

**ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В МАШИНОБУДУВАННІ**

**TECHNOLOGIES
IN MECHANICAL ENGINEERING**



MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
LVIV POLYTECHNIC NATIONAL UNIVERSITY
IVANO-FRANKIVSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
OF OIL AND GAS, UKRAINE

**CONFERENCE
PROCEEDINGS**

**XIII INTERNATIONAL
SCIENTIFIC CONFERENCE**

**ADVANCED TECHNOLOGIES
IN MECHANICAL ENGINEERING**

18–21 February 2025

Lviv–Zveniv (Carpathians)

Lviv
Lviv Polytechnic Publishing House
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”, УКРАЇНА
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ, УКРАЇНА

**ЗБІРНИК
НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

**XIII Міжнародної
науково-технічної конференції**

**ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В МАШИНОБУДУВАННІ**

18–21 лютого 2025 року

Львів–Звенів (Карпати)

Львів
Видавництво Львівської політехніки
2025

УДК 621
П 78

П 78 **Збірник наукових праць XIII Міжнародної науково-технічної конференції “Прогресивні технології в машинобудуванні”.** Львів – Звенів (Карпати), 18–21 лютого 2025 року. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2025. – 140 с.

Збірник містить праці XIII Міжнародної науково-технічної конференції “Прогресивні технології в машинобудуванні”, яка відбулася 18–21 лютого 2025 року. Матеріали опубліковано мовою оригіналу в авторській редакції.

УДК 621



ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ

Ступницький Вадим Володимирович – *співголова*, д.т.н., професор, завідувач кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування Національного університету “Львівська політехніка”;

Ланець Олексій Степанович – *співголова*, д.т.н., професор, заст. директора Інституту механічної інженерії та транспорту Національного університету “Львівська політехніка”;

Панчук Віталій Георгійович – *співголова*, д.т.н., професор, завідувач кафедри комп’ютеризованого машинобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу;

Barz Cristian – Assoc. Prof, PhD, Technical University of Cluj Napoca, North University Center of Baia Mare (Romania);

Baskutis Saulius – Assoc. Prof., Dr. Sc., Kaunas University of Technology (Lithuania);

Bembenek Michal – Prof., AGH University of Science and Technology in Kraków, (Poland);

Bošanský Miroslav – Prof., Dr. Sc., Slovak University of Technology, Institute of transport technology and designing (Slovak Republic);

Dragasius Egidijus – Prof., Dr. Sc., Kaunas University of Technology (Lithuania);

Edl Milan – Assoc. Prof., PhD, University of West Bohemia, University of West Bohemia, Faculty of Mechanical Engineering (Czech Republic) ;

Hatala Michal – Dr. h. c. prof. Ing., PhD, Department of Automobile and Manufacturing Technologies of Faculty of Manufacturing Technologies with a seat in Presov of Technical University of Košice (Slovak Republic);

Luściński Sławomir – PhD, Professor, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, (Poland);

Uysal Alper – Assoc. Prof., Dr. PhD, Yildiz Technical University (Turkey);

Živković Predrag – Assoc. Prof., PhD, University of Niš (Serbia);

Uysal Alper – Assoc. Prof., Dr. PhD, Yildiz Technical University (Turkey);

Воронцов Борис Сергійович – д.т.н., професор кафедри технології машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»;

Грицай Ігор Євгенович – д.т.н., професор кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування Національного університету “Львівська політехніка”;



Гурей Ігор Володимирович – д.т.н., професор кафедри РІТМ Національного університету “Львівська політехніка”;

Гурей Володимир Ігорович – д.т.н., професор кафедри РІТМ Національного університету “Львівська політехніка”;

Залога Вільям Олександрович – д.т.н., професор, академік АН ВО України, професор кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету;

Іванов Віталій Олександрович – д.т.н., проф., завідувач кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету;

Клименко Сергій Анатолійович – д.т.н., чл.-кор. НАН України *Інституту надтвердих матеріалів* ім. В.М. Бакуля НАН України;

Ковальов Віктор Дмитрович – д.т.н., професор, ректор Донбаської державної машинобудівної академії ;

Кусий Ярослав Маркіянович – д.т.н., професор кафедри РІТМ Національного університету “Львівська політехніка”;

Онисько Олег Романович – д.т.н., професор кафедри комп’ютеризованого машинобудування Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу;

Оргіян Олександр Андрійович – д.т.н., професор кафедри технології машинобудування Національного університету «Одеська політехніка» ;

Пасічник Віталій Анатолійович – д.т.н., проф., проректор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»;

Пермяков Олександр Анатолійович – д.т.н., професор кафедри технології машинобудування і металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Петраков Юрій Володимирович – д.т.н., професор кафедри технології машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» ;

Повстяной Олександр Юрійович – д.т.н., завідувач кафедри автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету;



Тонконогий Володимир Михайлович – д.т.н., професор, директор Інституту промислових технологій, дизайну і менеджменту Національного університету «Одеська політехніка» ;

Сліпчук Андрій Миколайович – *секретар*, к.т.н., доцент кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування Національного університету “Львівська політехніка”.

ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Ступницький В.В. – д.т.н., проф., зав. кафедри РІТМ

Грицай І.Є. – д.т.н., проф. кафедри РІТМ

Кусий Я.М. – д.т.н., проф. кафедри РІТМ

Сліпчук А.М. – к.т.н., доц. кафедри РІТМ



ЗМІСТ

DETERMINATION OF MACHINABILITY OF STRUCTURAL MATERIALS

Victor Antonyuk, DScTech, professor, Sergii Vysloukh, PhD, associate professor, Oksana Voloshko, senior researcher dr. eng.

