

Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Житомирська політехніка»
Інститут надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля НАН України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ, ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТ



МАТЕРІАЛИ
XIII Всеукраїнської науково-технічної конференції
з міжнародною участю

м. Житомир, 11–13 листопада 2025 р.

УДК 621(082)

П 84

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Державного університету «Житомирська політехніка»
(протокол № 19 від 17.11.2025 р.)*

П 84 Процеси механічної обробки, верстати та інструмент :
матеріали XIII Всеукраїнської науково-технічної конференції з
міжнародною участю, 11–13 листопада 2025 року. – Житомир :
Житомирська політехніка, 2025. – 149 с.

ISBN 978-966-683-717-5

Відображено сучасний стан і напрямки розвитку технологій та обладнання процесів механічної обробки матеріалів; виготовлення, зміцнення та відновлення деталей машин; автоматизації виробництва. Наведено результати досліджень, що пов'язані із вирішенням актуальних проблем машинобудування; створення нових конструкцій верстатів та їх елементів, інструментів; підвищення ефективності технологічних процесів.

ISBN 978-966-683-717-5

УДК 621(082)

*Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Житомирська політехніка»
Інститут надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля НАН України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»*

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Голова:

ОЛІЙНИК Оксана д.е.н., професор, перший проректор Державного університету «Житомирська політехніка»

Заступники голови:

КЛИМЕНКО Сергій д.т.н., проф., член-кореспондент Національної Академії Наук України, Інститут надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля НАН України (м. Київ)

МЕЛЬНИЧУК Петро д.т.н., професор, Державний університет «Житомирська політехніка»

Відповідальний секретар:

ГЛЕМБОЦЬКА Лариса к.т.н., доцент кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту Державного університету «Житомирська політехніка»

Секретар:

ШИШКОВА Оксана асистент кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту Державного університету «Житомирська політехніка»

Члени організаційного комітету:

АНТОНІЮК Віктор Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н., професор

БОЙКО Ігор АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), Державний університет «Житомирська політехніка», к.т.н.

ВЕРХОВЛЮК Анатолій ВИГОВСЬКИЙ Георгій ДАНИЛЬЧЕНКО Юрій ДЕРБАБА Віталій	Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (м. Київ), д.т.н., професор Державний університет «Житомирська політехніка», к.т.н., доцент Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н., професор Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», завідувач кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства, к.т.н., доцент
ДІМІТРОВ Любомир	Софійський технічний університет (м. Софія – Болгарія), д.т.н., професор
ЗАЛОГА Вільям КИРИЛОВИЧ Валерій	Сумський державний університет, д.т.н., професор. Державний університет «Житомирська політехніка», д.т.н., доцент
КОВАЛЬОВ Віктор	Донбаська державна машинобудівна академія, д.т.н., професор
ЛУЦІВ Ігор	Державний університет «Житомирська політехніка», д.т.н., професор
МАЗУР Микола	Хмельницький національний університет, д.т.н., професор
МАЙБОРОДА Віктор	Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н., професор
МАРЧУК Віктор	Луцький національний технічний університет, д.т.н., професор
МЕЛЬНИК Олександр	в.о. завідувача кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту Державного університету «Житомирська політехніка», к.т.н., доцент
НЕМИРОВСЬКИЙ Яків ОХРІМЕНКО Олександр	Державний університет «Житомирська політехніка», д.т.н., доцент Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н., професор
ПЕТРАКОВ Юрій	Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н., професор

ПОЛОНСЬКИЙ Леонід	Державний університет «Житомирська політехніка», д.т.н., професор
РОП'ЯК Любомир	Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, д.т.н., професор
САЛЕНКО Олександр	Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н., професор
СТРУТИНСЬКИЙ Василь	Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н., професор
ТКАЧУК Андрій	декан факультету комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки Державного університету «Житомирська політехніка», к.т.н., доцент
ТОНКОНОГИЙ Володимир	Державний університет «Одеська політехніка», д.т.н., професор
ТУРМАНІДЗЕ Рауль	Грузинський технічний університет (м. Тбілісі – Грузія), д.т.н., професор
ФЕДОРОВИЧ Володимир	Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», д.т.н., професор

ЗМІСТ

1. Modeling of Quality Parameters of Drilling Holes in Details Made from Polymer Carbon Plastic	10
Antonyuk V.S., Vysloukh S.P., Voloshko O.V.	
2. Current State and Prospects of Tool Production: Trends, Innovations, and Challenges for Mechanical Engineering	15
Kuzik O., Riabovolyk Y.	
3. Methods of Forming Surface Layer of an FDM Product at Post-Processing Stage	18
Orel V.M., Melnychuk P.P., Salenko O.F., Kostenko A.O., Tsurkan D.O.	
4. Key Aspects of Adapting Liquid Rocket Engine Shells Manufacturing Technology to the Modern Capabilities of CAD-CAM Systems and 5-Axis CNC Machines	21
Voichyshen O.L., Derbaba V.A.	
5. Determination of Laser Cutting Parameters of Stainless Steel Using Taguchi Method	23
Mazur M.P., Sokolan K.S.	
6. Improving the Quality of Reverse Surfaces Obtained by Waterjet Processing	25
Xianding Xue, Salenko O.F., Gavrushkevych A.Yu., Gabuzian G.V.	
7. Сили різання при торцевому фрезеруванні сплаву NITI	28
Балицька Н.О.	
8. Прогресивні технології контролю якості автомобільних запасних частин	30
Бегерський Д.Б., Пилипенко О.М.	
9. Аналіз напружено-деформованого стану багатолезового зенкера	34
Богданов О.О., Мазур В.А.	
10. Технологічне забезпечення обробки деталей типу моноколесо	37
Бойко І.А.	
11. Особливості застосування деталей типу моноколесо в авіаційних двигунах та енергетичних установках	39
Бойко І.А., Морозов А.В.	
12. Затискний патрон з інтегрованим приводом затиску для оснащення токарних верстатів	40
Буховець В.М., Волошин В.Н., Луців І.В.	
13. Аналіз впливу шорсткості поверхні на якість електрохімічного травлення при маркуванні нержавіючої сталі	42
Васильківський О.В., Канашевич Г.В., Хижняк Є.В.	
14. Особливості конструювання торцевих фрез з конічною формою передньої поверхні ножів	45
Глембоцька Л.Є., Виговський Г.М., Ільїн Ф.М.	

15. **Сучасний стан прогнозування характеристик взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом в процесі лезової обробки аустенітних сталей** 47
Голубовський А.В., Сторчак М.Г.
16. **Вплив температурних деформацій на формування точності деталей при круглому зовнішньому шліфуванні** 51
Іванова Л.П., Літовченко П.І., Полонський Л.Г., Громовий О.А.
17. **Особливості оптимального запуску деталей у виробництво в гнучких виробничих системах** 54
Кирилович В.А., Єгоров П.А., Дімітров Л.В.
18. **Структура, механічні та експлуатаційні властивості композитних матеріалів системи CBN+TiN** 56
Клименко С.А., Клименко С.Ан., Копейкіна М.Ю., Куш В.І., Манохін А.С., Мельничук Ю.О., Чумак А.О.
19. **Методи визначення гетерогенності матеріалів** 59
Коваленко Я.П.
20. **Розробка пристосування для фінішної антифрикційної безабразивної обробки кулачків розподільних валів** 61
Красота А.М., Шепеленко І.В., Красота М.В.
21. **Новітні дослідження в напрямку впливу зв'язуючого твердих сплавів на їх трибологічні та експлуатаційні характеристики (огляд)** 65
Лавріненко В.І., Солод В.Ю.
22. **Оброблення великогабаритних валів у машинобудуванні** 68
Лещенко О.І.
23. **Аналіз технологій торцевого фрезерування симетричних профілів на токарно-фрезерному верстаті з ЧПК** 72
Луценко Д.І., Дербаба В.А.
24. **Використання промислових роботів в умовах дрібносерійного типу виробництва** 75
Мажара А.В., Мажара В.А.
25. **Сучасні тенденції інтеграції адитивних технологій та механічного пост оброблення** 78
Мазур М.П., Милько В.В., Ткачук В.П.
26. **Надійність і довговічність верстатів** 80
Мельничук П.П., Турманідзе Р.С.
27. **Застосування нанопокриттів для продовження ресурсу інструмента** 82
Невмержицький І.М., Коваленко Я.П.
28. **Перспективи використання адитивного виробництва для виготовлення складнопрофільних виробів** 84
Носов Р.О., Рубан В.М.

29.	Оцінка впливу форми твірної деформуючого елементу на ресурс використаної пластичності матеріалу при деформуючому протягуванні	87
	Отаманський В.В., Мельник О.Л., Ширококов В.В., Грева Д.В.	
30.	Підвищення довговічності роботи перового свердла при висвердлюванні кореневища ріпчастої цибулі	91
	Осипенко В.І., Мисник Л.Д., Філімонова Н.В., Хандюк М.В.	
31.	Відцентрова обробка деталей	94
	Пікула М.В.	
32.	Модальний аналіз обробної системи токарного верстату	96
	Петраков Ю.В., Охріменко О.А., Пасічник О.В., Петришин А.І.	
33.	Вплив взаємокомпенсації похибок на точність технологічних розмірів при обробленні на токарних верстатах з ЧПК	102
	Приходько В.П., Сапон С.П., Фролов В.К.	
34.	Проектування та виготовлення інструменту	105
	Прудков Г.О., Кошовий О.О., Коваленко Я.П.	
35.	Використання надтвердих матеріалів у прецизійній обробці деталей	107
	Ренкас І.В., Виговський Г.М., Коваленко Я.П.	
36.	Шляхи підвищення продуктивності механічного оброблення деталей із застосуванням верстатів з ЧПК	109
	Редько П.Р., Четвержук Т.І.	
37.	Вплив механічної обробки на стан поверхневого шару диску турбіни із жароміцного сплаву	112
	Рябченко С.В., Клименко С.А., Клименко С.Ан., Чумак А.О., Манохін А.С., Мельничук Ю.О.	
38.	Цифровізація виробництва як ключовий фактор розвитку сучасного машинобудування	115
	Середа О.О.	
39.	Аналіз механізмів утворення тріщин в анізотропному середовищі залежно від умов орієнтації різальної кромки	117
	Сироїд Є.С., Шелудченко Б.А., Яновський В.А.	
40.	Механізм зношування при терті в умовах граничного змащення	120
	Стельмах О.У., Хао Ч., Костюнік Р.Є., Бадір К.К., Танович Л.	
41.	Прогнозування стану підшипників кочення шпиндельних вузлів металорізальних верстатів	124
	Степчин Я.А., Куліковський М.Ю., Лапчик Д.О.	
42.	Оптимізація параметрів фрезерування для підвищення точності обробки деталей	126
	Суворов О.О., Вишневецький Р.А., Коваленко Я.П.	
43.	Питомі сили різання при мікрофрезеруванні сплавів NITI	128
	Томашевський О.О., Балицька Н.О.	

44. **Друк металевих деталей із використанням нанопорошків та перспективи мікроплазмового спікання** 130
Троценко М.Д.
45. **Розрахунок та дослідження параметричних траскторій обробки деталей в системі Sinumerik 828D/840D для верстатів з ЧПК** 132
Хлинін А.А., Дербаба В.А.
46. **Smart Manufacturing: інновації в механічній обробці з використанням штучного інтелекту** 135
Циганок С.О., Дербаба В.А.
47. **Дослідження достовірності контролю діаметра валу** 137
Шеменьов М.А., Пацера С.Т., Рубан В.М.
48. **Використання чисельного моделювання для оцінки впливу параметрів процесу точіння хромомолібденових сталей на якість обробленої поверхні** 140
Шишкова О.А., Сторчак М.Г.
49. **Ефективність тонкого фінішного розточування циліндричних отворів деталей автомобіля при їх відновлювальному ремонті** 144
Шумляківський В.П.
50. **Розроблення надтвердих композиційних матеріалів на основі кубічного нітриду бору з активуючими добавками високоентропійних сплавів для використання при обробці жароміцних сплавів та суперсплавів на основі нікелю** 146
Щерецький О.А., Щерецький В.О., Верховлюк А.М., Туркевич В.З., Старик С.П.

UDC 621.91:691.175

V.S. Antonyuk, Dr. Sci., Professor,
S.P. Vysloukh, Ph.D., Associate Professor,

O.V. Voloshko, Senior teacher
*National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine*

MODELING OF QUALITY PARAMETERS OF DRILLING HOLES IN DETAILS MADE FROM POLYMER CARBON PLASTIC

Composite materials are widely used in various fields of instrument and mechanical engineering. Composite materials are characterized by high strength, stiffness, corrosion resistance, low coefficient of thermal expansion, improved fatigue performance during operation, damage and impact, electrical insulation properties and anisotropy, which allows you to control the properties of the final product by changing the number of fibers, their orientation and the type of layer arrangement. Polymer composite materials with carbon fibers and a flexible epoxy resin matrix have become particularly widespread [1].

Despite the fact that most parts made of composite materials are manufactured without machining, but for critical structures, complete exclusion of machining is impossible. To obtain holes for fasteners, drilling is used, which is accompanied by the following defects: delamination, chips, shrinkage of the material and high roughness of the treated surface. This is due to such characteristics of the material as heterogeneity, anisotropy, the presence of highly abrasive and hard-reinforced fibers, the combination of hard abrasive fibers with a soft matrix [2].

The widespread use of composite materials requires increasing the efficiency of the drilling process and ensuring the necessary quality parameters of the machined surfaces, which is possible by determining the optimal cutting modes.

The machinability of composite materials can be analyzed using: axial cutting force, torque, roughness of the machined surface, hole delamination, the degree of uncut fibers and tool wearing out. These parameters are influenced by cutting modes (feed and speed), the properties of the workpiece material and the tool material. Intensification of these modes leads to an increase in cutting force, torque and increased tool wearing out. At the same time, a higher cutting speed allows for better hole quality. Roughness is one of the main characteristics in the drilling process of composite materials, which is used to analyze the quality of the machined surface by studying the micro-roughness of the surface of the detail. The value of this parameter is most often estimated by the parameters Ra and Rz.

The aim of the work is to model the quality parameters of the drilling process in details made from polymer composite materials for its optimization.

To implement the tasks of studying the quality of machined hole surfaces in polymer composite materials, drilling efficiency indicators were considered, since they affect the service life of composite parts. During the drilling of polymer composite materials, various defects can form, such as delamination, damage to the surface layer,

high roughness of the machined surface, dimensional error and deviation from roundness.

Delamination is the most common defect in drilling composite materials. This quality parameter is divided into delamination at the entry of the cutting tool into the material and delamination at the exit from it. There are many ways to measure this parameter, but the most common is to use an optical microscope to assess its value.

There are several methods for estimating the delamination value around drilled holes. The most common characteristic of the delamination parameter in drilling composite materials is the delamination coefficient (K_{del}) proposed by Chen [3], which is determined by the formula:

$$K_{del} = \frac{D_{max}}{D}$$

where D_{max} is the maximum diameter of the hole with the damaged area; D is the nominal diameter of the hole.

To analyze delamination in composite materials, Ho-Cheng used a fracture mechanics approach [4]. Here, the critical axial force is presented, exceeding which leads to delamination of the hole surface. This parameter relates delamination to the properties of the composite material according to the following formula: critical

$$P_{crit} = \pi \sqrt{\frac{8G_{Ic}E_1h^3}{3(1-\nu_{12}^2)}},$$

where G_{Ic} – interlayer fracture toughness, J/m²; E_1 – modulus of elasticity, N/m²; h – thickness of the uncut layer of the workpiece, mm; ν_{12} – Poisson's ratio

To obtain mathematical dependences of the quality parameters of hole processing in composite materials, corresponding experimental studies were conducted.

When conducting experimental studies [5], carbon fiber with a carbon fiber content of 50% with an orientation of 0/90° was used as the processing material. The matrix material was epoxy resin LY564 and hardener HY 564 manufactured by Huntsman Co. The total thickness of the composite material was 8±0.1 mm and contained 32 layers with a thickness of 0.25 mm. The carbon fiber was manufactured using transfer molding technology (RTM - Resin Transfer Molding). The workpiece was a sheet of material 160 mm × 160 mm × 8 mm, which was cut into bars 20 mm wide for further processing.

The total thickness of the composite material was 8±0.1 mm and contained 32 layers with a thickness of 0.25 mm.

The holes were drilled on a vertical milling machine with a CNC SMG-300 with a maximum spindle speed of 5000 rpm. As a cutting tool, carbide drills with a diameter of 5 mm SANDVIK class ISO K20 were used.

The angles at the apex 2φ of the drills were 600, 1000 and 1400, they were formed by the grinding operation.

To measure the axial force signal, the workpiece was mounted on a four-component piezoelectric dynamometer Kistler 9272, which was fixed on the machine table. Experimental data were transmitted via the RS-232C data transfer interface using three Kistler 5070A amplifiers and processed on a PC using the corresponding

DynoWare software from Kistler. The surface roughness of the machined holes, according to the parameter Ra, was measured by the Perthometer M2 device. The value of the base length was 0.8 mm.

The value of the delamination coefficient was determined by photographing the drilled hole using a microscope with a 500-fold magnification, on which a camera was installed.

The maximum diameter of the hole was calculated by processing images using the Lab View v. 6 system.

The study of the hole drilling process with measurement of axial force and determination of its parameters was performed using an experimental plant [6].

The purpose of experimental research on the drilling process of carbon fiber parts is to study the influence of processing conditions and modes (feed, spindle speed and drill tip angle) on the parameters of carbon fiber drilling quality (layering coefficient and roughness of the machined surface) and axial cutting force. The processing modes during the research varied within the following limits: speed n – from 1250 to 4000 rpm and feed S – from 50 to 800 mm/min.

To process the results of experimental researches in order to obtain mathematical dependencies of the quality parameters of the machined hole surfaces, the method of group consideration of arguments (MGCA) was used [7].

Using the GMDH Shell DS software, which implements the advantages of MGCA, mathematical dependencies of the quality parameters on the number of drill rotation n , feed S and sharpening angle φ at the edge of the drill were obtained.

When obtaining the mathematical dependence of the axial force on the number of rotations, feed and angle at the edge of the drill $P = f(n, S, \varphi)$, 25% of the initial data was used as a test sample to assess its accuracy. As a result, the following dependence was obtained with a coefficient of determination $R^2 = 0.994$ on the test sample:

When obtaining the mathematical dependence of the axial force on the number of rotations, feed and angle at the edge of the drill $P = f(n, S, \varphi)$, 25% of the initial data was used as a test sample to assess its accuracy. As a result, the following dependence was obtained with a coefficient of determination $R^2 = 0.994$ on the test sample:

$$\begin{aligned} P = & 0,37403531 \cdot S + 0,80636969 \cdot \varphi - 0,042552536 \cdot n + \\ & + 0,0025174804 \cdot S \cdot \varphi - 0,00011838289 \cdot S \cdot n - 0,00028640392 \cdot \varphi \cdot n - \\ & - 0,00000066437653 \cdot S \cdot \varphi^2 + 0,000000015512999 \cdot S \cdot n^2 + \\ & + 0,000000037530623 \cdot \varphi \cdot n^2 + 0,000000075583524 \cdot \varphi^2 \cdot n - \\ & - 0,0001983767 \cdot \varphi^2 + 0,0000055761222 \cdot n^2 - 9,9045321e - 12 \cdot \varphi^2 \cdot n^2 - \\ & - 2,7554812e - 14 \cdot S \cdot \varphi^2 \cdot n^2 - 0,00000079678736 \cdot S \cdot \varphi \cdot n + \\ & + 1,0441172e - 10 \cdot S \cdot \varphi \cdot n^2 + 2,1027644e - 10 \cdot S \cdot \varphi^2 \cdot n + 99,778598 \end{aligned}$$

Since it is practically impossible to measure the value of the delamination coefficient during the machining process, it is proposed to determine this parameter by an indirect method - by measuring the axial force. For this purpose, the dependence

$K_{del} = f(P)$ was obtained, which allows determining the value of the delamination of the hole in the processed material by the value of the axial cutting force. A similar approach is also proposed to be performed to determine the roughness of the hole surface.

To obtain the analytical dependence $K_{crit} = f(P)$, polynomial regression was used:

$$K_{crit} = 3,7813353e-06P^2 - 0,0005009418P + 1,0600$$

Using the SPSS Statistics software, an analytical dependence was obtained that best describes the statistical data. It was determined that the power form of the regression equation most accurately approximates the dependence with a coefficient of determination $R^2 = 0.7419$.

$$Ra = 0,0898P^{0,5064}$$

It is found that the roughness of the machined surface of the holes increases with increasing feed and decreases with increasing drill speed. In addition, by comparing these graphs, it can be concluded that the angle at the edge of the tool does not have a clearly defined effect on the Ra parameter.

The developed mathematical dependencies of the hole surface quality parameters (delamination and roughness) are convenient to use for predicting these parameters when drilling holes in carbon fiber parts and as a constraint in the general mathematical model of the drilling process when solving the optimization issue. At the same time, these mathematical dependencies are adequate for the following machining modes: number of rotations n – from 1250 to 4000 rpm and feed S – from 50 to 800 mm/min.

According to the results of experimental studies, it can be concluded that the values of the axial force and the delamination coefficient can be minimized at high spindle speeds and reduced feed values.

However, modern production is focused not only on the quality of the finished product, but also on its manufacture with the lowest possible costs in the shortest possible time and in accordance with the specified quality indicators.

With adequate mathematical models of the parameters of the drilling holes process in carbon fiber parts, it is possible to determine the influence of cutting modes and conditions on the stability of the cutting process and establish optimal values of modes that provide the necessary dynamic properties.

Optimization of the conditions and modes of machining of composite materials involves solving various technological, structural, economic and organizational tasks. For this purpose, the following optimality criteria are used: the criterion of minimum cost; the criterion of maximum efficiency (productivity), which ensures the minimization of the time spent on machining; the criteria of quality and accuracy of machining, etc.

According to the results of modeling the parameters of the process of drilling holes and carbon fiber parts, the following conclusions can be drawn.

1. As a result of the analysis of the drilling holes process in carbon fiber parts, it was established that the criterion parameters of the quality of the process are the delamination coefficient and the roughness of the machined surfaces, which can be determined by the magnitude of the axial cutting force.

2. A scheme of the installation for conducting experimental research is proposed, which allows obtaining the necessary information for creating mathematical models of quality parameters when drilling holes.

3. As a result of processing the experimental research data, mathematical dependences of the axial force, the delamination coefficient and the roughness of the treated surface on the cutting modes and conditions were obtained, which allow to form a mathematical model of the drilling holes process in carbon fiber.

4. The developed mathematical model of the drilling holes process in carbon fiber details makes it possible to solve the problem of optimizing cutting modes, which ensures obtaining the specified quality parameters of the obtained surfaces with the highest productivity.

References:

1. Formation of the quality of holes obtained by drilling in aviation structures made from polymer composite materials Borys Lupkin, Oleksii Andrieiev, Kateryna Maiorova, Victor Antonyuk, Sergii Vysloukh // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, №3/1 (123) 2023. pp. 59-67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.279618>

2. Borys Lupkin, Oleksii Andrieiev, Kateryna Maiorova, Victor Antonyuk, Serhii Tolstoi Experimental studies of the holes quality parameters in polymer composite materials / New Technologies, Development and Application VII. NT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, 2024, p. 589-602. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-031-66268-3_60

3. Chen W.-C. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1997. Vol. 37, no. 8. P. 1097–1108. URL: [https://doi.org/10.1016/s0890-6955\(96\)00095-8](https://doi.org/10.1016/s0890-6955(96)00095-8).

4. Ho-Cheng H., Dharan C. K. H. Delamination During Drilling in Composite Laminates. Journal of Engineering for Industry. 1990. Vol. 112, no. 3. P. 236–239. URL: <https://doi.org/10.1115/1.2899580>.

5. Shahrajabian H., Farahnakian M. Modeling and multi-constrained optimization in drilling process of carbon fiber reinforced epoxy composite. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2013. Vol. 14, no. 10. P. 1829–1837. URL: <https://doi.org/10.1007/s12541-013-0245-1>.

6. Olexandr Matoshyn, Sergii Vysloukh, Victor Antonyuk, Oksana Voloshko Modeling and Optimization of the Process of Drilling holes in Carbon Fiber Reinforced Polymer Parts //Advanced Manufacturing Processes VI., 2024, pp. 300 – 310. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_27.

7. Vysloukh S.P. Determination of process parameters of new tool, J. Superhard Mater., 2001, vol. 23, no. 5, pp. 65–69. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0035550254&>

UDC 621.9:669.018:62-52

O. Kuzik, Head of the Department of Materials Science and Foundry Production, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Y. Riabovolyk, Postgraduate Student at the Department of Materials Science and Foundry Production, Group PM-25-1
Central Ukrainian National Technical University, Ukraine

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF TOOL PRODUCTION: TRENDS, INNOVATIONS, AND CHALLENGES FOR MECHANICAL ENGINEERING

Tool production occupies a key position within the structure of modern mechanical engineering, as it provides the creation and improvement of cutting, measuring, stamping, and specialized tools, without which the functioning of any manufacturing system is impossible. The tool base essentially serves as the foundation for technological development in industry, since the level of its quality determines the precision, productivity, and economic efficiency of production processes. The quality of tools directly affects the quality of finished products, the costs of their manufacturing, and the competitiveness of enterprises in the global economic space. The use of modern tools allows for high-precision material processing, reduces the duration of production cycles, and optimizes the consumption of energy resources and raw materials. At the same time, outdated or low-quality tool infrastructure becomes a factor that restrains innovative development in production and limits its capabilities in international markets [1].

The strategic significance of tool production is manifested in its multiplicative effect: the development of the industry stimulates progress in machine tool building, materials science, automation, robotics, and additive technologies. A high level of tool support creates conditions for the implementation of complex technological processes and the production of innovative products with high added value. In this context, tool production is an integral element of the industrial base of any country, determining its capacity for modernization, integration into the global market, and the formation of competitive advantages in mechanical engineering [2].

At the present stage, tool production worldwide is undergoing profound modernization and digital transformation, driven by the needs of high-tech mechanical engineering and increasing competition. One of the leading directions of development is the implementation of integrated CAD/CAM/CAE systems, which allow not only the creation of high-precision tools but also the virtual modeling of their operational characteristics at the design stage. This significantly reduces the development time of new solutions and lowers research and design costs. Production increasingly relies on the use of high-precision CNC machines, which ensure the manufacturing of tools with complex geometry and minimal deviations, high product quality, and flexibility of production processes. Automation of technological operations, in turn, reduces the impact of human factors and improves reproducibility of results [3; 4].

The materials science aspect is also of great importance. Modern tool production extensively employs cemented carbide composites, superhard materials based on polycrystalline diamond (PCD) and cubic boron nitride (CBN), ceramics, and tools with multilayer composite coatings. The use of such materials provides enhanced wear resistance, heat resistance, and durability of tools, which is critically important for high-speed processing and operation in challenging manufacturing conditions.

In Ukraine, the tool industry is undergoing gradual modernization. Despite the implementation of modern software systems and high-precision technologies at certain enterprises, the sector largely depends on imports of both materials and equipment. This limits its development and creates risks for the country's industrial security. At the same time, positive trends are observed, including the integration of Ukrainian enterprises into global production chains, which contributes to the renewal of the technological base and the gradual increase of competitiveness.

The further development of tool production is directly associated with the introduction of innovative technologies. Promising directions include the application of additive technologies (3D printing with metals and composites), which enable the creation of tools with complex internal structures, including cooling channels of unconventional configurations that improve heat dissipation and extend tool life [5; 6]. Another important innovation is the development of “smart tools,” equipped with sensor systems for monitoring technological parameters in real time. Data on temperature, wear, or vibration is transmitted to automated control systems, allowing for prompt adjustment of processing modes and prevention of failures. The use of digital twins is also increasingly widespread, providing the possibility to model tool operation processes, predict its service life, and optimize production costs [4; 7].

At the same time, modern composite materials and nanocoatings enhance hardness, wear resistance, and thermal stability of working surfaces, improving machining efficiency and tool durability.

However, the development of the sector is accompanied by a number of challenges. Major issues include high production costs due to the expense of specialized materials and equipment, insufficient levels of automation and digitalization at many enterprises, and a shortage of highly qualified engineers and technologists with modern digital competencies. Additional challenges arise from increasing requirements for energy efficiency and environmental sustainability, as well as global competition from leading countries such as Germany, Japan, China, and the USA, which possess significant scientific and technological potential and well-developed production cluster systems.

The prospects for the development of tool production will be determined by the integration of advanced technologies, digitalization of processes, and orientation towards sustainable development. Further automation and robotization will reduce costs, increase precision, and ensure product quality stability. The widespread implementation of Industry 4.0 technologies – Internet of Things, artificial intelligence, and big data analytics – will contribute to the optimization of production processes and prediction of tool condition [3]. In the long term, a transition to the concept of Industry 5.0 is expected, which implies harmonization of technologies and

human factors, as well as a focus on environmental sustainability and production personalization. For Ukraine, a strategic direction is the development of domestic production of tool materials, which will reduce import dependency and ensure industrial security. Another key task is the creation of high-tech clusters that unite manufacturing enterprises, research institutions, and educational establishments, promoting technology transfer and increasing global competitiveness.

Thus, tool production is a key component of technological development in mechanical engineering and industry as a whole. Its current state is characterized by active digitalization and the implementation of innovations, while the sector faces numerous economic, technological, and personnel challenges. Overcoming these issues and implementing prospective directions will allow the formation of an efficient, flexible, and competitive tool industry capable of meeting the needs of modern mechanical engineering and contributing to the country's economic growth.

References:

1. Абушов Теймур. Стан машинобудування в Україні через призму управління ресурсами // *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic sciences*. – 2024. – № 5(334). – С. 21-35. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-334-20>
2. Бурбурська Світлана В., Пасічник Віталій А. Можливості адитивних технологій у виготовленні високотехнологічної продукції машинобудування та біомедичної інженерії // *Технічна інженерія*. – 2022. – Вип. 1(89). – С. 21-26. – DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-1\(89\)-21-26](https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-21-26)
3. State Statistics Service of Ukraine. Statistical Yearbook of Ukraine for 2023. – Київ, 2024. – Режим доступу: <https://www.ukrstat.gov.ua>
4. Export.gov.ua. Machinery & Engineering — Trade with Ukraine. – Режим доступу: <https://export.gov.ua/directory/industry/machinery>
5. ResearchGate. Potentials of Additive Manufacturing of Cutting Tools (оглядові публікації). – Режим доступу: <https://www.researchgate.net>
6. Сапон С. П., Дзюба Д. І. Цифрові двійники шпиндельних вузлів. Огляд // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. – 2023. – № 4. – С. 17-27. – DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.17>
7. Гужва Володимир Михайлович. Технологічні драйвери цифрової трансформації: цифрові двійники // *IPSPR*. – 2023. – № 3-23. – С. 46-57. – Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана

УДК 621.9.011

V.M. Orel¹, PhD

P.P. Melnychuk¹, D.Sc., Prof.

O.F. Salenko², D.Sc., Prof.

A.O. Kostenko², PhD Student

D.O. Tsurkan², PhD Student

¹ State University "Zhytomyr Polytechnic"

² National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

METHODS OF FORMING SURFACE LAYER OF AN FDM PRODUCT AT POST-PROCESSING STAGE

In recent years, additive technologies have become an integral part of modern manufacturing, evolving from a prototyping tool to a full-fledged mass production technology. However, issues related to the surface layer, its roughness, and geometric accuracy remain unresolved.

Gradual multi-cycle reproduction of products leads to them being characterized by a certain anisotropy of properties [1], as well as errors in shape and size [2], which in most cases are determined by the conditions and means of product reproduction, the quality of the plastic used, the purity of the environment, etc.

Post-processing methods used for FDM products: mechanical impact (cutting or grinding), Fig. 1,a, physical and technical processing, Fig. 1,b, or chemical processing, Fig. 1,c.

During mechanical processing of a workpiece with dimensions $L \times B \times H$, for example with a milling cutter, Fig. 1,a, rotating at a frequency ω and contacting the workpiece at a width b with a gradual feed S , material is removed to a depth h ; as a rule, the surface layer is removed, ensuring the mutual arrangement of the base and mating surfaces, however, defects are not eliminated, since during cutting, the material, which has a certain porosity (from 1.5 to 3...5%), perceives a mechanical load that can destroy the loose places of the joints of the printed product structure, especially when the density of the latter is insufficient.

A type of mechanical processing is grinding, in which the microcutting process is accompanied by significant heat release, so that at the same time as the mechanical load is applied, the workpiece is subjected to significant thermal effects.

Laser scanning heating of the workpiece surface allows changing the state and structure of the surface layer due to intense local heating with the transfer of the heating zone, Fig. 1, b, as a result of which it is possible to achieve complete or partial remelting of the surface layer. In this case, the workpiece $L \times B \times H$ is subjected to a high-intensity focused irradiation spot with a diameter d on one edge of the workpiece during scanning at a speed v . The scanning step t is set based on the condition of overlapping the tracks subjected to thermal exposure. Typically, this can eliminate surface defects such as delamination, threading, over- or under-extrusion.

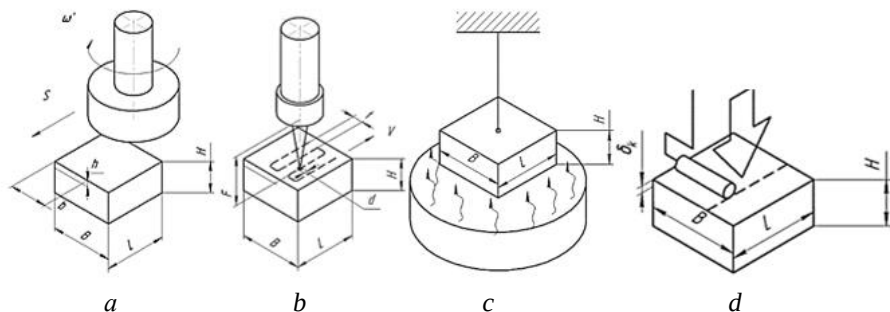


Figure 1. Post-processing options: a – mechanical; b – physical and technical; c – chemical methods; d – application of films (adhesive)

Chemical treatment of the workpiece, for example, in a chamber above a bath with ketone liquid (acetone), allows chemical exposure across the entire outer surface (for a prismatic body $L \times B \times H$, Fig. 1,c, practically across all six faces, with the exception of the workpiece attachment point; a variation of this treatment involves applying an adhesive reagent in strips or by immersion; this results in the formation of an adhesive layer with a thickness of T_k . This forms a sufficiently dense and closed surface structure (in the form of a film), which, provided that it has high wettability, ensures the tightness of the product and its ability to resist the development of microdefects from cyclic loads.

The corresponding post-processing methods are as follows: D_m^i – mechanical cutting (D_m^1 – turning, D_m^2 – milling, D_m^3 – drilling, etc.); D_a – abrasive processing; D_f – physical and technical processing; D_h – chemical processing. Then, ensuring the set of properties of the finished product described by the array G will correspond to the transformation of the initial parameters of the part R by the corresponding methods D_j , which are manifested through the corresponding components P_k .

$$R \cap D(P_k) \rightarrow G. R \cap D(P_k) \rightarrow G \quad (1)$$

Here, for each D_i , the set of components P_k will be unique, determined by the mechanisms and characteristics of their flow during post-processing. For example, D_{mi} will be determined as follows:

$$D_m^i \subset (P_1, P_3, P_4, P_9). \quad (2)$$

Other post-processing methods:

$$D_a \subset (P_1, P_2, P_3, P_4, P_9). \quad (3)$$

$$D_f \subset (P_4, P_5, P_6, P_7, P_9). \quad (4)$$

$$D_h \subset (P_4, P_5, P_7, P_8, P_9). \quad (5)$$

From the above expressions, it becomes clear that the task of achieving the required quality of the finished product as the formation of initial indicators according to (1) is possible in several post-processing options; thus, D_{mi} is aimed primarily at correcting the shape, while D_f and D_h are aimed at changing the state and properties of the surface. Thus, the full range of quality indicators is ensured by the condition

$$G \subset \sum_{i=1}^4 R \cap D_i(P_k), \quad (6)$$

which is quite expensive from an economic point of view and requires a significant amount of auxiliary equipment.

Improving the efficiency of post-processing involves finding methods that eliminate duplicate actions that lead to changes in the state or parameters of the surface and near-surface layers Fig. 2.

Modeling of the processes and phenomena occurring during the processing of additive-manufactured workpieces was carried out.

The assumptions for modeling were as follows:

- 1) the workpiece has a regular structure, consisting of symmetrically arranged fibers of regular shape, connected to each other and layer by layer;
- 2) the strength of the joints corresponds to the maximum permissible stresses that can occur at the contact boundary of the material;
- 3) all joint areas have the same strength and there are no internal defects;
- 4) the material is not dense, gas or liquid permeation is possible in the inter-fiber and interlayer gaps; the permeation area is the same for the main fibers and is stable across the cross-section.

The modeling was performed in Solid Works with the appropriate calculation modules. The analysis was performed for low-temperature plastic such as ABS.

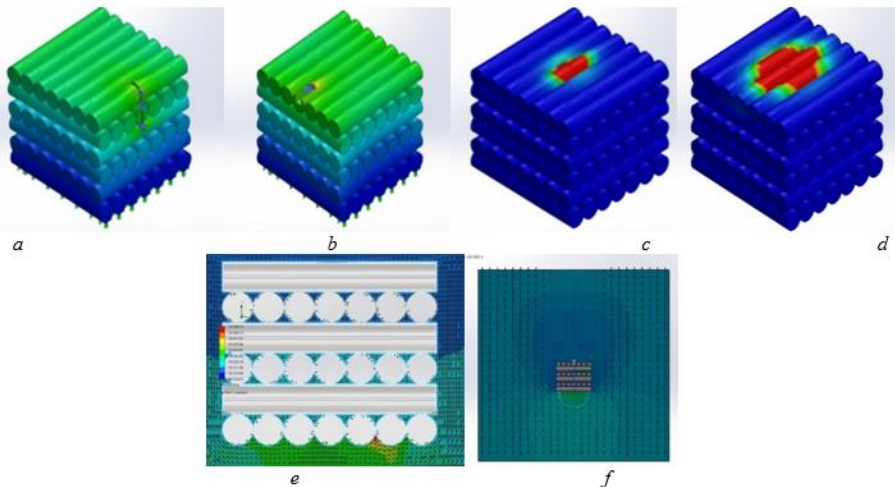


Figure 2. Post-processing simulation: a – force load from the cutting wedge across the fibers; b – force load from the cutting wedge along the fibers; c – effect of laser radiation pulse on the surface; d – heat propagation in the workpiece; e – fiber vapor flow; f – workpieces as a whole

During the modeling of mechanical interaction, attention was drawn to the fact that mechanical cutting satisfactorily removes the surface layer, but new defects in the form of cavities, delamination, and detachment may appear; the products proved to be quite sensitive to the accuracy of the cutting mode settings.

References

1. Ai, JR., Vogt, B.D. Size and print path effects on mechanical properties of material extrusion 3D printed plastics. *Prog Addit Manuf* 7, 1009–1021 (2022). <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00275-w>.
2. Erokhin K, Naumov S, Ananikov V. Defects in 3D Printing and Strategies to Enhance Quality of FFF Additive Manufacturing. A Review. *ChemRxiv*. 2023; doi:10.26434/chemrxiv-2023-lw1ns .

UDC 621.7+621.9+621.4:004.94

O.L. Voichyshen, postgraduate student of specialty 131 (Engineering Technology and Materials Science, 131A-23-10), CNC Programmer (RapidFit Company)

Scientific supervisor: V.A. Derbaba, Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Engineering Technology and Materials Science *National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine*

KEY ASPECTS OF ADAPTING LIQUID ROCKET ENGINE SHELLS MANUFACTURING TECHNOLOGY TO THE MODERN CAPABILITIES OF CAD-CAM SYSTEMS AND 5-AXIS CNC MACHINES

The following scientific results are described in the given article:

1. The planing [1] process using a special cutting tool on a 5-coordinate CNC machine for machining spiral surfaces of liquid engines shells has been proposed for the first time.
2. The principles of programming 5-axis CNC machines for planing using modern CAM-systems [2] have been developed for the first time.
3. A mathematical model of increasing the accuracy of the control program on a CNC machine [3] for processing the spiral surfaces of the shells of liquid rocket engines [4] has been obtained for the first time.
4. CAM-modeling of the cutting process to obtain the results of machining accuracy has been carried out.

The practical significance of the results described in the article:

1. Methods of programming 5-axis CNC machines for processing spiral surfaces of shells of liquid rocket engines by milling and planing methods were created and introduced into production.

2. Planing technology using a 5-axis CNC machine and a special cutting tool was introduced.

3. A system for measuring and analyzing the shells of liquid jet engines has been introduced into production.

4. A system for correction of the control program of a CNC machine tool has been created and implemented to increase the accuracy of processing the spiral surfaces of the shells of liquid rocket engines.

Theoretical and practical achievements of the work were implemented at the following enterprises: State Enterprise “Production Association Yuzhny Machine-Building plant named after A.M. Makarov” (YUZHMAH), State Enterprise “Yuzhnoye State Design Office named after M.K. Yangel” (YUZHNOYE SDO).

The introduction presents scientific novelty and practical significance, reveals the relevance of the study.

The main part analyzes the problems of manufacturing shells of liquid rocket engines in modern production, methods of their manufacture and control, substantiation and adaptation of the method of modeling the planing process for processing spiral surfaces of shells of liquid rocket engines. The method of programming 5-coordinate CNC machines for the planing process is described. The technique of control of accuracy at modeling of process of planing is offered.

The mathematical model of increase of accuracy of processing of spiral surfaces of covers of liquid rocket engines is developed, experimental researches on field samples with use of mathematical model are considered, methods of modeling and programming of process of planing for processing of spiral surfaces of covers of liquid rocket engines are developed. The results of using the above methods in production are considered.

In the general conclusions recommendations of practical use of the developed methods and results are offered and results of theoretical and experimental researches are summarized.

References:

1. Planing (process) URL:[https://en.wikipedia.org/wiki/Planing_\(shaping\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Planing_(shaping))
2. CAM-system URL:<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/>
3. CNC machine URL:<https://cncmachines.com/what-is-a-cnc-machine>
4. Liquid rocket engine URL:<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/rockth.html>

UDC 621.7

M.P. Mazur, Dr. Sc. (Engin.), Professor,
K.S. Sokolan, Cand. Sc. (Engin), Associate Professor,
Department of Mechanical Engineering Technology
Khmelnitskiy National University

DETERMINATION OF LASER CUTTING PARAMETERS OF STAINLESS STEEL USING TAGUCHI METHOD

Today, laser cutting is widely used in automotive, shipbuilding, and other industries where aluminum, low-alloy, and stainless steel are cut. The choice of a laser system for the cutting process is significantly influenced by criteria such as achieving high cutting speeds and maximizing production productivity, which allows for high-quality cuts and eliminates the need for reworking parts. Improving the efficiency of the laser cutting process, as well as its flexibility and quality, reduces production costs.

Mechanical processing of stainless steel is associated with a number of difficulties, which, in turn, are due to the properties of the material. Therefore, one of the most effective methods of processing stainless steel is laser cutting. The quality of manufactured parts is inextricably linked to cutting modes.

The Taguchi method is a statistical method aimed at improving the quality of manufactured parts. These methods have become widely used to improve the quality of manufactured parts in engineering and biotechnology [1]. The Taguchi method offers a systematic and fairly simple approach to optimizing production efficiency. The main goal of applying this method is to improve product quality, regardless of the field of application, or to minimize variations in productivity and processes for achieving target performance indicators.

The Smart 3015 machine [2] was used to obtain experimental results. The research was conducted for the process of laser cutting thick-sheet metal parts. The parameters of the research according to the Taguchi method were selected as the heat-affected zone (HAZ), average surface roughness (R_a), and cut depth (t_a). The control variables selected using the Taguchi method were cutting speed (cm/min), laser power (W), gas pressure (MPa), and laser frequency (Hz).

Experimental studies were carried out on plates made of 08X16H11M3 material, with a width and length of 50 mm and a thickness of 3 mm (Fig. 1, a). A cut was made in the plates with a laser, and after the cut was made, the width of the cut, the roughness of the cut surface, and the HAZ were measured (Fig. 1, b).

Based on the experimental data obtained using the Taguchi method, corresponding orthogonal arrays were constructed. The variables are cutting speed (X1), frequency (X2), gas pressure (X3), and laser power (X4). Three interactions are also investigated: X1 and X4, X3 and X1, and X1 and X2. After that, the experimental values obtained were subjected to variance analysis, which is a mandatory step in using the Taguchi method [1, 3].

