzhong; Yao, Xinhua; Zhang, Aiguo; He, Yong (2021-09). 3D Printing of Physical Organ Models: Recent Developments and Challenges. *Advanced Science* (англ.) **8** (17). с. 2101394. ISSN 2198-3844. PMC PMC8425903. PMID 34240580. doi:10.1002/advs.202101394. Прочитовано 9 червня 2023.

17. ISO 1328-1:2013. Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification. Вилучено з: <https://www.iso.org/ru/standard/45309.html>

18. ISO 1328-2:2020. Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification. Вилучено з: <https://www.iso.org/ru/standard/70386.html> 4.ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. Вилучено з: https://dnaop.com/html/68684/doc-%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_1643-81

References (transliterated):

1. Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Iu., Klochko O.O., Riabchenko S.V. Perspektyva doslidzhennia protsesu shvydkisnoho abrazyvnoho zubofrezuvannia tsylindrychnykh zubchastykh kolis // Suchasni pytannia

- vyrobnystva ta remontu v promyslovosti i na transporti: Materialy Mizhnarodnoho naukovo-tekhnicnoho seminaru, 26–27 bereznia 2024 r. – Kyiv: ATM Ukrainy, 2024. – S. 24–25.
2. Marchenko A.P., Hasanov M.I., Kryvobok R.V., Klochko O.O., Kovalov V.D., Vasylichenko Ya.V., Myronenko Ye.V., Shapovalov M.V. Modeliuvannia poslidovnosti formuvannia poverkhnevoho sharu tsylindrychnykh zahartovanykh krupnomodulnykh zubchastykh kolis z rehlamentovanymy vykhidnymy parametramy // Novi ta netradytsiini tekhnologii v resurso - ta enerhozberezhenni: Materialy mizhnarodnoi naukovo-tekhnicnoi konferentsii, 6-7 hrudnia 2023 r., m. Odesa. – Odesa: 2023. – S. 213–216.
 3. Klochko A., Basova Y., Gasanov M., Zakovorotny A., Fedorenko V., Myronenko O., Vorontsov B., Ryazantsev A., Protasov R. // Scientific Basis for the Substantiation of Process Regulations for the Micro-Cutting of Hardened Gears / Alexander Klochko, Yevheniia Basova, Magomediemin Gasanov, Alexander Zakovorotny, Vitaly Fedorenko, Oleh Myronenko, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev, Roman Protasov // Journal of Mechanical Engineering - Strojnický casopis. - 2023. - Volume 73.- No. 2. – P. 83 – 92. ISSN: 2450-5471 DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0023>.
 4. Maiboroda V.S., Okhrymenko O.O., Klochko O.O., Hasanov M.I., Zakovorotnyi O.Iu., Fedorenko V.S., Sapon S.P., Manokhin A.S., Shapovalov M.V. Protse modeliuvannia kontaktnoi vzaiemodii pry shvydkisnomu zubofrezuvanni velykomodulnykh zubchastykh kolis // Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy XXI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnicnoi konferentsii 20 – 22 chervnia 2023 roku / za zah. red. V. D. Kovalova. – Kramatorsk-Ternopil: DDMA, 2023. – S. 83–85. ISBN 978-617-7889-45-7.
 5. Tripathi, Swikriti; Mandal, Subham Shekhar; Bauri, Sudepta; Maiti, Pralay (2023-02). 3D bioprinting and its innovative approach for biomedical applications. MedComm (anhl.) 4 (1). ISSN 2688-2663. PMC PMC9790048. PMID 36582305. doi:10.1002/mco2.194. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 6. Wang, Zhenzhen; Yang, Yan (13 sichnia 2021). Application of 3D Printing in Implantable Medical Devices. BioMed Research International (anhl.) 2021. s. e6653967. ISSN 2314-6133. PMC PMC7817310. PMID 33521128. doi:10.1155/2021/6653967. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 7. Fidanza, Andrea; Perinetti, Tullio; Logroscino, Giandomenico; Saracco, Michela (2022-01). 