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

17

SOLUTION OF OPTIMIZING TASKS DURING MACHINING OF DIFFICULT-TO-CUT MATERIALS

¹Yaroslav Kusi, DScTech, professor, ¹Ihor Nazar, PhD, associate professor, ¹Andrii Kuk, PhD, associate professor, ²Maryna Yushkova, an engineer, ¹Andrii Zinko, bachelor’s student

¹Lviv Polytechnic National University

²Oracle, Ukraine

21

КОМП’ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ СТАРТУ БЛА З ПУСКОВОЇ УСТАНОВКИ КАТАПУЛЬТОВОГО ТИПУ

Буковська Д.В., аспірант, Антонюк В.С., д.т.н., професор

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

26

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ ЗА РАХУНОК ЗМІНИ ПРОФІЛЯ НА АСИМЕТРИЧНИЙ

Васильченко Я.В., д.т.н., професор, Мироненко О.Є., аспірант

Донбаська державна машинобудівна академія

29



**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО
ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ МАШИНОБУДІВНИХ
ВИРОБІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕРАТИВНИХ
МЕТОДІВ ОБРОБЛЕННЯ**

Врублевський І. Б. аспірант

Національний університет «Львівська політехніка»

32

**РОЗРОБЛЕННЯ ВІБРАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТЕРА
З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРИВОДОМ
ТА НЕЗАЛЕЖНИМИ КОЛИВАННЯМИ**

Гаврильченко О.В., к.т.н., професор, Павлюченко Д.П., аспірант

Національний університет «Львівська політехніка»

35

**ВІБРАЦІЇ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ЧЕРВ'ЯЧНОЮ
ПЕРЕДАЧЕЮ,
ЇХ ПРИЧИНИ ТА ВПЛИВ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ І МЕТОДИ
ЇХ УСУНЕННЯ**

Гелетій В. М., к.т.н., доцент, Новіцький Я.М. к.т.н., доцент

Національний університет «Львівська політехніка»

36

**НАПІВАВТОМАТИЧНА СИСТЕМА АЕРОЗОЛЬНОГО
МАСУВАННЯ ЕВАКУАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТУ**

Глазунов А.Є., студент, Довгополов А.Ю., к.т.н.,

Некрасов С.С., к.т.н., доцент

Сумський державний університет

39

**МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО СИСТЕМНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ
КОЛІС В МЕТОДАХ НЕПЕРЕРВНОГО ГЕНЕРУВАННЯ**

¹Грицай І.Є., д.т.н., проф., ²Громнюк С.І., інженер,

¹Вергун В.А., аспірант

¹НУ «Львівська політехніка»

²ТЗОВ «СПРЕнерго, м.Львів

40



МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ІНСТРУМЕНТУ ЗА ЙОГО ТЕМПЕРАТУРОЮ В ПРОЦЕСІ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС МЕТОДОМ POWER SKIVING

Грицай І.Є., д.т.н, професор, Сліпчук А.М. к.т.н., доцент
Національний університет «Львівська політехніка»

41

ВПЛИВ КОЛИВАНЬ НА ФОРМУВАННЯ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

**Дядя С.І., к.т.н, доцент, Козлова О.Б., к.т.н, доцент,
Яхно Д.А., аспірант, Дзюба Д. В., студент**
Національний університет «Запорізька політехніка»

44

ОСОБЛИВОСТІ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВУ ЖС6- У СИНТЕЗОВАНОГО МЕТАЛОТЕРМІЄЮ

**¹Жигуц Ю.Ю., д.т.н., професор, ²Козар О.П., д.т.н., професор,
¹Легета Я.П., ст. викладач, ¹Крайняй І.І., ст. викладач**
*¹Ужгородський національний університет
²Мукачівський державний університет*

48

УСТАНОВКА ДЛЯ ПЛАЗМОВО-ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ОКСИДУВАННЯ МЕТАЛІВ З АВТОМАТИЧНОЮ ЗМІНОЮ ВІДСТАНІ МІЖ ЕЛЕКТРОДАМИ

**Імбірович Н.Ю., д.т.н., професор, Повстяной О.Ю., д.т.н.,
професор,
Сметюх Б.В, аспірант**
Луцький національний технічний університет

50

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗБІРНИХ РІЗЦІВ ДЛЯ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ

**Клименко Г.П., д.т.н., професор, Бородай Р.А., аспірант,
Рєва Є.С., аспірант., Васильченко Ю.В., магістр,
Чумаченко В.П., бакалавр**
Донбаська державна машинобудівна академія

54



СТРУКТУРНИЙ СТАН ОБРОБЛЮВАНОВОГО МАТЕРІАЛУ ЯК ОКРЕМИЙ ФАКТОР ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ

¹Клименко С.А., *д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України,*

¹Копейкіна М.Ю., *к.т.н., старший науковий співробітник,*

²Павлова Г.О., *к.т.н., доцент*

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В.Н. Бакуля НАН України

²ПрАТ Краматорський завод важких верстатів

55

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ НИТОК ЗІ СКЛЯНОГО ВОЛОКНА

Кобилянська І.В., *магістриня, Матейчук Д.О., студентка,*

Медвідь Ю.В., *аспірантка, Панчук В.Г., професор., д.т.н.*

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

58

МЕТОДИКА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ КОНСТРУКЦІЙ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ

Ковальов В. Д., *д.т.н., професор, Шаповалов М.В., к.т.н., доцент,*

Сукова Т.О. *к.т.н., Хорошайло В.В., к.т.н., доцент,*

Григоренко Д.М., *аспірант, Голубицький Е.В., магістр*

Донбаська державна машинобудівна академія

61

АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ В PLM З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ СИСТЕМ

Копей В. Б., *д.т.н., професор, Букатка Ю. С., аспірант*

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

64

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ І ВНУТРІШНІХ СХОПЛЮВАЧІВ ДЛЯ МІЖОПЕРАЦІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ КІЛЬЦЕПОДІБНИХ ДЕТАЛЕЙ

Корендій В.М., *к.т.н., доцент, Качур О.Ю., д-р філософії, доцент,*

Пилип М.В., *аспірант, Карпин Р.Б., аспірант*

Національний університет «Львівська політехніка»

66



ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНИХ СХЕМ МЕХАНІЗМІВ ДЛЯ ЗБУРЕННЯ КОЛИВАНЬ ВІБРАЦІЙНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

**Корендій В.М., к.т.н., доцент, Паращин О.Я., аспірант,
Вільчинський Т.Р., аспірант, Киричук В.В., аспірант,
Янів О.М., аспірант**

Національний університет «Львівська політехніка»

70

РОЗРОБЛЕННЯ ОСВІТНЬО-НАУКОВОЇ ПРОГРАМИ «ПРОМИСЛОВИЙ ІНЖИНІРИНГ І УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЧИМИ СИСТЕМАМИ»

¹Кусий Я.М., д.т.н, професор, ^{2,3}Іванов В.О., д.т.н, професор,

¹Литвиняк Я.М., к.т.н, доцент

¹Національний університет «Львівська політехніка»

²Сумський державний університет

³Технічний університет у Кошице

73

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНТИНУАЛЬНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ ВІБРАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТЕРА З ВРАХУВАННЯМ НАЯВНОСТІ ЗОСЕРЕДЖЕНОЇ МАСИ

**Ланець О. С., д.т.н., професор, Кішка І. Л., аспірант,
Деревенько І. А., к.т.н., доцент**

Національний університет «Львівська політехніка»

76

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ЗБОРКИ З НАТЯГОМ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ (МКЕ)