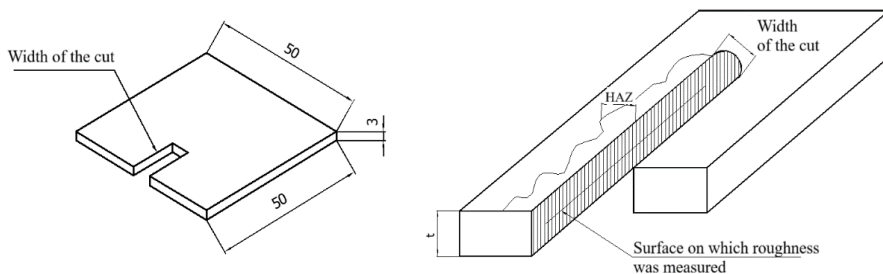


Figure 1 – Sample for research:
a – sample dimensions; b – measurement of opening elements

As a result, the values of the thermal influence zones, roughness, and geometric shape deviation were obtained. The calculation formulas and intermediate values of the parameters are given in [4].

It was established that the reduction of response variables (surface roughness of the slot, geometric shape deviation, and thermal influence zone) using the Taguchi method for all response variables would be most optimal for the control variable X4, which corresponds to the laser power, at a level of 1000 W (Table 1). Similarly, for all response variables, the most optimal value of the control variable X3, which corresponds to gas pressure, is 0.5 MPa.

In the case of cutting speed, it has a negligible effect on the average surface roughness and HAZ parameters, so it can be ignored for these response variables. Therefore, the optimal value is taken to be the value at which the best conicity index of the slot is obtained, i.e., the control variable X1, which corresponds to the cutting speed, at 40 cm/min.

Table 1 - Optimal cutting modes for stainless steel 08X16H11M3, determined using the Taguchi method

Control variables (X)	Response variables (Y)			Optimal cutting parameter
	Conicity	Average roughness	HAZ	
Cutting speed X1, sm/min	40	-	-	40
Frequency X2, Hz	75	25	-	50
Gas pressure X3, MPa	0,5	0,5	0,5	0,5
Laser power X4, W	1000	1000	1000	1000

Conclusions

The work explored the possibility of using the Taguchi method as a tool for optimizing the parameters of laser cutting of 08X16H11M3 stainless steel. Based on the results of the research, the optimal laser cutting modes were established, at which

the highest quality of parts is achieved, namely: cutting speed of 40 cm/min, laser power of 1000 W, frequency of 50 Hz, gas pressure of 0.5 MPa.

References:

1. Bendell A. Taguchi Methods. Springer Dordrecht. 2009. 212 p.
2. HGstar Smart3015 machine. URL: <https://www.hg-star.com/ru/budget-laser-cutting-machine/>
3. Roy K.R. Design of Experiments Using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement Wiley-Interscience. 2001. 560 p.
4. Sokolan, Yu. S., Klyasny N.S., Sokolan K.S. Optimization of stainless steel laser cutting modes using the Taguchi method. *Herald Of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. No. 1 (239). 2024. pp. 364-369

УДК 621.9.015

Xianding Xue¹, PhD Student
O.F. Salenko¹, D.Sc., Prof.
A.Yu.Gavrushkevych¹, Ph.D.
G.V. Gabuzian²

¹*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”*

²*Separated Structural Unit “Professional College of Kremenchuk
Mykhailo Ostrohradskyi National University”*

IMPROVING THE QUALITY OF REVERSE SURFACES OBTAINED BY WATERJET PROCESSING

Abrasive waterjet machining (AWJM) is widely applied in aerospace and precision manufacturing owing to its cold-cutting nature. It is particularly suited for thermally sensitive and hard-to-machine materials such as carbon-fiber-reinforced polymers (CFRP) [1]. But the residual high-energy jet column penetrating the workpiece often strikes the support structure, generating severe splashing that leads to surface contamination and secondary damage. So, a long-standing and unresolved issue in AWJM is the formation of a high-energy residual liquid jet after penetrating the workpiece. This liquid column impacts the support structure beneath, producing severe splashing that subsequently contaminates or damages the already machined surfaces.

To address this challenge, we propose a composite anti-splash support structure integrating a concave bowl surface with a Venturi-induced negative pressure mechanism.

Figure 1. illustrates a typical example of splash-induced damage along the edges of a CFRP workpiece. The red-circled regions highlight edge erosion and material delamination caused by splash backflow, which critically undermines the final surface quality. Figure 2. shows a current AWJM system where the support region still relies on conventional structures without any dedicated splash-control design. As a result, a large volume of

droplets is generated during cutting, bouncing and dispersing in an uncontrollable manner, making prevention extremely difficult.

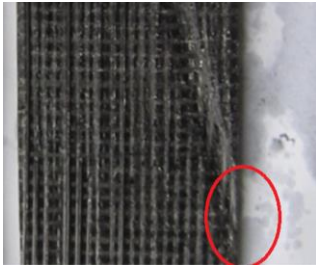


Figure 1 Splash-induced damage on the surface of a CFRP workpiece after AWJM



Figure 2 Current AWJM system and typical support structure configuration

Negative factors together can trigger a series of severe issues on the underside of the workpiece and within the surrounding equipment [2]:

- Surface quality degradation: Splash droplets cause micro-defects such as erosion, fiber tearing, and edge resin loss.
- Abrasive embedding: High-energy particles rebound onto the backside of the workpiece during splashing. In regions of resin softening or interface delamination, they can become embedded within the material, leading to reduced interlaminar strength and surface peeling.
- Unpredictable contamination zones: The extent of splashing is highly stochastic, influenced by flow disturbances and support structure geometry, making parameter adjustments ineffective as a preventive measure.
- Operational inconvenience: With conventional support designs (e.g., mesh or grooved supports), it is difficult to align the jet penetration path precisely with the underlying voids. As a result, the residual jet directly impacts metal support bars, exacerbating splash formation.

The challenge of splash is shared across multiple high-end and industrially critical domains. For instance, immersion lithography in semiconductor manufacturing employs gas–liquid isolation and Venturi drainage to prevent ultrapure water from contaminating circuits [3]; food and beverage filling industries utilize anti-splash nozzles and wall-guided filling to ensure hygiene and dosing accuracy [4]; electronic packaging requires suppression of flux or cleaning-liquid splashes to avoid short circuits [5]; and cutting-fluid spray in metal machining can impair precision and pose occupational health risks [6]. The control principles in these cases –grounded in Bernoulli’s law, the Venturi effect, and boundary-flow stabilization are closely related to those applied in this study.

We propose a new structure consists of a three-section coaxial design (Figure 3a), with fluid inlets and outlets specially configured:

- Upper convergence zone (concave bowl surface): After penetrating the workpiece, the liquid jet enters the bowl region. The axisymmetric concave surface forces the jet to slide along the inner wall, forming an attached liquid film. This substantially reduces radial momentum and delays cusp instability of the liquid rim.

Annular drainage holes are distributed along the bowl edge, allowing part of the liquid to be discharged early and preventing excessive film thickening and instability. Figure 3b illustrates the internal structure of the bowl, where a central main outlet and circumferential annular drainage holes (diameter larger than typical abrasive particles) work in synergy to achieve staged diversion and re-convergence.

- **Middle buffer cavity:** The liquid collected by the bowl flows into a T-shaped cavity, where initial dispersion and kinetic energy dissipation occur. This region also acts as the gas–liquid interaction zone, providing stable inlet conditions for the negative-pressure field induced by the downstream Venturi channel.
- **Lower Venturi induction zone:** In the contraction–throat–expansion channel, compressed air at 1.6 MPa is introduced laterally. As the gas accelerates through the throat to several hundred meters per second (approximately 400–600 m/s), a significant static pressure drop is created (negative pressure of about 0.15 MPa). This suction effect acts on the liquid film inside the cavity, continuously drawing droplets and films toward the throat and carrying them away with the airflow. Ultimately, the gas–liquid mixture is discharged smoothly through the downstream expansion section into an external collection system, forming a closed flow loop.

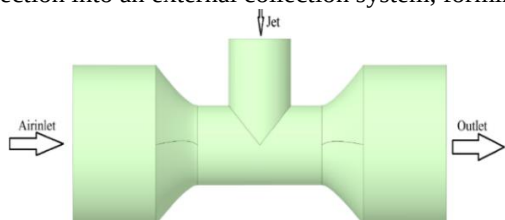


Figure 3a Overall structure and functional segmentation

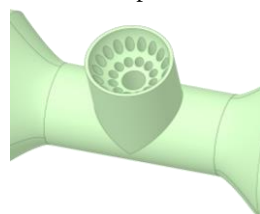


Figure 3b Internal structure of the concave bowl

Using VOF multiphase simulations coupled with finite element validation, we elucidate the synergistic control mechanism: the curved bowl enforces wall-attached liquid sliding to reduce radial momentum, while the Venturi throat establishes a negative pressure zone of ~ 0.15 MPa, entraining droplets into the downstream channel for dissipation. Results demonstrate that, compared with conventional supports, the design reduces peak mixture velocity by approximately 35%, lowers droplet diffusion height by 40%, and decreases radial spread by 30%, thereby confining the contamination region effectively. Static analysis further confirms that the structure retains a high safety margin even under extreme loads.

So, splash-induced contamination in abrasive waterjet machining by proposing a bowl-confinement and Venturi-suction structure may be reduced by a proposal special system.

Simulation results confirmed that the design effectively suppressed upward ejection and diffusion of splashing liquid without compromising cutting efficiency. The structure significantly reduced contamination footprints, thereby improving machining quality, extending equipment life, and maintaining a clean operational environment. These findings align with the trajectory of high-efficiency, clean, and

precision manufacturing, while providing a verifiable engineering example of flow control under high-speed liquid impact.

Future research should extend this concept to accommodate diverse fluid properties, flow velocities, and spatial constraints. Lessons can be drawn from other fields: multi-porous diffusers and wall-guided nozzles may attenuate local liquid momentum; gas-curtain isolation from lithography may inspire droplet barriers in open environments; and bottom-up filling strategies in food processing may guide recovery of viscous liquids. Through cross-disciplinary integration and refinement, a universal framework for splash-control design and evaluation in high-speed liquid environments could emerge, expanding industrial applicability and advancing the goals of high-end and sustainable manufacturing.

References:

1. M. Li, M. Huang, X. Yang, et al., Experimental study on hole quality and its impact on tensile behavior following pure and abrasive waterjet cutting of plain woven CFRP laminates, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 99 (2018) 2481–2490. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2589-2>.
2. E.E. Michaelides, M. Sommerfeld, B. Van Wachem, *Multiphase flows with droplets and particles*, CRC Press, Boca Raton, 2022.
3. B.J. Lin, Immersion lithography and its impact on semiconductor manufacturing, *J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS* 3 (2004) 377. <https://doi.org/10.1117/1.1756917>.
4. W. Kim, J. Eun, S. Jeon, Anti-splashing properties of sticky superhydrophobic surfaces, *Appl. Surf. Sci.* 542 (2021) 148617. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148617>.
5. D.V. Shenai-Khatkate, R.J. Goyette, R.L. DiCarlo Jr., et al., Environment, health and safety issues for sources used in MOVPE growth of compound semiconductors, *J. Cryst. Growth* 272 (2004) 816–821. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.09.007>.
6. A. Atmadi, A. Stephenson, S.Y. Liang, Cutting fluid aerosol from splash in turning: Analysis for environmentally conscious machining, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 17 (2001) 238–243. <https://doi.org/10.1007/s001700170175>.

УДК 621.91.01

Н.О. Балицька, к.т.н, доц.
Державний університет «Житомирська політехніка»

СИЛИ РІЗАННЯ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ СПЛАВУ NiTi

Сплав NiTi є бінарним сплавом, що складається приблизно з 50 атомних відсотків нікелю та 50 атомних відсотків титану. Це один з найвідоміших сплавів з пам'яттю форми з унікальними фізичними властивостями, такими як надпружність, високі міцність, корозійна стійкість, здатність до демпфування та

відмінна біосумісність. Він застосовується для виготовлення біомедичних імплантатів та біопристроїв, прецизійних інструментів, робототехнічних приводів, аерокосмічних деталей та мікроелектромеханічних систем [1, 2].

Однак лезова обробка сплавів NiTi є надскладною через їх зміцнення при високих деформаціях, особливі характеристики напруження-деформації, сильну адгезію та ускладнене стружкоутворення [1]. Властивості матеріалу, такі як низька теплопровідність, висока питома теплоємність та низький модуль Юнга, також ускладнюють обробку. Це призводить до високої питомої енергії та сил різання, інтенсивного зносу інструменту та надмірного утворення заусенців [2, 3].

Метою дослідження було визначити сили різання при сухому торцевому фрезеруванні аустенітного сплаву з пам'яттю форми Ni_{56,5}Ti_{43,5} (мас.%) в залежності від режимів різання при застосуванні твердосплавних різальних пластин без покриття. Випробування проводилися при швидкостях різання 20, 35 і 50 м/хв, подачі 0,05, 0,1 і 0,15 мм/зуб і глибинах різання 0,5, 0,75 і 1,0 мм.

У всіх випробуваннях домінуючою складовою сили різання була осьова F_z , тоді як сила подачі F_x була найменшою. Рівнодійна сила різання досягала 2700 Н (рис. 1). Це зумовлює високі навантаження як на різальний інструмент, так і на оброблювану поверхню, що в кінцевому підсумку призводить до передчасного руйнування пластини та погіршення параметрів цілісності поверхні.

Множинна лінійна регресія для рівнодійної сили різання F [4]:

$$F = 23.574 + 2319.45 \cdot f_z + 858.758 \cdot a_p - 4.478 \cdot V \cdot a_p + 9960.6 \cdot f_z \cdot a_p.$$

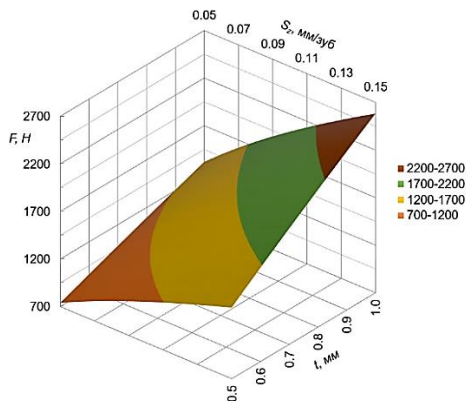


Рис. 1. Рівнодійна сила різання при торцевому фрезеруванні сплаву NiTi ($V=20$ м/хв) [4]

Встановлено, що подача є основним фактором, що впливає на значення складових сили різання F_y , F_z та рівнодійну силу різання F , тоді як глибина різання має другорядний вплив. Натомість на складову F_x в першу чергу впливає

глибина різання. У діапазоні випробуваних режимів різання швидкість різання не мала істотного впливу на сили різання.

У майбутніх роботах варто оцінити деградацію функціональних характеристик сплаву NiTi (ефект пам'яті форми, надпружність), як наслідок механічної обробки.

Дослідження виконано в рамках реалізації НДР Міністерства освіти і науки України «Модифікація властивостей поверхонь інтерметалідів з ефектом пам'яті форми фрезерним текстурованням» (№ 0123U102013).

Список літератури:

1. Billah T, Aquib TI, Dey K. A review on surface modification of NiTi for biomedical applications. J Mater Sci 2024;59(41):19340–79. <https://doi.org/10.1007/S10853-024-10273-8>
2. Kaya E, Kaya İ (2019) A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective. Int J Adv Manuf Technol 100:2045–2087. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2818-8>.
3. Балицька, Н. О. (2022). Особливості торцевого фрезерування сплавів Ni-Ti з ефектом пам'яті форми. Технічна інженерія, (2(90), 3–12. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-3-123](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-3-123).
4. Balytska N., Penter L., Manokhin A. et al. Face milling performance on austenitic NiTi shape memory alloy. Int J Adv Manuf Technol (2025). <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16777-0>.

УДК 629.113.012.1:658.562:004.94

Д.Б. Бегерський, к.т.н., доцент,
О.М. Пилипенко, д.т.н., професор,
Державний університет «Житомирська політехніка»

ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ І КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ АВТОМОБІЛЬНИХ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН

Сучасна автомобільна промисловість характеризується високим рівнем складності виробничих процесів і широкою кооперацією між постачальниками. У таких умовах контроль якості запчастин набуває стратегічного значення для забезпечення безпеки руху, надійності транспортних засобів та зниження експлуатаційних витрат.

Однією з ключових проблем є велика кількість контрафактних і низькоякісних компонентів, що надходять на ринок без належної сертифікації. Контрафактні запчастини можуть мати приховані дефекти матеріалу, технологічні похибки або невідповідність розмірних параметрів, що не завжди можна виявити традиційними методами контролю.

Невідповідність стандартам або дефектні компоненти можуть призвести до: підвищеної аварійності та ризику для життя водія й пасажирів; скорочення строку служби автомобіля та збільшення витрат на ремонт і обслуговування; втрати репутації виробників і дилерів, а також фінансових збитків для компаній; порушення екологічних стандартів через підвищений знос і несправності агрегатів.

Таким чином, актуальність проблеми обумовлена низкою системних викликів.

По-перше, ускладнення конструкцій сучасних автомобілів (збільшення кількості електронних систем, використання нових композиційних матеріалів, впровадження електричних і гібридних технологій) призводить до підвищення вимог до точності виготовлення деталей, їхньої взаємозамінності та довговічності.

По-друге, глобалізація постачань та мультивиробничі ланцюги створюють ризик втрати прозорості контролю якості. Багато автомобільних концернів використовують сотні підрядників, розташованих у різних країнах. Відсутність єдиної цифрової системи верифікації часто призводить до зниження відстежуваності походження деталей і підвищує ризики потрапляння на ринок контрафактних або низькоякісних запчастин. За даними Європейської асоціації автовиробників (ACEA), близько 10–15 % запчастин на вторинному ринку не відповідають технічним стандартам і мають потенційну загрозу безпеці.

По-третє, традиційні методи контролю (візуальний, вибірковий або механічний) дедалі менше відповідають сучасним вимогам щодо швидкості, об'єктивності та точності вимірювань. Вони не забезпечують повного охоплення виробничого процесу, залежать від людського фактора і не дають можливості виявляти дефекти прихованої структури матеріалу або мікротріщини.

Для підвищення ефективності контролю якості необхідно впроваджувати інноваційні підходи, зокрема:

1. Інноваційні технології візуального контролю

Використання систем машинного зору (Machine Vision) на основі алгоритмів глибокого навчання (Deep Learning) дозволяє автоматизувати процес перевірки геометричних і поверхневих параметрів деталей [1, 6].

Сучасні промислові комплекси (наприклад, Siemens, Keyence, Cognex) забезпечують точність виявлення мікрodefektів до 10 мікрометрів, що значно перевищує можливості візуального контролю людиною.

Застосування 3D-сканування та високошвидкісних камер дає змогу створювати цифрові моделі деталей і зіставляти їх з CAD-еталонами, що мінімізує виробничі похибки.

2. Цифрова простежуваність та блокчейн-ідентифікація

Інноваційним напрямом розвитку контролю є впровадження цифрових паспортів запчастин (Digital Twin, Digital ID), які містять інформацію про походження, стандарти перевірки та результати тестування [8].

Технологія блокчейн забезпечує захищене зберігання даних, унеможливаючи їх підробку, що дозволяє ефективно боротися з контрафактною продукцією.

Кожна запчастина може маркуватися QR-кодом або RFID-міткою, що містить унікальний ідентифікатор. Такі системи впроваджуються компаніями Bosch, Continental і ZF як складова цифрових платформ контролю якості.

3. Інтелектуальні системи діагностики

Використання штучного інтелекту і машинного навчання у контролі якості дозволяє створювати адаптивні системи, що аналізують великі обсяги сенсорних даних з метою виявлення прихованих дефектів [5]

Ці методи особливо ефективні для предиктивного обслуговування (Predictive Maintenance), коли система прогнозує ймовірність відмови компонента на основі історичних даних про вібрацію, температуру та навантаження [7].

4. Методи неруйнівного контролю

Неруйнівний контроль залишається базовим елементом системи перевірки якості. Сучасні технології — ультразвуковий контроль із фазованими решітками (PAUT), рентгенівська томографія та лазерна інтерферометрія — дозволяють проводити аналіз внутрішньої структури запчастин без їх руйнування [2 – 4].

Магнітно-дисперсійний метод контролю якості використовується для виявлення поверхневих і підповерхневих дефектів у феромагнітних автомобільних деталях, забезпечуючи високу точність оцінювання їхньої надійності без руйнування структури матеріалу.

Неруйнівні методи контролю залишкових напружень, зокрема рентгенографічний, нейтрографічний та магнітний, дають змогу точно визначати напружено-деформований стан поверхневого шару та глибину його залягання без пошкодження деталі.

Використання термофарб для визначення температурних полів і зон перегріву автомобільних деталей, зокрема елементів ДВЗ, дає змогу оцінити теплове навантаження, виявити потенційні дефекти та підвищити надійність і довговічність деталей.

Застосування таких методів у поєднанні з цифровими системами збору даних підвищує точність контролю до 98–99% навіть для складних металевих вузлів, таких як гальмівні диски, поршні та підшипники.

5. Інтегровані системи управління якістю

Сучасні підприємства переходять до комплексних систем управління якістю (QMS), інтегрованих із виробничими процесами через платформи MES та ERP.

Це забезпечує автоматичний збір даних контролю, їх аналітичну обробку та формування звітів відповідно до вимог стандартів ISO/TS 16949 [9].

Використання таких платформ, як Siemens Opcenter, SAP QM та Dassault 3DEXPERIENCE, сприяє створенню замкнутого циклу управління якістю – від проектування до постпродажного сервісу.

Висновки

Інноваційні технології контролю якості автомобільних запчастин забезпечують перехід від вибіркового до безперервного, автоматизованого контролю.

Використання машинного зору, штучного інтелекту, блокчейну та цифрової простежуваності підвищує точність перевірки, зменшує людський фактор і сприяє боротьбі з контрафактом.

Подальший розвиток цих технологій визначатиме конкурентоспроможність автомобільної промисловості у межах парадигми індустрії 4.0.

Комплексне впровадження перелічених технологій формує підґрунтя для створення єдиної інтегрованої системи управління якістю автомобільних запчастин, заснованої на принципах цифровізації, автоматизації та сталого розвитку. Така система повинна охоплювати всі стадії життєвого циклу — від проектування і виготовлення до експлуатації та перероблення.

Список літератури:

1. Hütten N., Alves Gomes M., Hölken F., Andricevic K., Meyes R., Meisen T. Deep Learning for Automated Visual Inspection in Manufacturing and Maintenance: A Survey of Open-Access Papers // Applied System Innovations. 2024. Vol. 7, No. 1. Article 11.
2. Tai J.-L., et al. Recent Trends in Non-Destructive Testing Approaches for Structural Health Monitoring. Materials. 2025. Vol. 18, No. 13. Article 3146.
3. Silva M. I., et al. Review of conventional and advanced non-destructive testing (NDT) techniques. Progress in Materials Science. 2023. Vol. (review).
4. Vithanage R. K. W., et al. Development of a phased array ultrasound roller probe for ultrasonic inspection. NDT & E International. 2022. Vol. (article).
5. Tabernik D., Šela S., Skvarč J., Skočaj D. Segmentation-Based Deep-Learning Approach for Surface-Defect Detection // arXiv preprint. 2019.
6. Shafiee M. J., Famouri M., Bathla G., Li F., Wong A. TinyDefectNet: Highly Compact Deep Neural Network Architecture for High-Throughput Manufacturing Visual Quality Inspection // arXiv preprint. 2021.
7. Theißler A., et al. Predictive maintenance enabled by machine learning: methods and industrial applications. Expert Systems with Applications. 2021. Vol. (article).
8. Deng S., et al. A systematic review on digital twin applications in the automotive industry. Transportation Research Procedia. Journal of Manufacturing Systems. 2023.
9. Cavaliere G., et al. Performances of an in-line deep learning-based inspection system integrated in an industrial production plant. Procedia Manufacturing. 2024.

УДК 621.9.025:519.6

О.О. Богданов, к.т.н., доц.

В.А. Мазур, магістр, гр. 131м-24н-1

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАГАТОЛЕЗОВОГО ЗЕНКЕРА

Актуальність теми. Проектування високоефективних ріжучих інструментів вимагає ретельного аналізу їх напружено-деформованого стану в реальних умовах експлуатації. Традиційні методи розрахунку міцності часто не враховують складну геометрію інструмента та нерівномірний розподіл навантажень. Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) дозволяє ще на етапі проектування оцінити працездатність конструкції, виявити зони концентрації напружень та оптимізувати параметри інструмента без виготовлення дорогих експериментальних зразків [1].

Зенкер як багатолезовий інструмент для обробки попередньо просвердлених отворів піддається значним силовим навантаженням під час різання. Недостатня міцність окремих елементів конструкції може призвести до передчасного руйнування інструмента, погіршення якості обробки та підвищення собівартості виробництва. Тому актуальним є завдання перевірки міцності розробленого інструмента з використанням сучасних засобів комп'ютерного моделювання.

Основна частина. Для проведення розрахунку методом скінченних елементів було створено повну тривимірну модель зенкера. Геометричне моделювання виконано в системі SolidWorks на основі двовимірних креслень інструмента (рис. 1).

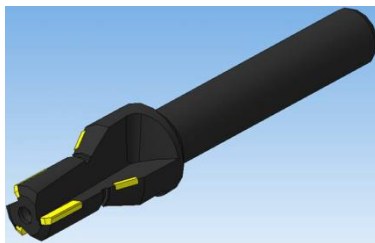


Рис. 1. Тривимірна модель зенкера у SolidWorks

Зенкер є складальною одиницею, що складається з корпусу, ріжучих пластин, елементів кріплення та інших деталей. Для побудови складальної моделі спочатку були створені твердотільні моделі всіх складових частин. Особливу увагу приділено точному відтворенню геометрії ріжучої частини, оскільки саме вона зазнає найбільших навантажень під час роботи.

Скінченно-елементна модель інструмента була побудована в спеціалізованому пакеті ANSYS, який є одним з найпоширеніших інструментів для інженерного аналізу (рис. 2). Для дискретизації геометричної моделі використовувалися параболічні скінченні елементи типу TETRA 10 (тетраедричні елементи з десятима вузлами) [2].

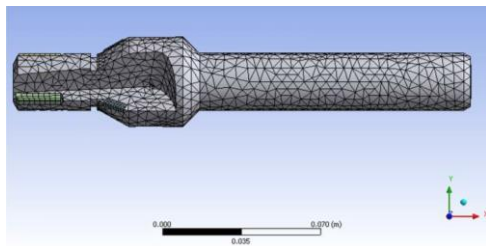


Рис. 2. Тривимірна модель зенкера у ANSYS

Вибір цього типу елементів обумовлений кількома факторами. По-перше, тетраедричні елементи добре адаптуються до складної геометрії інструмента з численними переходами та заокругленнями. По-друге, параболічна апроксимація забезпечує високу точність розрахунку напружень порівняно з лінійними елементами при меншій кількості вузлів сітки.

При побудові сітки особливу увагу приділено згущенню елементів у зонах очікуваної концентрації напружень – місцях контакту ріжучих пластин з корпусом та на ріжучих кромках. Це дозволило отримати більш точні результати у критичних областях конструкції.

Для адекватного моделювання напруженого стану були задані властивості матеріалів відповідно до конструкції інструмента. Ріжуча частина виготовлена з швидкоріжучої сталі Р6М5, яка характеризується високою твердістю та зносостійкістю при підвищених температурах. Решта елементів конструкції виготовлені зі сталі 40Х, що забезпечує необхідну міцність і в'язкість корпусних деталей.

Механічні характеристики матеріалів, використані в розрахунку: сталь Р6М5 (щільність – 8300 кг/м^3 , модуль пружності – $2,3 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, коефіцієнт Пуассона – 0,29, границя міцності – 2600 МПа), сталь 40Х: (щільність – 7850 кг/м^3 , модуль пружності – $2,14 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, коефіцієнт Пуассона – 0,3, границя міцності – 900 МПа).

Граничні умови задачі включали закріплення хвостовика зенкера та прикладення сил різання P_z (осьова складова) та P_y (радіальна складова). Значення силових параметрів визначені на основі довідкової літератури з теорії різання для конкретних умов обробки (матеріал заготовки, режими різання, геометрія інструмента).

Результати розрахунку показали, що максимальне еквівалентне напруження за Мізесом при різанні становить 245,29 МПа. Аналіз розподілу напружень виявив, що найбільші значення спостерігаються на ріжучій поверхні в зоні

контакту ріжучої пластини з корпусом зенкера. Це пояснюється концентрацією зусиль різання на відносно малій площі та геометричними особливостями конструкції в цій зоні (рис. 3).

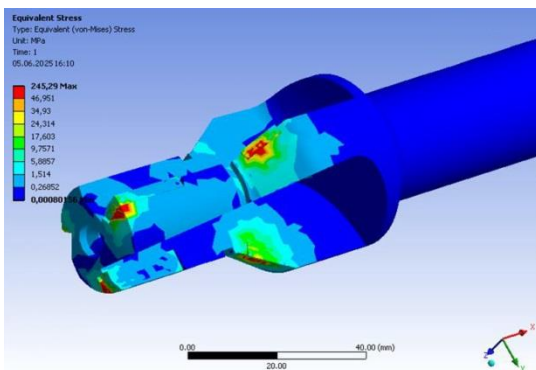


Рис. 3. Результати розрахунку у ANSYS

Визначені напруження значно нижчі за границю міцності як швидкоріжучої сталі P6M5 (2600 МПа > 245,29 МПа), так і конструкційної сталі 40Х (900 МПа > 245,29 МПа). Такий результат є прийнятним значенням для ріжучого інструмента з урахуванням динамічних навантажень та можливих ударів у процесі різання.

Аналіз напружено-деформованого стану також показав відсутність небезпечних деформацій, які могли б призвести до зміни геометрії ріжучої частини та погіршення точності обробки. Переміщення вузлів у найбільш навантажених зонах залишаються в межах пружних деформацій.

Висновки.

1. Розроблено комплексну методику комп'ютерного моделювання багатолезового зенкера, що включає створення параметричної тривимірної моделі та скінченно-елементний аналіз міцності.
2. Побудовано скінченно-елементну модель у пакеті ANSYS з використанням параболічних елементів TETRA 10, що забезпечило високу точність розрахунків.
3. Проведено аналіз напружено-деформованого стану інструмента під дією сил різання. Встановлено, що максимальне еквівалентне напруження становить 245,29 МПа і локалізується в зоні контакту ріжучої пластини з корпусом.
4. Визначено, що як місцеві напруження в зонах концентрації, так і загальні напруження в елементах зенкера не перевищують допустимих значень для обраних матеріалів.
5. Умова міцності розробленого інструмента повністю виконана, що свідчить про працездатність конструкції та можливість її використання в промислових умовах обробки.

Список літератури:

1. Гребенюк С. М., Гоменюк С. І. Чисельні методи розв’язання механічних задач: навчальний посібник для здобувачів третього освітньо-наукового рівня спеціальності «Прикладна математика» освітньо-наукової програми «Прикладна математика». Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2022. – 80 с.
2. Розв’язок задач проектування приладів та систем з використанням ANSYS і MATHCAD : підручник / І. А. Гришанова, Л. П. Згуровська, Ю. В. Киричук. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. – 180 с.

УДК 621.91.01

І.А. Бойко, к.т.н., докторант
*Державний університет «Житомирська політехніка»,
АТ Мотор Січ, м. Запоріжжя, Україна*

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ МОНОКОЛЕСО

У сучасному машинобудуванні зростає попит на високоточні, складнопрофільні деталі, що використовуються в авіаційній, автомобільній та енергетичній галузях. Одним із таких елементів є моноколеса – деталі з інтегрованою конструкцією, які поєднують функції декількох вузлів і характеризуються складною геометрією, високими вимогами до точності та механічних властивостей. Їх виготовлення потребує застосування прогресивних методів обробки, здатних забезпечити стабільну якість при мінімальних витратах часу та технологічних ресурсів.

П’ятикоординатні обробні центри забезпечують можливість виконання вискоєфективної обробки моноколіс завдяки своїй здатності виконувати багатоплощинну обробку за один установ, зменшуючи кількість переналагоджень і, відповідно, похибок позиціонування деталі. Висока кінематична гнучкість, автоматизоване управління траєкторією інструмента та можливість інтеграції CAD/CAM-систем дозволяють реалізувати складні технологічні маршрути з високою точністю та повторюваністю. Застосування п’ятикоординатних верстатів з числовим програмним керуванням дозволяє реалізувати безперервну обробку поверхонь з мінімальними похибками позиціонування, забезпечуючи високу продуктивність і якість готового виробу.

У контексті переходу до цифрового виробництва (Industry 4.0), застосування п’ятикоординатних обробних центрів для обробки моноколіс стає не лише технічно доцільним, а й економічно вигідним рішенням [1]. Це сприяє підвищенню продуктивності, зниженню витрат на технологічне оснащення, оптимізації виробничих процесів та забезпеченню стабільної якості продукції. Водночас виникає потреба в розробці та вдосконаленні технологічних режимів

обробки, виборі оптимальних інструментів і стратегій керування, що враховують особливості матеріалу, геометрії та умов експлуатації моноколiс.

Обробка деталей типу моноколесо, які характеризуються складною просторовою геометрією, тонкостінною структурою та високими вимогами до точності, є однією з найскладніших задач сучасного машинобудування. Саме складна геометрія поверхонь, що обробляються, а також тонкостінність (низька жорсткість) цих елементів, сприяють виникненню під час обробки таких явищ як автоколивання і їх різновиду – регенеративних коливань [2], відтискання різального інструменту, або оброблюваного елемента, зниження стійкості різального інструменту, що призводитиме до погіршення якості і точності обробки і, як наслідок, підвищенню трудомісткості виготовлення деталей за рахунок необхідності виконання ручної поліровки і доводки оброблених поверхонь.

У контексті САМ-програмування при обробці таких деталей ключовим фактором є правильний вибір стратегії керування траєкторією руху інструменту. Ефективними є методи обробки, при яких інструмент орієнтується перпендикулярно (по нормалі) до поверхні, що обробляється, однак враховуючі складну геометрію моноколiс, використання такого методу обробки стає неможливим, оскільки сусідні елементи деталі перешкоджають забезпеченню перпендикулярності між віссю інструменту і поверхнею, що обробляється, що призводить до необхідності використання гібридних стратегій обробки, які поєднують контурну обробку з адаптивною зміною кутів нахилу. Це дозволяє уникнути різких змін напрямку руху, зменшити навантаження на інструмент і забезпечити рівномірне зняття матеріалу.

Вибір інструменту також має критичне значення. Для обробки складнопрофільних поверхонь моноколiс, більшість із яких складають лопатки різної конфігурації, виготовлених з титанових або жароміцних сплавів, рекомендується застосовувати конусні фрези з радіусною кромкою, виготовлені з твердого сплаву, або змінними багатограними пластинками виготовленими з PCD (полікристалічного алмазу), та CBN (кубічного нітриду бору). Режими різання повинні підбиратися з урахуванням теплофізичних властивостей матеріалу: мала глибина різання, висока швидкість обертання інструменту, контроль подачі та охолодження. Це дозволяє мінімізувати температурний вплив, уникнути деформацій і зберегти точність геометрії.

Список літератури:

1. Обладнання для новітніх технологій [Текст]: навч. посібник / В. В. Солоха, Л. Й. Івченко, І. А. Бойко та інші. – Запоріжжя: Мотор Січ, 2021. – 209 с.
2. Тонконогий В. М. Зниження регенеративних коливань під час фрезерування маложорстких деталей за рахунок модуляції швидкості головного руху верстата / В. М. Тонкогий, С. А. Зелінський, А. Ж. Ткач, Ю. О. Серебрій // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів. – 2016. №839. – С.138-143.

УДК 621.91.01

І.А. Бойко, к.т.н., докторант^{1,2}

А.В. Морозов, інженер²

Державний університет «Житомирська політехніка»¹

АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна²

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ МОНОКОЛЕСО В АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНАХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Авіаційні двигуни – це високотехнологічні продукти, виробництво яких потребує постійного вдосконалення технологій і методів їх виготовлення задля забезпечення можливості зростання ефективності й технічних характеристик. Головними чинниками успішної розробки нових або удосконалення існуючих авіаційних двигунів є використання покращених та нових прогресивних матеріалів [2] та вдосконалення конструкції вузлів і агрегатів.

Одним із таких конструктивних рішень стало стрімке впровадження у 1980-х роках деталей типу моноколесо, або BLISK (скорочено від blade integrated disk – диск з інтегрованими лопатками) [1], де диски ступенів компресора і лопатки виготовлені як одна ціла деталь [3]. Крім того, ступені компресора між собою можуть з'єднуватися за допомогою зварювання, як-от електронно-променевого, виключаючи таким чином необхідність використання болтових з'єднань.

Значна економія витрат при виготовленні й ремонті досягається за рахунок скорочення обсягу монтажних робіт, оскільки зникає необхідність виконувати встановлення і демонтаж лопаток з диска компресора як при складанні, так і при ремонті, а також відсутня потреба у використанні деталей разової постановки, як-от замки (для встановлення і закріплення лопаток в посадкові місця на диску), обтискні гайки (для з'єднання дисків ступенів компресора між собою) та інші, які потребують 100% заміни при ремонті.

Відсутність необхідності закріплення лопатки в диску дозволяє спростити конструкцію моноколеса, при цьому його вага може на 20–30% бути меншою, ніж у класичному виконанні, що в цілому може знизити вагу двигуна, а в деяких випадках і його габарити, тим самим покращуючи його паливну ефективність, а відповідно – і знижуючи викиди в навколишнє середовище [4]. До того ж процес виробництва замкових з'єднань досить трудомісткий і полягає у протягуванні пазів у диску, що потребує високої точності виконання й якості обробки, а вартість виготовлення протяжок для нарізання «ялинкових» замків дуже висока. Також відсутність замкових з'єднань сприяє підвищенню аеродинамічної ефективності, оскільки забезпечується плавність переходу від профілю лопатки до поверхні диску – без стиків, зазорів тощо.

Використання суцільної конструкції дозволяє уникнути прояву такого негативного явища, як фреттингова втоми, яка виникає в зоні контакту двох поверхонь, що перебувають під високим статичним навантаженням і піддаються дуже малим циклічним переміщення одна відносно одної, і призводить до появи

таких дефектів, як втомні тріщини, лунки зносу, які безпосередньо знижують термін експлуатації вузла, його міжремонтний ресурс і призводять до необхідності їх заміни. До того ж монолітна конструкція має порівняно більшу міцність і, відповідно, може сприймати більші навантаження.

Однак моноколесо в контексті ремонтпридатності має один суттєвий недолік. У разі забракування в процесі ремонту будь-якої із лопаток на диску компресора з вставними лопатками, їх легко замінити на нові або відремонтовані. Натомість при пошкодженні поверхонь лопаток моноколеса, таку заміну виконати неможливо, а враховуючи умови роботи роторів компресора авіаційних двигунів, такі види відновлення, як наплавка і підварка, на таких вузлах не допускаються.

Список літератури:

1. Kumar R. A review on blisk technology / R. Kumar // International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology. – May 2013. – Vol. 2, Issue 5. – pp. 1353 – 1358.
2. Calleja A. Blisk blades manufacturing technologies analysis / A. Calleja, H. Gonzalez, R. Polvorosa, G. Gomez and other // 8th Manufacturing Engineering Society International Conferens. – 19-21 June 2019, Madrid. – pp. 714 – 722.
3. Lakshmi M. S. Design and life estimation of blisk in gas turbines / M. S. Lakshmi, V. N. Bhushaga Rao // International Research Journal of Engineering and Technology. – Feb. 2018. – Vol. 05, Issue 02. – pp. 1065 – 1076.
4. Gonzalez-Barrio H. Manufacturing Processes of Integral Blade Rotors for Turbomachinery, Processes and New Approach / H. Gonzalez-Barrio, A. Calleja-Ochoa, A. Lamikaz, L. N. Lopez de Lacalle // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10(9): 3063.

УДК 621.9.06

В.М. Буховець¹, к.т.н.

В.Н. Волошин¹, к.т.н., доцент

І.В. Луців², д.т.н., професор

¹Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя

²Державний університет «Житомирська політехніка»

ЗАТИСКНИЙ ПАТРОН З ІНТЕГРОВАНІМ ПРИВОДОМ ЗАТИСКУ ДЛЯ ОСНАЩЕННЯ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ

Сучасні виробничі системи прагнуть оптимізувати виробництво та підвищити продуктивність. Тому методи скорочення часу обробки стають одним із важливих завдань. Сучасні токарні верстати з ЧПК забезпечують високошвидкісне та високоточне точіння і дозволяють обробляти дрібні партії різних типів деталей. Хоча на продуктивність обробки на токарних верстатах з ЧПК впливають їх структурні характеристики та використовуваний різальний

інструмент, найважливішим фактором є ступінь інтеграції між верстатом, заготовкою та інструментом [1]. Важливу роль у цій системі відіграє встановлений на шпинделі токарного верстата затискний патрон, який повинен забезпечити точний та стабільний затиск заготовки. Тому розроблення швидкодіючих затискних патронів з інтегрованим приводом затиску та автоматизованими функціями, які можуть підвищити ефективність процесу обробки, максимально скоротивши час налагодження та затиску заготовок є актуальною науково-практичною задачею.

На основі аналізу конструкцій токарних патронів встановлено, що вони можуть мати [2-4]: інтегровані пневматичні або гідравлічні циліндри в їх корпус, що живляться робочим середовищем від розподільного кільця під час зупинки шпинделя; інтегровані пружинні приводи із пневматичними або гідравлічними циліндрами для розтиску; індивідуальні інтегровані гідравлічні приводи кожного із затискних елементів. Суттєвим недоліком токарних патронів із такими приводами є наявність пристроїв для підводу повітря або масла, які в процесі обертання затискного патрону мають із ним контактувати.

Цього недоліку немає у запропонованого цангового затискного патрона із інтегрованим пружинним приводом затиску та гідравлічним приводом розтиску, який не контактує із затискним патроном в процесі його обертання (рис. 1). Його перевагами є малі радіальні габарити, простота конструкції та можливість працювати на високих частотах обертання.

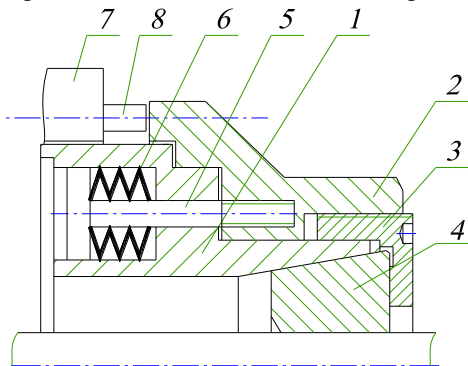


Рис. 1. Цанговий затискний патрон з інтегрованим пружинним приводом затиску та гідравлічним приводом розтиску

Затискний патрон складається із корпусу 1, в передньому кінці якого виконаний внутрішній конічний отвір. У цей отвір встановлюється затискна цанга 4, пелюстки якої з'єднані гумовими елементами. На зовнішню циліндричну частину корпусу 1 встановлена рухома втулка 2 із загвинченою в неї гайкою 3, яка внутрішнім торцем впирається в передній торець цанги 4. Переміщення втулки 2 з гайкою 3 при затиску прутка здійснюється штоками 5, які з'єднанні із втулкою, від пакетів тарілчастих пружин 6. Розтиск здійснюється

від гідравлічного циліндра 7, змонтованого на передньому торці шпиндельної бабки, шляхом переміщення плунжерів 8, які переміщують рухома втулку 2 із гайкою 3, стискаючи пакет тарілчастих пружин 6. Завдяки переміщенню цанги 4 при затисканні по внутрішній конічній поверхні корпусу 1 забезпечується точне позиціонування прутка, що дозволяє підтримувати високу точність затиску (мале радіальне биття).

В рамках даної роботи проведені теоретичні дослідження силових характеристик цангового затискного патрона в статичі та в процесі усталеного обертання. На основі аналізу силових потоків у розробленій конструкції цангового затискного патрона отримано аналітичну модель для оцінки сумарної статичної сили затиску прутка в залежності від його конструктивних параметрів та частоти обертання, а також від осьової сили інтегрованого пружинного приводу.