3D Printing Applications in Orthopaedic Surgery: Clinical Experience and Opportunities. Applied Sciences (anhl.) 12 (7). s. 3245. ISSN 2076-3417. doi:10.3390/app12073245. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 8. Rezaie, Fereshte; Farshbaf, Masoud; Dahri, Mohammad; Masjedi, Moein; Maleki, Reza; Amini, Fatemeh; Wirth, Jonathan; Moharamzadeh, Keyvan ta in. (2023-02). 3D Printing of Dental Prostheses: Current and Emerging Applications. Journal of Composites Science (anhl.) 7 (2). s. 80. ISSN 2504-477X. doi:10.3390/jcs7020080. Protsytovano 9 chervnia 2023. {{cite news}}: rekomenduietsia |displayauthors= (dovidka)
 9. Anadioti, Eva; Musharbash, Leen; Blatz, Markus B.; Papavasiliou, George; Kamposiora, Phophi (27 lystopada 2020). 3D printed complete removable dental prostheses: a narrative review. BMC Oral Health 20 (1). s. 343. ISSN 1472-6831. PMC PMC7694312. PMID 33246466. doi:10.1186/s12903-020-01328-8. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 10. Harding, A.; Pramanik, A.; Basak, A. K.; Prakash, C.; Shankar, S. (1 travnia 2023). Application of additive manufacturing in the biomedical field- A review. Annals of 3D Printed Medicine (anhl.) 10. s. 100110. ISSN 2666-9641. doi:10.1016/j.stlm.2023.100110. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 11. Persaud, Alicia; Maus, Alexander; Strait, Lia; Zhu, Donghui (1 veresnia 2022). 3D Bioprinting with Live Cells. Engineered Regeneration (anhl.) 3 (3). s. 292–309. ISSN 2666-1381. doi:10.1016/j.engreg.2022.07.002. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 12. Injectable Hydrogels for 3D Bioprinting (anhl.). The Royal Society of Chemistry. 23 lypnia 2021. ISBN 978-1-78801-883-8. doi:10.1039/9781839163975.
 13. Khoshnood, Negin; Zamanian, Ali (1 veresnia 2020). A comprehensive review on scaffold-free bioinks for bioprinting. Bioprinting (anhl.) 19. s. e00088. ISSN 2405-8866. doi:10.1016/j.bprint.2020.e00088. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 14. Pagan, Erik; Stefanek, Evan; Seyfoori, Amir; Razzaghi, Mahmood; Chehri, Behnad; Mousavi, Ali; Arnaldi, Pietro; Ajji, Zineb ta in. (1 lypnia 2023). A handheld bioprinter for multi-material printing of complex constructs. Biofabrication 15 (3). s. 035012. ISSN 1758-5082. doi:10.1088/1758-5090/acc42c. Protsytovano 13 chervnia 2023. {{cite news}}: rekomenduietsia |displayauthors= (dovidka)
 15. Segaran, Nicole; Saini, Gia; Mayer, Joseph L.; Naidu, Sailen; Patel, Indravadan; Alzubaidi, Sadeer; Oklu, Rahmi (2021-01). Application of 3D Printing in Preoperative Planning. Journal of Clinical Medicine (anhl.) 10 (5). s. 917. ISSN 2077-0383. PMC PMC7956651. PMID 33652844. doi:10.3390/jcm10050917. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 16. Jin, Zhongboyu; Li, Yuanrong; Yu, Kang; Liu, Linxiang; Fu, Jianzhong; Yao, Xinhua; Zhang, Aiguo; He, Yong (2021-09). 3D Printing of Physical Organ Models: Recent Developments and Challenges. Advanced Science (anhl.) 8 (17). s. 2101394. ISSN 2198-3844. PMC PMC8425903. PMID 34240580. doi:10.1002/advs.202101394. Protsytovano 9 chervnia 2023.
 17. ISO 1328-1:2013. Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification. Vylucheno z: <https://www.iso.org/ru/standard/45309.html>
 18. ISO 1328-2:2020. Cylindrical gears — ISO system of flank tolerance classification. Vylucheno z: <https://www.iso.org/ru/standard/70386.html> 4.HOST 1643-81. Основные нормы взаимоотношения.