Лещенко О. І., к.т.н., доцент

Приазовський державний технічний університет,

м. Маріуполь, м. Дніпро

80



ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ПОРОШКОВИМИ СТРІЧКАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БАЛІСТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БРОНЕПЛАСТИН

**Медвідь Ю.В., аспірант, Панчук В.Г., д.т.н., професор,
Присяжнюк П.М., д.т.н., доцент**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти
і газу*

84

ГРАФОВА МОДЕЛЬ ЗБІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ БЛОЧНО- МОДУЛЬНИХ РІЗЦІВ ДЛЯ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ

Мироненко Є.В., д.т.н., професор, Міранцов С.Л., к.т.н., доцент
Донбаська державна машинобудівна академія

87

ОЦІНКА ПОВЕРХНЕВОГО СТАНУ МЕТАЛУ ШЛЯХОМ ЗОНДУВАННЯ АКУСТИЧНИМИ ХВИЛЯМИ РЕЛЕЯ

Мокрий О.М., д.т.н., Романишин І.М., к.т.н.

Фізико-механічний інститут НАН України ім. Г.В. Карпенка, Львів

90

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЙНОГО ТЕРТЯ В ТІЛІ РІЗЦЯ НА ДЕМПФУВАННЯ АВТОКОЛИВАНЬ СИСТЕМИ ВПІД

**Новіцький Ю.Я., к.т.н., доцент, Сліпчук А.М., к.т.н., доцент,
Новіцький М. Я., аспірант**

Національний університет “Львівська політехніка”

93

КІНЕМАТИЧНІ АСПЕКТИ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ХОДОВИХ ВАЛІВ

Онисько О.Р., д.т.н., професор, Веркалець А.А. студент

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти
і газу*

95



**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВЕЛИЧИНИ КРОКУ ХОДОВОГО
ГВИНТА НА ТОЧНІСТЬ ЙОГО ПРОФІЛЮ У ПРОЦЕСІ
ВИХРОВОГО ТОЧІННЯ**

**Онисько О.Р., д.т.н., професор, Лукань Т.В. асистент,
Сливка Р.П., студент**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти
і газу*

99

**СИНТЕЗУВАННЯ ТА АНАЛІЗУВАННЯ УРУХОМЛЮВАЧА
ЕЛЕВОНА ПОБУДОВАНОГО НА ОСНОВІ ШАРНІРНОГО
ЧОТИРИЛАНКОВИКА**

**Пасіка В. Р., д.т.н., професор, Кіяшок В. О., студент,
Козловський Я., В., студент, Краснонос С. О., студент**

Національний університет «Львівська політехніка»

100

**НАЗЕМНІ РОБОТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ.
КЛАСИФІКАЦІЯ ТА АНАЛІЗ**

Пасічник В.А., д.т.н., професор, Дощенко М.А., аспірант

*Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

103

**АНАЛІЗ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ СИЛ
РІЗАННЯ В УМОВАХ ПРЕВЕНТИВНОГО НАГРІВУ**

Пастернак С. М., аспірант, Ступницький В.В., д.т.н., професор

Національний університет «Львівська політехніка»

107

**ПЕРЕБІГ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОЦЕСУ ТА НАПРУЖЕНЬ
В ЗОНІ РІЗАННЯ ПРИ ОБРОБЛЕННІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ
Ti-6Al-4V**

Пірогов Д.О., аспірант, Воронцов Б.С., д.т.н, професор

*Національний технічний університет України “Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”*

110



ЗАХИСТ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ВІД КОРОЗІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОКРИТТІВ

Посвятенко Н.І., к.т.н., доцент

Національний транспортний університет

113

ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВИГОТОВЛЕННІ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ ТА ІНШИХ ЕЛЕМЕНТІВ МІЛІТАРНОГО НАПРЯМКУ

Проданчук О.О., аспірант

Національний університет «Львівська політехніка»

115

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЗКРОЮ КРЕМНІЄВИХ ЧИПІВ ВОДО-КРИЖАНИМ ВПЛИВОМ

¹Саленко О.Ф., д.т.н., професор, ²Орел В.М., к.т.н.,

¹Гаврушкевич А.Ю., к.т.н., ³Габузян Г.В.

*¹Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

*²Харківський національний університет внутрішніх справ,
Кременчуцький льотний коледж*

*³Фаховий коледж Кременчуцького національного університету
ім.М.Остроградського*

118

ВПЛИВ ЗМІНИ НАВАНТАЖЕНЬ НА ТАЗОВУ КІСТКУ ЛЮДИНИ ВНАСЛІДОК ЕНДОПРОТЕЗУВАННЯ КУЛЬШОВОГО СУГЛОБУ

Сонець О.В., аспірант, Воронцов Б.С., д.т.н., професор

*Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

122

АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОМИСЛОВИХ ПОДРІБНЮВАЧІВ

Фик С.В., аспірант

Національний університет «Львівська політехніка»

126



**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСЬОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ,
ЯКІ ВИНИКАЮТЬ ПРИ НАКАТУВАННІ РІЗЕЙ**

**Четвержук Т.І., к.т.н., доцент, Редько Р.Г., к.т.н., доцент,
Полінкевич Р.М., к.т.н., доцент**

Луцький національний технічний університет

130

**СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ІНІЦІАТИВНОЮ НАУКОВО-
ДОСЛІДНОЮ РОБОТОЮ В КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
Юрчишин О.Я., к.т.н., доцент, Собецька А.В., провідний
фахівець**

*Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

132

**ДОСЛІДЖЕННЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИХ МОДЕЛЕЙ
ТИПОВИХ ОПОРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВЕРСТАТНИХ
ПРИСТРОЇВ МЕТОДОМ СТАТИЧНОГО АНАЛІЗУ**

Юсупов Д.А., аспірант, Євтухов А.В., к.т.н., доцент

Сумський державний університет

135

**СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПРОЦЕСІВ У МАШИНОБУДУВАННІ**

**Яковенко І.Е., к.т.н., професор, Похил А.В., аспірант,
Сотниченко В.В., аспірант**

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний
інститут»*

138



DETERMINATION OF MACHINABILITY OF STRUCTURAL MATERIALS

Victor Antonyuk, *DScTech, professor*, Sergii Vysloukh, *PhD, associate professor*, Oksana Voloshko, *senior researcher dr. eng.*

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

It is known that one of the most widely used methods of manufacturing parts is the process of their mechanical processing. At the same time, the current task is to determine the machinability of structural materials and the machinable properties of tool materials, which is the basis for the appointment of methods and rational modes of their use [1].