Список літератури:

1. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах: Монографія/ Ю.М. Кузнєцов, І.В. Луців, О.В. Шевченко, В.Н. Волошин. – К.: – Тернопіль: Терно-граф, 2011. – 692 с.
2. Yelak M. Design and Construction of Conventional Lathe Pneumatic Chuck System/ M. Yelak, P. Paramasivam, V. Kumar, S. Nagarajan// Design Engineering. – Issue 7, 2021 – pp. 4099-4111.
3. Pneumatic/hydraulic front-end chucks. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.smwautoblok.com/us/en/catalogs/turning/pneumatic-hydraulic-front-end-chucks-control-units/>.
4. FB6-20 Full bore mechanical grip, air released chuck [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.lexairinc.com/machine-tool/chucks/fb6-20>.

УДК 621.794.449

О.В. Васильківський, аспірант,
Г.В. Канашиевич, д.т.н., професор,
Є.В. Хижняк, к.т.н.

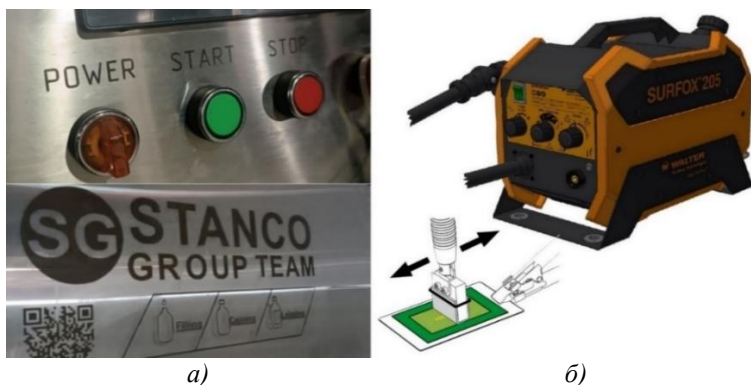
Черкаський державний технологічний університет

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ТРАВЛЕННЯ ПРИ МАРКУВАННІ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ

В сучасних умовах конкурентного співіснування комерційних машинобудівних підприємств особливої актуальності набуло брендування продукції що виготовляється. Згадана маркетингова особливість має ярко виражений загальносвітовий тренд в різних сферах машинобудівної галузі. Широкого застосування при маркуванні (брендуванні) продукції в сучасному машинобудуванні набуло електрохімічне травлення металів. Головною перевагою застосування даного різновиду електрохімічної обробки ЕХО (Electrochemical machining, ECM) у порівнянні з альтернативними способами маркування (механічне гравіювання, лазерна обробка) можна вважати більшу економічну та технологічну доступність, що набуває особливої актуальності серед машинобудівних підприємств малого та середнього бізнесу [2].

Однією з особливостей застосування методу електрохімічного травлення нержавіючих сталей на практиці стала відсутність гарантованого впливу на очікувану якість маркованих поверхонь металу. Обмежуючим фактором повсякденного використання є недостатня відтворюваність результатів маркування, яка в значній мірі залежить від конкретних технологічних умов процесу електрохімічного травлення. Як показав практичний досвід застосування даної технології на підприємстві ТОВ «МНВК «Станко-Груп» м. Черкаси, якість маркування істотно варіюється за різних технологічних умов обробки: марки матеріалу, якості та конфігурації оброблюваної поверхні. Безпосередньо на вище згаданому виробництві найбільш поширеним завданням є маркування нержавіючих сталей з різною якістю (шорсткістю) поверхонь.

Для визначення причин виникнення нестабільності результатів маркування та пошуку шляхів підвищення якості обробки насамперед було зроблено класифікацію дефектів промаркованих ділянок поверхонь. До характерних дефектів можна віднести наступні: контрастність, різкість та рівномірність заповнення відповідних графічних зображень на поверхні металу [3]. З метою визначення кореляції характерних дефектів від стану поверхні зразків проведено ряд дослідницьких маркувань за допомогою промислової системи обробки поверхонь металів (рис .1) «SURFOX 205™/WALTER» [1] виробництва «Bio-Circle Surface Technology» GmbH Німеччина.



*Рис. 1. Загальні вигляди маркування, обладнання та процесу травлення:
а) Зразок брендуння та маркування органів керування електричної шафи,
б) Загальний вигляд обладнання «SURFOX 205/WALTER» [1] та процесу електрохімічного травлення*

В якості оброблюваних заготовок були підготовлені зразки листової аустенітної низьковуглецевої нержавіючої сталі товщиною 1,2 мм різних марок (позначення згідно стандарту AISI), а саме AISI 316, AISI 304, AISI 201 (рис. 2) з різними видами попередньої обробки поверхні: 2В – матова поверхня, 4N – шліфувана поверхня, ВА – дзеркальна поверхня. Також для збільшення варіативності дослідних зразків однакового стану застосований метод

попередньої струменевої обробки (позначений як S – додаткова струменева обробка) відповідних поверхонь стисненим повітрям (0,6 МПа) скляною мікрокулькою (100 мкм). Вище згадані зразки були оброблені за однакових умов та налаштувань обладнання (час обробки 30 секунд, 8 зворотно-поступальних проходів). Результати даної ЕХО представлені на рисунку 2.



Рис. 2. Дослідні зразки нержавіючої сталі з результатами маркування методом електрохімічного травлення

Аналіз результатів практичних досліджень підтверджує залежність якості електрохімічного травлення від попереднього стану поверхні зразків. Оцінка обраних критеріїв якості маркування (табл. 1) виконана за умовною 10-ти бальною шкалою.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз дослідних зразків

Марка нержавіючої сталі	Стан поверхні	Критерій графічної якості маркованих зображень		
		контрастність	різкість	рівномірність
AISI 316	4N	8	8	8
AISI 316	4N+S	9	9	9
AISI 304	2B	7	8	7
AISI 304	4N	8	9	8
AISI 304	4N+S	9	9	9
AISI 304	BA	8	7	7
AISI 304	BA+S	9	9	9
AISI 201	BA	5	4	3
AISI 201	BA+S	6	8	4

Висновок: отримана дослідна інформація підтверджує кореляційний зв'язок між шорсткістю оброблюваної поверхні та контрастністю нанесеного маркування. Більш якісні результати ЕХО відповідають більшій шорсткості відповідних поверхонь дослідних зразків, що обґрунтовується більшою площею контакту на мікрорівні поверхні. Однак існуючі неоднозначні дефекти

рівномірності зображень маркувань та можлива вибіркова селективність процесу травлення потребують подальшого поглибленого аналізу технологічних умов процесу на макро- та макрорівнях.

Список літератури:

1. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://images.salsify.com/image/upload/s--zDIXvqug-safjt0nuxjubgvzdpnur.pdf>.
2. Самодай В., Машина Ю., Ковтун Г. (2023) «МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ СТВОРЕННЯ БРЕНДУ», *Економіка та суспільство*, (47). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-3>.
3. Сахненко М.Д. Основи теорії корозії та захисту металів / М.Д. Сахненко, М.В. Ведь, Т.П. Ярошок. – Х. : вид-во ХПІ, 2005.

УДК 621.91.05

Л.Є. Глембоцька, к.т.н., доцент кафедри механічної інженерії
та автомобільного транспорту

Г.М. Виговський, к.т.н., доц., проф. кафедри механічної інженерії
та автомобільного транспорту

Ф.М. Ільїн, студент групи ПМ-143

Державний університет «Житомирська політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУЮВАННЯ ТОРЦЕВИХ ФРЕЗ З КОНІЧНОЮ ФОРМОЮ ПЕРЕДНЬОЇ ПОВЕРХНІ НОЖІВ

В сучасному машинобудуванні важливим завданням є підвищення ефективності торцевого фрезерування, особливо при обробці важкооброблюваних матеріалів таких як титанові сплави, загартовані сталі та чавуни. Конструкція різального інструменту є важливим чинником, що впливає на якість та продуктивність процесу. Завдяки своїй універсальності, економічності та адаптивності торцеві фрези зі змінними пластинами є найпоширенішими при обробці плоских поверхонь важкооброблюваних матеріалів.

Серед конструктивних рішень особливу увагу привертає конічна форма передньої поверхні ножів, яка забезпечує покращене відведення стружки, зменшення тертя та підвищення стійкості. Також така геометрія передньої поверхні сприяє зниженню температури в зоні різання, що позитивно впливає на зносостійкість торцевої фрези.

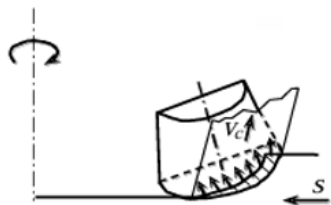


Рис. 1. Напрямок сходу стружки при торцевому фрезеруванні ножами з конічною передньою та плоскою задньою поверхнями

Конічна форма передньої поверхні забезпечує спрямований рух стружки у вертикальному та радіальному напрямках, що виключає її повторний контакт з обробленою поверхнею та стабілізує процес різання (рис. 1). Така конфігурація сприяє поступовому та безперервному переміщенню стружки від зони різання до зони відведення, що істотно знижує ймовірність її накопичення. Це, в свою чергу, мінімізує ризик термічного перевантаження інструмента та погіршення якості обробленої поверхні.

У дослідженнях [2] фрези з такою формою пластин показали зниження температури в зоні різання на 10-15% порівняно з плоскими ножами, а також збільшення ресурсу інструменту на 20-30%. Згідно з дослідженнями [3], кут нахилу ріжучої кромки забезпечує найкращі результати при обробці чавунних у межах 10-15° та загартованих сталевих деталей – 10-20°. Менші кути (10-12°) забезпечують міцність ріжучої кромки, тоді як більші (18-20°) сприяють кращому відведенню стружки та зниженню сили різання.

У виробництві деталей з чавунів застосування такої геометрії торцевих фрез дозволило збільшити продуктивність на 25% та зменшити кількість браку на 15% завдяки стабільному процесу різання та покращеній якості поверхні [2].

Використання конічної форми пластин вимагає адаптації конструкції корпусу торцевої фрези для збору та відведення стружки, застосування корпусів з внутрішніми каналами для охолодження та видалення стружки, конструкція посадочних гнізд під пластини повинна враховувати кут нахилу конічної поверхні.

Застосування змінних пластин із конічною передньою поверхнею у торцевих фрезах провідних виробників різального інструменту, таких як Sandvik Coromant (CoroMill 300, 345, 390), Kennametal (KRSM та Dodeka), Mitsubishi Materials, ISCAR, Taegu Tec та Korloy – для обробки загартованих сталей і чавунів, а також Sandvik Coromant (CoroMill® 390), ISCAR (HELITANG T490), Mitsubishi Materials (WSX445) – для обробки титанових сплавів, свідчать про актуальність і технічну доцільність досліджень у напрямку розробки торцевих фрез зі ступінчастими схемами різання. Такий підхід забезпечує підвищення ефективності обробки важкооброблюваних матеріалів шляхом оптимізації геометрії інструмента.

Список літератури:

1. Мельничук П.П. Моделювання силових залежностей при торцевому фрезеруванні. Вісник Тернопільського державного технічного університету. Тернопіль, 2008. №3. С. 78–87.
2. Радкевич, С.І., Глембоцька, Л.Є., Мельничук, П.П., Кирилович, В.А. (2022). Конструктивне рішення торцевих фрез зі змінними непереточуваними пластинами для обробки плоских поверхонь деталей з чавунів. Технічна інженерія, (1(89), 45–54. [https://doi.org/10.26642/ten-2022-1\(89\)-45-54](https://doi.org/10.26642/ten-2022-1(89)-45-54)
3. Виноградов О.О., Виговський Г.М. (2018). Про вплив кута λ нахилу різальної кромки інструменту на його стійкість при косокутному різанні металів. Вісник ЖДТУ. Серія "Технічні науки", (1 (81), 32–37. [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-32-37](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-32-37)

УДК 621.914

А.В. Голубовський, аспірант
Науковий керівник М.Г. Сторчак, д.т.н., проф. кафедри
Державний університет «Житомирська політехніка»

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОГНОЗУВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗАЄМОДІЇ ІНСТРУМЕНТУ З ОБРОБЛЮВАНИМ МАТЕРІАЛОМ В ПРОЦЕСІ ЛЕЗОВОЇ ОБРОБКИ АУСТЕНІТНИХ СТАЛЕЙ

В наш час широкого застосування у багатьох критичних галузях (авіакосмічна, медична, енергетична, харчова та ін.) отримали аустенітні сталі. Вони набули свою популярність через високу корозійну стійкість, міцність та високі експлуатаційні характеристики. З іншого боку, їм притаманна складність лезової обробки: висока в'язкість, низька теплопровідність, інтенсивне наклепування поверхневого шару, що призводить до швидкого зносу інструменту. Дуже важливим є необхідність точного прогнозування характеристик взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом для оптимізації режимів різання, зменшення браку та підвищення продуктивності [1].

Мета: Систематизація, аналіз та критична оцінка сучасних наукових публікацій, присвячених моделюванню та прогнозуванню параметрів взаємодії інструменту та матеріалу.

Завдання: Виявити найбільш ефективні методи прогнозування та ідентифікувати невирішені проблеми у дослідницькій сфері. Знос інструменту та характеристики контактної взаємодії між інструментом та оброблюваним матеріалом є однією з найпоширеніших та широко використовуваних характеристик для оцінки ефективності різання матеріалів [3, 4].

Аналіз існуючих моделей прогнозування. Прогнозування сил різання (F_x , F_y , F_z): *емпіричні, аналітичні та механістичні моделі.* Емпіричні моделі будуються на основі експериментальних даних і описують залежність сили різання від геометричних і режимних параметрів (подачі, глибини різання, швидкості різання тощо). Класичним прикладом є рівняння Кроненберга, яке встановлює зв'язок між силою різання та питомими силами для конкретного матеріалу:

$$F_c = K_c a^m f^n \quad (1)$$

де K_c – питомий коефіцієнт різання, a – глибина різання, f – подача, а m , n – експериментальні показники ступеня [2]. Такі моделі прості у використанні, широко застосовувалися для вуглецевих та низьколегованих сталей, проте їх точність обмежується умовами, у яких вони були отримані і не завжди коректно описує поведінку в'язких або високолегованих матеріалів, через їхню підвищену пластичність і схильність до наклепу, зокрема *аустенітних сталей* [5]. *Аналітичні моделі*, навпаки, базуються на механіці різання та враховують геометрію інструменту, умови тертя і зсуву, а також деформаційні характеристики матеріалу. До найвідоміших відносяться моделі *Мерчанта* та *Штебера*, які описують рівновагу сил у зоні різання з використанням кутів різання, зсуву та тертя [1]. Перевагою аналітичних моделей є фізична інтерпретованість параметрів, що дозволяє здійснювати попереднє прогнозування сил різання без проведення повного комплексу експериментів. Проте для матеріалів із нелінійними конститутивними властивостями (як аустенітні сталі) необхідно враховувати додаткові чинники — наприклад, залежність напруження від швидкості деформації і температури, що часто виходить за межі класичних підходів. *Механістичні моделі*, що враховують геометрію інструменту, кути різання та зсуву, забезпечують кращу узгодженість із експериментальними даними. Такі підходи дозволяють враховувати локальні варіації кута навантаження та зміни умов тертя в зоні контакту. Вони є проміжною ланкою між аналітичними та емпіричними підходами до прогнозування сил різання та поєднують експериментальні дані з аналітичними виразами, що базуються на геометрії інструменту та кінематиці процесу, дозволяючи з достатньою точністю оцінювати сили F_x , F_y , F_z , широкому діапазоні режимів [6].

Основною ідеєю механістичного підходу є *поділ сили різання на елементарні складові*, що діють у мікронах контакту стружки з різальною кромкою. Сили визначаються інтегруванням локальних питомих навантажень по довжині різальної кромки:

$$F_i = \int_{A_c} K_i(h_c, v_c, \theta) dA, \quad (2)$$

де K_i – питомі коефіцієнти сил (для напрямів x, y, z), що залежать від товщини стружки h_c , швидкості різання v_c та кута нахилу кромки θ , A_c – контактна площа стружкоутворення. Перевагою механістичних моделей є можливість врахування геометрії інструменту, зокрема радіуса заокруглення, кута нахилу та реальної довжини контакту. Крім того, моделі цього типу дозволяють оновлювати параметри під час зносу інструменту, що забезпечує динамічне прогнозування

сил різання під час тривалих операцій [6]. Однак, основним обмеженням є їх залежність від калібрувальних експериментів, без яких параметри K_i не можуть бути точно визначені. Для нових матеріалів (зокрема аустенітних сталей) часто необхідне окреме калібрування. Додатковою проблемою є те, що більшість реалізацій механістичних моделей ґрунтується на припущенні про сталість коефіцієнтів тертя та зсуву, що не відповідає реальним умовам високошвидкісної обробки. Це призводить до систематичної похибки у прогнозуванні складової F_y (радіальної сили), особливо при малих кутах нахилу кромки.

Для підвищення точності впроваджують *гібридні механістичні моделі*, що поєднують підхід локальних питомих сил із даними чисельного моделювання (FEM). Це дозволяє скоригувати коефіцієнти K_i на основі термомеханічного стану матеріалу, забезпечуючи кращу узгодженість із експериментом (до $\pm 5\%$) навіть при моделюванні складних нержавіючих сталей типу AISI 316 [3]. *Використання Методів ШІ (AI/ML)*: Сучасні дослідження показують ефективність використання штучних нейронних мереж (ANN) та методів опорних векторів (SVM) для прогнозування складових сили різання на основі вхідних параметрів [3, 4].

Моделювання температурного поля та теплових потоків Метод скінченних елементів (FEM) активно застосовується для аналізу температурного поля. Використання програмних комплексів ABAQUS, DEFORM .AdvantEdge дозволяє змоделювати розподіл температури в зоні контакту інструмент–деталь [4]. Однак точність результатів суттєво залежить від адекватності конститутивних рівнянь, що описують поведінку матеріалу. Модель Джонсона–Кука є стандартом, проте її параметри часто не відображають реальну поведінку аустенітних сталей при високих температурах та швидкостях деформації [5]. По-перше, модель Джонсона–Кука базується на емпіричних коефіцієнтах, визначених із випробувань на розтяг або стиснення, що не завжди адекватно відображає реальні умови різання, де швидкість деформації може перевищувати 10^4 s^{-1} , а локальний нагрів у зоні зсуву – досягати $800\text{--}1000^\circ\text{C}$. Це призводить до недооцінки термомеханічного пом'якшення матеріалу та похибок у розрахунках сил різання F_x , F_y , F_z [3]. По-друге, модель не враховує динамічні ефекти фазових перетворень і структурні зміни, що характерні для аустенітних сталей типу 304 та 316 під час високошвидкісної обробки. Внаслідок цього виникає розбіжність між експериментальними та розрахунковими результатами [3]. Для більш точного прогнозування поведінки аустенітних сталей доцільно застосовувати модифіковані варіанти моделі J–C (наприклад, J–C з температурно-залежним модулем або енергетичними поправками), або альтернативні підходи, такі як моделі Зерафіна–Аргонна чи Войновського–Кутона, які краще враховують дислокаційні механізми пластичності [4, 5].

Прогнозування Зносу Інструменту (Tool Wear) Більшість досліджень, проведених щодо зносу ріжучого інструменту, можна тематично розділити на експериментальні дослідження механізму зносу або його фізичного моделювання, моделювання зносу інструменту, головним чином з метою його прогнозування, та прогнозування зносу з використанням відносно нових методів, таких як застосування штучного інтелекту, машинного навчання тощо [1].

Моделі зносу поділяються на *фізичні*, що базуються на механізмах перенесення матеріалу (адгезійний, абразивний, дифузійний), та *феноменологічні*, що встановлюють емпіричну залежність між зносом і технологічними параметрами [3]. *Виявлені Прогалини (Gaps)*: Брак інтегрованих моделей, які одночасно і в *реальному часі* враховують сили, температуру, мікроструктурні зміни (наклепування) та знос інструменту. Недостатність універсальних конститутивних моделей, які точно описують поведінку аустенітних сталей при високих швидкостях зсуву та температурах. Обмежене застосування гібридних (механістичних з AI-корекцією) моделей.

Висновки: FEM-моделювання залишається найточнішим методом для оцінки температурного поля. AI/ML-моделі демонструють високу точність у прогнозуванні сил різання при коректному налаштуванні навчальних даних. Відсутність інтегрованих моделей, що одночасно враховують сили, температуру, знос та мікроструктурні зміни у реальному часі. Недостатня кількість універсальних конститутивних моделей для аустенітних сталей при високих температурах і швидкостях деформації. Обмежене використання гібридних моделей, які поєднують механістичний підхід із корекцією на основі AI/ML. *Напрямки майбутніх досліджень:* Розробка гібридних прогностичних моделей для визначення контактних характеристик процесу лезової обробки аустенітних сталей. Створення нових критеріїв оптимізації процесу різання, орієнтованих на мінімізацію наклепування та максимізацію стійкості інструменту.

Список літератури:

1. Storchak M, Melnyk O, Stepchyn Y, Shyshkova O, Golubovskiy A, Vozniy O. Effect of friction model type on tool wear prediction in machining. *Machines*. 2025;13(10):904. doi:10.3390/machines13100904
2. Abouridouane M, Bergs T, Schraknepper D, Wirtz G. Friction behavior in metal cutting: modeling and simulation. *Procedia CIRP*. 2021;102:405-410.
3. Umbrello D, Ambrosio D, Filice L, Micari F. Finite element simulation of machining of AISI 316L austenitic stainless steel. *CIRP Ann Manuf Technol*. 2007;56(1):61-64.
4. Lin ZC, Chen JH. A modified Johnson–Cook material model for high strain rate deformation of metals. *J Mater Process Technol*. 2002;122(2-3):273-283.
5. Voyiadjis GZ, Abed FH. Microstructural based models for BCC and FCC metals with temperature and strain rate dependency. *Mech Mater*. 2005;37(4):355-378.
6. Altintas Y, Lee P. A general mechanics and dynamics model for helical end mills. *Ann CIRP*. 1996;45(1):59-64.

УДК 621.81.85

Л.П. Іванова, доктор філософії, менеджер справ
зі стабільності життя Альянсу жінок-біженок,
м. Сіетл, штат Вашингтон (США);

П.І. Літовченко, к. т. н., проф., ст. наук. співробітник
кафедри «Інтегровані системи машинобудування» ім. М.Ф. Семка,
НТУ «Харківський політехнічний інститут»;

Л.Г. Полонський, д. т. н., проф., професор кафедри механічної
інженерії та автомобільного транспорту,

О.А. Громовий, к. т. н., доц., зав. кафедри робототехніки,
електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна,
Державний університет «Житомирська політехніка»

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ФОРМУВАННЯ ТОЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ПРИ КРУГЛОМУ ЗОВНІШНЬОМУ ШЛІФУВАННІ

Надійність, ефективність і конкурентоздатність сучасних машин, особливо, військової техніки, характеризується високою якістю і точністю виготовлення деталей і вузлів, що забезпечується сучасним рівнем і культурою технології їх виготовлення.

Шліфування є домінуючою технологічною операцією фінішної обробки деталей машин. Питома вага шліфувальних операцій сягає 27...30 % з тенденцією зростання, а питома вага шліфування деталей в авіаційно-космічній галузі становить 40...50 %. Тобто, шліфування є операцією, що забезпечує точність та високу якість поверхонь деталей сучасних машин.

При шліфуванні одним з основних факторів виникнення похибок розмірів та відхилення форми деталей є температурні деформації деталей та вузлів шліфувальних верстатів [1, 2]. З цієї причини вивчення впливу різних факторів на точність обробки шліфуванням є важливою і актуальною задачею. Це актуально для шліфування важкооброблюваних матеріалів, – титанових сплавів та нержавіючих сталей, які широко застосовуються у машинобудуванні. Це пояснюється теплоємністю шліфування вказаних матеріалів і, як наслідок, значним впливом температурних деформацій на точність деталей [3, 4].

Метою дослідження була розробка засобів оцінки впливу температурних деформацій елементів круглошліфувальних верстатів на похибку розташування формоутворюючих елементів шліфувального круга відносно заготовки і на точність оброблених деталей.

Передбачалось дослідження температурних деформацій станини та інших базових елементів круглошліфувальних верстатів, що виникають внаслідок їх нагрівання під впливом різних джерел тепла, а саме: за рахунок тертя у приводах і направляючих, шліфувальній бабці та столі; нагрівання при попаданні розігрітої мастильно-охолоджувальної рідини (МОР), що поглинає тепло із зони

шліфування та передає його на станину та інші елементи верстата; підвищення температури навколишнього середовища. Температурні деформації базових елементів верстата оцінювалися шляхом визначення величини зміни взаємного положення шліфувального круга та столу верстата із закріпленою на ньому заготовкою при її русі у процесі роботи верстата. В даній роботі проведено порівняльний аналіз результатів дослідження декількох круглошліфувальних верстатів одного класу точності.

Дослідження показало, що теплові зміщення точок заготовки спричинені непрямолінійністю руху стола внаслідок температурних деформацій. Наведено експериментальні дані щодо відносного зміщення шліфувального круга та заготовки залежно від терміну роботи верстата. Представлені швидкості переміщення контрольних точок заготовки внаслідок обертання стола верстата, спричинені температурними деформаціями, оцінено вплив зміни температури навколишнього середовища протягом робочої зміни на відхилення від прямолінійності руху стола.

Встановлено, що основним фактором виникнення похибок обробки є викривлення напрямних стола, що може бути наслідком нерівномірного нагрівання станини внаслідок різного теплового впливу МОР на її окремі ділянки. При цьому рух стола стає непрямолінійним, що призводить до відхилення вихідної форми направляючих станини та зміщення переднього і заднього кінців шпинделя від його номінального положення.

Зі збільшенням часу роботи верстата стіл з оправкою, встановленою в центрах, змінює своє положення у горизонтальній площині і величина цієї зміни сягає декілька десятків мікрометрів.

З метою визначення температурних деформацій станини проведено експериментальні дослідження групи круглошліфувальних верстатів, станини та інші деталі яких ідентичні з деталями та вузлами сучасних верстатів 3М152В, 3М162В, 3М152ВФ20 та ін.

Встановлено, що теплове зміщення заготовки протягом робочої зміни становить 7...22 *мкм*. У верстатах 3А164, що мають великі габарити, значення теплових переміщень більші і можуть досягати 44...47 *мкм*.

Під час проведення досліджень також встановлено, що, при повороті заготовки у горизонтальній площині відносно шліфувального круга, за рахунок температурних деформацій найбільше зміщення спостерігається у точках, розташованих на відстані 400...500 *мм* від передньої бабки.

Таким чином, порівняльний аналіз результатів дослідження верстатів одностипних моделей показує, що максимальне теплове зміщення точок заготовки внаслідок непрямолінійності руху стола через температурні деформації знаходиться у межах 13...19 *мкм*, що значно менше зміщення шліфувальної бабки в результаті температурних деформацій, яке становить для переднього кінця шпинделя 18...77 *мкм*, а для заднього – 12...40 *мкм*. При цьому швидкість максимального зміщення точок заготовки від їхнього номінального положення становить 1,33...7,33 *мкм/год*.

Зміна температури навколишнього середовища не більше ніж на $1...2^{\circ}\text{C}$ практично не впливає на величину теплового зміщення, але при більш значних змінах температури протягом робочої зміни – до 5°C і більше, – призводить до його збільшення на 60 %.

Описане зміщення кінців шпинделя у просторі, обумовлене впливом температурного режиму мийно-охолоджувальних середовищ і систем, що використовуються у верстатах, а саме: МОР, робочих рідин гідросистеми та систем змащування. При цьому, найбільш важливим фактором впливу є температура в опорах підшипниках шпинделя.

Встановлено, що наприкінці робочого дня (через 360 хв) температура рідини у підшипниках шпинделя максимальна і може сягати 60°C , що недопустимо. При цьому максимальна температура робочої рідини у підшипниках встановлюється для різних верстатів у інтервалі 200...300 хв роботи верстатів, а стабілізація температури рідин – через 150...180 хв роботи верстата.

Температура робочої рідини у підшипниках коливалася від 8 до 10°C і визначається температурою навколишнього середовища, а під час роботи у передній опорі вона вища, ніж у задній. Різниця спостерігається протягом всього робочого дня і складає $2...11^{\circ}\text{C}$.

При проведенні експериментів спостерігалася тенденція зміщення переднього кінця шпинделя у бік заготовки (величина зміщення – від 5 мкм (період роботи 30 хв) до 78...83 мкм (період роботи – 330 хв)). Середня величина зміщення шпинделя складала: 21,4 мкм через 60 хв роботи; 36,5 мкм – через 180 хв; 33 мкм – через 360 хв роботи верстата.

Поведінка заднього кінця шпинделя відрізняється від поведінки переднього. Для більшості досліджуваних верстатів задній кінець шпинделя при збільшенні часу роботи зміщувався від заготовки. Але величина зміщення кромки круга протягом робочої зміни може у багатьох випадках змінюватися у широких межах, що приводить до виникнення різної величини конусності, аж до виникнення зворотного конуса (у діапазоні від 0 до 30 хв роботи верстата).

Максимальна величина конусності – $1 : 845$ – спостерігалася наприкінці робочого дня, а мінімальна – $1 : 4545$ – у перші 30 хв роботи верстата.

Результати певним чином враховують нестационарний характер обробки, що змінюється, зокрема: періодичну подачу МОР в зону шліфування, періодичні зупинки процесу обробки для зміни та переточування різального інструмента тощо. Рекомендуються для використання при проектуванні підсистем МОР для застосування їх на круглошліфувальних верстатах і до використання у навчальному процесі закладів вищої освіти машинобудівного профілю.

Список літератури:

1. Stepanov, M., Ivanova, M., Litovchenko, P., Ivanova, L., Kotliar, A. Improvement of the Accuracy of Grinding by Means of Coolant Supply. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manuf. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. pp 325-335. URL: https:// DOI: 10.1007/978-3-030-50794-7_32.

2. Stepanov, M., Ivanova, L., Polonsky, L., Tretyak, T., Ivanova, M. (2025). The effect of thermal deformations of the grinding head of a circular grinding machine on the accuracy of grinding parts. In: Machado, J., Troyanovska, J., Ottaviano, E., Xavior, M.A., Valashek, P., Basova, Yu. (eds.) Innovations in Mechanical Engineering IV. ICIENG 2025. Lecture notes on mechanical engineering. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-93554-1_8

3. Stepanov, M., Ivanova, M., Litovchenko, P., Ivanova, L., Havryliuk, Y. Study of Heat Transfer Conditions in the Cutting Zone When Grinding. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manuf. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. pp 173-181.

URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-79165-0_17/

4. Мазильно-охолоджуючі технологічні засоби. Тепловий фактор у формуванні точності шліфованих деталей [Електронний ресурс] : монографія / М. С. Степанов, Л. П. Іванова, П. І. Літовченко, М. С. Іванова ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т» ; – Електрон. текст. дані. – Харків: НТУ «ХПІ», 2025. – 231 с. – URI: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/86858>.

УДК 621.865.8

В.А. Кирилович, д.т.н., проф. каф. робототехніки,
електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна,

П.А. Єгоров, магістр

Державний університет «Житомирська політехніка»,

Л.В. Дімітров, д.т.н., проф. каф. деталі машин
Технічний університет-Софія, м. Софія, Республіка Болгарія

ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМАЛЬНОГО ЗАПУСКУ ДЕТАЛЕЙ У ВИРОБНИЦТВО В ГНУЧКИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ

Гнучкі виробничі системи (ГВС) є організаційно-технологічними структурами, які широко використовуються в сучасному багатонаменклатурному та різногалузевому виробництві. Елементарними “цеглинками” останніх є гнучкі виробничі комірки (ГВК). Для усіх видів ГВС характерним є відносно часта зміна номенклатури виробів, що випускаються невеликими партіями, а відтак і виробів, що запускаються у виробництво. При цьому архіважливим є тривалість переналагоджень певних структур ГВС на випуск нової продукції. В такій постановці задача переналагоджень складових ГВС є традиційною задачею однокритеріальної оптимізації за мінімізованим критерієм тривалості переналагоджень. В той же час важливу роль відіграють і вартісна оцінка процесу переналагодження. В цьому випадку ця задача є теж задачею однокритеріальної оптимізації з мінімізованою величиною фінансових витрат на процес переналагодження.

В даній роботі стисло викладається зміст запропонованого підходу та його особливості, що базується на розв'язуванні задачі переналагоджень компонентів ГВК як складової ГВС. Ця задача розглядається як задача багатокритеріальної оптимізації, що комплексно враховує вказані вище критерії, які названо локальними критеріями, технічного та економічного (мінімізації тривалості та вартості переналагоджень відповідно) змісту. В такій постановці задача оптимального запуску деталей у виробництво раніше не розв'язувалось. При розв'язуванні таких та подібних задач багатокритеріальної оптимізації апіорі та апостеріорі точні розв'язки не є відомими. Показовим є те, що множина деталей, яку необхідно оптимізувати при їх запуску у виробництво, може бути сформована при розробці групових технологій, що можна розглядати як теоретично-методичну основу гнучких виробництв.

Одним із методів розв'язування таких задач є формування критерію, що комплексно враховує вказані вище локальні критерії. В основу формування такого критерію запропоновано використання теорії подібності. Для цього введені поняття локальних критеріїв подібності, що відображають відповідно критерії продуктивності (трудомісткості) та вартості (фінансових витрат) процесу переналагодження. Можливість та доцільність введення локальних критеріїв подібності визначено першою теоремою теорії подібності, а доцільність введення інтегрованого критерію подібності визначена другою теоремою подібності та наслідком до неї. Згідно останнього впливає, що аналітичний вираз інтегрованого показника продуктивність/собівартість, отримується добутком безрозмірних локальних критеріїв подібності. При цьому останні виражені коефіцієнтами готовності складових ГВК та останньої, тобто ГВК в цілому, до переналагоджень. На основі автоматизованого аналізу усіх можливих послідовностей запуску деталей групи у виробництво обирається та послідовність, що має максимальне значення інтегрованого показника подібності для аналізованої технологічної структури ГВК.

Результати, отримані за локальними критеріями подібності в рамках інтегрованого критерія подібності, порівнюються з результатами, що отримані при розрахунку локальних критеріїв подібності за методами дискретної оптимізації, а саме за методом графів та методом гілок і меж.

Для цього визначається мінімальний шлях переналагодження за матричною (графовою, із зваженими орієнтованими ребрами, де вага ребер ідентифікована тривалостями переналагоджень та/або їх вартісною складовою) моделлю процесу переналагоджень усіх матеріальних складових ГВК та останньою в цілому. При використанні методу гілок і меж знаходження оптимального розв'язку виконується з використанням перетворення Гаусса-Жордана для вихідної матриці переналагоджень ГВК.

Аналіз результатів тестування та порівняння отриманих результатів при реалізації даного підходу вказує на те, що результати, отримані за пропонуваним методом, і ті, що отримані за кожним із локальних критеріїв, співпадають. Отже, запропонований метод, що автоматизовано реалізований і функціонує як програмний продукт **Sdg Soft**, підтвердив свою працездатність.

Таким чином, особливостями оптимального запуску деталей у виробництво в ГВК (металообробки, складання тощо) є розв'язування цієї задачі як задачі багатокритеріальної оптимізації; критерієм оптимальності при цьому є інтегрований критерій подібності, який враховує локальні критерії подібності, що відтворюють відповідно продуктивнісну та вартісну складові процесу переналагодження.

Очевидним є те, що використання даного підходу щодо оптимального запуску деталей у виробництво в ГВК є потужним резервом підвищення ефективності технологічної підготовки роботизованих механоскладальних виробництв машино- та приладобудування.

УДК 621.9.025

С.А. Клименко, член-кор. НАН України, д.т.н., проф.

С.Ан. Клименко, к.т.н., ст. дослідник

М.Ю. Конєйкіна, к.т.н., с.н.с.

В.І. Куш, д.ф.-м.н., с.н.с.

А.С. Манохін, к.т.н., ст. дослідник

Ю.О. Мельничук, к.т.н., с.н.с.

А.О. Чумак, к.т.н.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України

СТРУКТУРА, МЕХАНІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ СИСТЕМИ «BN+TiN»

В композитних матеріалах системи «сBN-керамічна складова», які використовується у різальному інструменті, необхідно отримати якомога більш однорідну мікроструктуру, зберігаючи при цьому низький ступінь агломерації зерен кожної фази. Неоднорідна мікроструктура композитів призводить до утворення об'ємів без сполучних добавок або ділянок, де вони відокремлюються під час процесу спікання, що негативно впливає на механічні властивості композитів та експлуатаційні властивості оснащених ними інструментів. Одним із можливих рішень цієї проблеми є нанесення спеціального покриття на частинки надтвердого компонента у вихідній шихті перед спіканням композиту.

Щоб передбачити поведінку таких композитів в експлуатації, необхідно зрозуміти закономірності впливу параметрів мікроструктури на їх властивості на мікро- та макрорівнях. У цьому дослідженні запропоновано мікромеханічна модель, яка дозволяє оцінити крихкість композиту (сBN+TiN) з певною структурою шляхом визначення пікових локальних напружень, які ініціюють і поширюють мікропошкодження, що призводить до макроруїнування матеріалу. Розроблений метод використовує статистичний підхід Вейбулла для оцінки міцності шляхом обчислення ступеня пошкодження мікроструктури, а

закономірності впливу структури композитів на міцність перевірені шляхом виготовлення експериментальних PcBN та оцінки їх властивостей.

Для оцінки впливу структури на механічні властивості композиту проведено чисельний аналіз НДС в моделях структурно неоднорідного матеріалу з «квазивипадковою» мікроструктурою. Модель представляє собою репрезентативну елементарну комірку, яка імітує безладну структуру і періодично повторюється, заповнюючи нескінченну область – це дозволяє врахувати вплив мікроструктури на розподіл напружень, модулі пружності та крихкість двофазної кераміки при вирішенні задачі пружної деформації репрезентативного об'єму матеріалу методом скінченних елементів.

Розглянуто два типи структур – I, характерний для PcBN групи BL, та II, типовий для композитів з покриттями. Структура I складається з суміші частинок двох фаз (рис. 1, а), тоді як структура II складається з частинок однієї фази, покритих іншою фазою (рис. 1, в). Тип II відноситься до PcBN групи BH, оскільки на практиці він містить більше 75% надтвердої фази.

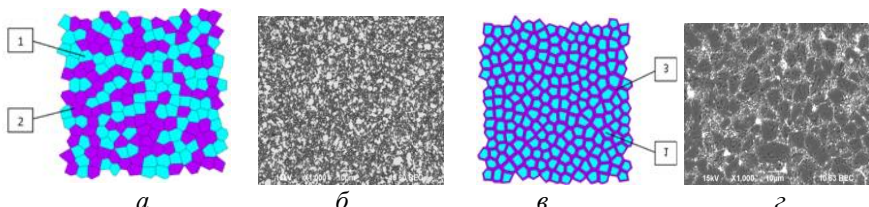


Рис. 1 – 2D структурні моделі двофазних композитів I (а) і II (в) (1 – cBN ; 2 – керамічне сполучення; 3 – покриття), структура композитів $\text{cBN}+45\% \text{TiN}$ (б), cBN -покриття, 5% Ti (г)

Для створення модельної структури використано модифікований алгоритм, заснований на геометрії Лагерра, який починається з щільного упакування сфер у заданому об'ємі, що служить початковою конфігурацією, потім формуються багатокутні зерна.

Для оцінки особливостей НДС в двофазних композитах розглянуто модель, що піддається одиничному навантаженню. Розподіл напружень в репрезентативному об'ємі є помітно неоднорідним, причому найвища концентрація напружень спостерігається в частинках cBN поблизу їх контактних поверхонь з частинками TiN . Поле напружень у композиті II є більш однорідним, з максимальними значеннями головних напружень нижчими, ніж у композиті I. Ці максимальні напруження спостерігаються на коротких краях зерен і в прошарках між ними, орієнтованих перпендикулярно до осі навантаження. Крім того, максимальні деформації в композиті II приблизно на 30% нижчі, ніж у композиті I. Інтегральна функція розподілу першого головного напруження у фазах композиту для будь-якої орієнтації навантаження апроксимується двопараметричною функцією Вейбулла.

Крива 2 на рис. 2 ілюструє розраховану ймовірність руйнування композиту I з об'ємним вмістом фази TiN = 45% при одноосному розтягуванні. Криві 1 і 5 розраховані для керамік TiN і cBN. Як видно, крива 2 ближча до кривої 1, що вказує на те, що крихкість композиту I визначається в першу чергу більш крихкою фазою. Для довідки наведено дані для композитів II з концентрацією cBN 90% (крива 3) і 95% (крива 4), чому відповідає товщина покриття 0,025 і 0,050 середнього радіуса зерен cBN. При зменшенні товщини покриття вдвічі міцність композиту збільшується приблизно на 10%.

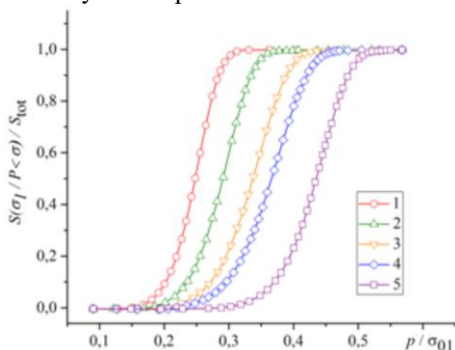


Рис. 2. Ймовірність руйнування композитів під одноосовим розтягуванням $\langle \sigma_{11} \rangle = -p$: 1 – TiN; 2 – cBN-45%TiN; 3 – cBN з покриттям (10%TiN); 4 – cBN з покриттям (5%TiN); 5 – cBN

Порівняння міцності композитів I (крива 2) і II з об'ємними частками фази TiN 10% і 5% (криві 3 і 4) вказує на потенціал 1,3-кратного поліпшення цього параметра. Це свідчить про те, що в практичному діапазоні товщини покриття міцність композиту може бути покращена порівняно композитом зі структурою типу BL, а покриття також захищатиме зерна cBN від трибоактивованого хімічного зносу під час високошвидкісної обробки. Структура досліджуваних композитів показана на рис. 1, б, г. Аналіз показує, що в композитах, отриманих з порошків cBN із покриттям, має місто рівномірний розподіл керамічної матриці між зернами та інкапсуляція окремих зерен cBN. Товщина шарів керамічної матриці, варіюється як 0,5–6,0 мкм для cBN-3%Ti, 1–8 мкм для cBN-5%Ti, 1–10 мкм для cBN-8%Ti. Найбільші площі та розміри керамічних шарів спостерігаються в точках, де сходяться чотири або більше зерен cBN, міжзернова зона між двома сусідніми частинками cBN в деяких областях становить менше 1 мкм.

Середні значення мікротвердості композитів: cBN-3%Ti – 41.5 ± 1.1 , cBN-5%Ti – 32.4 ± 1.2 , cBN-8%Ti – 30.4 ± 2.6 ГПа. Мікротвердість PcBN групи BL (cBN+45%TiN) – 23–26 ГПа, а групи ВН «Борсініт» перевищує 45 ГПа. PcBN групи ВН демонструє найвищу міцність при діаметральному стисненні, тоді як для композитів, виготовлених з порошків із покриттям, міцність збільшується із зменшенням вмісту Ti в структурі матеріалу.

Таким чином, отримані експериментальні результати визначення структурних особливостей і механічних властивостей композитів, створених з порошків cBN із покриттям, підтверджують висновки з моделювання структури і властивостей композитів – PcBN, сформовані з порошків із покриттям, мають значно кращі механічні властивості в порівнянні з композитами групи BL, які містять TiN в кількості до 45%. За своїм складом отримані PcBN належать до групи ВН і, на відміну від композитів групи BL, містять значно меншу кількість порівняно м'якої та крихкої фази TiN.

При низьких швидкостях різання (110 м/хв) інструмент, оснащений PcBN групи ВН, демонструє нижчу швидкість зношування порівняно з інструментом, виготовленим з композиту cBN-5%Ti. Зі збільшенням швидкості різання до 220 м/хв інтенсивність зношування обох інструментів зростає, проте інструмент з композитом cBN-5%Ti демонструє нижчу швидкість зносу порівняно з PcBN групи ВН. Ефективність інструменту з композитом, виготовленим з порошків із покриттям, зростає при збільшенні швидкості різання. Звичайно це характерно для інструменту з PcBN групи BL. Дослідження показують, що інструмент, оснащений композитом, виготовленим з порошку cBN-3%Ti, демонструє найвищу продуктивність серед розглянутих. Цей композит має достатню міцність для використання в інструментах, що піддаються динамічному навантаженню, а також демонструє найменший знос. Інструменти з композитів групи BL, які містять 45% TiN, не працюють у таких умовах. Інструмент з PcBN групи ВН при високошвидкісної обробці демонструє більш інтенсивне зношування контактних поверхонь у порівнянні з інструментом з композитом, виготовленим з порошку cBN-3%Ti. Таким чином, створені композити, які за складом належать до групи ВН, за своїми експлуатаційними властивостями схожі на композити групи BL. Однак, на відміну від групи BL, вони володіють набором властивостей, які дозволяють використовувати їх в інструментах, які працюють в умовах динамічного навантаження.