Peredachy zubchatye tsylindrycheskye. Dopusky. Vylucheno z: https://dnaop.com/html/68684/doc-%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2_1643-81

Поступила (received) 10.10.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455

Заковоротний Олександр Юрійович (Zakovorotniy Alexander Yuryevich) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри обчислювальна техніка та програмування, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (097) 967-3271; e-mail: arcade@i.ua; ORCID: 0000-0003-4415-838X

Набока Олена Володимирівна (Naboka Olena Volodimirivna) – кандидат технічних наук, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38050-98-65-027, e-mail: namirauza@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3997-5481

Главчева Юлія Миколаївна (Hlavcheva Yuliia) – PhD, директор науково-технічної бібліотеки; Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; вул. Кирпичова, 2, Україна, e-mail: yuliia.hlavcheva@khpri.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7991-5411>

Євсюкова Фатима Магометбіївна (Yevsiukova Fatyma) – доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299; e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru; ORCID: 0000-0002-9764-4106

ЗМІСТ

<i>Мигущенко Р.П., Кропачек О.Ю., Балєв В.М., Мигущенко К.Р., Фіногенов О.М.</i> Дослідження властивостей механічного робота на прикладі фізичного маятника.....	3
<i>Клименко С. А., Манохін А. С., Клименко С. Ан., Чумак А. О., опєйкіна М. Ю., Мельнійчук Ю. О.</i> Силлові особливості обробки загартованої сталі інструментами, оснащеними PcBN груп ВН, ВL	12
<i>Яковенко І.Е., Пермяков О.А., Льїн Д.О., Басова Є.В., Горбулик В.І.</i> До проблем автоматизації дільниці механічної обробки деталей з полістиролу	19
<i>Тулупов В.І., Онищук С.Г.</i> Використання комбінованих способів обробки для забезпечення життєвого циклу виробі	29
<i>Жовтобрюх В. О., Новіков Ф. В.</i> Підвищення Ефективності механічної обробки деталей транспортних машин	34
<i>Степанов М.С., Іванова М.С., Літовченко П.І., Іванова Л.П., Скидан Н.П.</i> Аналіз енергонасиченості круглошліфувальних верстатів	45
<i>Добротворський С.С., Басова Є.В., Алексенко Б.О., Приходько В.О. Добровольська Л.Г.Басов В.В.</i> Вплив короткоімпульсного лазерного випромінювання на формування поверхневих мікроструктур та твердість нержавіючої сталі.....	51
<i>Петраков Ю.В., Мигович А.В.</i> Моделювання контурного 2.5-d фрезерування на верстатах з числовим програмним керуванням	59
<i>Гасанов М.І., Руднев А.В., Котляр О.В., Титаренко О.В., Корчагин І.Г.</i> Оцінка змащувальної здатності твердих змащувальних матеріалів при алмазному шліфуванні важкооброблюваних матеріалів.....	69
<i>Чухліб В.Л., Палієнко В.О.</i> Вдосконалення технології виготовлення колінчастих валів куванням	75
<i>Клочко О.О., Заковортний О.Ю., Набока О.В., Главчева Ю.М., Євсюкова Ф.М.</i> Сучасний підхід до технологічного забезпечення виготовлення зубчастих коліс та адитивні ам-технології.....	82

CONTENTS

<i>Migushchenko R.P., Kropachek O.Y., Balev V.M., Migushchenko K.R., Finogenov O.M.</i> Investigation of the properties of a mechanical robot on the example of a physical pendulum.....	3
<i>Klymenko S.A., Manokhin A.S., Klymenko S.A., Chumak A.O., Opeikina M.Y., Melnychuk Y.O.</i> Power features of hardened steel processing by tools equipped with PcBN of BH, BL groups	12
<i>Yakovenko I.E., Permyakov O.A., Ilyin D.O., Basova E.V., Horbulyk V.I.</i> To the problems of automation of the site of machining of polystyrene parts	19
<i>.Tulupov V.I., Onyshchuk S.G.</i> The use of combined processing methods to ensure the life cycle of the product.....	29.
<i>Zhovtobriukh V. O., Novikov F. V.</i> Increasing the efficiency of machining of parts of transport machines	34
<i>Stepanov M. S., Ivanova M. S., Litovchenko P. I., Ivanova L. P., Skidan N. P.</i> Analysis of energy saturation of circular grinding machines	45
<i>Dobrotvorsky S.S., Basova E.V., Aleksenko B.O., Prykhodko V.O., Dobrovolska L.G., Basov V./V.</i> Influence of short-pulse laser radiation on the formation of surface microstructures and hardness of stainless steel	51
<i>Petrakov Y.V., Migovich A.V.</i> Modeling of contour 2.5-d milling on numerically controlled machines	59.
<i>Hasanov M.I., Rudnev A.V., Kotlyar O.V., Titarenko O.V., Korchagin I.G.</i> Estimation of the lubricating ability of solid lubricants in diamond grinding of hard-to-machine materials.....	69
<i>Chukhlib V.L., Palienko V.O.</i> Improvement of the technology of manufacturing crankshafts by forging	75
<i>Klochko O.O., Zakovorotny O.Yu., Naboka O.V., Glavcheva Yu.M., Yevsyukova F.M.</i> A modern approach to the technological support of the manufacture of gear wheels and additive am-technologies	82

□

ДЛЯ ПОДАТКІВ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ». СЕРІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ В**

Збірник наукових праць

№ 1'(9) 2024

Відповідальний редактор

*О.О. Пермяков, д-р техн. наук, професор,
НТУ «ХПІ», Україна*

*Зам. відповідального
редактора*

*О.О. Клочко, д-р техн. наук, професор, НТУ
«ХПІ», Україна*

Технічний редактор:

*В.С. Федоренко, аспірант НТУ «ХПІ»,
Україна*

*Відповідальний
секретар:*

*О. В. Набока, канд. техн. наук, професор,
НТУ «ХПІ», Україна*

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».

Кафедра технології машинобудування та металорізальні верстати

Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: oleksandr.klochko@khp.edu.ua, ukrstanko21@ukr.net

Підп. до друку 29.04.2024 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний. Друк офсетний.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75. Тираж 100 пр. Зам. № 25.
Ціна договірна.

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О. 61002, м. Харків, вул. Багалія, 16 Свідоцтво №
2480000000079553, від 16.05.2007 р.