Analysis of works devoted to the machinability of structural materials showed that existing methods for its determination are laborious, material-intensive, not sufficiently reliable and not always suitable for use in production conditions; most accelerated methods for determining technological parameters do not take into account the real conditions of the cutting process [2].

Therefore, the task is to develop a methodology for determining the cutting machinability of structural materials based on mathematical modeling of technological parameters, which, through short-term experimental research, allows obtaining adequate mathematical models of the initial parameters of the cutting process and, on this basis, to create a knowledge base containing mathematical models of the initial technological parameters.

For this purpose, it is proposed to use an automated system and a created methodology, which, by applying the obtained mathematical models, determines the relative machinability of the structural material in comparison with the selected standard by individual indicators of the cutting process and by a complex indicator taking into account their expert assessments and real processing conditions. Here, the real machinability of the structural material is calculated by optimizing the cutting modes by the selected criterion using mathematical models of individual indicators of the processing of the structural material, which are in the knowledge base.

The proposed automated system for determining the machinability of structural materials is based on the method of "free" experiment. The term "free" means the possibility of arbitrary variation of the input parameters set by the experimenter, therefore the experiment can be considered active, and the object of study – controlled. The object of study in this case is the process of mechanical processing of structural material (cutting process).



The input parameters of the system are the physical and mechanical characteristics of the processed and tool materials, the values of the design parameters of the tool, processing conditions, etc.

To conduct experimental studies of the cutting process of structural materials and process the results of experiments and obtain the necessary mathematical models, it is proposed to use an automated stand.

Considering that it is necessary to simultaneously obtain several mathematical models of the initial indicators of the cutting process G_i , $i = 1, 2, \dots, m$, and taking into account the further storage of these models in the knowledge base, it is advisable to present the models in a unified form, as:

$$M_e = C_e G_1^\alpha G_2^\beta \dots G_m^\delta$$

where , $C_e, \alpha, \beta, \dots, \delta$ - coefficients and indices of the powers of mathematical models, the values of which depend on the processed and tool materials, as well as the specific conditions of the cutting process.

This type of mathematical models significantly simplifies algorithms and programs for their generation, and also presents the task of processing experimental data to obtain mathematical models as an identification task [3].

During the experiment, at certain time intervals (not necessarily the same), the necessary parameters of the cutting process were recorded and entered into the corresponding arrays. Mathematical models of the parameters of the cutting process are determined as a result of processing the received information arrays.

When solving the task of determining the machinability of materials by cutting, the concepts of relative and real machinability were introduced. Therefore, this work considers these two types of machinability and their relationship.

The proposed method of calculating machinability allows changing the attitude to the process of determining relative machinability. With its use, there is no need to conduct control experiments on the material under study. It is enough to have the appropriate mathematical models of the material processing parameters.

All necessary calculations, which previously required a significant amount of time, can be performed autonomously, in an automated mode. In this case, it is possible to compare the reference and studied materials for each of the determined parameters, and also, which is especially important, to calculate a comprehensive processability index.

According to this method, the technologist-researcher only needs to specify the values of weight coefficients for the relevant parameters according to expert assessments, thereby objectively determining their priority. As a result, already at the first stages of development of new structural materials that have not previously been



used in production, it is possible to establish rational or optimal conditions for their processing and possible areas of their further use.

The relative machinability of a material is understood as a coefficient equal to the ratio of the values of the parameter by which the comparison is made, calculated under the same cutting conditions of the studied and reference materials.

In practice, it is often necessary to evaluate structural materials, especially new ones, not by one, but by several parameters at the same time.

For this purpose, the concept of a complex machinability coefficient is used.

Thus, the proposed methodology includes both stages of determining the relative machinability of materials for the pair "the material under study – the reference material", namely: determining the partial machinability coefficients; calculating the complex machinability coefficient.

The character of the automation of computational processes and the possibility of choosing a reference material make this approach more accessible to the researcher.

Real processability involves obtaining for different types of processing appropriate mathematical models, i.e. dependences of output parameters on input ones, with subsequent solution of the optimization problem according to the selected criteria. These dependences are obtained for each of the materials separately or for groups of similar materials. Often, several such dependences are matched for one material, while breaking down the set of input parameter values into its constituent subsets. This is due to the increased sensitivity of the processes being modeled to minor changes in external influences.

Despite the complex and close relationship observed between the initial parameters G_i , multi-criteria optimization methods allow us to apply a certain generalized, complex optimization criterion to study the cutting process [4].

In parallel with the problem of selecting a criterion, an equally important task of choosing an optimization method was solved – a method of determining the largest (smallest) value of the objective function.

To solve the optimization task, it is necessary to specify the values of economic indicators, which relate to conditionally constant information of a regulatory and reference nature and are determined on the basis of the current economic situation in the production sector. The method of determining the real machinability of a structural material by the criterion of the technological cost of processing allows you to edit economic indicators for the corresponding type of mechanical processing in an interactive mode.

The proposed method of mathematical modeling, determination of relative machinability of materials and optimization of cutting modes allows: to reduce the



volume, time and consumption of tool and structural materials when conducting experimental studies; to obtain adequate mathematical models of the initial parameters of the cutting process for any structural and tool materials; to improve the quality of the obtained mathematical models of the initial indicators of the cutting process; the mathematical models obtained using the provided method are conveniently stored in the knowledge base for further use in determining the machinability of structural materials and the processed properties of tool materials, as well as for optimizing the cutting process parameters; to determine the relative machinability of the structural material both by a separate partial indicator and by a complex one taking into account expert assessments (weight coefficients) of each partial indicator; to determine optimal cutting modes taking into account specific conditions for machining the part according to a defined optimality criterion.

The provided methodology for determining the machinability of materials based on mathematical modeling is universal, that is, it can be used for any methods of cutting materials.