УДК 621.9.025

Я.П. Коваленко, доктор філософії з прикладної механіки
Державний університет «Житомирська політехніка»

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ГЕТЕРОГЕННОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Гетерогенність матеріалів є важливою характеристикою, що визначає неоднорідність їх структури, фазового складу та властивостей. Вона суттєво впливає на експлуатаційні параметри, такі як міцність, в'язкість руйнування, корозійну стійкість і довговічність. Вивчення гетерогенності дозволяє оцінити рівень структурної рівномірності матеріалу, контролювати якість технологічних процесів його отримання та прогнозувати поведінку під дією навантажень [1].

Методи визначення гетерогенності поділяються на структурні, фізико-хімічні та неруйнівні. Найбільш поширеним є металографічний аналіз, який дає змогу досліджувати мікроструктуру матеріалу за допомогою оптичної або скануючої електронної мікроскопії. За мікроструктурними зображеннями визначають розмір і форму зерен, наявність фазових меж, неметалевих включень, карбідних або оксидних виділень. Отримані дані дають змогу кількісно оцінити ступінь неоднорідності структури шляхом статистичного аналізу – розрахунку дисперсії, коефіцієнта варіації або фрактальної розмірності.

Хімічна гетерогенність визначається методами спектрального аналізу, зокрема енергодисперсійною спектроскопією (EDS), рентгенофлуоресцентним аналізом (XRF) і мас-спектрометрією. Ці методи дозволяють оцінити просторовий розподіл легуючих елементів, домішок або залишкових фаз у мікрооб'єктах матеріалу. Для виявлення внутрішніх напружень, мікрodefektів та фазових перетворень застосовують рентгеноструктурний аналіз (PCA), який забезпечує визначення ступеня кристалічної досконалості, розміру кристалітів і текстури.

Для аналізу макроскопічної гетерогенності широко використовуються методи неруйнівного контролю: ультразвуковий, вихрострумний, магнітний та акустико-емісійний. Вони дозволяють виявити неоднорідності, тріщини, пори чи включення без руйнування матеріалу. Останніми роками активно розвиваються цифрові методи аналізу зображень, які базуються на машинному зчитуванні мікроструктури з подальшою кількісною оцінкою ступеня неоднорідності за допомогою алгоритмів кластеризації та сегментації.

Комплексне поєднання зазначених методів забезпечує багаторівневу характеристику гетерогенності – від атомарного до макроструктурного рівня. Це створює основу для вдосконалення технологій плавлення, термічної та хіміко-термічної обробки, спрямованих на підвищення структурної однорідності, стабільності властивостей та надійності експлуатації матеріалів у машинобудуванні, авіаційній та енергетичній галузях [2].

Додаткову інформацію про ступінь гетерогенності матеріалу можна отримати за допомогою методів механічного тестування в поєднанні з мікроструктурним аналізом. Зокрема, мікротвердометрія дозволяє оцінити локальні відмінності твердості в межах однієї фази або зерна, що корелює з неоднорідністю хімічного складу та дефектної структури. Визначення мікротвердості за Віккерсом чи Кнупом у різних ділянках поверхні дає змогу побудувати карту механічної гетерогенності матеріалу. Такі карти є інформативними для аналізу поверхонь після термічної обробки, зварювання або наплавлення.

Сучасні дослідження гетерогенності матеріалів активно розвиваються в напрямі комп'ютерного моделювання мікроструктури. Методи фазово-польового (phase-field) моделювання дозволяють відтворювати процеси кристалізації, росту зерен та фазових перетворень, що формують неоднорідну структуру [3]. Це дає можливість прогнозувати рівень гетерогенності залежно від швидкості охолодження, складу сплаву чи режимів термообробки. Поєднання експериментальних і чисельних методів створює передумови для цілеспрямованого керування структурою матеріалу на етапі його виробництва.

Таким чином, визначення гетерогенності матеріалів є комплексною задачею, що потребує використання як традиційних, так і високотехнологічних методів аналізу. Інтеграція мікроскопії, спектроскопії, рентгеноструктурного аналізу та цифрової обробки зображень забезпечує можливість точного контролю структурної однорідності для подальших наукових досліджень.

Список літератури:

1. Попов О. В., Кравченко І. Г. Аналіз неоднорідності матеріалів за допомогою мікроструктурних методів. Металофізика та новітні технології. 2019. Т. 41, № 7. С. 925-936.
2. Smith R., Zhang T. Advanced Techniques for Material Heterogeneity Assessment. Materials Science Journal. 2021. Vol. 45, No. 2. P. 134-150.
3. Гриценко О. Л., Сухомлин П. В. Комплексна оцінка гетерогенності сплавів на основі титану. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2023. Т. 59, № 4. С. 22-30.

УДК 621.787.4

Красота А.М., аспірант,
Шепеленко І.В., д.т.н., проф.,
Красота М.В., к.т.н., доц.

Центральноукраїнський національний технічний університет

РОЗРОБКА ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ФІНІШНОЇ АНТИФРИКЦІЙНОЇ БЕЗАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ КУЛАЧКІВ РОЗПОДІЛЬНИХ ВАЛІВ

Інноваційним методом підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей машин є нанесення антифрикційних покриттів фінішною антифрикційною безабразивною обробкою (ФАБО).

Сутність ФАБО полягає у фрикційної взаємодії інструменту з антифрикційного матеріалу (латуні, міді та бронзи) з поверхнею тертя деталі у присутності технологічної рідини. Внаслідок цього матеріал прутка (інструменту) переноситься на поверхню заготовки, внаслідок чого вона набуває високих антифрикційних властивостей [1, 2 та ін.].

На кафедрі експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету протягом багатьох років проводяться комплексні дослідження, спрямовані на підвищення ефективності застосування ФАБО деталей тертя. Серед найбільш вагомих отриманих результатів слід відзначити наступні:

- розробка технології фінішної обробки гільз циліндрів ДВЗ, що поєднує операції розкочування гільзи та нанесення на її поверхню антифрикційного мідного покриття [3];

- використання вібрації інструменту при нанесенні антифрикційних покриттів на зовнішні циліндричні поверхні на прикладі цапф шестерень гідронасосів (дослідження проводилися разом з науковцями Таврійського державного агротехнологічного університету ім. Дмитра Моторного) [4];

- розробка комбінованої технології обробки гільз циліндрів ДВЗ, при реалізації якої застосовано принцип протягування – інструмент з антифрикційним брусками здійснює зворотно-поступальний рух з одночасним дискретним обертанням деталі [5].

Більшість існуючих пристроїв забезпечують здійснення ФАБО при виконанні обробки внутрішньої або зовнішньої поверхонь, що мають форму тіла обертання [6]. Однак, для обробки профільних поверхонь такі схеми є неприйнятними.

Зокрема, одними з таких поверхонь є кулачки розподільного валу автотракторних ДВЗ, які працюють у важких умовах граничного навантаження, що супроводжується розриваннями масляної плівки в зоні контакту кулачка з штовхачем, а отже, піддаються інтенсивному зношуванню. Зниження висоти профілю кулачка приводить до різкого погіршення техніко-економічних показників ДВЗ [7]. Доцільність ФАБО кулачків розподільних валів ДВЗ переконливо доведено в роботі [8].

Однією з проблем обробки кулачків є складність їх геометричної форми, що унеможливорює використання універсальних технологічних пристосувань. Відомі конструкції пристосувань для ФАБО, як правило, створюють навантаження на інструмент за рахунок використання навантажувальних пристроїв пружинної дії.

Для обробки криволінійних поверхонь, зокрема кулачків розподільних валів, такі пружинні пристосування використовувати неможливо, адже при обертанні розподільного валу та набіганні кулачка на інструмент пружина навантажувального пристрою буде поперемінно стискатися та розтискатися, що приведе до створення змінного навантаження на інструмент. Це, у свою чергу, приведе до зміни режимів ФАБО. Відсутність постійного тиску інструмента на деталь, недостатня температура в зоні контакту не дозволяють створити умови для формування якісного покриття на циліндричній та профільній частині кулачка.

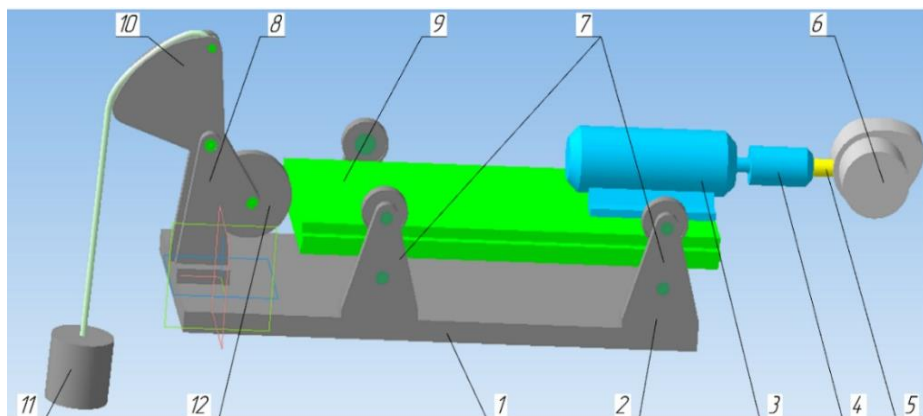
Одним із рішень поставленої задачі може бути використання важільної схеми навантаження інструменту, яка забезпечує постійне зусилля притискання інструменту на поверхню кулачка з врахуванням його геометрії.

Застосування такого підходу лягло в основу конструкції пристосування (рис. 1), що встановлюється на супорт токарного верстату, а розподільний вал, згідно запропонованої схеми, – в патроні верстату з підтримкою за допомогою центру.

Конструкцію пристосування складає основа 1, на якій закріплені кронштейни 2 з роликами 7. На роликах в горизонтальній площині встановлюється рухома платформа 9, на якій монтується електродвигун 3, на вихідному валу якого кріпиться патрон 4 з закріпленим інструментом (прутком

з антифрикційного матеріалу) 5. Торець стрижня упирається в кулачок розподільного валу. В задній частині пристосування на платформі 1 встановлюється двоплечий важіль 10, що хитається на осі на опорі 8. Одне плече важеля має округлений профіль, через який перекинута трос із закріпленням на ньому вантажем 11.

Завдяки округленому профілю забезпечується передача постійного зусилля через важіль 10 на рухому платформу 9. Зусилля передається через упорний ролик 12, який встановлюється на осі іншого плеча важеля 10. Застосування роликів 7 дозволяє зменшити тертя при ковзанні по рухомій платформі 9.



1 – основа; 2 – кронштейн; 3 – електродвигун; 4 – патрон; 5 – інструмент (латунний пруток); 6 – кулачок, що обробляється; 7 – ролики; 8 – опора важеля; 9 – рухома платформа; 10 – важіль; 11 – вантаж; 12 – упорний ролик

Рис. 1. Схема пристосування для ФАБО кулачків розподільного валу

Пристосування працює наступним чином. Розподільний вал обертається в токарному верстаті, при цьому його кулачок 6 поступово повертається навколо своєї осі. До кулачка притиснений інструмент (пруток), який обертається від електродвигуна 3. Рухома платформа 9 переміщується на роликах. У випадку коли на інструмент набігає на вершину кулачка, платформа відкочується назад, після проходження кулачка і підходу його циліндричної частини платформа виконує переміщення вперед. При цьому інструмент притискається завжди з постійним зусиллям, яке забезпечується внаслідок дії вантажу 11 через двоплечий важіль 10, що упирається роликом 12 в тилу частину рухомої платформи 9.

Головною особливістю запропонованої конструкції є наявність важільного навантажувального пристрою, що забезпечує постійне осьове навантаження, а отже, створює постійне зусилля інструменту на поверхню кулачка, що обробляється, фрикційно-механічним методом.

Таким чином, головними відмінними особливостями запропонованого конструкторського рішення є застосування важільної схеми навантаження інструменту, яка забезпечує постійне його навантаження з необхідним зусиллям.

Список літератури:

1. Косіюк М.М., Костюк С.А., Костюк М.А. Технологічне забезпечення нанесення антифрикційного покриття на неповні сферичні поверхні фрикційно-механічним способом. Вісник Хмельницького національного університету, 2018. №4. с. 39 – 43.
2. Черновол М.І., Шепеленко І.В. Пристрої для фрикційно-механічного нанесення покриттів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*. 2013. Вип.26. С. 58 – 62. <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/4cda4d8c-a34b-41c3-98c1-e4c54a5d5c3d/content>
3. Шепеленко, І.В., Немировський, Я.Б., Посвятенко, Е.К. (2022). Підвищення якості антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування. *Mechanics and Advanced Technologies*, 6(1). <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.255655>
4. Пат. 35859А Україна, С23С20/00. Спосіб нанесення антифрикційних покриттів / М. І. Черновол, В. В. Черкун, В. М. Наливайко та ін. №99010210; заявл. 14.01.99; опубл. 16.04.01, Бюл.№3.
5. Shepelenko, I., Nemyrovskiy, Y., Stepchyn, Y., Mahopets, S., Melnyk, O. (2024). Creation of a Combined Technology for Processing Parts Based on the Application of an Antifriction Coating and Deforming Broaching. In: Tonkonogiy, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) *Advanced Manufacturing Processes V. InterPartner 2023*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 209-218. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42778-7_19
6. Черновол М.І., Шепеленко І.В. Пристрої для фрикційно-механічного нанесення покриттів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*. 2013. Вип.26. С. 58 – 62. <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/4cda4d8c-a34b-41c3-98c1-e4c54a5d5c3d/content>
7. Сирота В.І. Основи конструкції автомобілів. К.: Аристей, 2005. 280 с.
8. Шепеленко І.В., Красота А.М., Красота М.В. Зміна напружено-деформованого стану робочої поверхні деталі з антифрикційним покриттям. *Збірник наукових праць. Науковий вісник. Технічні науки*. №11 (42) І. Кропивницький, 2025. С.179–189. [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/11\(42\)_I/22.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/11(42)_I/22.pdf)

УДК 621.923

В.І. Лавріненко, докт. техн. наук, професор, завідувач відділу
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ

В.Ю. Солод, канд. техн. наук, доцент, перший проректор
Дніпровський державний технічний університет МОН України, м. Кам'янське

НОВІТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В НАПРЯМКУ ВПЛИВУ ЗВ'ЯЗУЮЧОГО ТВЕРДИХ СПЛАВІВ НА ЇХ ТРИБОЛОГІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ (ОГЛЯД)

Спечені тверді сплави створені маже сторіччя тому, але із різними новітніми модифікаціями продовжують утримувати передові позиції в інструментальному виробництві. Нагадаємо, що тверді сплави спікають з зерен карбідів вольфраму (титану, танталу), що зв'язані між собою зв'язуючим (кобальтом, нікелем, залізом). Особливістю спечених пластин твердих сплавів є те, що у них після спікання формується поверхневий шар із підвищеним складом зв'язуючого. Так, для твердого сплаву Т5К10 у поверхневому шарі фіксується 16,5 % за масою кобальту, а у глибинних шарах – 9,5 %. Або, наприклад, в спеченій пластині з безвольфрамового твердого сплаву існує початковий градієнт концентрації фаз, а саме, в поверхневому спеченому шарі, товщиною 50 мкм спостерігається підвищена концентрація нікелю, причому відношення поверхневої концентрації до внутрішньої для сплаву КНТ16 складає 2,4–2,7, а для сплаву ТН20 – 3,3–3,6. Такий градієнт концентрації фаз викликаний тим, що в період спікання розплав металу витискається з внутрішніх на периферійні області. Разом з тим, як було свого часу показано в [1], для пластин з твердих сплавів існує проблема втрати зв'язуючого (кобальту, нікелю) з поверхневого шару в процесі шліфування пластин, коли зішліфовується спечений поверхневий шар із підвищеним вмістом зв'язуючого. Чи має для нас це значення? Так, має, адже підвищений вміст зв'язуючого (нікелю, кобальту) пластифікує поверхневі шари, збільшує – міцність під час згинання, коефіцієнт Пуассона та лінійного термічного розширення, корозійну стійкість, а також зносостійкість пластин при різанні. Тобто роль вмісту зв'язуючого у поверхневому шарі твердих сплавів є важливою для підвищення зносостійкості виробів з твердих сплавів.

Нас зацікавило, а чи звертається у новітніх дослідженнях увага про роль зв'язуючого, насамперед кобальту, коли дослідники мають справу з твердими сплавами і на що саме вони звертають увагу при різному температурному впливові на вироби з твердих сплавів чи на покриття WC-Co.

Для отримання якісних виробів з твердого сплаву складної форми в статті [2] пропонується новий процес «хімічної поліровки з потовщеним зрушенням» (C-STP) із застосуванням реагенту Фентона зі швидкістю, що вдвічі перевищує швидкість звичайної поліровки. На рис. 1 наведений механізм видалення матеріалу з сплаву карбід вольфраму–кобальт з суспензією Fenton в процесі C-STP.



Рис. 1. Механізм видалення матеріалу з сплаву карбід вольфраму з кобальтом методом C-STP з реагентом Фентона [2]

На першому етапі елемент Co на поверхні сплаву карбід вольфраму з кобальтом спочатку окислюється до $\text{Co}(\text{OH})_2$ за рахунок сильного окислювача OH, оскільки він має більш низький реакційний потенціал, ніж WC. В подальшому деяка частина WC окислюється до WO_3 . Крім того, реакційний шар, що утворюється на верхній поверхні, є рихлим, що означає, що його легше видалити, ніж сплав карбіду вольфраму і кобальту. На другому етапі завдяки абразивним частинкам $\text{Co}(\text{OH})_2$ на поверхневому шарі твердого сплаву швидко видаляється. На третьому етапі видаляється елемент Co, який є зв'язуючою фазою в твердому сплаві. Між твердою фазою WC зникають зв'язки, тому зерна WC і його рихлі оксиди відносно легко видаляються абразивними частинками. Як бачимо, автори [2] звертають увагу саме на кобальт, як елемент, на який важливо вплинути для досягнення кращої ефективності поліровки твердого сплаву.

В статті [3] аналізуються характеристики пошкодження кромки різального інструмента з твердого сплаву WC-Co після прецизійного шліфування. Характеристики пошкодження кромки включали крихітні тріщини і безперервні зубчасті руйнування кромки. Результати свідчать, що помітно підвищився вміст елемента C і елемента W на поверхні (з 28,35 % до 34,29 % і 54,51–61,06 % відповідно). Збільшення зерен WC і зменшення вмісту Co призводить до зниження міцності та появи тріщин. Тобто, зменшення вмісту кобальту в поверхневому шарі є негативним.

Для покращення якості ріжучих доліт застосовуються різні методи термообробки. З них криогенна обробка (КТ) вважається ефективним методом підвищення терміну служби різних матеріалів різального інструмента. В статті [4] оцінювався вплив криогенної обробки при різній продуктивності витримки (12, 24 і 36 годин) на твердість і зносостійкість породоруйнівних доліт WC–6%Co. Доля фази β -Co значно знизилася за рахунок криогенної обробки. При цьому спостерігалось підвищення твердості на 13–24 %, що пов'язано з

переходом від гранецентрованого кубічного α -кобальту до гексагонального щільноупакованого ϵ -кобальту. Крім того, коефіцієнт тертя підвищується (на 16,64 %), а також збільшується твердість до 2212 HV. Глибока криогенна обробка (DCT) доліт з цементованого карбіду (WC–Co) розглядалася також і в статті [5]. Результати показали, що кращий час DCT для твердості, міцності на згин і абразивної стійкості WC–Co склав 12 год. Виділення фази η ($\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$), перетворення мартенситної фази (α -Co в ϵ -Co) і підвищення залишкового напруження тиску (RCS) WC після DCT поліпшили твердість, міцність на згин і знизили швидкість зносу WC–Co. Як бачимо і тут дослідники звертають увагу на кобальт і його перетворення.

WC–Co із CVD-алмазним покриттям застосовуються в різальних інструментах. В дослідженні [6] вивчався вплив невеликих змін розміру зерна підкладки WC на морфологію, якість і адгезію алмазних покриттів. Результати свідчать, що покриття на підкладці WC з більш дрібним зерном (# 1) більш гладенькі і однорідні з більш високою густиною зародкоутворення, в той час як покриття на підкладці WC з більш крупним зерном (# 2) більш грубі з більш крупними кристалами алмаза. Покриття на підкладці WC з більш дрібним зерном показали більш низькі залишкові напруження і кращу адгезію. Дослідження підтверджує, що мікроструктура підкладки, навіть при невеликих змінах в розмірі зерна WC і в прожилках Co, суттєво впливають на морфологію алмазного покриття, якість кристалів, чистоту фази і міцність зчеплення. Ці ефекти пояснюються взаємодією між розміром зерна WC, середньою довжиною вільного пробігу Co і сміжністю WC.

Покриття компонентів трансмісії гребного гвинта WC–Co сприяє гарному сполученню м'яких і твердих фаз. В дослідженні [7] використані багатошарові композитні покриття FeCoNiW Co–WC із наднизьким коефіцієнтом тертя (0,17) і швидкістю зносу ($7,22 \times 10^{-7} \text{ мм}^3 \cdot \text{Н}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$). Багатий кобальтом твердий фазовий скелет сприяє зниженню коефіцієнта тертя. Однорідний і тонкий твердий фазовий скелет, багатий кобальтом, гарантує, що покриття демонструє надійні трибологічні характеристики. Тобто, і ці дослідження звертають увагу на позитивні ролі зв'язуючого (кобальту) у покращенні трибологічних і протизносних характеристик застосованого виробу.

Список літератури:

1. Лаврінченко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник / Заг. ред. акад. НАН України М.В. Новікова. Київ: ІНМ НАН України, 2013. 456 с.
2. Mechanism of material removal in tungsten carbide-cobalt alloy during chemistry enhanced shear thickening polishing / Jiahuan Wang, Zewei Tang, Saurav Goel, Yu Zhou, Yanfei Dai, Jinhu Wang, Qiankun He, Julong Yuan, Binghai Lyu. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 25, July–August 2023, Pages 6865–6879.

3. Analysis of large edge breakage of WC-Co cemented carbide tool blades emerging in precision grinding process / Li Wei, Ju Wen-Liang, Long Gui, Wang Bo, Mohammad S. Alsoufi, Ammar Elsheikh, Ahmed Mohamed Mahmoud Ibrahim. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 19, July–August 2022, Pages 3916–3929.
4. Microstructure evolution, phase formation, mechanical and tribological response of deep cryogenically treated hard WC-6%Co cutting bits / Moganapriya Chinnasamy, Rajasekar Rathanasamy, Biswajit Samanta, Samir Kumar Pal, Sathish Kumar Palaniappan, Roja Rani Korrayi, Padmakumar Muthuswamy, Shibayan Roy. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 27, November–December 2023, Pages 1293–1306.
5. Wear characteristics and micro-cutting damage model of cemented carbide by deep cryogenic treatment / Weiguo Zhang, Jun Tian, Xiaowei Wu, Yu Zheng, Jingyun Yuan, Mingfang Zheng. *Journal of Materials Research and Technology*. Volume 32, September–October 2024, Pages 2279–2295.
6. Xiaoling Wang, Xiang Wu, Kang Lu, Jinwen Ye. Influence of cemented carbide substrate microstructure on CVD diamond coating characteristics. *Diamond and Related Materials*. Volume 152, February 2025, 111886.
7. Achieving ultra-low coefficient of friction of FeCoNiW multi-bonded composite coatings by Co-coated WC / Xinyao Li, Xiufang Cui, Yajie Guan, Di Chen, Sen Ma, Ziyu Song, Zhongtao Dai, Litong Feng, Guo Jin, Bingwen Lu. *Tribology International*. Volume 201, January 2025, 110244.

УДК 621.941-229.3:531.133

О.І. Лещенко, к.т.н., доцент

Приазовський державний технічний університет, Маріуполь

ОБРОБЛЕННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ВАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

В машинобудуванні обробка валів, маса яких може досягати кількох тонн, вимагає спеціалізоване обладнання та технологію, як правило, орієнтовану на дрібносерійне або одиничне виробництво.

Найбільш відповідальним і трудомістким етапом виготовлення валів цього типу є налагодження на операцію механічного оброблення, а саме встановлення лінії центрів, що безпосередньо пов'язані з мінімальним припуском на заготовку валу.

Відходять у минуле, коли застосовуються для цієї мети розмітки, косинці, струни та індикатори годинного типу, хоча останні мають переваги – роботи виконуються при встановленні на верстаті заготовки.

В даний час найбільш перспективна технологія точного базування заготовки в центрах верстата – лазерна, за допомогою якої досягається на етапі налагодження на

операцію (рис. 1) узгодження координатних систем верстата (СКВ - $X_{BT} Z_{BT}$), інструменту (СКІ - $X_I Z_I$) та деталі (СКД - $X_D Z_D$). При цьому формування поверхні деталі розглядається через взаємодію цих координатних систем – в останній власне і виконується контроль геометричних параметрів деталі.

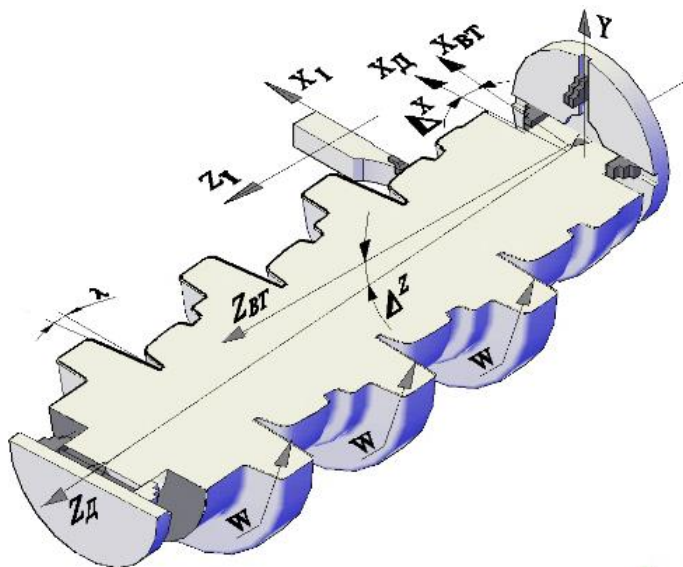


Рис. 1. Базування валка у центрах на вальцетокарному верстаті з ЧПК.

*Кутів відхилення Δ^X і Δ^Z осі деталі Z_D від осі шпинделя Z_{BT} у
вертикальній та горизонтальній площинах*

Слід зазначити, що налагодження верстата на операцію є основою для всього ланцюга формування поверхонь деталі. Разом з тим теоретично, установка валу при токарній обробці по центрових отворах дозволяє поєднати вісь деталі з віссю шпинделя, тобто звести до нуля похибки форми від розбіжності координатних осей Z деталі (СКД) і верстата (СКВ). Однак досягти такого поєднання, особливо при обробці великогабаритних валків практично неможливо через ряд причин:

- відхилення від співвісності центрових гнізд та кромкового торкання центрів із центровими отворами призводить до того, що при закріпленні валу осьова сила заднього центру зсуває заготовку в поперечному напрямку що до осі шпинделя. Наприклад: при відхиленні від співвісності центрових отворів в 0.1 мм і довжини твірної гнізда 5 мм, зсув може досягнути 0.05 мм;
- похибка кутів центрових отворів та конуса центрів;
- нормоване усунення осі шпинделя (осі Z_{CT} верстата) щодо осі заднього центру.

Також встановлено, що при затиску пінолі заднього центру верстата, його зміщення в горизонтальній та вертикальній площинах, виміряне індикаторами, закріпленими на корпусі задньої бабки, може складати 0.004-0.008 мм.

Усі перелічені вище причини активізують свій вплив на точність базування деталі під дією значної сили тяжіння в процесі стропління валків і осьового зусилля гідрозатиску заднього центру.

При токарній обробці на верстатах з УЧПУ програмні переміщення супорта відпрацьовуються приводами подач у координатній системі верстата, де площина $X_{BT}Z_{BT}$ визначається векторами поздовжнього та поперечного переміщень супорта, при цьому вісь Z_{BT} збігається з віссю шпинделя. Однак внаслідок збурювальних впливів, що супроводжують процес різання можуть виникнути похибки початкового базування від різних факторів, таких як зазори в кінематичних парах, демпфування з плином часу властивості гідрозатиску заднього центру і таке інше.

У цьому випадку можуть з'явитися кутові відхилення від співвісності осі верстата та осі валу високої жорсткості у двох площинах: горизонтальній Δ^X та вертикальній Δ^Z відповідно.

Обчислювальні можливості і обсяг пам'яті сучасних CNC систем управління верстатами дає можливість побудову керуючих програм для верстатів з ЧПК на основі параметричних модулів, для яких фактичні значення формальних параметрів змінюється у динамічному режимі в залежності від стану системи на даному інтервалі траєкторії переміщення.

В даному випадку в основу вивчення процесу, що підлягає моделюванню покладено можлива поява статичної похибки, пов'язаної з точністю базування валка рейкового прокату в центрах (рис. 1).

Якщо розглядати ідеальні умови процесу, коли вісь верстата Z_{BT} – вісь шпинделя і вісь деталі Z_d мають співвісність, то інструмент при обертанні заготовки формує циліндричні, конічні, тороїдальні або сферичні поверхні. Однак в даному випадку розглядається реальна поверхня деталі, що отримана шляхом обертання твірних поверхонь, заданих в X_dZ_d навколо осі Z_{BT} , поверненої на кути статичної похибки Δ^X і Δ^Z .

Формоутворення поверхонь валу відбувається вершиною різця, що переміщується за еквідистентой програмної траєкторії на відстані вектору вильоту інструменту. Тоді математична модель, що відображає з достатньою точністю механізм утворення похибок поверхонь, отриманих точінням можна представити рівняннями в СКД, виду:

– при лінійній інтерполяції:

$$\left[\frac{kX}{kZ} \left[Z - X0 + L_x(\Delta^X) \right] \right]^2 + \left[\frac{kX}{kZ} \left[X - Z0 + L_z(\Delta^Z) \right] \right]^2 - (X^2 + Z^2) = 0$$

– при круговій інтерполяції:

$$M_x^2 X^2 + M_z^2 Z^2 + M_x \cdot X - M_z \cdot Z + (Zc + L_x (\Delta^x))^2 + (Xc + L_z (\Delta^z))^2 - r^2 = 0,$$

де X, Z – поточні координати;

$X0, Z0$ – координати початкової точки твірної;

Zc, Xc – координати центру дуги твірної; r – радіус дуги;

Δ^x, Δ^z – кутові похибки осевих напрямків статичної налагодження;

$kX, kZ, M_x^2, M_{xy}, M_x, M_z$ – коефіцієнти та матриці, що враховують віджимання різця від виробу по нормалі до поверхні оброблення, залежно від контактної податливості та координат точки докладання горизонтальної складової зусилля різання.

На початковому етапі проведення робіт було зроблено аналіз геометричної точності валків за допомогою точкових діаграм даних вимірювання відхилення кута нахилу λ підосви формоутворюючого струмка валка W , кожного з трьох рейкових калібрів.

Графічно-аналітичні дані діаграм показали, що на всіх трьох струмках валка процес формоутворення нестійкий, центри налагодження та розсіювання розмірів мають значні коливання, котрі виходять за межі поля допуску.

Аналіз геометрії валка за допомогою створеної моделі дозволив виділити домінуючі фактори, що впливають на точність поверхонь валка і провести ряд робіт, спрямованих на зниження похибки оброблення.

Запропонована математична модель відкриває можливість створення параметричних програм які оптимізують не тільки структуру самої програми, але і якісні параметри обробленої поверхні. Такий підхід дозволяє з часом побудувати бібліотеку модулів корекцій різного типу, що значно прискорить та знизить витрати на розробку нових програм.

Слід також зазначити, що параметризація програм відкриває шлях до створення асоціативних зв'язків між геометричними характеристиками оброблюваної поверхні та значеннями кінематичних параметрів режимів різання.

Список літератури:

1. Бондаренко С.Г. Основи технології машинобудування. ЧДТУ, 2005. – 567 с.

УДК 681.5:621.7:004.9

Д.І. Луценко, здобувач 1-го курсу магістратури,
спеціальність G9 Прикладна механіка

В.А. Дербаба, завідувач кафедри технологій машинобудування
та матеріалознавства, к.т.н., доцент

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ СИМЕТРИЧНИХ ПРОФІЛІВ НА ТОКАРНО-ФРЕЗЕРНОМУ ВЕРСТАТІ З ЧПК

Сучасні вимоги до виробництва прецизійних деталей, зокрема в медичній індустрії, вимагають застосування високотехнологічного обладнання, здатного інтегрувати точіння та фрезерування в єдиному циклі. У статті проведено порівняльний аналіз двох технологічних підходів до фрезерування складних симетричних профілів на торцях малорозмірних деталей на токарно-фрезерних верстатах поздовжнього точіння швейцарського типу. Об'єктом дослідження є розробка та порівняльний аналіз технологічних стратегій фрезерування чотирипелюсткового профілю (рис. 1) на торці деталі з використанням кінцевої діаметром 1 мм, що зафіксована у позиції інструменту T11.

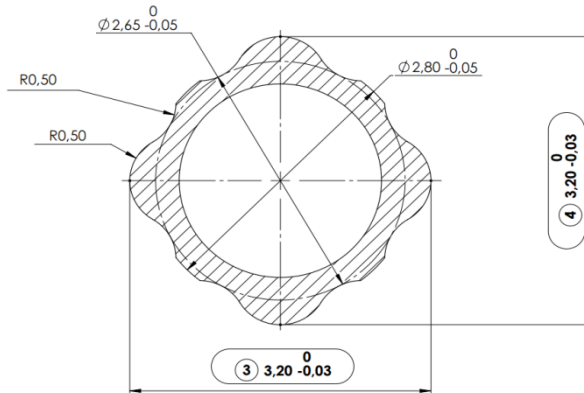


Рис. 1. Фрагмент креслення

На верстаті Sincom L12 (2M10) кінцева фреза встановлюється в кутовий приводний блок на поперечному супорті, що забезпечує співвісність осі фрези з віссю заготовки (рис. 2) [1].

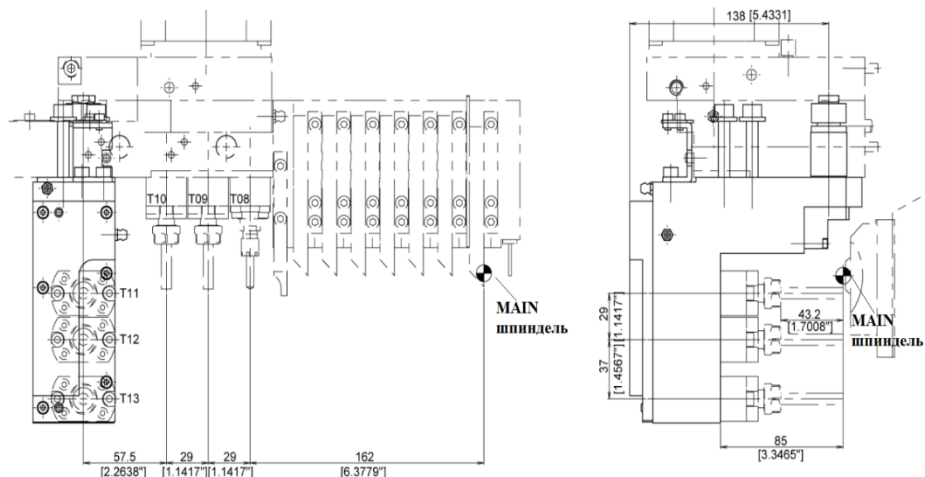


Рис. 2. Кінематична схема комплектування верстата Sincom L12 2M10 для «MAIN шпиндель»

Варіант 1: Фрезерування у площині X-Y, де деталь є нерухомою. Ця стратегія базується на керуванні двома лінійними осями X та Y в площині G17, при цьому вісь C визначається та фіксується (M18 C0) [2]. Обробка складної криволінійної траєкторії вимагає постійної синхронізації X та Y осей, де контур профілю необхідно апроксимувати великою кількістю лінійних сегментів (G1), які проходять через ключові точки модуляції радіуса. Фрагмент коду для цього типу обробки СЕГМЕНТУ 1 (від 0° до 90°):

```
G1 X3.200 Y0.000 (R=1.60)
G1 X2.586 Y0.536 (R=1.40)
G1 X1.874 Y0.937 (R=1.325)
G1 X1.072 Y1.293 (R=1.40)
G1 X0.000 Y1.600 (R=1.60)
```

Головним недоліком даної стратегії є зниження точності обробленої поверхні. Фізично, формування криволінійної траєкторії вимагає безперервної взаємодії керуючих сигналів сервоприводів осей X-Y. Будь-яка неточність або динамічна затримка у ланцюгу "керуючий сигнал – сервопривід – привідний механізм" призводить до похибки позиціонування по вектору радіуса, що є критичним для поверхонь з високими допусками. Крім того, з точки зору налагодження, одночасне керування двома лінійними осями для коригування складної криволінійної траєкторії є ускладненим для оператора.

Альтернативним варіантом є фрезерування з обертанням заготовки X-C. Ця стратегія використовує функцію G12.1 (Milling Interpolation) для активації режиму, де вісь C (заготовка) контролюється як лінійна координата, а вісь X

забезпечує радіальну подачу. Контур формується синхронізованим обертанням заготовки та модуляцією радіальної координати X [2].

G1 X3.200 C0.0 (R=1.60)
G1 X2.800 C22.5 (R=1.40)
G1 X2.650 C45.0 (R=1.325)
G1 X2.800 C67.5 (R=1.40)
G1 X3.200 C90.0 (R=1.60)

Ця стратегія фрезерування є технологічно досконалішою для обробки радіально-симетричних контурів. Її ефективність базується на спрощенні кінематики керування та підвищенні жорсткості динамічної системи. Траєкторія модуляції контуру описується зміною лише однієї лінійної координати X (радіус) та обертової координати C (кут), яка керується як лінійна вісь. Таке розділення функцій між осями забезпечує значне зменшення обсягу керуючого коду і, відповідно, мінімізує ймовірність програмних помилок. Підвищення точності обробки обумовлено тим, що для системи ЧПК значно легше контролювати та стабілізувати одну лінійну координату X в парі з високоточним електронним перетворювач кутових переміщень осі C, аніж синхронізувати дві незалежні лінійні осі X та Y як це вимагалось у попередньому методі. Оскільки основна модуляція профілю здійснюється вздовж радіальної осі X яка, як правило, має вищу статичну та динамічну жорсткість порівняно з віссю Y, вдається ефективно мінімізувати пружні відхилення інструменту, що підвищує фактичну точність профілю. При налагодженні верстата цей метод надає відчутну перевагу, оскільки керування однією лінійною віссю X та ротаційною віссю C значно спрощує процес внесення технологічних коригувань (наприклад, компенсації зносу інструменту) для оператора.

Список літератури:

1. Citizen Machinery Co., Ltd. *Instruction Manual Cincom L12-2M10*. Citizen Machinery.
2. *Fanuc 31i/32i-B Series CNC Milling Control System Programming Manual*. Fanuc Corporation, 2018.
3. V. Ruban, V., Derbaba, O., Bohdanov, & Y. Shcherbyna. (2023). OPTIMIZATION OF PRODUCT PROCESSING MODES IN MODELING AND PROGRAMMING OF MACHINING ON MACHINE TOOLS WITH PROGRAM CONTROL. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, (72), 222-238. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.222>.
4. Дербаба, В.А., Григоренко, В.У. & Рубан, В.М. (2023). Розвиток елементів комп'ютерного програмування у складових наскрізних технологіях виготовлення механічного обладнання в машинобудуванні. *Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка»*, (72), 212-221. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.212>

УДК 621.865.85

А.В. Мажара, здобувачка вищої освіти,

В.А. Мажара, к.т.н., доцент

Центральноукраїнський національний технічний університет

(м. Кропивницький)

ВИКОРИСТАННЯ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ В УМОВАХ ДРІБНОСЕРІЙНОГО ТИПУ ВИРОБНИЦТВА

Сучасне машинобудування характеризується прагненням до підвищення ефективності виробничих процесів, зниження собівартості продукції та забезпечення її конкурентоспроможності. В умовах масового та крупносерійного виробництва використання промислових роботів для автоматизації завантаження та вивантаження металообробного обладнання вже стало стандартом, демонструючи значні економічні переваги. Однак, у дрібносерійному виробництві, де номенклатура виробів широка, обсяги партій невеликі, а методи обробки часто змінюються, доцільність впровадження робототехнічних комплексів залишається предметом дискусії. Традиційно вважалося, що гнучкість роботів не компенсує високі початкові інвестиції та складність їх переналаштування для невеликих партій. Проте, з розвитком технологій, появою більш гнучких, інтуїтивно програмованих та доступних роботів, а також систем технічного зору, ця парадигма починає змінюватися. Метою даної роботи є комплексна оцінка техніко-економічної доцільності інтеграції промислових роботів у процеси завантаження металообробного обладнання саме в умовах дрібносерійного виробництва.

У контексті дрібносерійного виробництва, головними викликами завжди були високі витрати на переналагодження та програмування. В дослідженнях [1] та [2] пропонується рішення для оптимізації траєкторій роботів та зменшення часу переналагодження через офлайн-програмування та симуляцію. Однак ці підходи вимагають значних інженерних ресурсів.

Останні роки відзначаються появою нових концепцій, таких як "співпрацюючі роботи" (collaborative robots), які, за даними [3], призначені для безпечної взаємодії з людиною та легкого перепрограмування. Це відкриває нові перспективи для їх використання у дрібносерійному виробництві. Праці [4] та [5] також акцентують увагу на економічному моделюванні та оптимізації інвестицій у робототехніку, проте часто не враховують всіх нюансів дрібносерійних партій деталей.

Таким чином, тенденції сьогодення демонструють перехід від жорстких автоматизованих систем до гнучких, адаптивних рішень, що потенційно відповідають потребам дрібносерійного виробництва. Однак, комплексного аналізу конкретних економічних моделей та методик оцінки доцільності використання промислових роботів для завантаження металообробного обладнання в умовах дрібносерійного виробництва, все ще бракує.

Оцінка доцільності використання промислових роботів у дрібносерійному виробництві вимагає розгляду як технічних, так і економічних аспектів.

Технічні аспекти:

1. Гнучкість та переналадження. Ключовою вимогою дрібносерійного виробництва є швидке та легке переналадження. У сучасних роботах використовується інтуїтивне програмування "навчанням з руки" (lead-through programming), що значно скорочує час переналадження порівняно з традиційними промисловими роботами, що потребують значних навичок програмування.

2. Точність та повторюваність. Роботи забезпечують високу точність позиціонування та повторюваність, що є критичним для якісного завантаження металообробного обладнання. Це дозволяє зменшити кількість браку, спричиненого людським фактором та забезпечує стабільність процесу.

3. Автономність та надійність. Роботи можуть працювати 24/7 без втоми, що підвищує коефіцієнт використання обладнання. Сучасні промислові роботи мають високу надійність та тривалий термін служби, що мінімізує час простою на обслуговування.

4. Інтеграція з периферійними системами. Для ефективної роботи в дрібносерійному виробництві робот повинен бути легко інтегрований з іншим обладнанням (верстати з ЧПК, допоміжні пристрої, системи контролю якості) та виробничими інформаційними системами. Це забезпечується відкритими архітектурами контролерів та стандартними протоколами зв'язку.

5. Системи технічного зору та датчики. Впровадження систем технічного зору (2D/3D камери) дозволяє роботу розпізнавати різні деталі, визначати їхнє положення та орієнтацію, що усуває необхідність у точній подачі заготовок та спрощує адаптацію до змін у номенклатурі. Тактильні датчики можуть контролювати зусилля при затисканні деталі, запобігаючи пошкодженню.

Економічні аспекти:

1. Початкові інвестиції. Включають вартість самого робота, захватного пристрою, програмного забезпечення та навчання персоналу. Для дрібносерійного виробництва критичним є обґрунтування цих витрат.

2. Операційні витрати. До них відносяться витрати на електроенергію, технічне обслуговування, запасні частини, а також витрати на програмістів та операторів.