Reference

1. Visloukh, S. P.: *Determination of process parameters of new tool*. J. Superhard Mater. 23(5), 65–69 (2001).
2. *Review of current best-practices in machinability evaluation and understanding for improving machining performance*. Zhirong Liao, Julius M. Schoop, Jannis Saelzer, Benjamin Bergmann, Paolo C. Priarone, Antonia Splettstößer, Vikram M. Bedekar, Frederik Zanger and Yusuf Kaynak // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology Volume 50, June 2024, Pages 151-184 <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.02.008>
3. Vysloukh S.P., Antonyuk V.S., Barandych K.S., Voloshko O.V. *Mathematical modeling of automated production systems* // International Scientific Journals Mathematical Modeling Vol. 4 (2020), Issue 4, pg(s) 114-120 <https://stumejournals.com/journals/mm/2020/4/114.full.pdf>
4. Viktor Antonyuk, Kateryna Barandych, Sergii Vysloukh *Multicriteria Optimization of the Part's Finishing Turning Process Working in the Conditions of Alternating Loadings* // Advanced Manufacturing Processes II. 2020, 491–501. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_48



SOLUTION OF OPTIMIZING TASKS DURING MACHINING OF DIFFICULT-TO-CUT MATERIALS

**¹Yaroslav Kusyi, *DScTech, professor*, ¹Ihor Nazar, *PhD, associate professor*,
¹Andrii Kuk, *PhD, associate professor*, ²Maryna Yushkova, *an engineer*, ¹Andrii
Zinko, *bachelor's student***

¹*Lviv Polytechnic National University*

²*Oracle, Ukraine*

The constant growth of regulated technical requirements for product quality in the era of digitalization requires the transformation of approaches to the development of technological processes at machine manufacture, the design of elements of the technological system, optimization of cutting modes, etc. The ability to solve complex optimization problems in the production field, which involves research and is characterized by uncertainty of conditions and requirements, is an urgent task of manufacturing engineering [1, 2]. Nowadays, the solution of important engineering and technical tasks is closely related to the implementation of the concept of sustainable manufacturing, in particular, reducing energy costs, rational disposal of chips and waste elements of metal-cutting tools and equipment, reducing the share of lubricating and cooling fluids at the parts machining, etc. At the same time, increasing the competitiveness of engineering products needs production optimization at the important phases and stages of product life cycles [3].

The optimization problem of parts machining is significant for materials with special physical and mechanical properties, the most important of which are corrosion resistance in various environments, heat resistance, high strength, and good wear resistance. Various classifications of hard-to-work materials are developed primarily by chemical composition. In particular, deformed heat-resistant alloys on nickel and iron-nickel bases belong to group V and are used for the manufacture of important machine parts that operate at significant specific loads and a temperature range of 750-950° C (elements of gas turbines: disks, blade guides, etc.). The chemical composition of EI702 steel (36NKhTYu) as a representative of group V consists of C≤ 0.5 %; Si=0.3-0.7 %; Mn=0.8-1.2 %; Cr=11.5-13.0 %; Ti=2.7-3.2 %; Al=0.9-1.2 %; S≤ 0.02 %; P≤ 0.02 %; Fe – base element [4].

Therefore, optimization of cutting modes at machining of hard-to-work materials, in particular EI702 steel (36NKhTYu), is one of the important tasks of mechanical engineering for the formation of surface engineering parameters, in particular roughness parameters.



The method of full factor experiment was used in scientific research with a plan form 2^k , where k is the number of technological parameters that are changed [5].

The final turning of the workpiece made of EI702 steel (36NKhTYu) was analysed based on the influence of the main technological factors (elements of cutting modes: feed per spindle revolution S_0 , cutting depth t , rotary speed n) on the parameters of the surface engineering. Mathematical models in the form of polynomial dependencies of optimization parameters on variation parameters were developed based on the obtained and processed research results. The mutual influence of the main technological parameters of turning on geometric quality parameters was researched experimentally based on a systematic surface approach due to the complexity of the theoretical prediction of parts machining. The peculiarity of the system approach was the development of mathematical models of individual process structures, as well as models of structures in their interconnections. The code designation and levels of variation of factors are given in Table 1 [4, 5].

In mechanical engineering, dependencies that establish a relationship between optimization parameters (geometric parameters of the surface layer quality, force components, etc.) and characteristics of technological processes are described in the form of power mathematical expressions [5].

The regression equation is obtained after the logarithm of the power model, for which it is legitimate to use experiment planning matrices [6]:

$$Y = b_0 + \sum_p b_p \cdot X_p + \sum_{ij} b_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{ijk} b_{ijk} \cdot X_i \cdot X_j \cdot X_k, \quad (1)$$

where Y is the response function of the mathematical model; b_0 , b_p , b_{ij} , and b_{ijk} are regression coefficients; X_p , X_i , X_j , and X_k are the coded designation of variable parameters.

Table 1

Levels of change of technological factors for analysis of their influence on geometric parameters of surface quality of samples made of EI702 steel (36NKhTYu)

No	Technological factor	Code designation	Levels of change		Change interval
			upper	lower	
1.	Feed per spindle revolution S_0 , mm/rev	X_1	0.17	0.0475	0.1225
2.	Cutting depth t , mm	X_2	0.6	0.2	0.4
3.	Rotary speed n , min^{-1}	X_3	500	200	300



The number of repeated experiments $r=2$ is chosen to ensure good reproducibility of experiments during the development of mathematical models. Regression coefficients were calculated using the mean of the logarithms of the optimization indicator obtained on the basis of the implementation of two parallel observations. The choice of limit values of technological parameters was carried out on the basis of production experience and analysis of literary sources on the basis of their independence, determinism, and significance [5, 6].

The results of the experiments were processed according to a well-known methodology, which contains a statistical analysis of research results [6]. The adequacy of the regression equations was checked according to the Fisher criterion for the significance level $\alpha=5\%$. The values of the statistical criteria – *Cochran's criterion*, *t-Student's criterion*, and Fisher criterion (F-criterion) were determined according to the corresponding tables [5, 6].

The processing of the results of experimental studies obtained using the program “Roughness Plot Analyzer” was carried out according to the methodology using the computer program developed in the MATHCAD environment.

Mathematical dependencies for determining the geometric parameters of surface quality during the turning of cylindrical samples made of EI702 steel (36NKhTYu), taking into account only significant regression coefficients as functions of the main technological parameters and their interactions are as follows:

$$R_a = 31942.7335 \cdot S^{-4.6559} \cdot t^{-3.7399} \cdot n^{-1.4635+0.8187 \cdot \ln(S)+0.7583 \cdot \ln(t)} \quad (2)$$

$$S_m = 0.00014 \cdot S^{-7.107} \cdot t^{-9.9711-4.1664 \cdot \ln(S)} \cdot n^{2.5821+1.2514 \cdot \ln(S)+1.744 \cdot \ln(t)+0.7238 \cdot \ln(S) \cdot \ln(t)} \quad (3)$$

$$S = 163.09 \cdot S^{-0.042} \cdot t^{-3.6547} \cdot n^{0.1589+0.6808 \cdot \ln(t)} \quad (4)$$

The obtained dependencies (2)-(4) allow us to develop a set of graphic dependencies that characterize the influence of cutting modes on the geometric parameters of the surface quality of the cylindrical samples made of 36NKhTYU steel machined by turning. In this paper, the developed graphs (see Fig. 1-2) that characterize the influence of the feed per spindle revolution S_0 , cutting depth t , and rotary speed n on the arithmetical mean deviation of the assessed profile R_a within the intervals of variation of technological factors.

Technological assurance of the best quality of the surface layer of a part made of 36NKhTYU steel according to the arithmetic mean deviation of the profile R_a ($R_a \rightarrow R_a=0.2 \mu\text{m}$) requires machining by turning at the following cutting modes: $S_0=0.0475 \text{ mm/rev}$, $t=0.2 \text{ mm}$; $n=500 \text{ min}^{-1}$.

Technological assurance of maximum labour productivity ($t_{0\min}=L/(S_0 \cdot n_{\max})$, where $t_{0\min}$ is the minimum value of the cutting time, L is the cutting path) and good



quality surface layer of the product ($R_a=0.35 \mu\text{m}$) is achieved by turning in the following cutting modes: $S_0=0.17 \text{ mm/rev}$, $t=0.2 \text{ mm}$; $n=500 \text{ min}^{-1}$.

Increasing the cutting depth to $t=0.6 \text{ mm}$ at $S_0=0.17 \text{ mm/rev}$, and $n=500 \text{ min}^{-1}$ degrades the quality of the surface layer to $R_a=1.01 \mu\text{m}$.

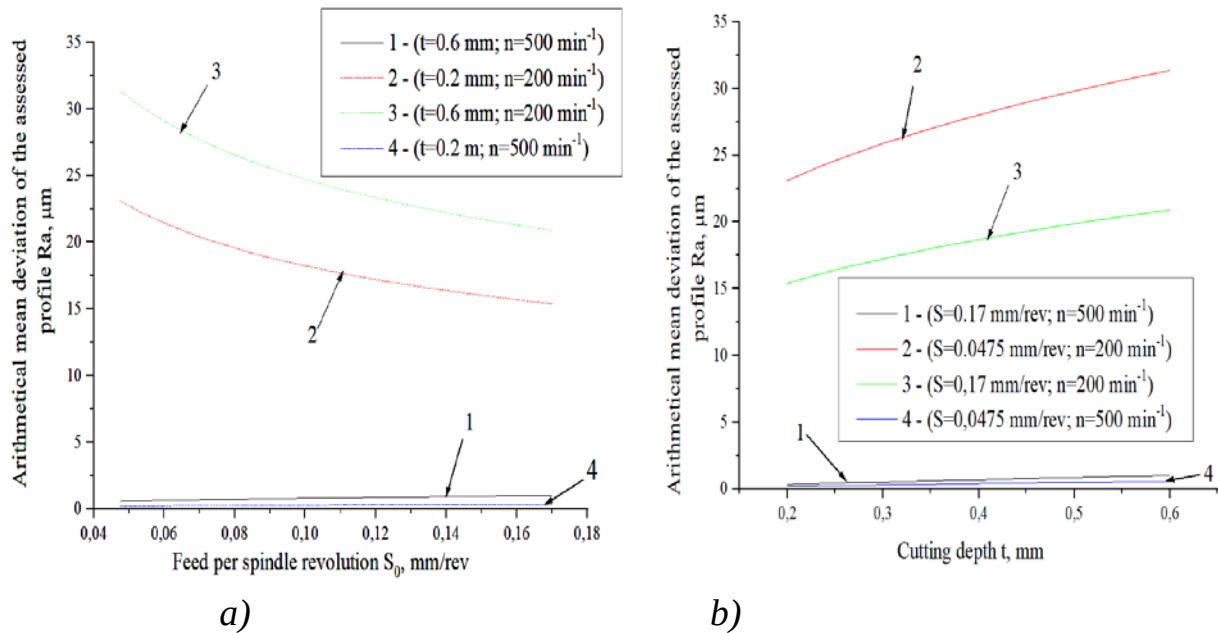


Fig.1. Influence of the feed per spindle revolution S_0 a) and cutting depth t b) on the arithmetical mean deviation of the assessed profile R_a during machining by turning the samples made of EI702 steel

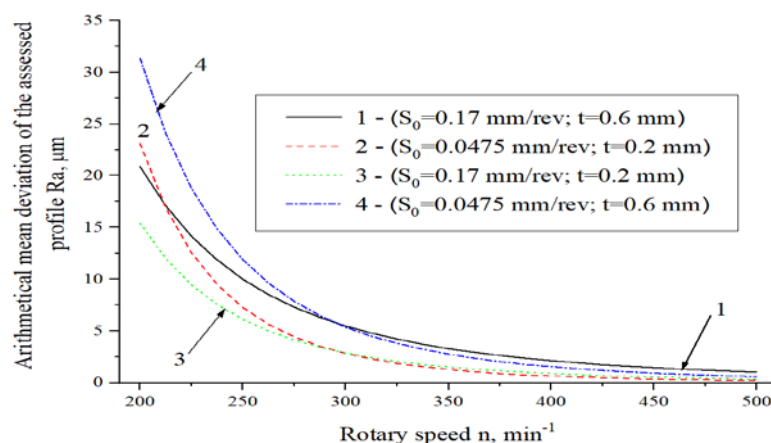


Fig.3. Influence of the rotary speed n on the arithmetical mean deviation of the assessed profile R_a during machining by turning the samples made of EI702 steel

The worst quality of the surface layer of a sample made of 36NHTYu steel is predicted during machining by turning using feed $S_0=0.0475 \text{ mm/rev}$, a cutting depth $t=0.2 \text{ mm}$, and a spindle speed $n=200 \text{ min}^{-1}$ ($R_a \approx 31 \mu\text{m}$).



The main conclusions have been drawn based on the research results.

The influence of technological parameters of turning on microgeometry indicators is ambiguous, which is confirmed by analytical dependencies obtained using the theory of mathematical planning of the experiment. The best arithmetical mean deviation of the assessed profile Ra is achieved according to the certain cutting modes: $S_0=0.0475$ mm/rev, $t=0.2$ mm; $n=500$ min⁻¹. Maximum productivity during turning and a good quality surface layer of the product (arithmetic mean deviation of the profile Ra) is achieved according to the certain cutting modes: $S_0=0.17$ mm/rev, $t=0.2$ mm; $n=500$ min⁻¹.

Further research in this direction will be extended to a wider range of materials and other methods of parts machining by cutting.