3. Зниження прямих витрат на оплату праці. Робот замінює працівника на монотонних та часто небезпечних операціях, що дозволяє перерозподілити робочу силу на більш кваліфіковані завдання.

4. Збільшення продуктивності та коефіцієнта використання обладнання [6]. Завдяки безперервній роботі робота, верстати можуть працювати більше годин на добу, що призводить до зростання випуску продукції без додаткових інвестицій в основне обладнання.

5. Гнучкість та швидкість реагування на ринок. Можливість швидкого переналадження дозволяє оперативно реагувати на зміни номенклатури

виробів відповідно до попиту ринку, що є важливою конкурентною перевагою для дрібносерійного виробництва.

6. Термін окупності інвестицій. Для дрібносерійного виробництва термін окупності може бути довшим, ніж у масовому, тому важливо використовувати методики розрахунку, що враховують не тільки пряму економію, а й непрямі переваги (гнучкість, якість, безпека). Окупність може бути досягнута за рахунок зниження витрат на оплату праці, зменшення браку, збільшення обсягів виробництва за той самий час та підвищення якості продукції.

Тож для аналізу можливості використання промислових роботів треба використовувати багатофакторну модель оцінки, що включає:

1. Технічний аналіз. Оцінка сумісності робота з наявним обладнанням, необхідність модифікацій, складність інтеграції, вимоги до простору.

2. Економічний аналіз. Розрахунок терміну окупності з урахуванням початкових інвестицій та операційних витрат, а також потенційної економії та прибутку від зростання продуктивності та якості.

3. Оцінка гнучкості. Аналіз часу та вартості переналагодження робота для різних виробів, оцінка впливу на час виконання замовлень.

4. Аналіз ризиків. Визначення потенційних ризиків, пов'язаних з впровадженням (технічні збої, проблеми з програмуванням, опір персоналу) та розробка стратегій їх мінімізації.

5. Якісний аналіз. Оцінка покращення умов праці, іміджу компанії, можливості залучення кваліфікованих кадрів.

Особливу увагу слід приділити вибору типу робота. Для дрібносерійного виробництва важливою складовою є стандартизація захватних пристроїв та систем подачі заготовок, що також дозволяє скоротити час на переналагодження.

Виходячи з проведеного аналізу, можна зробити висновок, що впровадження промислових роботів для завантаження металообробного обладнання в умовах дрібносерійного виробництва є доцільним, але вимагає ретельного техніко-економічного обґрунтування та виваженого підходу до вибору обладнання. Основні переваги, що роблять таке впровадження перспективним:

- підвищення продуктивності та ефективності використання обладнання;
- покращення якості продукції та зниження браку;
- зниження операційних витрат у довгостроковій перспективі;
- покращення умов праці та безпеки.

Для успішного впровадження необхідно враховувати специфіку конкретного виробництва, проводити детальну оцінку вартості життєвого циклу рішення, а також забезпечити належну підготовку персоналу. В умовах постійного розвитку технологій та конкуренції, інвестиції в роботизацію дрібносерійного виробництва стають не просто опцією, а стратегічною необхідністю для забезпечення сталого розвитку та збереження конкурентоспроможності підприємств.

Список літератури:

1. M.C. Kim, D.J. Kim and S.K. Lee. Optimal trajectory generation for a robot manipulator using genetic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 20, no. 5, pp. 583-591, 2009.
2. Павленко І.І., Мажара В.А. Вплив конструктивних особливостей виконання порталних роботів на продуктивність РТК // *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. – 2011. – №. 41 (2). – С. 121-126.
3. B. Siciliano and O. Khatib. *Springer Handbook of Robotics*. Springer, 2016.
4. B. Atlason, R. G. Johnson and B. J. Rant. Economic justification of robotics: A framework for manufacturing. *International Journal of Production Economics*, vol. 92, no. 1, pp. 31-41, 2004.
5. K. Fukunaga, T. Ohsumi and T. Mitsui. A method for evaluating the economic benefit of introducing industrial robots into small-scale production. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, pp. 2970-2975.
6. Павленко, І.І. Структура продуктивності верстатних роботизованих комплексів / І.І. Павленко, В.А. Мажара // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр.* – Краматорськ: ДДМА, 2005. – Вип. 17. – С. 131–137.

УДК 621.9.02:621.7.04

М.П. Мазур, д.т.н., професор,

В.В. Милько, к.т.н., доцент,

В.П. Ткачук, к.т.н., доцент

Хмельницький національний університет

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ІНТЕГРАЦІЇ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА МЕХАНІЧНОГО ПОСТ ОБРОБЛЕННЯ

Виготовлення складних за формою та високоточних деталей із заданими характеристиками поверхні за допомогою одного технологічного процесу залишається складним і багатоаспектним завданням сучасного машинобудування. У більшості випадків виробниці потребують проведення післяоброблення (post-processing) та переміщення між різними верстатами, що супроводжується додатковими витратами часу, підвищенням трудомісткості та зниженням точності виготовлення. Особливо суттєвими такі обмеження є під час виробництва мікро- та нанорозмірних компонентів, де допуски й якість поверхні мають критичне значення.

У цьому контексті гібридне виробництво (Hybrid Manufacturing, НМ) розглядається як один із найперспективніших напрямів розвитку технологій оброблення матеріалів. Гібридне виробництво являє собою інтегрований

технологічний підхід, який поєднує два або більше процесів – найчастіше адитивне виробництво (Additive Manufacturing, AM) та субтрактивне виробництво (Subtractive Manufacturing, SM) – у межах єдиного технологічного комплексу. Така інтеграція забезпечує синергійний ефект, що дозволяє реалізувати переваги обох методів: геометричну свободу адитивних процесів і точність субтрактивних. Це, у свою чергу, забезпечує виготовлення складних, композиційних та індивідуалізованих виробів із високою точністю, покращеними властивостями поверхні та зменшеною тривалістю виробничого циклу. Додатковою перевагою є усунення необхідності транспортування деталей між різними обладнаннями, що знижує похибки базування та ризик пошкодження заготовок.

Водночас, попри суттєві технологічні переваги, реалізація гібридного виробництва залишається складним інженерним завданням. Ключовими проблемами є інтеграція сенсорних систем і модулів контролю, здатних у реальному часі виявляти дефекти, оцінювати параметри процесу та здійснювати автоматичне коригування або відновлення виробів відповідно до заданих критеріїв якості. Незважаючи на те, що сучасні гібридні системи демонструють значний потенціал і швидкий темп розвитку, більшість із них ще не забезпечують повноцінного адаптивного керування на основі інтелектуальних алгоритмів (AI/ML) та зворотного зв'язку від вбудованих сенсорів.

Гібридне виробництво стрімко еволюціонує у трансформаційний напрям сучасного інженерного виробництва, поєднуючи високу точність методів механічного оброблення із гнучкістю та інноваційністю адитивних технологій. Попри значний прогрес, більшість наявних гібридних систем усе ще не володіють повною функціональністю адаптивного керування в реальному часі.

Для забезпечення реальної адаптивності виробничого процесу такі системи мають використовувати широкий спектр сенсорних даних – зокрема, стереокамери, лазерні вимірювальні системи, датчики переміщення та температури. Їх необхідно обробляти автоматично з метою самокорекції параметрів оброблення та досягнення оптимальних технологічних результатів у режимі онлайн.

Водночас значна частина сучасних гібридних комплексів залишається лише частково інтегрованою у концепції Індустрії 4.0 та 5.0, не використовуючи повною мірою потенціал Інтернету речей (IoT), автоматизації даних, хмарних обчислень та інтелектуального прийняття рішень. Інтеграція цих цифрових технологій створює значний резерв для подальшого розвитку гібридного виробництва.

У перспективі гібридні виробничі системи все більше орієнтуватимуться на використання розумних матеріалів, концепції 4D-друку та тісної взаємодії між людиною і машиною. Завдяки впровадженню штучного інтелекту та доповненої реальності роль оператора поступово трансформуватиметься – від безпосереднього виконання технологічних операцій до контролю, інноваційного проектування та креативної взаємодії з виробничою системою. Така співпраця дозволить звільнити людину від рутинних завдань та розкрити нові рівні

індивідуалізації, функціональності та ефективності у проектуванні та виготовленні деталей.

Список літератури:

Hybrid Manufacturing Processes Used in the Production of Complex Parts: A Comprehensive Review Authors: by Naiara P. V. Sebbe, Filipe Fernandes, Vitor F. C. Sousa and Francisco J. G. Silva Link: <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/11/1874>
Габова, О. В. Аналіз сучасного стану гібридного адитивного виробництва та перспективного впровадження в Україні / О. В. Габова // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського.Серія: Технічні науки : науковий журнал / гол.ред.Кисельов В. - Київ : ВД"Гельветика", 2023. - № 1, Т. 34(73). - С.1-7

УДК 621.19.41

П.П. Мельничук, д.т.н., професор,
Державний університет “Житомирська політехніка”

Р.С. Турманідзе, д.т.н., професор,
Грузинський технічний університет (м. Тбілісі Грузія)

НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ ВЕРСТАТІВ

Важливими проблемами надійності верстатів є визначення фактичного її рівня в процесі експлуатації, визначення встановлення найбільш слабких і ненадійних вузлів, а також аналіз недоліків їх роботи. При цьому відмінна особливість і основна позитивна якість експериментального методу визначення надійності – точність її оцінки, яка враховує вплив умов реальної експлуатації. Але обмеженість статистичних даних, яка є наслідком складностей організації спостережень в процесі експлуатації верстатів, призводить до того, що вказати одне точне і надійне значення оцінювання параметра надійності неможливо. Тому існує деяка область або межі можливих значень показників надійності. Оскільки вузли верстатів відновлюються або ремонтуються, то при експлуатації вони можуть відмовити більше одного разу і характеризуються напрацюванням в годинах, циклах або об'ємом виконаної ними роботи. При цьому напрацювання є випадковою величиною між двома послідовними відмовами, а якщо розглядаються роботи верстатів протягом заданого напрацювання, то випадковим є число відмов у цьому періоді. До того ж випадкові величини можуть бути дискретними, зокрема число вузлів верстата, що відмовили.

Випадкові величини, які зустрічаються в задачах надійності, можуть мати одиничні розподілення ймовірності: безперервне (нормальне, експоненціальне, Вейбулла), дискретне (Пуассона).

Нормальним розподілом, як правило, характеризується сумарне

напрацювання верстатів до капітального ремонту при малому коефіцієнті варіації ($Kn \leq 1/3$), коли вірогідність отримання негативних значень настільки мала, що нею можна знехтувати. Час відновлення обладнання також наближено розподіляється за нормальним законом. Окрім того, нормальне розподілення можна використовувати при приблизних розрахунках, коли є місце для розподілення Пуассона.

Використання експоненціального закону розподілення для оцінки надійності верстатів дозволяє обійтись відносно нечисельною інформацією про відмови їх вузлів в процесі експлуатації. Але при обмежених експериментальних даних нелегко виявити значне відхилення від умови $\lambda = \text{const}$, навіть якщо і є нестационарність, тоді за перше наближення доцільно приймати теоретичне розподілення як найбільш зручне для обчислення. Розподілення Вейбулла можна використовувати лише для оцінки невідновлюваних вузлів верстатів (підшипників кочення тощо). При простому потоці відмов вузлів, які відновлюються, випадкова їх кількість протягом фіксованого напрацювання описується розподілом Пуассона. Цьому ж розподілу підпорядковується випадкове число відмов вузлів верстатів під час періоду їх припрацювання.

Слід відмітити, що вірогідність безвідмовної роботи як кількісна характеристика надійності має деяку позитивну якість, яка дозволяє ефективно використовувати її на практиці. Вона характеризується змінами в часі, входить до багатьох інших характеристик верстатів, а також необхідна спеціалістам при проектуванні, виробництві, експлуатації, ремонтах тощо. Вона охоплює характерні критерії (відмови, частоту відмов, інтервал часу між відмовами, середнє квадратичне відхилення та інше), які дозволяють оцінювати можливості обладнання.

Їх можна отримувати відносно просто розрахунковим шляхом ще на стадії проектування, спираючись на експлуатаційні дані подібних верстатів. В той же час цій характеристиці притаманні і такі недоліки, як неможливість навіть у вірогідному розумінні обумовити фактичний стан верстата в даний момент часу; незручність для оцінки надійності простих їх елементів; Знаючи тільки її, важко визначити інші кількісні характеристики. Необхідно відмітити, що вірогідність безвідмовної роботи характеризує надійність верстатів, але не може бути ототожненням з нею.

Оскільки надійність і продуктивність верстата тісно пов'язані, їх доцільно розглядати з точки зору фактичного часу роботи обладнання. Але в процесі експлуатації крім регламентованих зупинок мають місце випадки, які виникають через поломки і передчасний знос спряжених деталей, порушення працездатності вузлів та наладки, зниження точності тощо. Ці причини необхідно розглядати з урахуванням умов, в яких працює верстат, а також режимів його експлуатації.

Оцінка оптимальної довговічності верстата дозволяє не тільки вирішити задачу тривалості його доцільного використання, але й своєчасно його замінити новим, що забезпечує також планування виготовлення і ремонту.

Як показали власні дослідження авторів, теоретичне розподілення

надійності роботи вузлів верстата і його довговічності визначається в основному на основі вірогідніших методів дослідження. В своєму виступі на конференції автор викладе характеристики надійності безвідмовної роботи верстатів нормальної і підвищеної точності вітчизняного виробництва.

УДК 621.901

І.М. Невмержицький, студент
Я.П. Коваленко, доктор філософії з прикладної механіки
Державний університет «Житомирська політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ НАНОПОКРИТТІВ ДЛЯ ПРОДОВЖЕННЯ РЕСУРСУ ІНСТРУМЕНТА

Сучасне машинобудування, металообробка та інші галузі промисловості постійно потребують підвищення ефективності та довговічності інструментів. Одним із найрезультативніших шляхів збільшення ресурсу ріжучих, формуютьуючих і вимірювальних інструментів є застосування нанопокриттів. Нанопокриття – це тонкі шари матеріалів, товщина яких зазвичай не перевищує 100 нм, нанесені на поверхню інструмента з метою покращення його експлуатаційних характеристик.

Основна перевага нанопокриттів полягає у поєднанні високої твердості, зносостійкості, термостійкості та хімічної інертності при збереженні необхідної в'язкості основного матеріалу. Завдяки цьому інструменти з нанопокриттями мають значно більший термін служби, меншу силу тертя під час різання та стабільнішу роботу при високих температурах.

Серед найбільш поширених матеріалів для створення нанопокриттів використовують нітриди, карбіди, оксиди та бориди перехідних металів, таких як Ti, Al, Cr, Zr та інші. Найбільш відомими є покриття типу TiN, TiAlN, CrN, AlTiN, ZrN тощо. Вони наносяться методами фізичного (PVD) або хімічного (CVD) осадження з парової фази. Вибір технології нанесення залежить від вимог до інструмента, типу оброблюваного матеріалу та умов експлуатації.

Наноструктуровані покриття мають багатошарову будову, що дозволяє поєднати властивості різних матеріалів. Наприклад, комбінація твердого шару TiAlN із поверхневим оксидним бар'єром Al_2O_3 забезпечує високу термостійкість при обробці матеріалів із високою міцністю. Такі системи ефективно протидіють дифузійному зносу та окисленню інструмента при підвищених температурах.

Важливу роль відіграє також нанорозмірна зерниста структура покриттів. Зменшення розміру зерен до нанометрового діапазону підвищує міцність меж зерен, знижує утворення тріщин і сприяє рівномірному розподілу навантажень. Це призводить до суттєвого підвищення зносостійкості інструмента, особливо при переривчастому різанні або обробці твердих сплавів [1, 2].

Дослідження показують, що використання нанопокриттів може збільшити термін служби ріжучого інструмента у 2-5 разів порівняно з непокритими аналогами. Крім того, зменшується споживання мастильно-охолоджувальних рідин, що позитивно впливає на екологічність процесу та знижує виробничі витрати.

Перспективи розвитку технологій механічної обробки пов'язані насамперед з:

- вдосконаленням теорії механічної обробки на основі уявлень про закономірності процесів;
- створенням системи вибору матеріалу інструменту з урахуванням структурного стану матеріалу виробу;
- розширенням гами композитів і покриттів для оснащення інструментів, які здатні адаптуватися до умов навантаження в зоні обробки;
- розробленням smart-інструментів;
- розширенням номенклатури виробництва інструментів, у тому числі багатолезових;
- розробленням 3D-технологій формоутворення інструментів.

Знання закономірностей процесів в зоні обробки, врахування принципів технологічного забезпечення якості, дозволяють розробляти високопродуктивні технології обробки виробів, формувати в поверхневому шарі виробів стан, який забезпечує їм необхідні експлуатаційні властивості. З огляду на це, проблему вдосконалення процесів механічної обробки слід розглядати, насамперед, як актуальне матеріалознавче завдання. Отже, застосування нанопокриттів є одним із найефективніших способів продовження ресурсу інструмента. Вони забезпечують високу зносостійкість, термостабільність, стійкість до окислення та корозії, що дозволяє підвищити продуктивність виробництва й економічну ефективність обробки матеріалів. Подальші дослідження у цій сфері спрямовані на вдосконалення складу, структури та технології нанесення нанопокриттів для досягнення максимальної довговічності інструментів у різних умовах експлуатації.

Список літератури:

1. Клименко С.А., Копейкина М.Ю., Чумак А.Ю. Технологічні можливості інструментів, оснащених композитами на основі кубічного нітриду бора. Київ. 2017. С. 54.
2. Клименко С.А., Манохин Ю.А., Копейкина М.Ю., Чумак А.А., Мельничук Ю.А. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/66395/1/Klymenko_Klymenko_Manokhyn_JES_2017_1_4_F8-F14.pdf

УДК 621.7

Р.О. Носов, аспірант
В.М. Рубан, к. т. н., доц.
НТУ «Дніпровська політехніка»

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ВИРОБІВ

Сучасне машинобудування характеризується зростанням складності конструкцій та підвищенням вимог до точності, надійності й ефективності технологічних процесів. Особливо це стосується галузей авіаційної, космічної, оборонної та медичної техніки, де широко застосовуються вироби складної просторової геометрії з високими експлуатаційними характеристиками. Традиційні технології формоутворення — лиття, штампування, механічна обробка — не завжди забезпечують необхідну точність, функціональність або економічну доцільність при виготовленні деталей складних форм, зокрема з важкооброблюваних матеріалів [1].

Головним дефектом є нерівномірність товщини стінки при класичному варіанті отримання заготовки (рис. 1), що й призводить до малої жорсткості системи СПД під час обробки, великих коливань, биття. Сукупність цих факторів призводить до погіршення якості поверхні, перевитрат матеріалу, великої трудомісткості операцій механічної обробки [2].

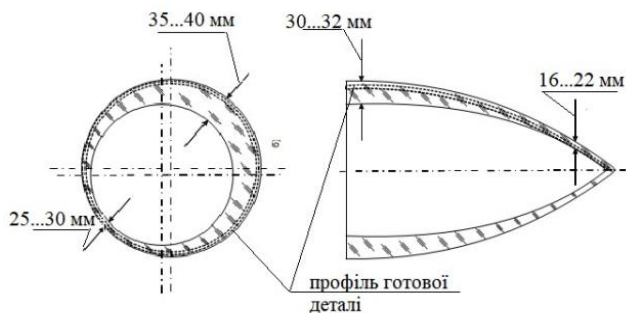


Рис. 1. Заготовка отримана литтям

Одним із найперспективніших напрямів розвитку технологій виробництва є адитивне виробництво (Additive Manufacturing, AM), яке полягає у створенні деталей шляхом пошарового нанесення матеріалу безпосередньо з цифрової 3D-моделі [3]. На відміну від традиційних методів, що передбачають видалення зайвого матеріалу, адитивне виробництво забезпечує виготовлення виробів практично будь-якої складності, включно з внутрішніми порожнинами,

каналами охолодження, решітчастими структурами або функціонально градієнтними зонами [4].

Основними технологіями адитивного виробництва для промислових застосувань є селективне лазерне спікання (SLS), селективне лазерне плавлення (SLM), електронно-променеве плавлення (EBM), друк екструзією розплаву (FDM), стереолітографія (SLA) та інші [4]. Для виготовлення металевих і керамічних виробів найчастіше застосовують SLS і SLM, які дозволяють формувати деталі з точністю 20–40 мкм та забезпечують високу щільність і механічну міцність. Такі технології вже успішно використовуються для виготовлення корпусів двигунів, елементів ракетно-космічних систем, турбінних лопаток і легких решітчастих конструкцій [5].

Серед головних переваг адитивних технологій можна відзначити:

- мінімізацію матеріальних відходів, оскільки матеріал використовується лише там, де це потрібно;
- зменшення кількості технологічних операцій, зокрема обробки, складання або зварювання;
- скорочення термінів проектування і виготовлення завдяки відсутності необхідності у прес-формах або штампах;
- можливість швидкого виготовлення дослідних зразків і малих серій виробів без значних витрат;
- гнучкість виробництва, що дозволяє оперативно вносити зміни до конструкції виробу без зміни технологічної оснастки [6].

Адитивне виробництво, незважаючи на численні переваги, має ряд суттєвих обмежень, які слід враховувати при його впровадженні у промислове виробництво. Однією з головних проблем є неоднорідність фізико-механічних властивостей виробів у різних напрямках, що обумовлено послідовним пошарованим нанесенням матеріалу. Це призводить до анізотропії, коли ділянки деталі, виготовлені у різних площинах, мають різну щільність, міцність та твердість. Внутрішні дефекти, такі як пористість, тріщини або неповне спікання порошку, можуть суттєво знижувати експлуатаційні характеристики деталей, створювати концентрації напружень і підвищувати ризик руйнування, особливо у тонкостінних або складнопрофільних елементах.

Ще одним серйозним недоліком є виникнення залишкових напружень і деформацій у процесі друку через нерівномірне нагрівання та швидке охолодження шарів матеріалу. Це часто призводить до викривлень, зміни геометрії деталі та необхідності додаткової термообробки. Значною проблемою залишається обмеженість матеріалів, придатних для АМ. Не всі метали, полімери чи кераміки можна ефективно використовувати в адитивних технологіях, а отримання порошків необхідної чистоти і гранулометричного складу для спеціалізованих сплавів потребує значних витрат.

Швидкість виробництва великих деталей за допомогою АМ часто є нижчою порівняно з традиційними методами, такими як лиття чи штампування, оскільки нанесення матеріалу відбувається пошарово, а час виготовлення пропорційно збільшується з розміром виробу. Крім того, практично всі деталі, виготовлені

методом АМ, потребують додаткової механічної обробки для забезпечення геометричної точності та потрібних параметрів шорсткості поверхонь, що підвищує трудовитрати та час виробництва.

Високі капітальні та експлуатаційні витрати є ще однією перешкодою для широкого впровадження АМ. Вартість обладнання, систем фільтрації та безпеки, а також спеціалізованих матеріалів значно перевищує витрати на традиційні технології. Контроль якості виробів також залишається складним, оскільки стандартні методи вимірювань не завжди дозволяють оцінити внутрішні структури або порожнини, що потребує застосування дорогих методів неруйнівного контролю, таких як рентгенографія або комп'ютерна томографія [8].

Ситуацію ускладнює відсутність єдиних стандартів для багатьох процесів АМ, що ускладнює сертифікацію продукції, особливо для авіаційної та медичної галузей. Енергоспоживання адитивного виробництва є високим, а порошкові матеріали можуть бути токсичними або вибухонебезпечними, що вимагає додаткових заходів безпеки та утилізації залишків. Усі ці фактори роблять необхідним комплексний підхід до використання адитивного виробництва, включаючи поєднання його з традиційними технологіями, удосконалення процесів і контроль якості на кожному етапі [8].

Особливо актуальним є питання забезпечення точності розмірів і геометрії поверхонь при виготовленні деталей із тонкостінними або складнопрофільними елементами, які схильні до деформацій у процесі термічного навантаження.

Використання гібридних систем (наприклад, поєднання SLM-друку з фрезеруванням або шліфуванням на верстатах з ЧПК) дозволяє досягти високої точності посадочних поверхонь і покращити параметри шорсткості. Такий підхід відкриває новий рівень технологічної ефективності – адитивне формоутворення використовується для створення складних об'ємних структур, а механічна обробка завершує процес формування точних елементів конструкції. Особливої уваги заслуговують адитивні технології з металевими порошками (наприклад, титановими, нікелевими або сталевими сплавами), які дозволяють виготовляти високонавантажені деталі для авіакосмічної техніки, де маса та міцність відіграють критичну роль. Використання порошків із контрольованим гранулометричним складом і вдосконалення параметрів лазерного випромінювання забезпечують стабільну якість виробів і зменшення кількості дефектів.

У сучасних дослідженнях активно розвиваються напрями, пов'язані з моделюванням процесів адитивного формування, розробленням адаптивних систем керування та вдосконаленням складу порошкових матеріалів. Значну увагу приділяють також стандартизації параметрів якості та розробці єдиних метрологічних підходів для контролю продукції, виготовленої адитивними методами.

Отже, адитивне виробництво є не просто альтернативою традиційним технологіям, а одним із ключових напрямів трансформації промисловості. Його впровадження дає змогу зменшити собівартість виготовлення, підвищити точність і функціональність складнопрофільних виробів, а також розширює

конструкторські можливості при створенні нових типів техніки. Перспективи розвитку цього напрямку пов'язані з подальшою інтеграцією у виробничі системи, використанням штучного інтелекту для оптимізації параметрів друку та розвитком гібридних технологічних комплексів, які поєднують адитивне й субтрактивне виробництво.

Список літератури:

1. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer, 2021. 684 p.
2. Носов Р.О. Шляхи підвищення ефективності виготовлення спеціальних виробів типу тонкостінних оболонок складної геометричної форми з важкооброблюваних конструкційних матеріалів: Магістерська робота. – ДонНТУ, 2024.
3. ASTM F2792-12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. – ASTM International, 2012.
4. Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. // Composites Part B: Engineering, 2018, Vol. 143, pp. 172–196.
5. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D. et al. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. // Computer-Aided Design, 2015, Vol. 69, pp. 65–89.
6. Frazier W. E. Metal Additive Manufacturing: A Review. // J. Mater. Eng. Perform., 2014, Vol. 23(6), pp. 1917–1928.
7. 3D Printed Rockets: How New Manufacturing is Transforming Spacecraft Design. – Tomorrow Bio, 2023.
8. Thompson M. K., Moroni G., Vaneker T. et al. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. // CIRP Annals, 2016, Vol. 65(2), pp. 737–760.

УДК 621.787.4

В.В. Отаманський, ст. викл. каф. МІ та АТ
О.Л. Мельник, к.т.н., доцент, в.о. зав. каф. МІ та АТ
В.В. Ширококов, студент групи ПМ-143
Д.В. Грева, студент групи ПМ-141м
Державний університет «Житомирська політехніка»

ОЦІНКА ВПЛИВУ ФОРМИ ТВІРНОЇ ДЕФОРМУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТУ НА РЕСУРС ВИКОРИСТАНОЇ ПЛАСТИЧНОСТІ МАТЕРІАЛУ ПРИ ДЕФОРМУЮЧОМУ ПРОТЯГУВАННІ

Пластичність матеріалу в умовах деформуючого протягування при наскрізній деформації заготовки визначає її здатність до безруйнівного формоутворення. Для кількісної оцінки якості виробів, що обробляються пластичною деформацією, застосовується параметр, що характеризує

дефектність матеріалу – ресурс використаної пластичності (ψ). Величина ψ суттєво залежить від умов обробки, до яких належать схема навантаження, температура, швидкість деформації, характер напружено-деформованого стану, а також інші технологічні параметри. За умов холодного пластичного деформування з низькими швидкостями, що є типовими для процесів ДПР, величина ресурсу пластичності ψ здебільшого зумовлена механічними властивостями матеріалу та характером напружено-деформованого стану.

Для оцінювання ресурсу використаної пластичності різні дослідники [1, 2] запропонували залежності, що ґрунтуються на принципі: процес деформування відбувається без руйнування, якщо параметр (ψ) задовольняє умову:

$$\psi \leq 1, \quad (1)$$

При оцінці граничної можливості деформування заготовки до появи дефектів на її поверхні використовують критерії деформованості, які представлені в роботах Г.А. Смірнова-Аляєва, В.Л. Колмогорова, Г.Д. Деля, В.О. Огороднікова та ін. Найбільш зручною для операції деформуючого протягування, згідно з рекомендаціями [1], є критерій Колмогорова:

$$\psi = \int_0^{e_0} \frac{de_0}{e_{\text{пр}}(\eta)}, \quad (2)$$

де: $e_{\text{пр}}(\eta)$ – гранична деформація матеріалу при відповідному постійному значенні коефіцієнта жорсткості напруженого стану; η – коефіцієнт жорсткості напруженого стану; e_0 – інтенсивність деформацій для осесиметричної заготовки.

У роботі [3] представлено результати моделювання та розрахунку ресурсу використаної пластичності матеріалу на зовнішній і внутрішній поверхнях заготовок товстостінністю $t_0/d_0 = 0,35$ та $0,2$ при деформуючому протягуванні з наскрізною деформацією різною кількістю деформуючих елементів але з однаковим сумарним натягом $\sum a/d_0 = 0,075$.

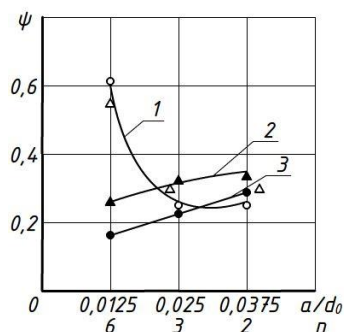


Рис. 1 – Зміна ресурсу використаної пластичності на внутрішній і зовнішній поверхні заготовок з $t_0/d_0 = 0,35$ і $0,2$ при симулюванні їх деформування з сумарною деформацією отвору $\sum a/d_0 = 0,075:1$ – зміна ресурсу пластичності на внутрішній поверхні заготовки при $t_0/d_0 = 0,35$ – $\circ$, $t_0/d_0 = 0,2$ – Δ ; 2 – зміна ресурсу пластичності на зовнішній поверхні при $t_0/d_0 = 0,2$; 3 – зміна ресурсу пластичності на зовнішній поверхні при $t_0/d_0 = 0,35$ [3]

Як видно з графіку, максимальне вичерпання ресурсу використаної пластичності на внутрішній поверхні заготовки спостерігається при обробці 6-ма деформуючими елементами з мінімальним натягом на елемент. При цьому

ресурс використаної пластичності мало залежить від товстостінності заготовки (рис. 1, крива 1).

На зовнішній поверхні заготовки ресурс використаної пластичності в залежності від кількості деформуючих елементів змінюється незначною мірою (рис. 1, криві 2 і 3). Його максимальне значення відповідає використанню великих натягів. Помітний вплив товстостінності на значення ресурсу використаної пластичності на зовнішній поверхні заготовки (рис. 1, криві 2 і 3). При цьому, чим менша товстостінність, тим більше значення ресурсу використаної пластичності.

У роботі [4], присвяченій ротаційному обтиску труб, операції яка подібна до ДПР, за допомогою методу скінченних елементів у програмі ABAQUS досліджували течію матеріалу з різними формами деформуючих матриць (рис. 2), визначаючи їх вплив на НДС обробленої заготовки.

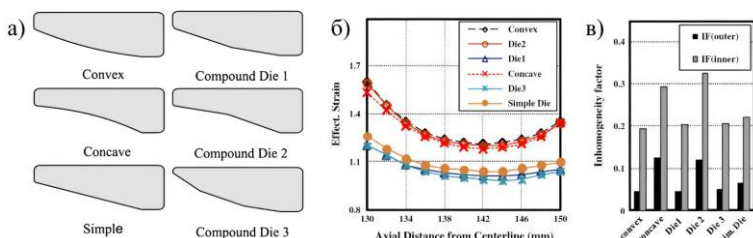


Рис. 2. Вплив форми матриці при радіальному куванні труби:
а) форми матриць; б) розподіл деформації в радіальному напрямку;
в) коефіцієнти неоднорідності [4]

Автори [4] дійшли висновку, що для обробки деталі з мінімальною неоднорідністю деформації необхідно обирати опуклу форму матриці або штамп з трьома похилими гранями. Найгірший варіант спостерігається при використанні матриць з увігнутою формою.

Отже, актуальним завданням є дослідження форми твірної деформуючого елемента на ресурс використаної пластичності матеріалу при деформуючому протягуванні.

За методикою описаною у роботі [3] проведемо моделювання процесу ДПР при деформуванні заготовки товстостінністю $t_0/d_0 = 0,2$ з різними формами твірної деформуючого елемента, які представлені на рис. 3.

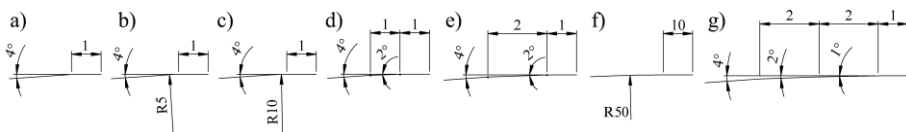


Рис. 3. Форми твірної деформуючого елемента

Обробка результатів моделювання та розрахунок згідно критерію Колмогорова (2) дали змогу отримати значення ресурсу використаної

пластичності матеріалу (рис. 4) на зовнішній і внутрішній поверхнях заготовки під час ДПР із використанням деформуючих елементів різної форми твірної.

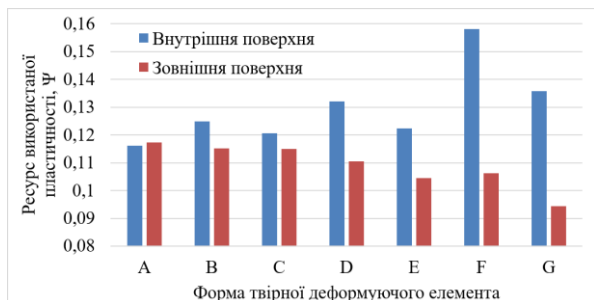


Рис. 4. Вплив форми твірної деформуючого елемента на ресурс використаної пластичності матеріалу

З рисунку 4 видно, що зміна форми твірної деформуючого елемента, відносно стандартної форми А, суттєво впливає на ресурс використаної пластичності як внутрішньої, так і зовнішньої поверхонь заготовки. У всіх випадках зміна форми призводить до збільшення ресурсу використаної пластичності на внутрішній поверхні, проте для форм В, С, Е ця зміна незначна. Водночас форма Е сприяє зниженню параметра ψ на зовнішній поверхні заготовки.

Таким чином, можна зробити висновок про доцільність подальших досліджень форми твірної деформуючого елемента на ресурс використаної пластичності, що є особливо актуальним під час проектування деформуючих протяжок із груповим розташуванням деформуючих елементів.

Список літератури:

1. Tsekhanov Yu. Stress-strain state of thick-walled pipes under multicycle deforming broaching. Journal Problems of Strength, Institute of Strength Problems. Kiev, 2002. Vol. 6. P. 26–33.
2. Hrushko O., Kyrytsia I. Criteria of deformity taking into account the properties of the material in the parameter of the stress state. Обробка матеріалів тиском. 2022. № 1(51). С. 30–37. URL : [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1\(51\)30](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2022-1(51)30).
3. Nemyrovskiy Y.B., Shepelenko I.V., Otamanskyi V.V., Melnyk O.L., Vasylyv T.I. Plasticity of workpieces processed by deforming broaching with through deformations. Journal of Engineering Sciences (Ukraine). 2025. Vol. 12(2). P. D9–D24. URL : [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).d2](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).d2).
4. Sanjari M., Sapanathan T., Ebrahimi R., Poursina M. Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test. Materials & Design. 2012. Vol. 38. P. 147–153.

УДК 620.1:621.951:664.02

В.І. Осипенко, д.т.н., проф.
Л.Д. Мисник, к.т.н., доц.
Н.В. Філімонова, к.т.н., доц.
М.В. Хандюк, ст. викладач

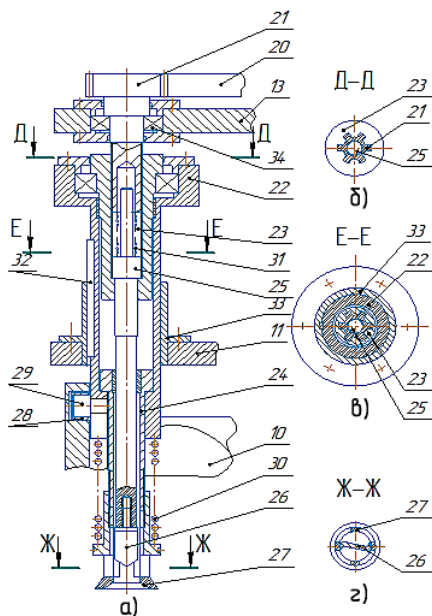
Черкаський державний технологічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОТИ ПЕРОВОГО СВЕРДЛА ПРИ ВИСВЕРДЛЮВАННІ КОРЕНЕВИЩА РІПЧАСТОЇ ЦИБУЛІ

Консервна промисловість – одна з основних галузей харчової промисловості, яка дає змогу скоротити витрати часу на приготування їжі в домашніх умовах, урізноманітнити раціон громадського харчування, забезпечити протягом року населення продуктами з сировини, що росте тільки у визначений період року [1]. В сучасних виробництвах проблеми підвищення надійності і довговічності машин і обладнання є особливо актуальними. Витрати на підтримку працездатності різноманітних технічних об'єктів і систем постійно збільшуються [2]. Аналіз даних по ремонту обладнання у харчовій і переробній промисловості показує, що основні причини відмов технічних об'єктів це зношування, втомне руйнування, корозія тощо, повинні бути ретельно вивчені і по можливості усунуті. Втрати працездатності виробів внаслідок відмов призводять до простоїв, значних витрат на ремонт та запасні частини [2]. Тому підвищення зносостійкості вузлів тертя машин і захист від корозії і передчасного зношування найбільш вразливих елементів конструкції апаратів є основним з головних напрямків підвищення надійності та довговічності устаткування галузі. Навіть на сьогоднішній день зношування інструментів при обробці різноманітних харчових продуктів є складною специфічною проблемою [2].

Мета роботи полягає в підвищенні ефективності експлуатації різального інструменту шляхом формування на ріжучих поверхнях плазмовим напиленням зносостійких покриттів на основі нітриду титану з подальшим дослідження їх мікрогеометрії за використанням методів растрової електронної мікроскопії (РЕМ) та атомно-силової мікроскопії (АСМ). Для висвердлювання кореневища та обрізання стебла ріпчастої цибулі була розроблена машина [3].

На рис. 1 зображено базовий вузол машини: свердлильну головку для висвердлювання кореневища та обрізання стебла ріпчастої цибулі. Із креслень (рис. 1) видно, що обертання здійснює тільки свердло 26, а інші частини голівки для висвердлювання кореневища цибулин здійснюють лише зворотно-поступальні рухи. Таким чином при роботі даної свердлильної головки, завдяки добре продуманій кінематиці, найбільш зношуваним органом є різальний інструмент – перове свердло.



а) розріз свердильної головки; б), в) і г) поперечні розрізи свердильної головки
10 – копір; 11 – нижній диск; 13 – верхній диск; 20 – центральна шестерня; 21 – колесо зубчасте; 22 – стакан; 23 – муфта шліцьова; 24 – шток; 25 – шпindel; 26 – свердло перове; 27 – тримач; 28 – ролик; 29 – палець; 30 – пружина; 31 – пружина; 32 – шпонка; 33 – маточина; 34 – підшипник

Рис. 1. Свердильна головка машини для висвердлювання кореневища ріпчастої цибулі

Надійність та довговічність роботи перового свердла у великій мірі пов'язана з якісним станом поверхневого шару різальних поверхонь. Від параметрів цього шару залежать експлуатаційні властивості – опір втомі, зносостійкість, корозійна стійкість, опір контактній втомі тощо [4]. В сучасних умовах для свердління ріпчастої цибулі зазвичай найбільш часто використовується наступна конструкція перового свердла – корпус/основа з AISI 304, а різуча кромка – загартована AISI 420. З врахуванням наведеного об'єктами дослідження були зразки вирізані на електроерозійному вирізному верстаті з різальних кромки перового свердла у формі секторів диска із загартованої нержавіючої сталі AISI 420, діаметром 3,5 мм і товщиною 2 мм, які були розділені на дві групи:

- зразки без покриття TiN;
- зразки, які мали шар покриття TiN (до 13 мкм).

В результаті проведеного комплексу досліджень встановлені особливості формування наноструктурних покриттів нітриду титану на різальних поверхнях комбінованим PVD-методом з подальшою низькоенергетичною електронно-

променевою обробкою (ЕПО).

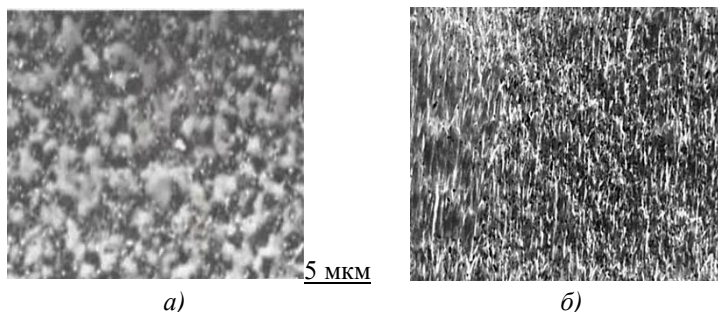


Рис. 2. Електронно-мікроскопічні знімки поверхні газозфазного покриття TiN на сталі AISI 420 (час осадження 15 хв (а) та подальшої ЕПО протягом 7 с (б))

Електронно-променева модифікація осаджених покриттів TiN (рис. 2.б), призводить до зменшення їх поруватості, а кристаліти утворених формувань мають голкоподібну форму з чітко вираженим напрямком їх утворення вздовж напрямку дії електронного потоку стрічкової форми. Така електронна дія дозволила суттєво покращити структуру поверхні сформованого газозфазним осадженням покриття TiN .

Аналіз поверхонь зразків показав, що в процесі тривалої експлуатації відбувається їх руйнування (збільшення мікронерівностей з $60 \div 90$ нм до $280 \div 350$ нм, поява мікротріщин, відколів та інших мікрodefектів), яке призводить до різкого зниження функціональних властивостей цих покриттів і працездатності інструменту в цілому. При цьому, на зразках з покриттям TiN , яке було отримане PVD-методом з подальшою електронно-променевою обробкою мікрodefекти не спостерігаються, а мікронерівності за цей же час експлуатації (800 годин) збільшувалися з $50 \div 60$ нм до $85 \div 130$ нм, що не є критичним для стану поверхні.

Проведеними склерометричними дослідженнями встановлено, що критичне навантаження, при якому з'являлися перші відколи і відшаровування покриття з нітриду титану, складало $135 \div 165$ Н, що значно перевищує критичне ударне навантаження в 10 Н/мм² при експлуатації перового свердла машини для обрізання стебла та кореневища ріпчастої цибулі. Результати дослідження перового свердла машини для обрізання кінців цибулі та висвердлювання серцевини без покриття та з покриттям TiN з подальшою низькоенергетичною електронно-променевою обробкою дозволили підвищити термін експлуатації інструменту з покриттям до 2200 годин (55 робочих днів експлуатації) порівняно з свердлом без покриття до 800 годин (20 робочих днів експлуатації) при зусиллі на свердло 186 Н.

Список літератури:

1. Консервна промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід [Електронний ресурс]: наук.-допом. бібліогр. покажч. / [упоряд. О. В. Олабоді] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. – Київ, 2020. – 265 с.
2. Надійність обладнання харчової галузі. Навчальний посібник /Ю.Г. Сухенко, І.П. Паламарчук, М.М. Жеплінська, М.М. Муштрук, Д.П. Журавель/. Київ: ЦП “КОМПРИНТ” 2019. 375 с.
3. Хандюк М.В. Нова конструкція машини для обрізання кінців ріпчастої цибулі. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія : Технічні науки. Випуск 1 (89). Т. 1. Вінниця : 2015. С. 62-67.
4. Kucharska, B., Czarniak, P., Kulikowski, K., Krawczyńska, A., Roźniatowski, K., Kubacki, J., Szymanowski, K., Panjan, P., & Sobiecki, J. R. (2022). Comparison Study of PVD Coatings: TiN/AlTiN, TiN and TiAlSiN Used in Wood Machining. Materials, 15(20), 7159. <https://doi.org/10.3390/ma15207159>.

УДК 621.923.7

М.В. Пікула, старший викладач,
*Національний університет водного господарства
та природокористування, м. Рівне*

ВІДЦЕНТРОВА ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ

Важливим напрямком розвитку машинобудування є широке впровадження передових технологій, які визначають прогрес в різних галузях індустрії та сільського господарства. Для забезпечення якості машинобудівної продукції широко використовують високопродуктивні технологічні методи обробки деталей складної конфігурації, що дозволяє забезпечити зростання рівня автоматизації робіт, підвищення економічної ефективності та продуктивності праці.

Підвищення вимог до якості виробів призводить до зростання об'єму технологічних операцій обробки деталей, що складають 10...20% від загальної трудомісткості.

Одним із найважливіших заходів щодо створення надійних машин з високим ресурсом є забезпечення промислової чистоти поверхонь деталей на всіх етапах виробництва. Це можна досягнути при вирішенні комплексу завдань, що включають технічні та організаційні - видалення задилок і частин мікрорельєфу, що швидко зношуються, очищення поверхонь і кромek деталей після механічних видів обробки від мікрочасток.

Механічна обробка деталей супроводжується утворенням задилок на кромках, а також мікрочадилок і мікрочастинок на поверхнях деталей. Розміри

мікрозадинок співрозмірні з величиною шорсткості, а їхня твердість перевищує твердість матеріалу деталей. Тому частки будь-якої величини можуть викликати задири, схоплювання, а найчастіше - абразивне зношування.

Необхідність видалення задинок пояснюється декількома факторами.

Функціональні фактори пов'язані з запобіганням відмов вузлів і агрегатів через заклинювання і підвищене зношення відповідальних деталей, що відбувається при попаданні в зазори кінематичних пар твердих частинок.

Ергономічні чинники, які спрямовані на запобігання травмування в процесі роботи та запобігання пошкоджень поверхонь під час транспортування.

Естетичні чинники впливають на товарний вигляд виробів, зчеплення з лакофарбовими та іншими покриттями.

Як відомо, достаньо велику частку фінішних операцій займає ручна обробка, що накладає суттєві обмеження на досягнення високих продуктивності та якості.

З метою заміни ручної зачищувальної обробки у виробництві використовуються відцентрові методи обробки. А це потребує подальших досліджень процесу відцентрової обробки, які включають конструювання технологічного обладнання і спорядження для обробки деталей складних конфігурацій.

На якість процесу відцентрової обробки важливий вплив мають характеристики гранульованого робочого матеріалу та розміри та конфігурація деталі, що обробляють. Основні фактори, які впливають на процес є режими руху, конструкція робочої камери, об'єм і коефіцієнт заповнення. Дані фактори мають значний вплив на силу мікроударів, тиск, напруження і температуру, що утворюються внаслідок дії мікроударів, температури в робочій камері, швидкості та прискорення частинки робочого середовища процесу відцентрової обробки.

Рух маси завантаження у робочих камерах забезпечує швидкість відносних переміщень до 2,5 м/с і тиск робочих тіл на поверхні деталей до 0,3 МПа, що забезпечує високу продуктивність обробки.

Для підвищення якості відцентрової абразивної обробки важкодоступних ділянок фасонного профілю деталей пропонується інтенсифікувати відносний рух гранул і поверхонь деталей за рахунок удосконалення пристрою для відцентрової обробки деталей

Для формування заданих якісних характеристик поверхневого шару деталей різної форми запропоновано пристрій, що містить робочу камеру, встановлену в підшипниковому вузлі, і привід. У камері розташований похилий розсікач над перфорованою перегородкою, яка орієнтована під кутом до горизонтальної площини і має бічну щілину у верхній частині, при цьому робоча камера виконана конічною з конусністю 25-35° та з сферичною чи еліпсоїдною кришкою [1].

При ввімкненні приводу маса завантаження починає здійснювати складний рух. Під дією відцентрових сил інерції деталі і абразивні гранули піднімаються по внутрішній поверхні робочої камери і після контакту з сферичною кришкою інгредієнти маси завантаження починають рухатися назустріч один одному. В

результаті відбувається їх інтенсивне перемішування, зіткнення та відповідна обробка деталей. Під дією гравітаційних сил інгредієнти маси завантаження опускаються вниз і розділяються перфорованою перегородкою на деталі та абразивні частинки. Цикл обробки повторюється.

Удосконалена конструкція пристрою для відцентрової абразивної обробки дає можливість підвищити якість і продуктивність процесу обробки деталей.

Список літератури:

1. Пристрій для відцентрової обробки деталей: пат.: 117736 Україна: МПКВ24В 31/06. № и2016 13503; заявл. 28.12.2016; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

УДК 621.914

Ю.В. Петраков, професор, д.т.н.,

О.А. Охріменко, професор, д.т.н.,

О.В. Пасічник, аспірант.

А.І. Петришин, ст. викладач, к.т.н.

Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

МОДАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ОБРОБНОЇ СИСТЕМИ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТУ

Однією з основних перешкод для підвищення продуктивності токарної обробки є регенеративні коливання обробної системи, які призводять до погіршення шорсткості поверхні деталі, підвищеного зносу інструменту та верстату. Динамічні процеси в обробній системі, що призводять до виникнення коливань, є основною причиною появи вібрацій. Для усунення таких негативних явищ у процесах різання використовуються різні методи, які умовно можна поділити на пасивне придушення вібрацій (РСС), активне керування (АСС) та методи, засновані на використанні режиму різання відповідно до діаграм пелюсток стабільності (SLD) [1]. Ефективність усіх цих методів повністю залежить від адекватності математичної моделі процесу, що використовується при проектуванні.

В цих тезах представлені основні результати роботи зі створення методики визначення модальних параметрів математичної моделі токарної обробної системи, яка базується на експериментальному модальному аналізі, результатах визначення складових сили різання, жорсткості та методі ресептивного з'єднання, який дозволяє об'єднати окремі складові для прогнозування динаміки всього вузла та конструювання SLD.

Динамічну модель обробної системи токарного верстата при встановленні заготовки в патроні і задньому центрі можна представити схемою на рис. 1. Динаміку системи можна описати трьома моделями, кожна з яких має один

ступінь свободи в напрямку відповідної координатної осі. Усі пружні рухи в обробній системі відбуваються в динамічній системі, яку доцільно представити динамічними зв'язками, що описуються передатними функціями другого порядку:

$$W(s) = \frac{1/k}{\frac{s^2 \delta}{\omega^2} + 2\xi \frac{s\delta}{\omega} + \delta}, \quad (1)$$

де k – жорсткість, δ – пружне переміщення, ω – власна частота коливань, ξ – коефіцієнт згасання коливань. Усі такі параметри необхідно ідентифікувати в напрямку дії збурюючої сили, який буде визначатися відповідним індексом позначення координатної осі.

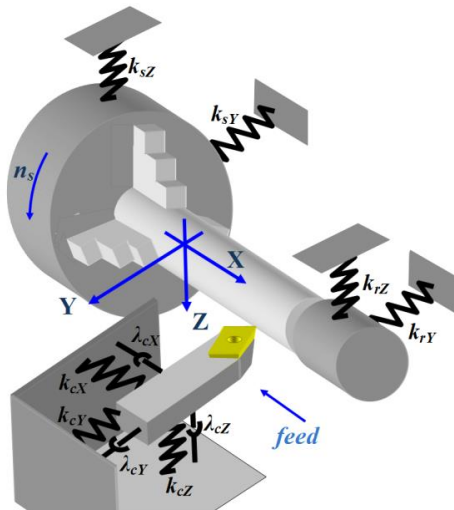


Рис. 1. Модель обробної системи

Кожна динамічна ланка має свої динамічні параметри, позначені в знаменнику передатної функції, а жорсткість зручно представляти відповідно до схеми на рис. 1 як функцію поздовжньої координати x як жорсткість усієї динамічної системи, приведену до вершини різця. Такий підхід визначається призначенням токарної обробної системи, оскільки саме тут відбувається формування деталі. Під час закріплення заготовки в патроні з використанням класичних залежностей теорії пружності можна застосовувати формулу для приведеної жорсткості системи [2] у напрямку дії складової F_y сили різання в точці різання як функції координати x :

$$k_y = \frac{k_{sY}k_{cY}3EJ}{3EJ(k_{sY} + k_{cY}) + x^3k_{sY}k_{cY}}, \quad (2)$$

де k_{sY} – жорсткість шпинделя, k_{cY} – жорсткість інструменту, E – модуль пружності матеріалу заготовки, J – момент інерції перерізу заготовки. Для круглого перерізу $J = \pi d_a^4/64$, де d_a – середній діаметр.

При встановленні заготовки в патроні та задньому центрі, приведена жорсткість динамічної системи визначається як для статично невизначеної системи за методикою [2]:

$$k_y = \frac{l_p^2 k_{sY} k_{cY} k_{rY} 3EJ}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}, \quad (3)$$

де $a_1 = (l_p - x)2k_{cY}k_{rY}3EJ$; $a_2 = x^2k_{sY}k_{cY}3EJ$; $a_3 = l_p^2k_{sY}k_{rY}3EJ$; $a_4 = x^2(l_p - x)^2l_p k_{sY}k_{cY}k_{rY}$, l_p – довжина деталі. Інші позначення пояснені на рис. 1.

Зведена жорсткість вздовж координати Z розраховується за аналогічними залежностями зі зміною індексів при відповідній жорсткості у формулах (2) та (3). Таким чином, для проведення подальших досліджень динаміки токарної обробної системи необхідно її ідентифікувати за допомогою експериментальних даних щодо визначення модальних параметрів [2] обробної системи: жорсткості динамічних ланок, що входять до системи, частоти власних коливань та коефіцієнтів затухання коливань ланок другого порядку, що їх замінюють. Частотні характеристики кожного компонента обробної системи визначалися методом експериментального модального аналізу (EMA) з використанням ударного молотка моделі 086D05, акселерометра RSV 353B15 з підсилювачем RVC 480E09 та АЦП NI USB-9215 (усі від фірми Piezotronics, Inc., США) (рис. 2). Сигнали записуються двоканальним осцилографом Owon XDS3202E та можуть бути збережені у флеш-пам'яті у вигляді файлів Excel.

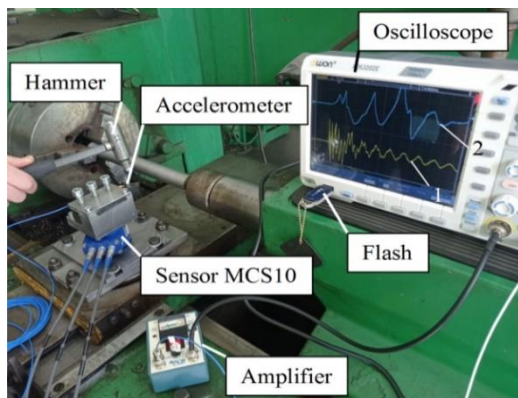


Рис. 2. Експериментальне визначення імпульсної характеристики

Акселерометр підключено через підсилювач до входу двоканального осцилографа, а до іншого входу підключено ударний молоток. Удар виконується в

напрямку однієї з координатних осей. Результат реєстрації отриманих сигналів у вигляді імпульсної характеристики (IRF) відображається на екрані осцилографа у вигляді осцилограм: сигнал акселерометра позначено лінією 1, сигнал ударного молотка позначено лінією 2 на рис. 2. Для визначення IRF у напрямку іншої осі змінюють розташування акселерометра та напрямку удару. Аналогічні експерименти проводилися з іншими компонентами динамічної моделі обробної системи: шпинделем та заднім центром.

Для ідентифікації частотних характеристик компонентів системи за їх IRF було використано прикладну програму, що виконує швидкі перетворення Фур'є для визначення частотних характеристик (FRF). На рис. 3 показано результати експериментального модального аналізу частотних характеристик опори інструменту в напрямку осі Y.

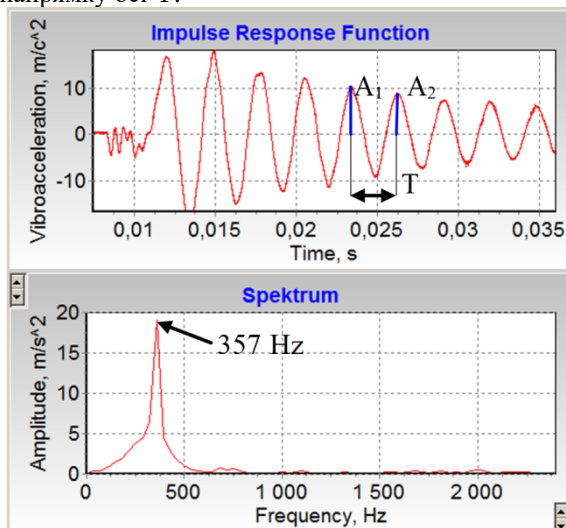


Рис. 3. IRF і FRF інструментальної системи в напрямку осі Y

Отриманий спектр вказує на переважання однієї основної гармоніки (357 Гц), а коефіцієнт затухання коливань ξ можна розрахувати за IRF [2]:

$$\xi = \frac{\ln(A_1 / A_2)}{T\omega}, \quad (4)$$

де A_1 , A_2 , T – амплітуди та період коливань, ω – частота основної гармоніки ($\omega = 2\pi \cdot 357$ рад/с).

Отримані дані, разом з експериментальними даними щодо визначення жорсткості в напрямку осі Y, повністю ідентифікують коливальну ланку, яка представляє систему різця в математичній моделі всієї обробної системи.

Для визначення частотних характеристик обробної системи в напрямку осі Z були виконані аналогічні експерименти. Реакція в напрямку осі Z представлена на рис. 4. Спостерігаються три піки спектру тому для представлення в

математичній моделі всієї системи у вигляді коливальної ланки другого порядку необхідно застосовувати підхід, представлений в [3].

Оскільки модель обробної системи представлена відповідно до принципу методу ресептансного зв'язку [4], як композиція з трьох основних вузлів системи – інструментальної опори, шпинделя, заднього центру - то модальний аналіз проводився для кожної ланки окремо. Експеримент також проводився за допомогою ударного молота та акселерометра, прикріпленого до відповідних місць досліджуваної системи, а імпульсна характеристика реєструвалася на запам'ятовуючому осцилографі і копіювалася на флеш-пам'яті у вигляді цифрового Exell файлу.

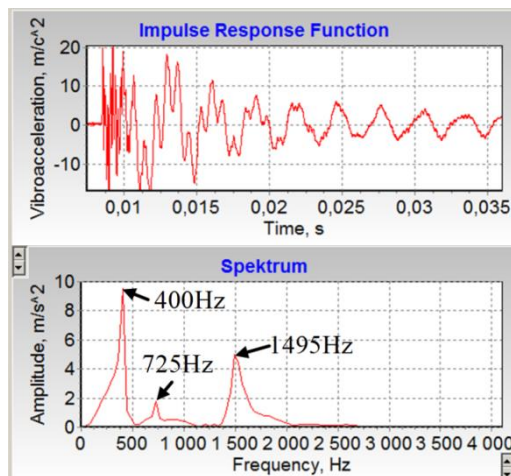


Рис. 4. IRF і FRF інструментальної системи в напрямку осі Z

Модель процесу різання побудована таким чином, що, використовуючи механістичний підхід до визначення сили різання, реалізується можливість вбудовування складових сили різання в структуру всієї динамічної системи. Відомо, що найбільш інформативною складовою сили різання є тангенціальна складова F_z сили різання, яка переважно визначає потужність різання. Тому в загальній моделі структури обробної системи пропонується визначати складові F_x та F_y шляхом розкладання горизонтальної складової F_{xy} вздовж координатних осей:

$$F_x = F_{xy} \sin(\varphi + \eta), \quad F_y = F_{xy} \cos(\varphi + \eta), \quad (5)$$

де φ – головний кут у плані різального інструменту, η – кут зсуву.

Ця схема враховує відхилення вектора горизонтальної складової сили різання від нормалі до ріжучої кромки інструменту в напрямку потоку стружки. Горизонтальна складова сили різання залежить від багатьох факторів і в загальному випадку може бути виражена через тангенціальну складову:

$$F_{xy} = k_{xy} F_z, \quad (6)$$

де k_{xy} – емпіричний коефіцієнт, який при обробці конструкційних сталей з міцністю на розрив не більше 1000 Н/мм^2 , швидкістю різання 100 м/хв та $\varphi=45^\circ$ може знаходитися в діапазоні $k_{xy} = 0,55 \dots 0,65$.

Ідентифікацію динамічних характеристик сили різання було проведено за частотною характеристикою її динаміки, отриманої через швидкі перетворення Фур'є в спеціально створеній програмі. В програму завантажується осцилограма складової F_y сили різання, записаної через трикомпонентний MCS10 (рис. 5).

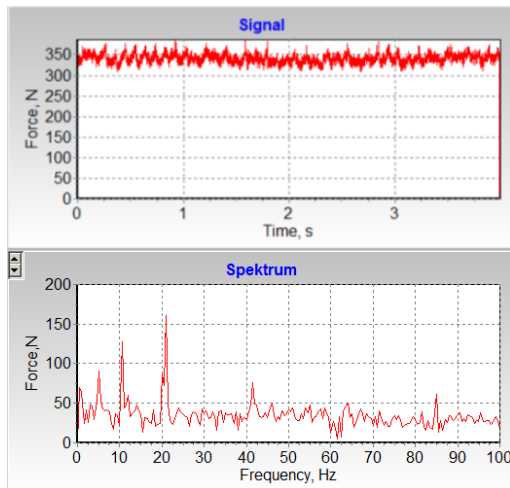


Рис. 5. Осцилограма складової F_y сили різання та її частотна характеристика

Такий підхід дозволяє побудувати математичну модель, необхідну для вирішення основної задачі управління – побудови діаграми стабільності за алгоритмом, розробленим в [5]. Визначення жорсткості кожного блоку обробної системи проводиться експериментально окремо, а результати зведені в єдину залежність жорсткості на кінчику різця, що дозволить прогнозувати її зміну за довжиною заготовки.

Список літератури:

1. Çetindağ, H.A., Oezkaya, E., Çiçek, A. et al. Review of chatter control techniques in turning and boring. *Int J Adv Manuf Technol* 139, 5363–5407 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16188-1>
2. Petrakov Y., Ohrimenko O., Pasichnyk O., Petryshyn A. Determination Modal parameters a Turning machining system, *Mechanics and Advanced Technologies*, Vol. 9, No. 2, 2025, pp. 176–184. [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.2\(105\).331541](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.2(105).331541)
3. Petrakov Y. V., Ohrimenko O. A., Sikailo M. O. Identification of dynamics for machining systems. *Mechanics and Advanced Technologies*, Vol. 8, No. 4, 2024, pp. 337–345. [http://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.4\(103\).305837](http://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.4(103).305837)

4. Yulei Ji et al. A new receptance coupling substructure analysis methodology to predict tool tip dynamics International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 126, March 2018, Pages 18-26.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.12.002>
5. Petrakov Y., Danylchenko M. A Time-Frequency Approach to Ensuring Stability of Machining by Turning. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(2) (120) 2022, 85–92. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268637>

УДК 621.757:621.793

В.П. Приходько, к.т.н., доцент

С.П. Сапон, к.т.н., доцент

В.К. Фролов, к.т.н., доцент

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

ВПЛИВ ВЗАЄМОКОМПЕНСАЦІЇ ПОХИБОК НА ТОЧНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РОЗМІРІВ ПРИ ОБРОБЛЕННІ НА ТОКАРНИХ ВЕРСТАТАХ З ЧПК

Важливим етапом розробки технологічних процесів (ТП) оброблення заготовок на верстатах з ЧПК є розмірне моделювання та аналіз ТП (РМА ТП). Виконання РМА ТП дозволяє на основі визначення прогнозних величин полів розсіювання технологічних і конструкторських розмірів оцінити можливість забезпечити необхідну точність оброблюваних деталей. Отримані прогнозні оцінки точності розмірів є основою для вибору відповідної структури технологічних процесів.

Існуючі методології прогнозування точності розмірів не забезпечують максимально повного врахування значимих факторів, зокрема взаємокомпенсації похибок (ВКП) технологічних розмірів (ТР), яка безумовно присутня в процесах оброблення і повинна враховуватись при прогнозуванні.

Наразі при оцінці впливу ВКП технологічних розмірів на точність конструкторських розмірів немає єдиної формалізованої методології. Натомість використовуються різні методологічні підходи урахування ВКП [1-4]. Відповідно, проблема полягає в тому, що для більшості схем та способів оброблення значення коефіцієнтів ВКП або невідомі, або визначені тільки для окремих випадків. До того ж відсутні моделі впливу умов оброблення на величину коефіцієнтів ВКП, що обмежує можливості оптимального вибору коефіцієнтів відповідно до умов оброблення.

Для визначення величини коефіцієнтів ВКП при токарному обробленні на верстатах з ЧПК, з урахуванням впливових факторів процесу оброблення, була розроблена спеціальна програма для моделювання розсіювання величин ТР та коефіцієнтів ВКП залежно від зміни факторів процесу оброблення (рис.1).

При моделюванні впливу ВКП на точність ТР враховувався вплив пружних деформацій технологічної системи, як наслідок коливання припусків та твердості заготовок, за схемами формування лінійних розмірів з одностороннім та двостороннім розташуванням припусків. Величини елементарних похибок у кожному дослідженні розраховувались з урахуванням фізико-механічних характеристик матеріалу заготовки, коливання твердості, припусків оброблюваної поверхні, режимів різання та геометричних параметрів інструменту, які враховувались при визначенні відповідних сил різання та деформацій.

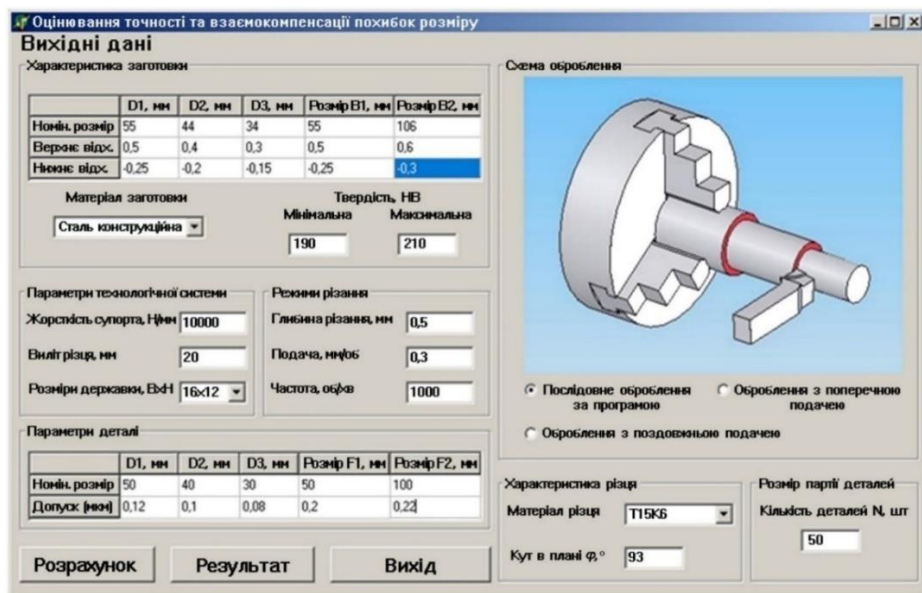


Рис. 1. Інтерфейс програми для моделювання розсіювання величин технологічних розмірів та коефіцієнтів ВКП [5]

Для кожної вибірки результати моделювання формувались на основі заданих умов оброблення (схема формування розмірів, режими різання, жорсткість ТОС, параметри інструменту, характеристики заготовки), але з імітацією коливання твердості і величин припусків. Коливання припуску та твердості оброблюваних поверхонь відтворювалось шляхом додавання до їх мінімального значення випадкової частки, згенерованої випадковими числами в межах їхніх граничних відхилень, залежно від прийнятого прогнозованого діапазону розсіювання.

Для вивчення впливу схем формування конструкторських розмірів на величину коефіцієнтів ВКП реалізовано окреме моделювання різних схем оброблення з триразовим повторенням для забезпечення адекватності результатів. Отримано графічні залежності з відповідною апроксимацією та

математичні моделі, що відображають вплив різних факторів на величину коефіцієнтів ВКП. Вплив практично усіх досліджених факторів представлений лінійними моделями, які, судячи з розрахованих значень коефіцієнтів кореляції R^2 , достовірно відображають такий вплив.

Встановлено, що істотний вплив на величину коефіцієнта ВКП має жорсткість C інструментальної наладки, збільшення якої приводить до його зменшення – як при чорновому, так і при чистовому обробленні. Вплив режимів різання – глибини різання h і подачі f_0 значно менший ніж вплив жорсткості C інструментальної наладки.

Збільшення глибини різання h призводить до зменшення величини коефіцієнтів ВКП для досліджуваних схем формування розмірів. При цьому інтенсивність зменшення, а отже і вагомість впливу глибини різання менша, ніж вплив подачі f_0 та значно менша, ніж жорсткості C інструментальної наладки. Це свідчить про відносно невелику чутливість коефіцієнтів ВКП до зміни глибини різання та необхідність орієнтації на величини більш значимих факторів при виборі значень коефіцієнтів ВКП.

Вплив подачі f_0 , в середньому у 2 рази більше за вплив глибини різання h , про що свідчать величини коефіцієнтів в апроксимаційних моделях. Але водночас вплив подачі f_0 на величину коефіцієнтів ВКП є менш вагомим ніж вплив схеми формування розмірів і жорсткості C інструментальної наладки.

Аналіз впливу твердості матеріалу заготовки не виявив значних змін коефіцієнтів ВКП, що свідчить про збереження приблизно однакового рівня ефекту впливу ВКП при зміні твердості.

Значний вплив на величину коефіцієнту ВКП мають схеми формування ТР та розташування припусків. При різносторонньому розташуванні припусків розрахунок операційних розмірних ланцюгів та величин полів розсіювання замикаючих ланок можна виконувати без урахування ВКП ТР внаслідок її мінімальної значущості.

При односторонньому розташуванні припусків на зв'язаних розміром поверхнях завжди буде мати місце ВКП ТР. Тому при розрахунках величин полів розсіювання замикаючих ланок потрібно врахувати ВКП відповідних ТР. Така закономірність має місце при будь-яких режимах різання, жорсткості технологічної системи та властивостях оброблюваного матеріалу.

Для підтвердження адекватності результатів отриманих комп'ютерним моделюванням, у даній роботі оцінку коефіцієнтів ВКП технологічних розмірів було виконано з використанням експериментально-статистичних даних [6], які характеризують точність оброблення на токарних верстатах та приведені в науковій і довідковій літературі. Збіг результатів прогностичних оцінок точності КР, отриманих на основі використання коефіцієнтів ВКП, а також на основі експериментально-статистичних даних, свідчить про достовірність результатів моделювання.

Використання встановлених закономірностей впливу різних факторів на величину коефіцієнтів ВКП сприятиме їх більш обґрунтованому вибору при прогнозуванні точності розмірів залежно від умов оброблення. Це дозволить

отримати більш достовірні оцінки прогнозовної точності отримуваних технологічних розмірів та уникнути додаткової коригуючої обробки на верстатах з ЧПК.

Список літератури:

1. Рудь В.Д. Розмірно-точнісний аналіз конструкцій та технологій: Навч. посібник./ В.Д. Рудь, О.О.Герасимчук, Т.П. Маркова. Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2010. 344 с.
2. Приходько В.П. Розмірне моделювання та аналіз технологічних процесів. [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» – Електронні текстові дані (1 файл: pdf.-15.2 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 249с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38826>
3. Бондаренко С.Г. Розмірні розрахунки механоскладального виробництва: навч. посібник / С.Г. Бондаренко – Київ: ІСДО, 1993. – 544 с.
4. Кравченко Л.С. Розмірний аналіз при проектуванні, виготовленні й складанні: навч. Посібник / Л.С. Кравченко. – Харків: НТУ "ХП", 2009. – 356 с.
5. Автоматизоване оцінювання впливу схем формування технологічних розмірів на їхню точність. / Приходько, В.П., Данилова, Л.М., Лапковський, С.В., Сапон, С.П., Фролов, В.К., Кравець, О.М. // Технічні науки та технології. – 2025. – № 2(40). – с. 68–86.
6. Визначення та урахування величини взаємокомпенсації похибок при прогнозуванні точності оброблення на верстатах з ЧПК. / Приходько В.П., Пуховський Є.С., Данилова Л.М., Лапковський С.В., Гаврушкевич Н.В. // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», випуск 4 (50). – 2022. – С.78-85.

УДК 631.171.075.3

Г.О. Прудков, студент

О.О. Кошовий, магістрант

Я.П. Коваленко, доктор філософії з прикладної механіки

Державний університет «Житомирська політехніка»

ПРОЄКТУВАННЯ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ІНСТРУМЕНТУ

Сучасне машинобудування неможливе без високоефективного ріжучого інструменту, який забезпечує необхідну точність, чистоту поверхні та продуктивність процесів механічної обробки. Від правильного проектування геометрії, вибору матеріалу і технології виготовлення інструменту залежить стабільність процесу різання, довговічність інструменту та якість готових деталей. Інструмент має першочергове значення в обробній промисловості, оскільки забезпечує ефективне й точне виробництво складних і

стандартизованих деталей. Він надає засоби для перетворення сировини в потрібні форми та розміри, забезпечуючи послідовність, точність і повторюваність. Інструменти поєднують інженерні концепції, принципи проектування та передові технології виробництва для оптимізації виробничих процесів і досягнення високоякісного продукту.

Проектування інструменту базується на аналізі умов різання, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу та вимог до кінцевого виробу. При цьому враховуються параметри тепловиділення, зносостійкості, міцності різальної частини та стійкості до вібрацій. Використання систем автоматизованого проектування (CAD/CAE) дозволяє моделювати процес різання, оптимізувати форму різальної кромки та забезпечити мінімальні деформації інструменту під навантаженням.

Виготовлення ріжучого інструменту здійснюється з використанням швидкорізальних сталей, твердих сплавів, керамічних та композитних матеріалів. Важливим етапом є фінішна обробка ріжучих крайок (шліфування, полірування, нанесення покриттів TiN, TiAlN, CrN), що знижує коефіцієнт тертя та підвищує ресурс інструменту. Використання адитивних технологій (3D-друк з металевих порошків) відкриває нові можливості у створенні складних внутрішніх каналів для охолодження.

Розроблення інноваційних конструкцій інструментів із системами адаптивного охолодження та знімними твердосплавними пластинами дозволяє зменшити витрати матеріалу й підвищити ремонтпридатність. Оптимізація процесу заточування та балансування інструменту під час експлуатації забезпечує стабільність параметрів різання протягом усього циклу роботи.

Процеси механічної обробки передбачають формування та формування компонентів інструменту за допомогою різних методів, таких як фрезерування, токарна обробка, шліфування, свердління та EDM (електророзрядна обробка). Обробка з ЧПУ (комп'ютерне числове керування) широко використовується у виробництві інструментів, пропонуючи високу точність, повторюваність і можливість створювати складні геометрії.

Обробка з ЧПК відіграє важливу роль у виробництві інструменту, забезпечуючи точне та ефективне виробництво компонентів інструменту. Верстати з ЧПК слідує інструкціям траєкторії інструменту, створеним програмним забезпеченням CAD/CAM, що забезпечує узгоджену та точну обробку. Автоматизація, включаючи роботизовані системи та вдосконалені пристрої зміни інструменту, підвищує продуктивність і зменшує людські помилки під час процесів обробки. Контроль якості має вирішальне значення протягом усього процесу обробки та виготовлення, щоб забезпечити точність розмірів і цілісність компонентів інструменту. Метрологічні інструменти, такі як СММ (координатно-вимірювальні машини), використовуються для перевірки точності розмірів. Методи перевірки, включаючи візуальний огляд, аналіз поверхні та неруйнівний контроль, використовуються для виявлення будь-яких дефектів або відхилень від специфікацій. Компоненти інструментів збираються за допомогою різних методів, таких як болтові з'єднання, зварювання, клейове

з'єднання або механізми блокування. Точність складання має вирішальне значення для забезпечення правильного вирівнювання, підгонки та функціональності інструменту. Під час складання можна використовувати спеціальні інструменти та пристосування для підтримки точності та узгодженості.

Таким чином, сучасне проектування та виготовлення інструменту – це комплексний процес, що поєднує комп'ютерне моделювання, матеріалознавство, точну механіку та технології обробки. Подальший розвиток у цьому напрямі сприятиме підвищенню конкурентоспроможності українського машинобудування, зниженню собівартості продукції та забезпеченню високої якості деталей.

Список літератури:

1. Мельничук П.П., Савощенко О.П. Основи машинобудування. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – 312 с.
2. Кулинич В.М., Мошинський І.З. Основи проектування машин та механізмів. – Рівне: НУВГП, 2015. – 270 с.
3. Гаврилюк В.М. Ріжучий інструмент: проектування та експлуатація. – Київ: КНУТД, 2018. – 256 с.
4. Кравець С.І. Технологія виготовлення ріжучих інструментів. – Харків: ХНАДУ, 2014. – 220 с.

УДК 621.91

І.В. Ренкас, студент

Г.М. Виговський, доцент, к.т.н.

Я.П. Коваленко, доктор філософії з прикладної механіки

Державний університет «Житомирська політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРЕЦИЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ ДЕТАЛЕЙ

Сучасна прецизійна обробка вимагає надзвичайно високої точності, стабільності та чистоти поверхні деталей. Досягнення таких параметрів стало можливим завдяки впровадженню надтвердих матеріалів, які істотно підвищують ефективність процесів різання, шліфування та полірування. Їх використання дозволяє зменшити зношування інструменту, забезпечити стабільність геометричних параметрів деталей і покращити якість обробленої поверхні.

Надтверді матеріали, такі як синтетичний алмаз, кубічний нітрид бору (сBN), карбід бору та надтверді композиції, мають виняткові фізико-механічні властивості: високу твердість, зносостійкість, теплопровідність і хімічну

інертність. Завдяки цьому вони застосовуються у виробництві різального та шліфувального інструменту для обробки високолегованих сталей, кераміки, карбідів та інших важкооброблюваних матеріалів.

Застосування надтвердих матеріалів у прецизійній обробці дозволяє реалізувати такі технологічні процеси, як надтонке шліфування, доведення та полірування із досягненням шорсткості поверхні $Ra < 0,05$ мкм. Особливе значення мають алмазні абразиви, що використовуються у вигляді кругів, паст та суспензій для кінцевого доведення поверхонь оптичних, вимірювальних та мікромеханічних деталей [1].

У конструкції різального інструменту з надтвердих матеріалів важливим є питання тепловідведення, мікрогеометрії різальної кромки та адгезії між основою і надтвердим шаром. Для підвищення зносостійкості широко застосовуються комбіновані інструменти, у яких робоча частина виготовляється з надтвердого матеріалу, а корпус – зі сталі або твердого сплаву. Технології нанесення надтвердих покриттів (CVD, PVD) дозволяють отримувати тонкі шари з алмазоподібного вуглецю (DLC), що забезпечують високу твердість і низьке тертя.

Використання комп'ютерного моделювання (CAD/CAE/CAM) у поєднанні з числовим програмним керуванням забезпечує високу точність геометрії інструментів і стабільність параметрів обробки. Завдяки цьому досягається підвищення точності виготовлення деталей до 1-2 мкм, що є критичним для авіаційного, оптичного, медичного та електронного машинобудування. Отже, надтверді матеріали є ключовим чинником розвитку сучасних технологій прецизійної обробки. Їх застосування сприяє зниженню собівартості виробництва, підвищенню ресурсу інструментів та забезпеченню високої якості готових деталей. Нинішні дослідження спрямовані на створення наноструктурованих композиційних надтвердих матеріалів, здатних поєднувати високу твердість з підвищеною ударною в'язкістю. Іншим перспективним напрямом є адитивне нанесення тонких надтвердих покриттів на різальні елементи інструмента, що забезпечує їх довговічність і зменшує схильність до сколювання. Також активно розвиваються технології лазерного модифікування поверхні інструментів, а також системи інтелектуального керування процесами прецизійної обробки, що дозволяють адаптивно регулювати режими різання залежно від умов навантаження та стану інструмента.

Надтверді інструменти дозволяють реалізовувати мікроточіння та наношліфування поверхонь, де глибина різання не перевищує кількох десятків нанометрів. Ці процеси є основою для формування оптичних поверхонь, лінз, дзеркал, елементів мікромеханічних систем.

Алмазне різання використовується при виготовленні деталей із кристалічного кремнію, оптичного скла, сапфіру та тугоплавких металів. Висока стабільність параметрів різального інструмента забезпечує відсутність мікротріщин і хвилястості поверхні, що є вирішальним чинником при виготовленні високоточних вузлів і систем позиціонування. Разом з тим, до важливих властивостей можна віднести високу твердість, низький коефіцієнт

тертя, висока термостійкість і хімічна інертність. Структура надтвердих матеріалів визначається щільною кристалічною решіткою, що забезпечує їхню стабільність під екстремальними навантаженнями [2].

Використання надтвердих матеріалів у прецизійній обробці є одним із найефективніших способів забезпечення високої точності та якості оброблених поверхонь. Поєднання унікальних властивостей надтвердих матеріалів із сучасними технологічними підходами відкриває нові можливості для розвитку високоточного машинобудування. Подальші дослідження у цій сфері сприятимуть підвищенню ефективності виробництва, зменшенню енергозатрат і забезпеченню стабільної якості продукції.

Список літератури:

1. Поляков В.П. Надтверді матеріали у машинобудуванні. Київ: Либідь. 2017. 184 с.
2. Косенко І.О. Технології прецизійної обробки. Харків: НТУ «ХПІ». 2020. 198 с.

УДК 621.91

П.Р. Редько, аспірант,

Т.І. Четвержук, к.т.н. доцент,

Луцький національний технічний університет

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

Сучасний етап розвитку машинобудування характеризується швидким впровадженням автоматизованих та цифрових технологій, серед яких особливе місце займають верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК). Такі верстати забезпечують високу точність, стабільність процесів оброблення повторюваність операцій, що дозволяє виготовляти деталі складної конфігурації з мінімальними витратами. Проте в умовах жорсткої конкуренції та постійного зростання вимог до продуктивності виробництва навіть використання сучасних верстатів з ЧПК не гарантує максимальної ефективності роботи.

Одним із основних показників ефективності функціонування верстатного обладнання є продуктивність механічного оброблення. Вона визначає кількість деталей або об'єм матеріалу, який може бути оброблений за одиницю часу, а підвищення продуктивності без зниження якості оброблення в свою чергу дозволяє зменшити собівартість продукції, скоротити виробничий цикл і підвищити економічну ефективність машинобудівного підприємства. На

сьогодні існує низка напрямів (рис. 1), які сприяють підвищенню продуктивності оброблення деталей на верстатах з ЧПК [4].



Рис. 1. Основні напрями підвищення продуктивності оброблення деталей на верстатах з ЧПК

Оптимізація режимів різання включає в себе вибір раціональних параметрів (швидкість різання, подача, глибина різання) з врахуванням властивостей матеріалу, типу інструмента та жорсткості системи «верстат-інструмент-заготовка». Використання адаптивного керування (Adaptive Control) дозволяє автоматично змінювати параметри обробки залежно від навантаження на інструмент [2]. Програми для симуляції різання (наприклад, VERICUT, Edgcam Simulation та інші) зазвичай застосовують для перевірки та оптимізації траєкторії руху інструменту.

Використання сучасного інструменту із твердих сплавів, кераміки, CBN або PCD дозволяє збільшити швидкість різання у кілька разів [6]. Інструменти з покриттями (TiN, TiAlN, AlCrN) підвищують зносостійкість, а модульні системи інструментів скорочують час переналадження [5].

Для контролю стану ріжучого інструменту використовують датчі або сенсори навантаження та вібрацій, які дозволяють запобігати поломкам інструменту. Також використовують системи моніторингу зношення інструмента для автоматичного коригування траєкторій або заміни інструменту при досягненні граничного зношення, а системи MDA/TDA (Machine Data Acquisition, Tool Data Acquisition) дають змогу відстежувати ефективність у реальному часі. Сучасні системи ЧПК такі як Fanuc, Siemens та Heidenhain мають функції високошвидкісної та високоточної обробки (High-Speed/High-Precision

Machining), а використання цифрових двійників (Digital Twin) дозволяє тестувати програми й режими на віртуальній моделі верстата перед запуском.

Раціональне програмування з використанням CAD/CAM-систем (найпопулярніші – SolidCAM, Mastercam, NX, Fusion 360) дозволяють генерувати оптимальні траєкторії, мінімізувати холості переміщення [3]. Використання підпрограм і параметричне програмування скорочує час створення програм для однотипних деталей у серійному виробництві.

У контексті парадигми Industry 4.0 та переходу до Industry 5.0 для підвищення продуктивності механічного оброблення деталей використовують технології кіберфізичних систем (CPS), технології інтернету речей (IoT), Big Data-аналітики, штучного інтелекту (AI), доповненої реальності (AR) та хмарні обчислення, які дозволяють створювати «розумні» верстати, які здатні самостійно аналізувати параметри процесу оброблення (вібрації, температуру, навантаження на шпиндель та інші вузли обладнання [1]) і коригувати режими різання в реальному часі для досягнення максимальної продуктивності. Застосування цифрових двійників (Digital Twin) деталей і технологічних процесів для моделювання, прогнозування зношування інструменту та оптимізації траєкторій оброблення дає змогу Інтегрувати CAM-системи з MES-і ERP-рівнем управління виробництвом, забезпечуючи єдиний інформаційний простір і повне відслідковування даних. Таким чином, у межах Industry 4.0 (так звана 4-та промислова революція) підвищення продуктивності оброблення досягається не лише за рахунок оптимізації режимів різання, а й через інтелектуальне управління виробничими процесами та автоматизований обмін даними між обладнанням, системами ЧПК і оператором. Підвищення продуктивності механічного оброблення деталей із застосуванням верстатів з ЧПК в умовах Industry 5.0 (так звана 5-та промислова революція) досягається завдяки інтелектуальному поєднанні людини, машини та інформаційно-цифрових технологій, де людина відіграє роль не оператора, а аналітика, проєктувальника та контролера процесів.

На основі вище викладеного матеріалу можна зробити висновок, що підвищення продуктивності механічного оброблення деталей на верстатах з ЧПК досягається комплексом технічних, технологічних та організаційних заходів, серед яких провідну роль відіграють оптимізація режимів обробки, застосування сучасного інструменту та відповідних мастильно-охолоджувальних рідин, автоматизації технологічних процесів та використання ефективного спеціалізованого програмного забезпечення.

Список літератури:

1. Chetverzhuk T., Zabolotnyi O., Sychuk V., Polinkevych R., Tkachuk A.: A Method of Body Parts Force Displacements Calculation of Metal-Cutting Machine Tools Using CAD and CAE Technologies. *Annals of Emerging Technologies in Computing (AETiC)*, Vol. 3, No. 4, pp. 37-47. International Association of Educators and Researchers (IAER). (2019). DOI: <https://doi.org/10.33166/AETiC.2019.04.004>.

2. Kovalov V., Vasilchenko Y., Turmanidze R., Dašić P., Sukova T., Shapovalov M. The technique of designing high-power CNC lathes for enterprises of the heavy engineering industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 568 (2019) (Special Volume with: *Annual Session of Scientific Papers «IMT ORADEA 2019»*; Oradea, Felix Spa; Romania; 30-31 May 2019), Article № 012119: pp. 1-6. ISSN 1757-8981. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/568/1/012119>.
3. Sychuk V. et al. Practices of modernization of metal-cutting machine tool CNC systems. *Mechatronic Systems 2: Applications in Material Handling Processes and Robotics* (1st ed.). Routledge (2021). DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003225447-22>
4. Yao K-C, Chen D-C, Pan C-H, Lin C-L. The Development Trends of Computer Numerical Control (CNC) Machine Tool Technology. *Mathematics*. 2024; 12(13):1923. <https://doi.org/10.3390/math12131923>
5. Zaleta, O.M., Povstyanoy, O.Y., Ribeiro, L.F., Redko, R.G., Bozhko, T.Y., Chetverzhuk, T.I.: Automation of optimization synthesis for modular technological equipment. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 10(1), A6-A14 (2023). [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(1\).a2](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).a2)
6. Алексієнко Г.В. Використання високопродуктивного інструменту як метод скорочення часу виготовлення деталей на верстатах з ЧПУ. *Наукові нотатки*, №73: C21-28 (2022). DOI: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2022.73.3>

УДК 621.9.02:669.245.6

С.В. Рябченко, к.т.н.,
С.А. Клименко, чл.-кор. НАН України,
С.Ан. Клименко, к.т.н., ст. досл.,
А.О. Чумак, к.т.н.,
А.С. Манохін, к.т.н., ст.. досл.
Ю.О. Мельничук, к.т.н., с.н.с.
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України

ВПЛИВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТАН ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ДИСКУ ТУРБИНИ ІЗ ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ

Метою роботи було дослідження процесу лезової, алмазно-абразивної обробки та поверхнево-пластичного деформування зразків диску турбіни зі сплаву ЕП 742-ИД та вивчення стану поверхневого шару зразків після обробки.