References

1. Kumar, K., Zindani, D., and Davim, J.P.: *Sustainable Manufacturing and Design*. Woodhead Publishing, Cambridge, United Kingdom (2021).
2. la Monaca, A., Murray, J.W., Liao, Z., Speidel, A., Robles-Linares, J.A., Axinte, .A., Hardy, M.C., and Clare, A.T.: *Surface integrity in metal machining – Part II: Functional performance*, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 164, 103718. (2021)
3. Kusyi, Y., Stupnytskyi, V., Kostiuk, O., Onysko, O., Dragašius, E., Baskutis, S., and Chatys, R.: *Control of the parameters of the surface layer of steel parts during their processing applying the material homogeneity criterion*. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 26(3). (2024)
4. Yurchyshyn, I.I., Lytvyniak, Ya.M., Hrytsay, I. Ye. and all.: *Mechanical engineering technology: Handbook for the performance of qualification works: Education. manual*. I.I. Yurchyshina (Ed.). Lviv: Lviv Polytechnic National University (2009)
5. Debska B.J., Dobrowolski L., Debska B.: *Experiment-design Methods in Innovative Polymer Material Planning*. *Journal of Applied Polymer science*, 135 (46), 46761. (2018)
6. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y.: *Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology*, Nova Science Publishers, New York 2011.



КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ СТАРТУ БЛА З ПУСКОВОЇ УСТАНОВКИ КАТАПУЛЬТОВОГО ТИПУ

Буковська Д.В., аспірант, Антонюк В.С., д.т.н., професор

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вступ. Пускові установки катапультированного типу мають вирішальне значення для функціонування безпілотних літальних апаратів (БЛА), оскільки вони забезпечують швидкий і ефективний старт БЛА, особливо в умовах обмеженого простору. Ці системи дозволяють здійснювати запуск БЛА з невеликих платформ, таких як наземні бази, кораблі або інші об'єкти, без потреби у великих злітно-посадкових смугах. Це особливо важливо для військових та місій спостереження, де швидкість і маневреність можуть бути критичними для успіху операцій.

Комп'ютерне моделювання дозволяє інженерам провести детальний аналіз проекту, що включає можливість оцінити різні конструкційні рішення і визначити їхню ефективність без необхідності фізичних експериментів. Це дозволяє зменшити витрати як часу, так і ресурсів на стадії проектування.

Прогнозування механічних навантажень, які діють на установки під час старту, також є суттєвим аспектом використання моделювання. Це дозволяє виявляти потенційні проблеми на ранньому етапі розробки, запобігаючи можливим поломкам і подовжуючи термін служби обладнання. Комп'ютерний аналіз дозволяє не лише верифікувати результати експериментів, але й виявляти несправності, ще до початку фізичних тестувань.

Застосування комп'ютерного моделювання у проектуванні установок катапультированного типу дозволяє значно знизити витрати на розробку та впровадження нових технологій. Завдяки можливості вносити зміни у цифровому форматі, інженери можуть оперативно реагувати на вимоги та коригувати проекти без додаткових затрат, що робить процес розробки більш гнучким і ефективним.

Таким чином, комп'ютерне моделювання стає невід'ємною складовою у вдосконаленні катапультированных установок для БЛА та сприяє підвищенню ефективності та надійності систем старту БЛА.

Огляд останніх публікацій. Комп'ютерне моделювання динаміки старту БЛА з катапультированных установок є важливим напрямком досліджень у сфері аерокосмічної інженерії і є критично важливим для удосконалення існуючих технологій та розробки нових рішень. Моделювання дозволяє передбачати



поведінку БЛА під час старту, оцінюючи різні параметри, такі як прискорення, швидкість, кут запуску, тощо [1].

В роботі [2] акцентована увага на інтеграції алгоритмів управління, які враховують динаміку групи БПЛА, а також вимоги до навігації та взаємодії між апаратами. Запропоновані моделі симуляції, що дозволяють проводити експерименти в умовах, наближених до реальних, для перевірки ефективності запропонованих стратегій управління.

Актуальність досліджень полягає в необхідності вдосконалення комп'ютерних моделей, які враховують не лише традиційні фактори аеродинаміки, але й новітні вимоги щодо безпеки, енергоефективності та адаптивності до різних умов операцій.

Основний матеріал. Створення математичної моделі старту БЛА є складним, але важливим процесом, що дозволяє дослідити динаміку, ефективність та безпеку польоту. Мета комп'ютерного моделювання динаміки старту БЛА з пускової установки катапультного типу полягає в оцінці факторів, які впливають на рух літального об'єкта під час старту.

Першим кроком у створенні моделі є визначення сил, що діють на БЛА. Сили, які необхідно врахувати, включають силу тяги (T), що генерується двигунами, силу ваги (W), яка є результатом впливу гравітації, а також аеродинамічний опір (D), що виникає в процесі пересування через повітря.

Сила ваги розраховується за формулою: $W = m \cdot g$, де m – маса БЛА, g – прискорення вільного падіння.

Для розрахунку аеродинамічного опору використовуємо формулу:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_d \cdot A,$$

де ρ – густина повітря, v – швидкість БЛА, C_d – коефіцієнт аеродинамічного опору, A – площа поперечного перерізу БЛА.

Застосовуючи другий закон Ньютона визначаємо прискорення БЛА $a(t)$:

$$a(t) = \frac{T - m \cdot g - D}{m},$$

де T – сила тяги, m – маса БЛА, g – прискорення вільного падіння, D – аеродинамічний опір.

Опишемо рух БЛА через рівняння швидкості та положення. Швидкість БЛА в момент часу t визначається за формулою:

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(\tau) \, d\tau,$$

де v_0 – початкова швидкість, яка зазвичай вважається нульовою. Таким чином, за допомогою інтегрування прискорення, можна визначити, як швидкість змінюється з часом.



Аналогічно, положення БЛА часом визначається через інтеграцію швидкості:

$$s(t) = s_0 + \int_0^t v(\tau), d\tau,$$

що дозволяє оцінити, як змінюється висота БЛА під час старту.

Коефіцієнт аеродинамічного опору (C_d) може змінюватися в залежності від швидкості БЛА та його конфігурації та розраховується за формулою:

$$C_d = C_{d0} + k \cdot M^2,$$

де C_{d0} – стартовий коефіцієнт опору, k – постійна, що характеризує вплив швидкості на опір, а M — число Маха.

Для розрахунку старту БЛА, на основі математичної моделі розроблено програмне забезпечення, що дозволяє врахувати аеродинамічні особливості у різних умовах запуску з пускової установки катапультного типу [3].

Проведено аналіз запуску безпілотного літального апарата ScanEagle з пневматичної катапульти, в результаті чого отримано показники сили ваги, аеродинамічного опору та прискорення під час старту. Отримані результати показали важливість оптимізації параметрів запуску БЛА для забезпечення успішного зльоту та виконання місій. Зменшення маси апарату та вдосконалення двигуна для покращення стартових характеристик і підвищення маневреності.