Для вивчення процесу механічної обробки на стан поверхневого шару зразків, нами проведена підготовка зразків для досліджень. Для цього була вирізана центральна частина диску турбіни діаметром 280 мм. методом гідроабразивного різання на гідроабразивному верстаті (рис. 1).



Рис. 1. Розрізаний диск турбіни

Для вивчення процесу торцевого різання та процесу поверхнево-пластичного деформування була підготовлена одна торцева поверхня центральної частини диска турбіни. Оброблювалася торцева поверхня (зовнішній діаметр 150 мм, внутрішній 130 мм) центральної частини диска на прецизійному токарному верстаті «HOLZMANN ED1000FDIG» з ЧПК. Інша торцева поверхня зразка була підготовлена для проведення процесу торцевого шліфування на шліфувальному верстаті «JONES & SHIPMAN WD936/7» (моделі 3G711AF1) з ЧПК.

Точіння торця диска турбіни зі сплаву ЕП 742-ИД відбувалось різальними інструментами з твердого сплаву марки SECO CNMG 120408 TH 1000 з PVD покриттям TiSiN-TiAlN. Марка TH1000 – це високотехнологічна марка токарного твердосплавного інструменту, що спеціалізується на рішеннях, які зазвичай називають складними матеріалами, такими як загартовані матеріали, термооброблені сталі з HRC 50–62 та жароміцні сплави, такі як Inconel (v_p – 25 м/хв.; S – 0,07 мм/об.; t – 0,2 мм) (рис. 2, а).

Проведені дослідження процесу поверхнево-пластичного деформування (ППД) торцевої поверхні зразку диска алмазними наконечниками для вигладжування з радіусами при вершині $R = 0,5$ мм та $R = 1$ мм (v_p – 25 м/хв.; S – 0,05 мм/об.; t – 0,01 мм), (рис. 2, б).

Проведені дослідження процесу шліфування торцевої поверхні зразку диска абразивними крутами з рубін-корунду. Вивчено вплив режимів шліфування та типу кругів на показники працездатності процесу та якості торцевої поверхні зразку диска турбіни (рис. 2, в). Використовувались шліфувальні круги із монокристалічного хромистого корунду (рубін-корунду) прямого профілю (типу Т1) діаметром 250 мм та висотою 25 мм, зернистістю F40 на керамічній зв'язці ($v_{кр}$ – 25 м/с; $S_{нов}$ – 2 м/хв.; $S_{пол.}$ – 0,05 м/хв; t – 0,01 мм/подв.хід). Вибір шліфувальних кругів із монокристалічного хромистого корунду (рубін-корунду) обґрунтовано високою якістю шліфування крутами даного типу жароміцних сплавів.

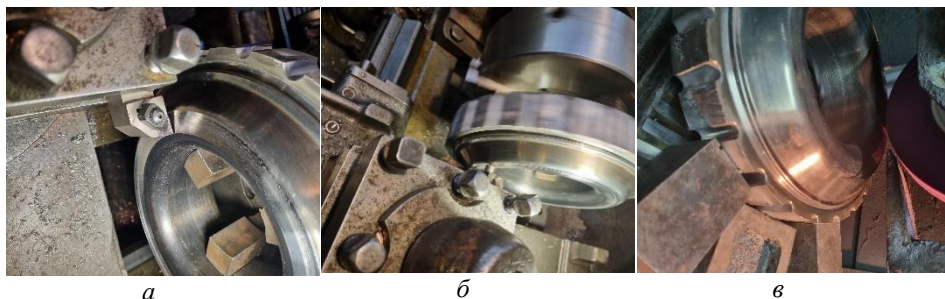


Рис. 2. Механічна обробка торця диску турбіни із жаростійкого сплаву
ЭП 742-ИД: а – точіння твердосплавним інструментом SECO CNMG 120408
ТН 1000 з PVD покриттям TiSiN-TiAlN; б – ППД торцевої поверхні диску
алмазними наконечниками; в – шліфування торцевої поверхні диску
абразивними кругами з рубін-корунду

Критерієм оцінки поверхневого шару була шорсткістю обробленої
поверхні після кожного типу механічної обробки (рис. 3).



Рис. 3. Шорсткість торця диску турбіни після точіння твердосплавним
інструментом (а), ППД алмазними наконечниками (б), шліфування
абразивними кругами з рубін-корунду (в)

Шорсткість обробленої поверхні замірялась вздовж торцевої поверхні
фрагменту диску турбіни та складала $Ra\ 0,27$ при шліфуванні, поверхневий шар не
мав механічних дефектів, $Ra\ 0,59$ при різанні токарними різцями, поверхневий
шар після точіння мав більшу шорсткість в порівнянні із шліфуванням, а також
налипи окремих частинок металу на обробленій поверхні, що вказувало на
адгезійну взаємодію між інструментальним та оброблюваним матеріалом та
вимагало проведення обробки із застосуванням МОР, та $Ra\ 1,32$ при поверхнево-
пластичному деформуванні алмазними наконечниками, при ППД отримано
найгірший стан обробленої поверхні. Виявлене погіршення якості поверхні після
процесу ППД жароміцного сплаву ЭП742-ИД пояснюється сукупністю фізико-
механічних та трибологічних чинників. Жароміцні нікелеві сплави мають високу
міцність, низьку пластичність і схильність до інтенсивного адгезійного зчеплення з
інструментальними матеріалами. При контакті алмазного наконечника з

поверхню сплаву в зоні деформації виникають значні питомі тиски та локальне підвищення температури, що призводить до мікропластичного зсуву верхніх шарів металу і налипання його на інструмент. Адгезійна взаємодія супроводжується утворенням налипів і мікрозадирів, які після проходження інструменту залишаються на поверхні у вигляді дефектів. Крім того, через низьку теплопровідність жароміцних сплавів теплота деформації не відводиться вглиб, а концентрується у тонкому поверхневому шарі, що спричиняє його локальне розупрочнення і появу мікротріщин при повторному навантаженні. Тому для таких матеріалів ППД алмазними наконечниками без охолодження або при завищених режимах подачі є недоцільним.

Результати досліджень показали, що найбільш оптимальним фінішним методом обробки виробів із жароміцного сплаву марки ЭП742-ИД є шліфування кругами із хромистого корунду (рубін-корунду). Круги із хромистого корунду шліфують жароміцний сплав рівномірно, без напруження та не «припікають» поверхню обробленого матеріалу та забезпечують шорсткість обробленої поверхні $Ra\ 0,27$.

УДК 621.9:004.9

О.О. Серeda, магістр спеціальності 131 Прикладна механіка
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ЦИФРОВІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА ЯК КЛЮЧОВИЙ ФАКТОР РОЗВИТКУ СУЧАСНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

Сучасне машинобудування перебуває на етапі глибокої трансформації, спричиненої Четвертою промисловою революцією (Industry 4.0). Ключовим елементом цієї трансформації є цифровізація виробництва, яка охоплює інтеграцію інформаційних технологій у всі ланки життєвого циклу продукту – від проектування до експлуатації та утилізації. Це не просто автоматизація, а створення єдиного, інтелектуального, взаємопов'язаного виробничого середовища, яке забезпечує гнучкість, ефективність та індивідуалізацію продукції [4].

Тотальна цифровізація, що включає впровадження систем CAD/CAM/CAE, технології "цифрового двійника" (Digital Twin), промислового Інтернету речей (IIoT) та адитивних технологій (3D-друк), є вирішальним фактором, що визначає конкурентоспроможність, інноваційність та здатність сучасних машинобудівних підприємств оперативно реагувати на глобальні виклики та вимоги ринку.

Інтегроване проектування та моделювання (CAD/CAM/CAE). Впровадження CAD (Computer-Aided Design), CAM (Computer-Aided Manufacturing) та CAE (Computer-Aided Engineering) систем створює єдиний цифровий ланцюжок. Це дозволяє скоротити час на розробку, уникнути помилок

на ранніх стадіях, провести повний цикл віртуального тестування (CAE) до створення фізичного прототипу та автоматично генерувати програми для верстатів з ЧПК (CAM) [1, 2].

"Цифровий Двійник" (Digital Twin) це концепція, яка передбачає створення віртуальної копії фізичного продукту, виробничої лінії або цілого заводу. Це забезпечує можливість прогнозувати поведінку обладнання в різних умовах та оптимізувати виробничі процеси в реальному часі. Також ще здійснювати проактивне технічне обслуговування, запобігаючи аварійним зупинкам і мінімізуючи простой [3].

Промисловий Інтернет Речей (IIoT) та Великі Дані (Big Data) в основному це датчики та мережеві пристрої, об'єднані в систему IIoT, збирають величезні масиви даних (Big Data) про стан обладнання, якість матеріалів та параметри процесів. Аналіз цих даних за допомогою штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) яка дозволяє, наприклад, виявляти приховані закономірності та підвищувати якість продукції. Ще ідія в цьому є налаштовувати обладнання для максимальної енергоефективності та реалізувати адаптивне та автономне виробництво [2, 4].

Також ключовий фактор розвитку машинобудування є адитивні Технології (3D-друк).

Адитивне виробництво (AB) – це процес створення тривимірних об'єктів шляхом пошарового додавання (злиття, спікання, полімеризації) матеріалу, на противагу традиційним субтрактивним (різання, фрезерування) методам. Це радикально змінює підходи до проектування та логістики.

Адитивне виробництво дозволяє створювати деталі з оптимізованою, біонічною геометрією (імітацією природних структур), які неможливо виготовити іншими способами. Це забезпечує зменшення маси при збереженні або підвищенні міцності (особливо важливо в аерокосмічній та автомобільній галузях). Також застосовуються передові матеріали — високоміцні метали (титан, нікелеві сплави), композити та полімери. Найпоширеніші методи включають селективне лазерне спікання (SLS) та плавлення в шарі (SLM) для металів.

Децентралізація виробництва у адитивному виробництві є технологія, яка дозволяє виготовляти запасні частини на вимогу (on-demand manufacturing) без необхідності зберігання великих складських запасів. Це суттєво скорочує логістичні витрати та час простою обладнання. Адитивні технології ідеально підходять для дрібносерійного та індивідуального виробництва (наприклад, інструментальне оснащення або медичні імпланти) [5, 6].

Цифровізація є невід'ємною частиною сучасного машинобудування, перетворюючи його з традиційної галузі на високотехнологічну та інтелектуальну. Комплексне впровадження цифрових технологій забезпечує гнучкість, швидкість та персоналізацію виробництва, що є критично важливим для збереження конкурентних переваг на світовому ринку та задоволення зростаючого попиту на інноваційні та високоякісні продукти [4].

Список літератури:

1. Внуков Ю.Н. та ін. Інтегровані технології машинобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – 480 с.
2. Партика Т.Л., Фоменко І.О. Цифрові технології в машинобудуванні. Навчальний посібник. – Київ: Центр учбової літератури, 2020. – 288 с.
3. Швайгер О. Концепція “цифрового двійника” як інструмент трансформації машинобудівної галузі. // Економічний часопис Волинського національного університету. – 2022. – №1.
4. Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. World Economic Forum, 2016.
5. Степаненко С.М., Коваленко О.В. Основи адитивних технологій. – Дніпро: ДНУ, 2021. – 150 с.
6. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. – Springer, 2021.

УДК 539.4

Є.С. Сиройд, асистент

Б.А. Шелудченко, к.т.н., професор

Поліський національний університет

В.А. Яновський, доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ УТВОРЕННЯ ТРІЩИН В АНІЗОТРОПНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ЗАЛЕЖНО ВІД УМОВ ОРІЄНТАЦІЇ РІЗАЛЬНОЇ КРОМКИ

Залежно від характеру прикладення зовнішніх навантажень можна виокремити три основних типи розвитку тріщин, які загалом визначають відрив, поздовжній та поперечний зсув в анізотропному середовищі (рис. 1).

При деформуванні оброблюваного середовища за схемою I – відрив (розтягування) - береги тріщини розходяться один відносно одного, що визначає крихке руйнування деформованого середовища. У випадку деформування за схемою II – реалізується поперечний зсув – поверхні тріщини зміщуються шляхом взаємного ковзання у поперечному напрямку, що зумовлює обертову переорієнтацію шарів деформованого середовища. У випадку розвитку тріщини за схемою III – поздовжній зсув – поверхні тріщини ковзають одна відносно одної у поздовжньому напрямку, внаслідок чого відбувається ущільнення деформованих шарів середовища.

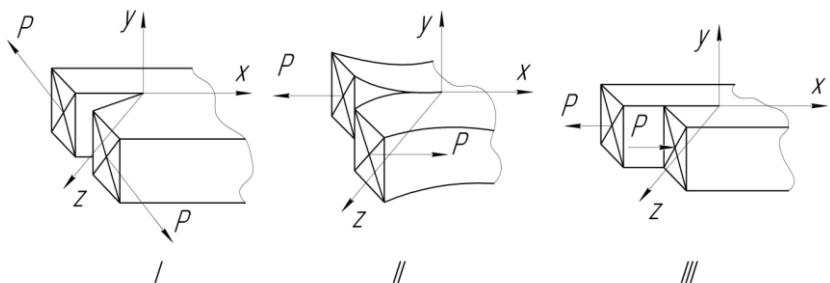


Рис. 1. Схеми деформування та утворення тріщин [2]

Схема I:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3}{2} \Theta \right); \\ \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3}{2} \Theta \right); \\ \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\Theta}{2} \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3}{2} \Theta; \\ \sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y); \\ \tau_{xz} = 0; \\ \tau_{yz} = 0; \\ u = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 - 2\mu + \sin^2 \frac{\Theta}{2} \right); \\ v = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\Theta}{2} \left(2 - 2\mu - \cos^2 \frac{\Theta}{2} \right). \end{array} \right. \quad (1)$$

Схема II:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\Theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3}{2} \Theta \right); \\ \sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\Theta}{2} \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3}{2} \Theta; \\ \tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3}{2} \Theta \right); \\ \sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y); \\ \tau_{xz} = 0; \\ \tau_{yz} = 0; \\ u = \frac{K_{II}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\Theta}{2} \left(2 - 2\mu + \cos^2 \frac{\Theta}{2} \right); \\ v = \frac{K_{II}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(-1 + 2\mu + \sin^2 \frac{\Theta}{2} \right). \end{array} \right. \quad (2)$$

Схема III:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\Theta}{2}; \\ \tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2}; \\ \tau_{xy} = 0; \\ \sigma_x = 0; \\ \sigma_y = 0; \\ \tau_{xy} = 0; \\ u = 0; \\ v = 0; \\ w = \frac{K_{III}}{G} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\Theta}{2}. \end{array} \right. \quad (3)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальні напруження у вершині тріщини;

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – дотичні напруження у вершині тріщини;

u, v, w – деформації у вершині тріщини у відповідних напрямках;

K_I, K_{II}, K_{III} – параметри, які визначають розподілення напружень і деформацій в конструкційному матеріалі поблизу вершини тріщини;

Θ – кут, який визначає напрямок розвитку (зростання) тріщини;

G – модуль зсуву;

r – радіус-вектор в напрямку розвитку тріщини;

μ – коефіцієнт Пуассона.

Об’ємний напружено-деформований стан досліджуваного середовища (ізотропного, анізотропного, трансверсальноізотропного) в умовах розвитку тріщини може бути описано, як (див. рис.2):

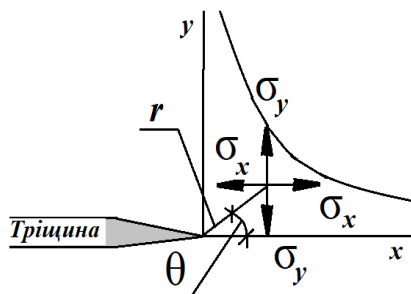


Рис. 2. Розподілення напружень у вершині тріщини для схеми навантаження I [2]

Список літератури:

1. Шелудченко Б.А. Агромеханіка ґрунтів / Б.А. Шелудченко. – Житомир: Полісся, 1992. – 249 с.

2. Шелудченко Б.А., Ярош Я.Д., Заброцький А.П., Кондратюк А.М., Білецький В.Р., В.Р. Плужніков В.Р. Графо-аналітичні дослідження формозміни деформованих тонкостінних контурів / Наукові горизонти. Том 23, №9. – Житомир: Поліський національний університет, 2020. – С. 7-11.

УДК 621.891

О.У. Стельмах, д.т.н.

Ч. Хао, к.т.н.

Пекінський технологічний інститут, Китай

Р.С. Костюнік, к.т.н.

Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна

К.К. Бадір, к.т.н.

Університет Халіфа, ОАЕ

Л. Танович, д.т.н.

Белградський університет, Сербія

МЕХАНІЗМ ЗНОШУВАННЯ ПРИ ТЕРТІ В УМОВАХ ГРАНИЧНОГО ЗМАЩЕННЯ

Однією з актуальних проблем сучасної трибології є підвищення працездатності трибосистем з граничним тертям. Значимість цієї проблеми зростає, якщо врахувати, що втрати, пов'язані із зношуванням вузлів тертя, становлять до 5% ВВП промислово розвинених країн. Розвиток цього напрямку стримується недостатністю знань про складні фізико-хімічні, фізико-механічні та динамічні процеси, що протікають при терті в умовах високих навантажувально-швидкісних параметрів у трибосистемі «тверде тіло-мастильне середовище-тверде тіло». При цьому в трибології граничного мастила і фізики конденсованого стану термін «граничні шари мастила» (від моно- до мультимолекулярних), які за своїми реологічними і теплофізичними властивостями істотно відрізняються від об'ємних властивостей мастильного середовища, міцно увійшов в ужиток. На відміну від терміна «прикордонний шар» в аеро- та гідродинаміці, визнаного терміну «граничні шари мастила» досі не дано, хоча глибокі дослідження граничних шарів на сучасному нанорівні свідчать про істотний вплив їх властивостей на процеси тертя і зношування поверхонь трибоконтактів у різних об'єктах техніки, наприклад у металорізальних верстатах.

Існує два основних взаємовиключних підходи до вирішення проблеми граничного тертя. Перший, ЕГД (еластогідродинамічний) підхід, заснований на динамічних процесах у тонкому мастильному шарі, в якому виникає надлишковий тиск, що ототожнюється з контактними напруженнями в робочих поверхнях, хоча трибоконтакт має три характерні області за напрямком руху

відповідно до термінології О. Рейнольдса: звужується або конфузозна область (КО), перехідна область (ПО) і розширюється або дифузозна область (ДО).

В рамках ЕГД моделі мастильне середовище розглядається як ньютонівська однорідна рідина. Цей підхід передбачає безмінність контакту, що суперечить експерименту. При цьому адгезійно-деформаційні взаємодії між поверхнями не розглядаються. Однак, в рамках цього підходу виявлені кавітація і термoeфект в мастильних шарах, що підтверджують наявність в них динамічних процесів.

Другий підхід, заснований на адгезійно-деформаційній теорії граничного змащення. У рамках цього підходу граничний шар розглядається як «третє тіло», в якому тиск, що ототожнюється з герцевськими контактними напруженнями, завжди вищий за тиск навколишнього середовища. При цьому будь-які динамічні процеси в граничному шарі не враховуються, що обмежує встановлення взаємозв'язку неоднозначних складних динамічних процесів у граничних шарах з адгезійно-деформаційною взаємодією поверхонь та не дозволяє керувати трибологічною поведінкою трибоконтакту.

Автори розглядали третій підхід, заснований на адгезійно-деформаційній взаємодії поверхонь у її взаємозв'язку з динамічними процесами в граничному шарі. Для встановлення такого взаємозв'язку необхідно було провести дослідження як закономірностей динамічних процесів у граничному шарі, так і адгезійно-деформаційної взаємодії поверхонь спільно з трибологічною поведінкою контакту.

Під час досліджень моделювався процес тертя ковзання підшипника з лінійним контактом, де підшипник ковзання представлений у вигляді системи (рис. 1) – нерухомого плоского зразка і обертового циліндричного ролика (діаметр – 33 мм, ширина робочої поверхні контакту – 3 мм), виготовлених зі сталі ШХ-15 (HRC 59...63). Крім поступального переміщення по осі дії осьового навантаження OY робоча поверхня плоского зразка могла вільно обертатися відносно осей OX і OZ , які перетинаються в центрі мас модельного вала. Це дозволяє коректно вимірювати силу тертя датчиком, що обмежує переміщення вала відносно осі OZ і забезпечувати повне прилягання поверхонь контакту при обертанні вала за рахунок можливості плоского зразка вільно переміщатися відносно осі OX . У разі відсутності переміщення плоского зразка відносно осі OX , тертя ковзання реалізується малою частиною (до 5% довжини контакту) поверхні модельного вала, яка за один оборот має випадкову ширину і описує траєкторію тертя «вісімки». У цьому випадку реальна площа контакту істотно менша за розрахункову величину, а контактні напруги відповідно більші за розрахункові значення.

Для забезпечення коректності вимірювань після трибологічних випробувань використовувалися безконтактний лазерний скануючий диференціально-фазовий мікроскоп-профілометр з чутливістю по профілю 1 нм, а також растровий електронний мікроскоп РЕМ-106І. Параметри зношеної доріжки ковзання у вигляді профілограм і 3D зображення визначалися на мікроскопі-профілометрі шляхом растрового сканування у напрямку ковзання.

Запропонована експрес-методика випробувань на тертя і знос проби мастильного матеріалу, яка полягала в наступному. Камера, деталі кріплення зразків і самі зразки після доведення ретельно промивалися і протиралися насухо, у ванночку з плоским зразком заливалася проба випробовуваної рідини. Електроприводом забезпечувалася номінальна частота обертання модельного вала (300 хв^{-1}) до лінійної швидкості при одночасному плавному збільшенні осевого навантаження до номінальної величини після чого починався відлік часу першого етапу випробувань до проходження робочою поверхнею вала 320 м шляху через контакт. Після цього проводиться другий етап тертя цього ж модельного вала по новій поверхні плоского зразка також протягом 320 м. Третій етап тертя аналогічний другому – той же модельний вал реалізує тертя, але по новій поверхні плоского зразка. Четвертий етап тертя проводиться за тих же початкових умов, що і попередні три, але протягом 1900 м шляху.

Перші три короточасні етапи тертя забезпечували формування на робочій поверхні вала вторинних структур, характерних для даного зразка рідини, а четвертий, більш тривалий етап, дозволяє оцінити триботехнічні властивості рідини з урахуванням властивостей раніше утворених вторинних структур. Таким чином, перші три короточасні етапи тертя характеризують припрацювальні властивості випробуваного середовища за величиною, так званих початкових зносів, а IV-й, більш тривалий етап, характеризує інтенсивність зношування в часі. Оцінка протизносних властивостей випробуваних зразків проводилася за середнім значенням п'яти однакових серій чотири-етапних випробувань.

Розроблена методика експрес-випробувань дозволяє лабораторним шляхом досить надійно визначати протизносні властивості мастил.

За наведеною методикою трибологічні випробування проводилися при визначених експериментальним шляхом початкових розрахункових контактних напружень для низькомолекулярних вуглеводневих середовищ – 1000 МПа, а для масел залежно від в'язкості – від 1000 до 2500 МПа. Залежно від цілей трибологічних досліджень лінійна швидкість ковзання модельного вала варіювалася від 0,04 м/с до 2 м/с. Шорсткість робочих поверхонь модельного підшипника створювалася шляхом їх послідовного полірування алмазними пастами до рівня параметра $Ra < 20 \text{ нм}$, що контролювалося мікроскопом-профілометром. Вимірювання профілів зносу доріжок тертя проводилися контактним профілографом-профілометром «Калібр М201» і безконтактним мікроскопом-профілометром.

Досліджено паливно-мастильні матеріали різних класів: авіакеросини (ТС-1, РТ), моторні мінеральні (МС-20, ГАЛОЛ М-4042, МК-8) синтетичні оливи (діалкілбензолна, ППМ-10) вакуумні оливи (ВМ-6, ВМ-4), гідравлічні оливи (АМГ-10, ПП 18), холодильне масло ХФ 12-16, бензини та присадки до них. У всіх цих середовищах під час лабораторних випробувань і після тертя спостерігалися якісно схожі процеси: закономірна локалізація мікрозачеплення і мікрорізання з характерними пошкодженнями поверхонь тертя, однаковий розподіл продуктів зносу і циркуляційні течії в середовищі відносно напрямку

ковзання, що послужило приводом для висунування гіпотези про наявність двох різнополярних процесів стиснення і розтягування фрагментів мастила в граничних шарах трибосистеми ковзання з лінійним контактом, взаємозумовлених зворотними мікропотокami граничних шарів в конфузорній області і їх випаровуванням в дифузорній області контакту.

Підвищення зносостійкості трибосистем із зростанням фактичних контактних напружень, асиметрія зношених доріжок ковзання, виникнення первинних вузлів адгезійної взаємодії в ДО і осідання продуктів зношування в області, близькій до КО – закономірний наслідок протікання впорядкованих динамічних процесів у граничних шарах мастила, що супроводжується фазовими переходами: контактними мікропотокami граничних шарів у КО та нуклеацією газової фази в ДО.

У конфузорній області контакту під дією високих позитивних градієнтів стиснення відбувається пошарове плавлення квазікристалічних мультимолекулярних граничних шарів і їх течія в напрямку, протилежному руху вала.

У дифузійній області контакту під дією негативних градієнтів напружень розтягування граничні шари, перебуваючи в умовах розрідження, пошарово випаровуються, реалізуючи «холодне кипіння», створюючи умови квазісухого тертя. При цьому під дією атмосферного тиску зворотна течія формується з вільних молекул середовища і спрямована також у зворотному до обертання вала напрямку.

Аналіз отриманих результатів досліджень показав, що первинна адгезійна взаємодія поверхонь тертя виникає в дифузійній області трибоконтакту. Запропонований десорбційно-адгезійний механізм зношування при терті в умовах граничного змащення, що обумовлений адгезією поверхонь в дифузорній області (ДО) контакту, наслідком чого є наявність виривів і надходження разом з валом первинних частинок зносу в конфузорній області (КО), які здійснюють мікрорізання поверхні в цій області з подальшим сколюванням вершин адгезійних «наростів», що переходять у продукти зносу.

УДК 621.82

Я.А. Степчин, к.т.н., доц.
М.Ю. Куліковський, студент
Д.О. Лапчик, студент

Державний університет «Житомирська політехніка»

ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

Точність та продуктивність обробки деталей машин на металорізальних верстатах у значній мірі залежить від забезпечення довговічності та безвідмовності найбільш відповідальних деталей та складальних одиниць. Важливе місце серед них займають підшипники кочення приводів верстатів, особливо шпиндельних вузлів, від яких, в першу чергу, залежить точність і стабільність отримуваних при обробці різанням розмірів деталей. Значна частина відмов технологічного обладнання напряму пов'язана зі зношуванням підшипників [1].

При розгляді роботи шпиндельної групи металорізальних верстатів особливо важливим є прогнозування стану підшипників опор з метою вчасної протидії зниженню точності та продуктивності обладнання або і виходу його з ладу. Важливим методом прогнозування стану механізмів на підшипниках кочення є вібраційна діагностика, яка забезпечує достатню інформативність процесів, що супроводжують роботу діагностуємих вузлів, та можливість проведення аналізу без демонтажу обладнання [2]. Основною вимогою до її застосування є достатня достовірність визначення та прогнозування параметрів стану підшипника з простотою контролю діагностичних параметрів. Діагностика устаткування за вібрацією є ефективним способом попередження відмов, оскільки поява незворотних змін стану відповідальних вузлів впливає на різні параметри вібрації [3].

Вибір діагностичних параметрів підшипників кочення в значній мірі залежить від режиму їх роботи. Залежно від виду навантаження підшипники кочення працюють в умовах статичного та ударного (динамічного) навантаження, маятникових коливань, кругових коливань цапфи валу, каскадного руху цапфи валу та режиму перекидання.

У підшипниках кочення дефекти з'являються на усіх етапах його життєвого циклу і, відповідно, усі види дефектів повинні надійно діагностуватися в процесі експлуатації обладнання. Основними проблемами вібродіагностики підшипників є слабкість високочастотної вібрації, утруднений доступ до місця її розташування та негативний вплив зовнішніх джерел при аналізі низькочастотних складових вібрації підшипникового вузла [1, 2, 4].

На підставі систематизації та аналізу зміни рівня вібрацій на характерних частотах складових спектру вібрації та її обвідної, що можуть бути застосовані для ідентифікації дефектів підшипників кочення встановлено, що визначення

дефектів підшипників кочення за зміною рівня вібрацій на характерних частотах складових спектру вібрації та спектру обвідної надає більш конкретну інформацію щодо характеру пошкодження підшипника або недоліків його встановлення та експлуатації [5]. Вузкий інформативний діапазон частот датчика, відповідний його резонансним частотам, значно підвищує його чутливість, проте ускладнює процес визначення інформативної компоненти сигналу.

Значний вплив на оцінку стану підшипника також має точність визначення базового рівня сигналу, який відповідає умовам його нормальної роботи, а також залежить від частоти його обертання та розмірів.

Пропонується застосувати розроблений на основі узагальнення експериментальних даних параметр T [5] оцінки стану підшипників кочення до підшипникових вузлів опор шпиндельних вузлів металорізальних верстатів з метою оцінки загального стану підшипника кочення та прогнозування його подальшої працездатності.

Список літератури:

1. *Harmouche J.* Improved fault diagnosis of ball bearings based on the global spectrum of vibration signals / *J. Harmouche, C. Delpha, D. Diallo* // *IEEE Transactions on Energy Conversion.* – 2014. – Vol. 30(1). – P. 376-383.
2. *Яворський І.М.* Методи вібраційної діагностики початкових стадій пошкодження обертових систем / *І.М. Яворський, П.П. Драбич, І.Б. Кравець, І.Й. Мацько* // *Фізико-хімічна механіка матеріалів, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів.* – 2011. – № 2 – С. 134-140.
3. ДСТУ ISO 13373-1:2015 Моніторинг і діагностика стану машин. Моніторинг вібраційного стану. Частина 1. Загальні методики. [Чинний від 2016-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2015. (Інформація та документація).
4. *Howard I.* A review of rolling element bearing vibration detection, diagnosis and prognosis. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory. – 1994. – 94 p.
5. *Степчин Я.А., Отаманський В.В., Малишев І.П., Пилипенко О.М.* Вібродіагностика підшипникових вузлів папероробних машин. Науковий журнал "Технічна інженерія" Державного університету "Житомирська політехніка". – 2023. №1 (91). – С. 10-16.

УДК 631.171.075.3

О.О. Суворов, студент
Р.А. Вишневський, студент
Я.П. Коваленко, доктор філософії з прикладної механіки
Державний університет «Житомирська політехніка»

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ

Фрезерування є одним із найпоширеніших методів механічної обробки, який забезпечує формування складних поверхонь з високою точністю та чистотою. Оптимізація режимів фрезерування (швидкість різання, подача, глибина різання, кут нахилу інструменту) має вирішальне значення для досягнення необхідної точності геометрії деталей, зниження шорсткості поверхні та підвищення стабільності процесу обробки. Параметри різання безпосередньо впливають на теплові процеси, вібрації, знос інструменту та деформації заготовки. Надмірна швидкість різання або глибина різку можуть призвести до термічних напружень і зниження точності, тоді як недостатня подача зменшує продуктивність. Тому підбір оптимальних параметрів базується на математичному моделюванні, експериментальних даних та застосуванні систем CAD/CAM для прогнозування сил різання та температурних характеристик.

Використання твердосплавних фрез з покриттями TiAlN або CrN забезпечує стабільність процесу при високих швидкостях різання. Оптимізація траєкторій руху інструменту в CAM-системах дозволяє мінімізувати похибки позиціонування та підвищити точність обробки складних контурів. Для контролю точності використовуються координатно-вимірювальні машини, що дозволяє оцінювати геометричні відхилення деталей після фрезерування. Застосування адаптивного керування процесом різання та моніторингу вібрацій дає змогу в реальному часі регулювати параметри обробки, що суттєво підвищує стабільність та якість поверхні. Це особливо важливо при виготовленні деталей для авіаційної, медичної та приладобудівної галузей, де допуски на точність є мінімальними. Таким чином, оптимізація параметрів фрезерування є ключовим напрямом підвищення точності механічної обробки. Вона поєднує використання сучасних комп'ютерних технологій, матеріалознавства та експериментального аналізу, що забезпечує зниження похибок, підвищення ресурсу інструменту та конкурентоспроможності виробництва.

Окремої уваги потребує питання термостабільності процесу фрезерування. У зоні різання виникає значна кількість тепла, що призводить до теплових деформацій інструменту та заготовки. Використання ефективних систем охолодження, зокрема мінімального змащування, кріогенного охолодження або внутрішнього підведення мастильно-охолоджувальної рідини через інструмент, дозволяє зменшити температурний вплив і забезпечити стабільність розмірів. Крім того, застосування сучасних покриттів на фрезах зменшує коефіцієнт тертя, підвищує зносостійкість та забезпечує рівномірність зняття стружки. Для

складних просторових поверхонь усе більшого поширення набувають п'ятикоординатні верстати з числовим програмним керуванням. Вони забезпечують високу точність позиціонування інструменту та дозволяють виконувати обробку за складними траєкторіями без додаткових переналагоджень [1].

Завдяки сенсорним системам моніторингу вібрацій, температури та сил різання верстат може автоматично регулювати подачу чи швидкість у реальному часі. Такі системи дозволяють підтримувати стабільну якість обробки навіть за зміни властивостей матеріалу або зношування інструменту. Алгоритми оптимізації на основі штучного інтелекту поступово впроваджуються у виробництво, забезпечуючи самонавчання системи та автоматичне коригування режимів. Під час вибору параметрів фрезерування також враховується вплив мікрогеометрії різальної кромки. Радіус заокруглення, кут нахилу та форма стружколамача визначають не лише ефективність зняття стружки, а й рівень залишкових напружень у поверхневому шарі деталі. Оптиміальне поєднання цих параметрів дозволяє зменшити мікрореформації, що особливо важливо для деталей високої точності, зокрема корпусів, шестерень, лопаток турбін, медичних імплантатів тощо.

Сучасні дослідження у сфері прецизійного фрезерування спрямовані на створення цифрових двійників процесу обробки. Такі моделі відтворюють поведінку інструменту та заготовки в реальному часі, що дозволяє прогнозувати якість поверхні, знос інструменту та відхилення форми ще до початку фізичної обробки. Це суттєво скорочує кількість експериментів і зменшує витрати матеріалів. Отже, підвищення точності фрезерування є багатофакторним завданням, яке охоплює оптимізацію режимів різання, характеристик інструменту, динамічної стабільності та цифрового контролю процесу. Комплексне застосування сучасних методів моделювання, автоматизації й контролю. Важливо також підкреслити роль кваліфікації оператора та рівня технічного обслуговування обладнання у забезпеченні точності фрезерування. Навіть за оптимальних режимах різання та сучасного програмного керування, людський фактор і стан верстата залишаються критично важливими складовими. Регулярна калібровка системи ЧПК, контроль жорсткості шпиндельного вузла та точності подачі забезпечують стабільність технологічного процесу. Використання метрологічних приладів для проміжного контролю та профілометрії дозволяє своєчасно виявляти відхилення та коригувати параметри обробки. Перспективним напрямом розвитку є впровадження концепції «розумного виробництва» (Smart Manufacturing), де фрезерні верстати інтегровані у єдину цифрову мережу з системами контролю, аналізу даних і прогнозування технічного стану. Це дозволяє створити гнучкі автоматизовані виробничі системи, здатні самостійно адаптуватися до змін умов роботи. Такі технології формують основу «Індустрії 4.0», що відкриває нові можливості для підвищення точності, швидкості та надійності процесів механічної обробки. У майбутньому подальше вдосконалення методів оптимізації параметрів фрезерування сприятиме розвитку високотехнологічного машинобудування в

Україні, розширенню експорту інженерної продукції та підвищенню престижу вітчизняних наукових розробок у галузі точного машинобудування.

Список літератури:

1. Грабовський П.І. Технологічні основи фрезерування та оптимізація процесів обробки. – Харків: ХНАДУ, 2019. – 230 с.

УДК 621.91.01

О.О. Томашевський, аспірант

Н.О. Балицька, к.т.н, доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ПИТОМІ СИЛИ РІЗАННЯ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ СПЛАВІВ NITi

Мікрофрезерування сплавів NiTi є перспективною технологією лезової обробки, що забезпечує виготовлення конструктивних мікроелементів. Завдяки унікальним властивостям NiTi, зокрема ефекту пам'яті форми, надпружності, корозійній стійкості, біосумісності тощо, цей метод все ширше застосовується для створення мініатюрних деталей у біомедичних пристроях, аерокосмічних системах та мікроелектромеханічних компонентах.

Однією із основних характеристик процесу мікрофрезерування є питома сила різання – сила, яку необхідно прикласти для зрізання одиниці площі зрізу під час обробки матеріалу різанням. Вона характеризує опір матеріалу деформації та відокремленню стружки, а також впливає на енергетичні показники процесу різання.

Зміна питомої сили різання є однією з основних причин прояву масштабного ефекту, оскільки при зменшенні розмірів зрізу вона значно зростає. При зменшенні розмірів різального інструменту, а також глибини різання та подачі, питома сила, що діє на одиницю об'єму матеріалу, зростає через більшу частку пластичних деформацій і мікроруїнувань порівняно із звичайним різанням. Це відбувається тому, що при малих розмірах зони контакту інструмента з оброблюваним матеріалом значний вплив мають мікроструктурні неоднорідності матеріалу. Таким чином, масштабний ефект при взаємодії інструмента з матеріалом суттєво змінює характер силового навантаження на різальну кромку [1].

Масштабний коефіцієнт – це відношення товщини зрізу до радіуса заокруглення різальної кромки інструмента, тобто чим менший радіус різальної кромки інструмента, тим більший масштабний коефіцієнт при тому ж значенні подачі. При зменшенні масштабного коефіцієнта зростає частка пластичної деформації матеріалу та тертя між різальною кромкою й оброблюваною

поверхню, що призводить до підвищення енерговитрат на одиницю об'єму зрізаного матеріалу.

Один із важливих підходів до підвищення ефективності мікрофрезерування сплавів NiTi полягає у зменшенні питомих сил різання, що досягається шляхом раціонального вибору геометрії інструмента та значень подачі. Подача на зуб повинна перевищувати значення мінімальної товщини зрізу, оскільки надто мала подача призводить до переважання пластичного деформування матеріалу над різанням і різкого зростання питомих сил [2].

За допомогою скінченно-елементного моделювання [3] було визначено сили різання при мікрофрезеруванні сплаву NiTi. В результаті було встановлено, що для фрези діаметром 0,5 мм при глибинах різання 0,1 та 0,003 мм питомі сили різання досягають 3100 ГПа, тоді як для фрези 0,2 мм – приблизно 700 ГПа. Зі збільшенням подачі з 0,000022 до 0,02 мм/зуб питома сила зменшується в 141,64 раза (фреза 0,2 мм) та 421,94 раза (фреза 0,5 мм). Це пов'язано з тим, що при подачі, меншій за радіус різальної кромки, матеріал переважно деформується, а не зрізається, що спричиняє нелінійне зростання навантаження. Отримані результати свідчать, що для забезпечення ефективного різання сплавів NiTi значення подачі повинне забезпечувати масштабний коефіцієнт не менше 0,1, а бажано – понад 0,5, що дозволяє знизити енергетичні витрати та навантаження на інструмент. Оптимальне поєднання цих параметрів забезпечує більш стабільні умови різання та покращує якість обробленої поверхні (зменшення заусенців).

Отже визначення оптимального значення подачі для конкретної фрези з певним радіусом заокруглення різальної кромки, є актуальним науково-практичним завданням. Правильна комбінація геометрії інструмента та режимів різання дозволяє мінімізувати силове навантаження, зменшити зношування інструмента та забезпечити вищу якість обробленої поверхні при мікрофрезеруванні NiTi.

Дослідження виконано в рамках реалізації НДР Міністерства освіти і науки України «Модифікація властивостей поверхонь інтерметалідів з ефектом пам'яті форми фрезерним текстуруванням» (№ 0123U102013).

Список літератури:

1. Aramcharoen, A., Mativenga, P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. Precision Engineering, 2009. Vol.33(4), P. 402–407.
2. Aslantaş K., Kaynak Y. Şekil Hafızalı NİTİ Alaşımının Mikro Frezelenmesi ve Kritik Talaş Kalınlığının Belirlenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2018. Vol. 2018, no. 18-2.
3. Balytska N., Tomashevskiy O., Shadura V. Evaluation of Cutting Forces and Temperatures in Micro-Milling of NiTi Alloys Using Finite Element Modeling. Journal of Engineering Sciences. 2025. Vol. 12, no. 1. P. A20–A27.

УДК. 675

М.Д. Троценко магістр спеціальності 131 Прикладна механіка
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ДРУК МЕТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАНОПОРОШКІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ МІКРОПЛАЗМОВОГО СПІКАННЯ

Аддитивні технології вже сьогодні змінюють підхід до проєктування та виробництва металевих деталей. Останні дослідження вказують на те, що введення нанопорошків у склад вихідного матеріалу відкриває додаткові можливості для поліпшення механічних характеристик виробів та контролю мікроструктури. Стаття на ScienceDirect (2025) показує: наночастинки можуть підвищувати щільність спечених шарів, зменшувати температуру локального спікання і, в результаті, сприяти зниженню термічних напружень у виробі. Це робить нанопорошкові композиції особливо цікавими для виготовлення складних деталей, де важлива висока точність геометрії й однорідність властивостей по об'єму.

Паралельно з цим, роботи міжнародної групи (Nature Communications, 2018) [2] демонструють можливість створення трьохвимірних металевих конструкцій з наноструктурованою архітектурою, які поєднують в собі високу жорсткість та малу масу. Такий підхід – «nano-architected metals» – показує, що поєднання тонкого контролю над мікроструктурою та адитивних методів проєктування дає синергетичний ефект: можна не лише зменшити витрату матеріалу, а й отримати бажану механічну відповідь за рахунок архітектурних рішень.

На стику цих ідей постає концепція використання локальних, низькоенергетичних джерел при спіканні нанопорошків – зокрема, мікроплазмове спікання. Такий підхід потенційно дозволяє: 1) ефективно зв'язувати наночастинки із нижчими тепловими впливами на навколишні шари; 2) точково корегувати процес спікання шар за шаром; 3) зменшувати деформації та залишкові напруження, властиві традиційним методам плавлення. Хоча системні дослідження мікроплазмового спікання ще лишаються на початкових етапах, поєднання доказаної користі нанопорошків і контролю енерговведення дає підґрунтя вважати цю комбінацію перспективною для точного виробництва деталей, наприклад, для авіаційної та медичної техніки [1].

Практичні задачі, що стоять перед впровадженням цієї технології, включають: оптимізацію розміру й розподілу наночастинок у порошкових сумішах; розробку надійних систем подачі й контролю порошку при адитивних процесах; калібрування параметрів мікроплазмового джерела для різних сплавів; а також методів неруйнівного контролю якості готових виробів. Також важливим є створення каталогу співвідношень «параметри процесу – мікроструктура – властивості», що дозволить переводити дослідницькі результати в промислові регламенти.

Впровадження технологій на основі нанопорошків і мікроплазмового спікання може стати конкурентною перевагою для вітчизняного машинобудування: можливість місцевого виробництва високоточних і функціонально-градієнтних деталей знижує логістичні витрати й час постачання, а також відкриває нішу для малого й середнього виробництва, що працює за принципом «випускай за потребою». Для України додатковим стимулом буде розвиток локальних постачань порошкових матеріалів і створення науково-виробничих кластерів, які поєднують інженерні розробки, матеріалознавство та промислові випробування.

У статті на ScienceDirect (2025) також відзначається, що наночастинки під час спікання діють як центри зародження нових фаз, завдяки чому зменшується пористість і утворюються більш рівномірні мікроструктури. Це підвищує не лише міцність, а й пластичність матеріалу, оскільки напруження в об'ємі розподіляється рівномірніше. Автори наголошують, що використання нанопорошків дозволяє уникати перегріву, який часто трапляється при лазерному чи електронно-променевому плавленні. Такий контрольований тепловий режим є ключовим для запобігання тріщинам і забезпечує високу якість поверхні без додаткової механічної обробки [1].

У статті Nature Communications (2018) дослідники продемонстрували, що наноструктуровані металеві решітки, створені методом двофотонної літографії, мають унікальне співвідношення міцності до маси. Вони витримують навантаження у десятки разів більше, ніж очікувалося для таких тонких структур, завдяки ефекту так званого «нанорозмірного зміцнення». Вчені зазначають, що при масштабуванні цього підходу до мікроплазмового або лазерного спікання можна буде створювати металеві деталі з програмованими властивостями – тобто підлаштованими під конкретні умови експлуатації. Саме це зараз розглядається як одна з найперспективніших тенденцій у розвитку адитивного виробництва [2].

Підсумовуючи, інтеграція нанопорошків у адитивні процеси доводить свою ефективність у поліпшенні властивостей металевих деталей, а ідеї створення nano-architected металів показують, як архітектурний контроль доповнює матеріальні інновації. Мікроплазмове спікання, у свою чергу, виглядає як логічний крок для зниження енергетичного впливу і підвищення точності процесу – варто приділити увагу експериментальним дослідженням і розробці промислових прототипів.

Список літератури:

1. Mubasher Ali, Uzair Sajjad, Ahsan Ali, Hafiz Muhammad Ali, Khalid Hamid. Metallic nanoparticles-based additive manufacturing: A review of recent advances on progress, prospects, and challenges, Materials & Design. Vol. 257. Article 114464. – 2025.
2. Andrey Vyatskikh, Stéphane Delalande, Akira Kudo, Xuan Zhang, Carlos M. Portela & Julia R. Greer. Additive manufacturing of 3D nano-architected metals Article 598 – 2018.

УДК 621.9:004.9

А.А. Хлинін, здобувач 1-го курсу магістратури, G9 Прикладна механіка
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

В.А. Дербаба, к.т.н., доцент
завідувач кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства,
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

РОЗРАХУНОК ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ ТРАЄКТОРІЙ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ В СИСТЕМІ SINUMERIK 828D/840D ДЛЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

У сучасному машинобудуванні ефективність процесів механічної обробки визначає конкурентоспроможність підприємств. Використання верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК) забезпечує високу точність і продуктивність, проте вимагає оптимізованого підходу до створення керуючих програм. Системи *Sinumerik 828D/840D* від компанії *Siemens* є одними з найсучасніших рішень для промислового виробництва. Вони підтримують багатовісну обробку, параметричне програмування, автоматичну генерацію траєкторій і симуляцію процесів.

Розробка параметричних траєкторій обробки деталей у цих системах дає змогу не лише підвищити гнучкість виробництва, але й мінімізувати людський фактор, скоротити час підготовки програм і підвищити якість готових виробів. Саме тому дослідження особливостей побудови параметричних моделей у середовищі *Sinumerik* є актуальним і практично значущим напрямом для сучасного машинобудування.

Предметом дослідження є методика створення параметричних траєкторій обробки деталей у системах *Sinumerik 828D/840D* для верстатів з ЧПК.

Метою дослідження є розробка підходу до побудови універсальних керуючих програм, які можуть автоматично формувати траєкторію інструмента залежно від змінних параметрів заготовки – таких як діаметр, довжина, форма або глибина обробки. Реалізація такого підходу дає можливість створювати гнучкі технологічні рішення, що легко адаптуються до різних типів деталей, підвищують продуктивність та забезпечують стабільну якість механічної обробки.

Системи *Sinumerik 828D* та *Sinumerik 840D* належать до високотехнологічних платформ керування верстатами з ЧПК, розроблених компанією *Siemens*. Вони поєднують потужне апаратне забезпечення з гнучким програмним середовищем, що підтримує параметричне програмування, макромови, багатовісну інтерполяцію та симуляцію обробки в реальному часі.

Параметричне програмування ґрунтується на використанні змінних і формул, за допомогою яких задаються основні технологічні параметри – координати, швидкість подачі, глибина різання, радіуси або кути. Це дозволяє

створювати універсальні програми, які автоматично адаптуються під конкретні розміри чи форму деталі.

Крім того, у системах *Sinumerik* передбачено використання спеціальних циклів і макрокоманд, що забезпечують спрощене описання типових технологічних операцій — свердління, підрізки, фрезерування, нарізання різьби тощо. Завдяки цьому програміст ЧПК може побудувати траєкторію не шляхом послідовного запису *G*-кодів, а через набір параметричних модулів, які легко модифікуються.

Таким чином, параметричне програмування у середовищі *Sinumerik 828D/840D* є інструментом не лише для автоматизації створення програм, а й для оптимізації процесів обробки, скорочення часу переналагодження та підвищення точності виконання складних просторових траєкторій.

Розробка параметричних траєкторій обробки деталей у системах *Sinumerik 828D/840D* передбачає послідовне виконання кількох етапів, які охоплюють як створення математичної моделі, так і практичну реалізацію програми у середовищі контролера.

На першому етапі виконується аналіз геометрії деталі — визначаються основні контури, технологічні бази, отвори, фаски, радіуси та інші параметри, які можуть бути представлені змінними. Це дає можливість сформувати параметричну модель, у якій усі ключові розміри задаються через змінні.

Другим етапом є побудова структури програми у форматі *G*-кодів або в середовищі *ShopTurn*, де створюються макрокоманди та логічні зв'язки між параметрами. Використовуються умовні оператори, цикли, та формули, що дозволяють автоматично змінювати траєкторію в залежності від введених даних.

На третьому етапі проводиться віртуальне налагодження у програмі *SinuTrain*, яка імітує роботу систем *Sinumerik 828D/840D*. У цьому середовищі виконується перевірка коректності траєкторій, контроль за відсутністю зіткнень, оптимізація подачі, швидкості обертання шпинделя, а також візуалізація траєкторії інструмента у тривимірному просторі.

Заключним етапом є впровадження програми на реальному верстаті з ЧПК. Після тестового виконання здійснюється коригування параметрів для досягнення найкращих показників точності, якості поверхні та продуктивності.

Завдяки такому підходу створюється гнучка система програмування, яка дозволяє швидко адаптувати програму до нових умов – змінюючи лише вхідні параметри, без необхідності переписування всієї програми. Це істотно скорочує час підготовки виробництва та підвищує ефективність роботи верстатів.

Використання параметричних траєкторій у системах *Sinumerik 828D/840D* має вагоме практичне значення для підвищення ефективності сучасного виробництва. Насамперед це стосується скорочення часу підготовки програм — замість створення окремого керуючого коду для кожної модифікації деталі, технолог може застосовувати єдиний параметричний шаблон, у який достатньо внести змінні значення розмірів або кількості операцій.

Параметричні програми дозволяють оптимізувати траєкторію руху інструмента, зменшити холості ходи, скоротити час різання та підвищити

ефективність використання ріжучого інструменту. Крім того, система *Sinumerik* забезпечує точну симуляцію обробки, що дає можливість уникнути зіткнень, браку або пошкодження інструментів.

Завдяки інтегрованому середовищу *SinuTrain* (рис. 1), користувач може протестувати програму віртуально, відкоригувати параметри та переконатися у правильності траєкторії ще до запуску реального верстата. Це підвищує безпеку, точність і економічність виробництва, а також скорочує витрати на налагодження.

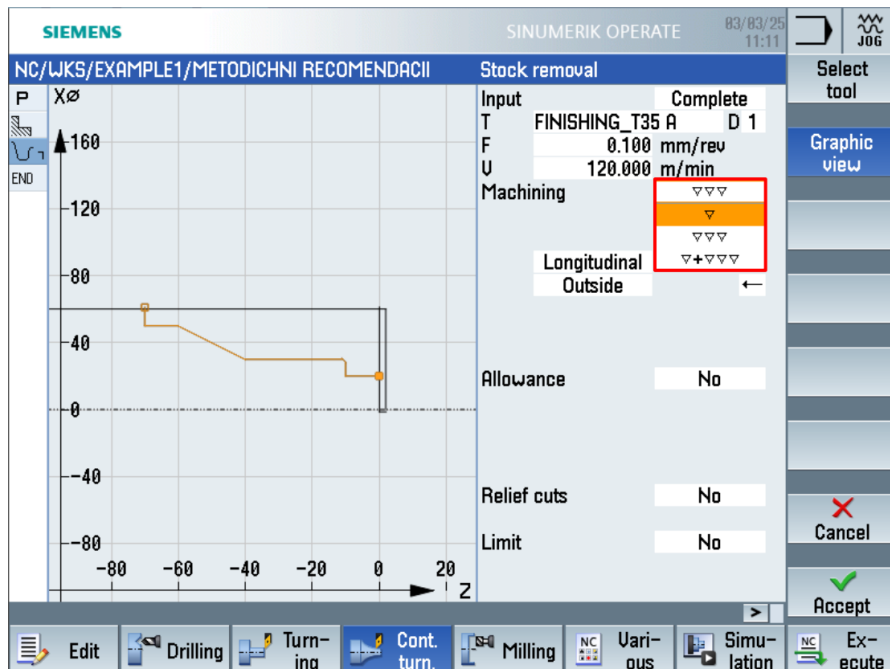


Рис. 1. Приклад параметричного контуру деталі в середовищі *SinuTrain*

Параметричне програмування в системах *Sinumerik 828D/840D* є потужним інструментом для створення інтелектуальних керуючих програм, що забезпечують високу точність, продуктивність і гнучкість процесу обробки деталей. Завдяки використанню змінних, формул, циклів і умовних операторів можна автоматизувати побудову складних траєкторій руху інструмента, адаптуючи їх до геометрії конкретної заготовки або технологічних вимог.

Розробка параметричних траєкторій дає змогу істотно зменшити час програмування, підвищити стабільність результатів і знизити ризик людських помилок, що особливо важливо для серійного та індивідуального виробництва високоточного обладнання.

Список літератури:

1. JIN, Weiwen; LEI, Tongfei. Numerical Control Simulation and Programming Based on SinuTrain Bearing Bracket (Five-axis). In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023. p. 012056.
2. Головка, В.М.; Пушкар, М.В. Концепція дослідження електроприводу металообробних станків за допомогою програмного забезпечення SIEMENS SINUTRAIN. *Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики"*, 2018, 463–465.
3. Martínez-Ruedas, Cristina; Adame-Rodríguez, Francisco José; Díaz-Cabrera, Juan Manuel. Integrating and interconnecting of older SINUMERIK CNC machines with industry 4.0 using a plug-and-play system. *Journal of Industrial Information Integration*, 2024, 38: 100583.
4. Zagórski, Ireneusz; Barszcz, Marcin. Virtual machines in education–CNC milling machine with Sinumerik 840D control system. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 2014, 8.24: 32–37.

УДК 621.7+621.9:004.9

С.О. Циганок, здобувач 1-го курсу магістратури,
спеціальності G9 Прикладна механіка

В.А. Дербаба, к.т.н, доцент
завідувач кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства,
*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро,
Україна*

SMART MANUFACTURING: ІННОВАЦІЇ В МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Розвиток концепції «Smart Manufacturing» у сфері механічної обробки деталей базується на інтеграції автоматизованих систем, IoT-технологій, комп'ютерного зору та алгоритмів штучного інтелекту. Такі технології дають змогу оптимізувати процеси фрезерування, точіння, шліфування та свердління, підвищити ефективність, зменшити витрати часу і матеріалів, а також забезпечити стабільну якість продукції [1].

Серед реальних прикладів застосування ШІ у механічній обробці можна виділити автоматичну оптимізацію режимів різання на підприємствах компанії Sandvik Coromant, де AI-алгоритми аналізують параметри процесу і коригують швидкість подачі та глибину різання залежно від стану інструменту та матеріалу [3]. На заводах Siemens використовуються системи комп'ютерного зору, що миттєво фіксують дефекти поверхні після обробки. Платформи превентивної діагностики, впроваджені на виробництвах Mazak, прогнозують відмови

шпинделів і приводів за кілька тижнів до поломки, використовуючи дані IoT-датчиків [2].

Гібридні верстати, як-от DMG MORI LASERTEC (рис. 1), поєднують 3D-друк металом та класичну субтрактивну обробку у єдиному виробничому циклі, при цьому штучний інтелект керує подачею матеріалу і послідовністю обробки [4]. У CAM-системах нового покоління, таких як Fusion 360, AI буде оптимальні траєкторії руху інструменту, що скорочує холості переміщення та підвищує рівномірність обробки [5].



Рис. 1. DMG MORI LASERTEC 65

Окрему увагу варто приділити використанню «цифрових двійників» – віртуальних моделей обладнання та виробів, які відтворюють їхню поведінку у реальному часі. Такі моделі дають змогу тестувати технологічні зміни без ризику пошкодження реального устаткування, а інтеграція з системами штучного інтелекту забезпечує швидкий аналіз тисяч варіацій процесу, вибираючи найбільш ефективний. Це скорочує час розробки нових виробів і підвищує точність виробничих операцій.

Перспективи розвитку Smart Manufacturing у механічній обробці пов'язані з появою повністю автономних виробничих ліній, де адаптивні роботи виконують всі ключові операції – від подачі заготовок та налаштування верстатів до контролю якості. Очікується ширше застосування технологій машинного навчання для аналізу «великих виробничих даних» та реалізації самонавчальних систем, здатних постійно вдосконалювати свої алгоритми обробки. Це дозволить підприємствам підвищувати продуктивність, зменшувати енергоспоживання та відповідати сучасним екологічним стандартам.

Список літератури:

1. Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
2. <https://www.siemens.com/global/en.html>
3. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb>
4. <https://en.dmgmori.com/>
5. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>

УДК 621.7

М.А. Шемен'ов, магістр гр. 131м-24н-1
Наукові керівники: С.Т. Пацера, к.т.н., професор кафедри технологій
машинобудування та матеріалознавства
В.М. Рубан, к.т.н., доцент кафедри
технологій машинобудування та матеріалознавства
*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро,
Україна*

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ КОНТРОЛЮ ДІАМЕТРА ВАЛУ

В умовах сучасного виробництва в таких галузях, як транспортне машинобудування, авіація, аерокосмічна та медична промисловість, вимоги до якості продукції, що випускається, а також до точності вимірювання розмірів деталей постійно підвищуються. Відповідно до цих тенденцій в останні роки спостерігається бурхливий розвиток технічних можливостей контрольно-вимірювальних приладів. Однак така тенденція призводить до неухильного зростання вартості вимірювальних приладів. Завдання обґрунтування раціонального вибору точності вимірювального приладу залишається актуальною [1].

Для розв'язання цієї задач такого класу в роботах [1, 2] запропоновано метод імітаційно-статистичного моделювання точності формоутворення базової поверхні виробу та розрахунку числового критерію достовірності контрольних процедур.

В даній роботі викладено особливості апробації вказаного методу дослідження стосовно контрольних операцій для поверхні високоточного валу.

Аналіз літературних джерел і нормативної документації показав, що чисельний метод статистичного моделювання (Монте-Карло) широко використовується для комп'ютерного моделювання вимірювальних процедур. Як потужний інструмент наукових досліджень, моделювання методом Монте-Карло вже давно широко використовується в машинобудуванні. Але особливість даного дослідження полягає в тому, що метод Монте-Карло інтегровано з імітаційним моделюванням контрольних операцій [2].

Метод статистичних випробувань, або метод Монте-Карло базується на використанні так званих випадкових чисел – можливих значень деякої випадкової величини із заданим розподілом ймовірностей.

При реалізації методу статистичних випробувань на комп'ютері, випадкові числа виробляються спеціальною електронною приставкою до комп'ютера (датчиком випадкових чисел) або машиною за спеціальною програмою. У будь-якому з цих варіантів для генерування випадкових чисел використовується апаратна (датчик випадкових чисел) або алгоритмічна (спеціальна програма

для комп'ютера) модель деякого випадкового процесу, імовірнісні характеристики якого відомі або можуть бути оцінені експериментально.

Вихідними даними для проведення комп'ютерних досліджень були:

- типові вимоги до точності циліндричної поверхні вала, яка є базовим елементом;
- типові вимоги нормативних документів до максимальної похибки застосовуваного вимірювального приладу.

Скористаємося методом статистичних випробувань, який обчислюється виразом виду:

$$I = (b - a) \int_a^b h(x) \frac{1}{b - a} dx, \quad (1)$$

де $(b - a)$ – інтервал випадкових чисел.

До статистичних показників якості валу відносимо: найбільше випадкове відхилення від номінального розміру (мкм); найменше випадкове відхилення від номінального розміру (мкм); середнє відхилення від номінального розміру (мкм); середньоквадратичне відхилення від середнього відхилення (мкм); поле розсіювання ω випадкових відхилень (мкм).

По результатам статистичних показників якості побудовано гістограму розподілу ймовірності отримання виробу рисунок 1.

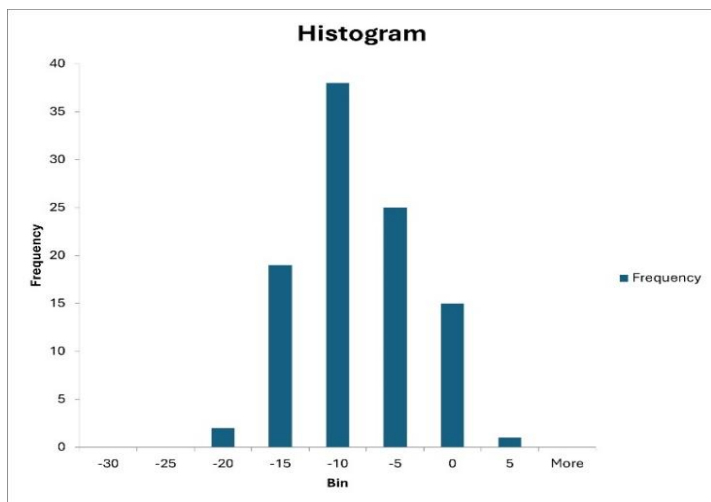


Рис. 1. Гістограма розподілу ймовірності отримання виробу

Кількісний критерій точності технологічної системи обираємо по відношенню поля допуску (або інтервалу розсіювання) до середньо квадратичного відхилення у статистичній вибірці за умови нульової похибки вимірювання:

$$Ac = \frac{T_d}{\sigma}, \quad (2)$$

де Ac - кількісний критерій точності технологічної системи, T_d - допуск діаметру вала (мкм), σ - середнє квадратичне відхилення розміру.

Показник достовірності контролю визначається за формулою:

$$Rc = \frac{\Pi_{\pi} + \Pi_3}{\Pi_{\pi} + \Pi_3 + H_{\pi} + H_3}, \quad (3)$$

де Π_{π} - кількість (або відсоток) правильно прийнятих виробів, Π_3 - кількість (або відсоток) правильно забракованих виробів, H_{π} - кількість (або відсоток) неправильно прийнятих виробів, H_3 - кількість (або відсоток) неправильно забракованих виробів.

Застосування імітаційно-статистичного моделювання методом «Монте Карло» у програмі Microsoft EXCEL дає можливість змоделювати достовірність контролю розмірів для виробів не залежно від обсягу партії.

Список літератури:

1. Voichyshen, O., Patsera, S., Derbaba, V., & Bohdanov, O. (2024). Virtual Device for Assessing the Geometric Parameters' Reliability Control for Mechanical Products Depending on the Tool Accuracy. In Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (pp. 409-421). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61797-3_35
2. Alekseyenko, S., Ruban, V., Derbaba, V., Bohdanov, O., & Patsera, S. (2025). Justification of Digital Algorithmic Model Controlling the Radial Runout of Gear Wheels. 8th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (DSMIE-2025) (Book series: Lecture Notes in Mechanical Engineering; Publisher: Springer Nature). p181-191. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0_16
3. Кузьмичов А.І. Ймовірнісне та статистичне моделювання в Excel для прийняття рішень. Навч. пос./ Бишовець Н.Г., Кузьмичов А.І., Куценко Г.В., Омечинська Н.В., Юсипів Т.В. – К.: Видавництво Ліра-К, 2019. – 200 с.

УДК 621.914.5:519.672

О.А. Шишкова, аспірантка
Науковий керівник: М.Г. Сторчак, д.т.н., проф.
Державний університет «Житомирська політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ТОЧІННЯ ХРОМОМОЛІБДЕНОВИХ СТАЛЕЙ НА ЯКІСТЬ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ

Одним із ключових напрямів сучасної механічної обробки є підвищення якості поверхні деталей, що визначає їхню довговічність, надійність та експлуатаційні характеристики. Основними чинниками, які впливають на вибір режимів різання є матеріал заготовки, характеристики інструменту та вимоги до шорсткості обробленої поверхні. Водночас важливе значення має стан залишкових напружень у приповерхневому шарі, що формується під дією механічних і теплових навантажень у процесі різання.

Сучасні дослідження впливу режимів різання на показники шорсткості та залишкових напружень, мають однобічний характер, одні дослідження спрямовані на визначення оптимальних режимів різання, тоді як інші зосереджені на аналізі параметрів шорсткості поверхні. Поєднання цих підходів дає змогу одночасно вивчити взаємозв'язок між параметрами обробки, формування шорсткості поверхні та залишкових напружень, а також визначити найбільш ефективні параметри обробки, які забезпечують високу якість поверхні та сприятливий напружений стан у приповерхневому шарі.

Обробка загартованих хромомолібденових сталей потребує підвищеної міцності ріжучого інструменту та супроводжується вищими термічними й механічними навантаженнями, що ускладнює умови в зоні зсуву. Додатковий вплив спричиняє зміни мікроструктури матеріалу, особливо у приповерхневих шарах. Обробка сталі AISI 4140 потребує використання ріжучого інструмента, здатного витримувати температурно-механічні навантаження. Для таких умов зазвичай використовують полікристалічний кубічний нітрид бору (PCNB) або керамічні різці, що відзначаються високою зносостійкістю та хімічною стабільністю. Чисельне моделювання процесів механічної обробки є ефективним засобом їх аналізу та вдосконалення, зокрема використовується для передбачення розподілу залишкових напружень.

На шорсткість обробленої поверхні впливають різні чинники. Чинники, які пов'язані з геометричними параметрами процесу різання, чинники, які зумовлені пружною та пластичною деформацією оброблювального матеріалу та чинники, які пов'язані з виникненням вібрацій ріжучого інструменту.

Автори [1] визначили залежність шорсткості поверхні від режимів різання при обточуванні сталі 38ХМ. Встановлено, що суттєво на шорсткість поверхні

впливають подача та швидкість різання, глибина різання чинить незначний вплив на шорсткість поверхні. Доведена доцільність обточування деталей зі сталі 38ХМ на малих глибинах різання, на малих подачах та великих швидкостях різання.

Більш глибоке дослідження шорсткості поверхні проводиться авторами [2] за допомогою аналізу кривої площі контакту (bearing area curve analysis (BAC)). Крім того, для вирішення багатоцільових задач використовується алгоритм генетичної оптимізації з несумісним сортуванням (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm - NSGA-II) на основі прогнозних моделей штучних нейронних мереж (Artificial Neural Networks (ANN.)) Прогнозування вихідних реакцій значно покращується при застосуванні техніки штучних нейронних мереж у порівнянні з регресійним моделюванням. Фактично було встановлено, що більшість відсоткових похибок між прогнозованими значеннями штучних нейронних мереж та значеннями підтверджувального тесту становлять менше 7%.

Прогнозування шорсткості поверхні з використанням накопичених знань дає змогу одночасно скоротити час виконання технологічного процесу та покращити його якість. Основою такого підходу є детальне розуміння фізичних явищ і їх точне моделювання за допомогою аналітичних або чисельних методів.

Стан залишкових напружень у приповерхневому шарі є ключовим фактором цілісності поверхні. Він суттєво впливає на механічні властивості компонентів, зокрема на їхню втомну міцність, зносостійкість та стійкість до корозії. Формування залишкових напружень відбувається під дією механічних та теплових процесів під час різання, що є важливою задачею сучасного інженерного виробництва для підвищення надійності та експлуатаційних властивостей деталей. Залишкові напруження можуть мати як позитивний так і негативний вплив на експлуатаційні властивості деталей, залежно від характеру – стискувального чи розтягувального.

У сучасній промисловості формування стискувальних залишкових напружень набуває особливого значення, та широко застосовуються як інструмент проєктування для підвищення втомної довговічності деталей та поліпшення їх стійкості до механічних пошкоджень. Деталі, які піддаються розтягувальним статичним або динамічним навантаженням, схильні до виникнення тріщин.

Автори [3] досліджували покращення залишкових напружень і приповерхневих властивостей сталі AISI 4140, яка широко використовується в автомобільній та аерокосмічній промисловості. Зразки спочатку піддавалися точінню, після чого глибокому холодному накочуванню з різними параметрами процесу. Дослідження було спрямоване на вивчення впливу параметрів процесу на покращення поверхні та термін служби сталі AISI 4140 після точіння з глибоким холодним накочуванням (TADCR - Turn-Assisted Deep Cold Rolling) у програмному середовищі ANSYS LS-DYNA для аналізу розподілу залишкових напружень за різних режимів обробки. Підтверджувальні експерименти з оптимальними параметрами показали, що відхилення між прогнозованими та експериментальними значеннями становить близько 5%.

Чисельне моделювання є ефективним інструментом для відтворення процесу точіння в цифровому середовищі, що дозволяє прогнозувати характеристики обробленої поверхні без проведення великої кількості фізичних експериментів. Це забезпечує можливість оцінки впливу різних факторів, таких як режим різання, геометрія інструменту, властивості матеріалу на якість обробленої поверхні.

У своїй роботі автори [4] розробили багатомасштабну модель симуляції пластичності матеріалу для прогнозування деформаційної поведінки сталі AISI 4140 за різних умов високоефективного різання. Розроблена модель побудована шляхом поєднання тривимірної моделі дискретної динаміки дислокацій (3D-DDD) із методом скінченних елементів (FEM) через оптимізацію конститутивного рівняння, заснованого на густині дислокацій (DDB), реалізованого як користувацька підпрограма в ABAQUS. Результати симуляції показали, що запропонована багатомасштабна модель не лише точно прогнозує напруження, деформації, силу різання та температуру, подібно до класичних FEM-розрахунків, але й відображає мікроструктурні характеристики, такі як розмір зерен і розподіл густини дислокацій за заданих умов різання.

Особливо перспективними є використання гібридних моделей, що поєднують метод скінчених елементів із штучними нейронними мережами (ANN), оскільки такий підхід дозволяє моделювати складні нелінійні взаємозв'язки між параметрами процесу точіння, більш точно прогнозувати якість обробленої поверхні і передбачати можливі дефекти. Це значно економить час та ресурси, дозволяє проводити тестування різних режимів різання, а також оптимізувати параметри обробки для досягнення заданих характеристик поверхні з високою надійністю.

У своєму дослідженні автори [5] описали вдосконалення моделей шорсткості поверхні при обробці легованих сталей (AISI 4140) з використанням покритих ріжучих інструментів за різних сухих умов. Рівняння прогнозу другого порядку було розроблене за допомогою повнофакторного плану експерименту та порівняне з підходом штучної нейронної мережі (ANN) за показниками RMSE, R^2 та PE. Експериментальні результати показали, що якість обробки поверхні покращується зі зменшенням подачі, але погіршується зі збільшенням радіуса носика інструмента. Аналіз дисперсії показав, що як подача, так і радіус носика інструмента суттєво впливають на шорсткість поверхні, тоді як інші фактори є незначущими. Крім того, на етапі тестування випадково обрана штучна нейронна мережа показала трохи кращу здатність до прогнозування порівняно з MQR (Multiquadratic Regression), оскільки середні помилки становили 2,21% та 2,73% для штучної нейронної мережі та MQR відповідно. Значення RMSE становили приблизно 0,046 для штучної нейронної мережі і 0,063 для MQR. Обидва методи можуть ефективно використовуватися для прогнозування у будь-яких видах обробки в промисловості завдяки високій точності результатів.

Моделювання на основі штучних нейронних мереж є перспективним інструментом для прогнозування параметрів шорсткості при точінні сталі AISI

4140. Це забезпечує точні результати, адаптивність моделі до змін параметрів і її застосування в системах адаптивного керування обробкою. Поєднання методу скінченних елементів (FEM) із нейронними мережами (ANN) дозволяє точніше передбачити характеристики обробленої поверхні то оптимізувати режими різання для досягнення потрібних експлуатаційних властивостей.

Комплексний аналіз взаємозв'язку режимів різання, шорсткості та залишкових напружень дає змогу визначити оптимальні параметри обробки, що забезпечують високу якість поверхні та сприятливий напружений стан у приповерхневому шарі. Чисельне моделювання у поєднанні з сучасними методами обробки та аналізу даних відкриває перспективи для підвищення продуктивності, економічності та якості обробки хромомолібденових сталей, забезпечуючи більш надійне виробництво високоточних деталей.

Список літератури:

1. Яровий Ю., Фролов В., Сапон С., Ісаєнко І. Дослідження шорсткості поверхні при обточуванні хромомолібденової сталі. Технічні науки та технології, № 1(35), 2024, с. 90–98. DOI: [10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-90-98](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-90-98)
2. Meddour I., Yallese M.F., Bensouilah H., Khellaf A., Mohamed E. Prediction of surface roughness and cutting forces using RSM, ANN, and NSGA-II in finish turning of AISI 4140 hardened steel with mixed ceramic tool. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 97, no. 5-8, pp. 1931–1949. DOI: [10.1007/s00170-018-2026-6](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2026-6)
3. Prabhu P. R., Kulkarni S. M., Sharma S. Multi-response optimization of the turn-assisted deep cold rolling process parameters for enhanced surface characteristics and residual stress of AISI 4140 steel shafts. Journal of Materials Research and Technology. vol. 9, no. 5, 2020, pp. 11402–11423. DOI: [10.1016/j.jmrt.2020.08.025](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.025)
4. Bai J., Tong Z. A novel multiscale material plasticity simulation model for high-performance cutting AISI 4140 steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 116, no. 11-12, 2021, pp. 3891–3904. DOI: [10.1007/s00170-021-07643-w](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07643-w)
5. Şahin Y., Kocabıçak A. C., Yalçınkaya S. Prediction of Surface Finish Model in Cutting AISI 4140 Steel with Different Approaches. In: Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore: Springer, 2022, pp. 303–318. DOI: [10.1007/978-981-16-8810-2_22](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8810-2_22)

УДК 621.9.025

В.П. Шумляківський, к.т.н., доц., докторант
Державний університет «Житомирська політехніка»

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТОНКОГО ФІНІШНОГО РОЗТОЧУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОТВОРІВ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛЯ ПРИ ЇХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОМУ РЕМОНТІ

Відновлювальний ремонт автомобільних деталей із циліндричними отворами (блоки та гільзи циліндрів, корпуси підшипників, гідравлічні вузли, посадочні місця під направляючі) часто передбачає вибір: розточування під ремонтний розмір, встановлення втулки/гільзи з подальшим фінішем або заміну деталі. Тонке фінішне розточування (зокрема, з наступним розвертанням або коротким хонінгуванням) залишається одним із найекономічніших способів досягти необхідної геометричної точності та якості поверхні без повної заміни вузла. Нижче розглянуто техніко-економічні та якісні аспекти застосування цього процесу з опорою на західні джерела, а також практичні рекомендації для СТО та ремонтних цехів.

У типовому маршруті відновлення отвір спочатку обробляють чорновим розточуванням до ремонтного розміру, після чого виконують тонке фінішне розточування/розвертання для забезпечення розмірної точності, круглості й малих коливань діаметра, а при потребі додатково проводять короткий цикл хонінгування для формування потрібної мікрогеометрії. Професійні керівництва з відновлення двигунів наголошують: ключ до ресурсу це правильний вибір припуску під фінішну операцію та стабільність процесу, щоби уникнути конусності, овальності і слідів вібрацій ("шаберу").

Європейські дослідження процесів розвертання/тонкого розточування показують, що режим різання, конусність інструмента, жорсткість тримача і мастильно-охолоджувальні умови істотно впливають на геометрію отвору, шорсткість та інтегральний стан поверхневого шару (залишкові напруження, мікротвердість). Позитивний ефект дає мінімальне змащування (MQL): при правильному налаштуванні воно забезпечує порівняну з традиційним охолодженням точність і шорсткість, зменшуючи витрати рідини та розсіювання результатів. У процесах високої точності також підтверджено вплив конструкції державки/оправки: демпфовані та композитні тримачі істотно знижують амплітуду коливань, що напряму покращує R_a , R_z і круглість.

Найкритичніша причина браку при глибокому внутрішньому точінні це вібрації консольної борштанги. Західні роботи [1, 2] демонструють два ефективні підходи: по-перше, інтегровані настроювані демпфери маси (TMD) усередині оправки; по-друге використання внутрішніх сердечників із вуглепластику (CFRP), які підвищують власну частоту та коефіцієнт демпфування. Обидва рішення зміщують межу стійкої роботи в бік більших подач і швидкостей без появи шабера, що прямо підвищує продуктивність відновлювальних операцій.

Для ремонтних майстерень ключовим питанням є співвідношення «якість/витрати/час». Практичні керівництва і галузеві огляди вказують, що точне розточування з подальшим коротким хонінгуванням або без нього дозволяє відновити отвір до ремонтного розміру з контрольованою посадкою, уникаючи заміни корпусної деталі чи блоку. Використання MQL знижує витрати на охолоджувально-мастильні матеріали (часто 7–17% собівартості обробки), а демпфовані оправки скорочують час доведення та кількість «перепроходів». Загалом, завдяки підвищенню стабільності процесу досягається менше відхилення розміру та шорсткості з першого разу, що прямо зменшує брак і переробки.

Практичні рекомендації для СТО та ремонтних цехів будуть наступні. Потрібно забезпечити припуски: залишати 0,02–0,08 мм під фінішне розточування/розвертання; за потреби додатково 0,01–0,03 мм під короткий хонінг. Застосовувати демпфовані оправки або оправки з CFRP-ядром при $L/D > 4-5$; налаштувати TMD під робочу частоту. Використовувати MQL або високоефективні мастильно-охолоджувальні рідини із цілеспрямованою подачею в зону різання; контролювати температуру. Оптимізувати геометрію інструменту: малий задній кут і позитивна геометрія для чистового різання та мікрофаска для стабільної кромки. Перевіряти тримаць/патрон: високоточні затискачі (shrink-fit/HSK) помітно зменшують биття й коливання. Проводити контроль якості: контроль круглості/циліндричності, Ra (типово 0,4–1,0 мкм після розточування; нижче після короткого хонінгу).

Таким чином, тонке фінішне розточування є технологічно і економічно ефективною операцією технологічного процесу відновлювального ремонту циліндричних отворів автомобільних деталей. Комбінація коректних режимів, демпфованих інструментальних систем та раціонального змащування (MQL) забезпечує стабільну геометрію, низьку шорсткість і передбачуваний стан поверхневого шару. Для більшості ремонтних сценаріїв це дозволяє скоротити цикл ремонту і підвищити ресурс вузла.

Список літератури:

1. Thorenz B., Friedrich M., Westermann H.-H., Döpper F. Evaluation of the Influence of Different Inner Cores on the Dynamic Behavior of Boring Bars. Procedia CIRP, 2019. URL: <https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/d17ef60c-6cf0-4502-b485-f135ed60c155/download>
2. Sørby K., et al. Development and Optimization of Vibration-Damped Tool Holders (TMD for Boring Bars). (Portico) URL: <https://access.portico.org/Portico/show?auId=phx34dxjdh4&viewFile=pdf>

УДК 621.921.343

О.А. Щерецький, д.т.н., ст.н.с., провідний науковий співробітник¹

В.О. Щерецький, к.т.н. ст. досл., ст.н.с.¹

А.М. Верховлюк, д.т.н., проф., зав. відділом¹

В.З. Туркевич, д.т.н., академік НАН України, директор²

С.П. Старик, к.т.н., ст.н.с, завідувач лабораторії²

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ

²Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля, НАН України, м. Київ

РОЗРОБЛЕННЯ НАДТВЕРДИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ З АКТИВУЮЧИМИ ДОБАВКАМИ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ТА СУПЕРСПЛАВІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ

Надтверді композиційні матеріали на основі кубічного нітриду бору (сBN) відіграють важливу роль у сучасному машинобудуванні. Вони використовуються в ріжучому інструменті, що застосовується для обробки загартованих сталей, жароміцних сплавів та суперсплавів [1]. Такий інструмент повинен забезпечувати високу продуктивність в умовах високих швидкостей різання та перемінних динамічних навантажень, інтенсивної теплової та хімічної взаємодії з оброблюваними матеріалами, при цьому необхідно дотримуватися заданої точності розмірів та геометрії деталі, яка обробляється. Надтверді композиційні матеріали для фінішної обробки повинні мати високі твердість, зносостійкість та тріщиностійкість. Існуючі на сьогоднішній день надтверді композиційні матеріали на основі кубічного нітриду бору не в повній мірі задовольняють цим вимогам. Наразі використовуються надтверді матеріали на основі сBN з металевою, керамічною та металокерамічною зв'язками. Більшість металевих розплавів мають низьку здатність до змочування сBN, а ті, які змочують, взаємодіють з частинками кубічного нітриду бору та утворюють на міжфазній границі крихкі сполуки, які знижують експлуатаційні характеристики інструменту. Більшість металевих сплавів мають значно більший температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) ніж сBN, тому при розігріві інструменту з металевою зв'язкою виникають мікротріщини, що суттєво зменшує термін використання інструменту. Композити сBN з керамічною зв'язкою не проводять електричний струм, тому їх не можливо обробляти високопродуктивними способами, такими як електроерозійна або електроіскрова обробка. Для виготовлення композитів сBN з керамічною зв'язкою потрібно використовувати дуже високий тиск (вище 6 ГПа) та високу температуру (вище 1800 °C), що вимагає вартісного обладнання та спеціального твердосплавного оснащення, а розмір робочої камери зазвичай дозволяє виготовити тільки невеликі за розміром вироби з таких композитів. Крім того, композити на керамічній основі мають низьку пластичність та не витримують

ударних навантажень, що суттєво обмежує сферу їх застосування. Тому розробка нових високоєфективних надтвердих композиційних матеріалів на основі cBN є актуальною задачею, що дозволить швидше та якісніше обробляти загартовані сталі, жароміцні сплави та суперсплави на основі нікелю, економлячи при цьому значні матеріальні та енергетичні ресурси. Матеріали такого класу (високоміцні, жаростійкі сплави) широко використовуються в машинобудуванні, енергетиці, оборонній промисловості та в інших галузях промисловості України, їх обробка вимагає придбання вартісних імпорتنих інструментів, вітчизняні аналоги таких інструментів або взагалі відсутні, або не можуть за якістю та технічними характеристиками задовольнити вимоги вітчизняних споживачів. Як показують, проведені нами, термодинамічні розрахунки та експериментальні дослідження ефективною матрицею для надтвердих композитів з cBN можуть бути високоентропійні сплави (BEC) на основі перехідних металів. BEC мають унікальні властивості, не характерні для інших матеріалів, а саме понижену хімічну активність, високу пластичність, міцність, жаростійкість, температурну стабільність, зносостійкість, корозійну стійкість, електропровідність, високу теплоємність та при цьому низьку теплопровідність та низький коефіцієнт лінійного термічного розширення [2]. На сьогоднішній день, композити на основі BEC активно досліджуються, демонструють високі експлуатаційні характеристики та є перспективними для використання в промисловості [3, 4]. Цілеспрямовано змінюючи склад BEC та вміст додатково легуючих елементів, можливо досягти хорошого адгезійного контакту зв'язуючого матеріалу з частинками кубічного нітриду бору і отримати надтверді композиційні матеріали з високими фізико-механічними характеристиками. Інструмент, виготовлений з таких композитів, буде мати такі переваги:

1. Для його одержання потрібні значно нижчі температури та тиск, ніж для керамічної зв'язки, а отже, таке виробництво не вимагає вартісного обладнання та спеціального оснащення;
2. Для виготовлення інструмента завдяки електропровідній матриці можна використовувати високопродуктивні способи обробки твердих матеріалів, такі як електроерозійна або електроіскрова обробка;
3. Збільшений термін експлуатації: буде 15-20 % більший, ніж для сучасного інструменту з металевою зв'язкою;
4. Розроблений матеріал можна буде використовувати при значно більших ударних та динамічних навантаженнях, ніж інструмент з керамічною зв'язкою.

У роботі досліджено термодинамічні аспекти взаємодії високоентропійних сплавів системи NiFeCoCrTiAl з кубічним нітридом бору (cBN) при високих температурах у середовищі з киснем і без нього. Використано CALPHAD-моделювання та літературні дані для оцінки температурної залежності зміни енергії Гіббса реакцій утворення нітридів, боридів та оксидів. Показано, що присутність кисню суттєво змінює термодинамічні умови перебігу реакцій, зокрема знижує ймовірність прямої взаємодії Ti та Al з cBN за рахунок формування оксидних фаз. Порівняльний аналіз з реакціями чистих металів вказує на знижену активність Ti та Al у складі BEC, що узгоджується з

результатами CALPHAD-розрахунків. Виконані експериментальні високотемпературні дослідження методом синхронного термічного аналізу в повній мірі підтвердили термодинамічні розрахунки. Досліджено взаємодію високоентропійних сплавів (ВЕС) системи NiFeCrCoTiAl з кубічним нітридом бору (сBN), проведено комплексні дослідження мікроструктури, фазового складу та теплофізичних властивостей трьох перспективних сплавів із використанням методів рентгеноструктурного аналізу (XRD), сканувальної електронної мікроскопії (SEM/EDS) та синхронного термічного аналізу (STA).

Отримано та досліджено три високоентропійні сплави системи NiFeCrCoTiAl (1, 2, 3), які мають різний фазовий склад: 1 – γ (fcc) + локальні σ включення; 2 – γ (fcc) + B2 (NiAl-тип); 3 – γ + B2 (евтектична структура). Параметри ґратки γ -фази становлять 3,55–3,59 Å, B2-фази — 2,90–3,02 Å. Уточнено типовий хімічний склад фаз для ВЕС системи NiFeCrCoTiAl. Найвищу мікротвердість ($HV \approx 568$ кгс/мм²) має сплав 1 із γ -структурою + локальні σ включення, що корелює з його однорідною мікроструктурою та відсутністю грубих інтерметалідів. Результати STA показали, що сплав 1 має найбільшу реакційну здатність до сBN (втрата маси в результаті взаємодії $\approx 5,2\%$), тоді як сплави 2 та 3 демонструють значно нижчу активність (2,96% і 2,83% відповідно). Це пояснюється тим, що у сплаві 1 титан знаходиться переважно в γ -матриці у «вільному» стані, тоді як у сплавах 2, 3 він зв'язаний у B2-фазах. Термодинамічне моделювання показало, що зменшення активності Ti та Al у ВЕС суттєво знижує ймовірність їх взаємодії з сBN, однак для сплавів із високим вмістом «вільного» Ti (як у сплаві 1) реакція $Ti + BN + O_2 \rightarrow TiN + B_2O_3 + N_2$ є термодинамічно можливою при температурі вище 1200°C. Отримані результати демонструють перспективність використання γ -фазних HEA-матриць, легованих Ti, для формування композитів HEA–сBN, що розширює можливості створення термостійких матеріалів для ріжучого інструменту нового покоління.

Список літератури:

1. Solozhenko, V. L., et al. A novel route to superhard nanocrystalline cubic boron nitride // Journal of the European Ceramic Society.-2021.-41(4).-P. 2612–2616.
2. Miracle D. B., Senkov O. N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // Acta Materialia.-2017.-122.-P. 448–511.
3. Zhang, X., Li, H., Jiao, L. Shen, W., Shcheretskyi, O. Effect of Rotational Speed on Microstructure and Properties of Al-Based Composite Reinforced with High-Entropy-Alloy Particles Fabricated by Friction Stir Processing// Advanced Engineering MaterialsOpen source preview, 2024, 26(23), 2401417, DOI:10.1002/adem.202401417.
4. Xiao, C., Zheng, H., Tao, H. et al. Effect of particle size of cubic boron nitride powders on the properties of polycrystalline cubic boron nitride composites. Bull Mater Sci 47, 255 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12034-024-03326-w>

**МАТЕРІАЛИ
ХІІІ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ З МІЖНАРОДНОЮ УЧАСТЮ
«ПРОЦЕСИ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ,
ВЕРСТАТИ ТА ІНСТРУМЕНТ»**

11 – 13 листопада 2025 року

Електронне видання

Комп'ютерна верстка:
Глембоцька Л.Є., Шишкова О.А.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 8,3.

Державний університет «Житомирська політехніка»,
вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005