На основі аналізу отриманих розрахунків запропоновано декілька удосконалень для безпілотного літального апарата ScanEagle:

- зменшення маси апарату через використання легших композитних матеріалів може знизити силу ваги і збільшити тривалість польоту;
- удосконалення двигуна, зокрема через впровадження більш потужних і енергоефективних рішень, що покращить стартові показники і забезпечить кращу маневреність та швидкість під час польоту.

Висновки.

Проведені дослідження показали, що комп'ютерне моделювання старту БЛА забезпечує комплексний підхід до оцінки його динамічного поведінки в процесі зльоту. За допомогою математичної моделі можливо проводити чисельні симуляції, які допомагають виявити оптимальні умови для запуску, оцінити ризики і забезпечити безпеку польоту. Вона може бути адаптована для аналізу впливу різних зовнішніх факторів, таких як зміни вітру, температура або висота, що дозволяє удосконалити проектування та експлуатацію БЛА.

Застосування комп'ютерного моделювання у рамках процесу проектування безпілотних літальних апаратів робить його більш ефективним і менш затратним, знижуючи ризики під час експлуатації.

Отже, комп'ютерне моделювання старту БЛА являє собою потужний інструмент, що дозволяє здавати всебічний аналіз і адаптацію безпілотників до



викликів сучасності. Це охоплює не лише технічні аспекти, але й наукові дослідження, що відкривають нові горизонти в проектуванні і використанні безпілотних літальних апаратів.

Література

1. Miller, Christopher J., et al. "Airborne Simulation of Launch Vehicle Dynamics." *Annual AAS Guidance and Control Conference*. No. AAS 15-097. 2015.
2. Zhao, S.; Wang, Q. *Control and Simulation Technology for the swarm of Air-launch UAVs*. In 2020 Chinese Automation Congress (CAC); IEEE, 2020; pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/CAC51589.2020.9327172>.
3. Буковська Д.В., Антонюк В.С. Система автоматизованого розрахунку параметрів стадії запуску безпілотного літального апарату з пускової установки катапультного типу // *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: «Технічні науки», *Вісник Хмельницького національного університету*, №2, 2024(333), с.17–20. DOI:10.31891/2307-5732-2024-333-2-2

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ВАЖКОНАВАНТАЖЕНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ ЗА РАХУНОК ЗМІНИ ПРОФІЛЯ НА АСИМЕТРИЧНИЙ

Васильченко Я.В., д.т.н., професор, Мироненко О.Є., аспірант
Донбаська державна машинобудівна академія

До важконавантажених зубчастих передач відносяться приводи машин, при проектуванні яких висуваються жорсткі вимоги до мінімізації їх габаритів, маси і вартості. Сюди, в першу чергу, відносяться транспортні машини і гірські машини, де визначальними є крупногабаритні зубчасті колеса, зубчасті вінці діаметром до 15000 мм, модулем від 12 мм до 40 мм, маса млина рудногалькового МРГ-5500 х7500, 600т (рис. 1). Реалізація цих жорстких вимог призводить до значного зростання удільної силовий навантаженості, а вимога максимізації продуктивності машин призводить до зростання швидкісних характеристик приводу. Всі перераховані фактори сприяють зниженню довговічності машин і їх приводів, габарити і маса яких в основному визначаються параметрами зубчастих передач.

У важконавантажених машинах в якості приводів використовуються передаточні механізми, що містять зубчасті передачі, ступінь досконалості яких значною мірою визначає вартість і експлуатаційні характеристики промислового



обладнання. Важкі умови роботи, динамічний, вібраційний характер навантаження цих машин знижують міцність і час експлуатації зубчастих передач і їх приводів



Рис. 1. Млини рудногалькові МРГ-5500х750

Підвищення довговічності приводів машин є одним з найважливіших (поряд з підвищенням продуктивності і зниженням собівартості) вимог до проектування машин, яке в значній мірі забезпечується за рахунок збільшення ресурсу основних деталей приводу і, в першу чергу, за рахунок підвищення зносостійкості їх контактних поверхонь.

Дослідження умов довговічності крупногабаритних зубчастих передач по початковим параметрам евольвентних профілів зубів без урахування забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубчастих коліс і відновлених крупногабаритних зубчастих вінців є вельми наближеною, не відображає того факту, що через знос зубів форма профілю стає відмінною від початкової евольвентної поверхні. В результаті чого змінюються навантажено-кінематичні параметри контакту, які, в свою чергу, інтенсивно змінюють процес зношування і форму профілів зубів по лінії контакту і в поперечному перерізі [1, 2].

З метою підвищення навантаженості зубців в приводах машин важкого машинобудування пропонується застосування зубчастих передач з асиметричною формою зубців яка відображає функціональну різницю передач за ГОСТ1643-81 та асиметричним профілем [3,4].

У разі асиметричних передач стандартну симетричну зубчасту рейку оснащення змінюють шляхом зміни кута тиску на одній із бічних поверхонь.

Асиметричні шестерні призначені для передавання здебільшого односпрямованого навантаження з кутом нахилу 40° , за якого бокові поверхні зубів забезпечують 12% контактного напруження та 25% зменшення швидкості ковзання. Водночас контактна напруга і швидкість ковзання берегових флангів



близькі до цих параметрів базових передач і повинні забезпечувати таку саму навантажувальну здатність поверхні зуба, як і базові зубчасті колеса. Цей тип передач може знайти застосування для приводів з одним основним напрямком передавання навантаження, але вони повинні бути здатні переносити більш легке навантаження протягом коротших періодів часу в протилежному напрямку.

Асиметричні шестерні мають кут повороту на 46° , що дає змогу зменшити контактну напругу на 14% і швидкість ковзання на 32%. Недоліком таких зубів є дуже високе (+30%) навантаження на підшипник. Ці типи передач призначені тільки для односпрямованої передачі навантаження. Їхні бічні кути нахилу під кутом 10° мають незначну вантажопідйомність. Ці типи зубчастих передач можуть знайти застосування для приводів тільки з одним напрямком передавання навантаження, яке може іноді не мати контакту із зубцями бічної поверхні навантаження, як у разі зубного відскоку у високошвидкісних передачах.

Заміна симетричного профілю крупногабаритних зубчастих передач на асиметричний, особливо в умовах зростання удільної силової навантаженості, призведе до рівномірного розподілу навантаження на зуб та підвищення довговічності важконавантажених зубчастих передач.

Література:

1. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin. *Technology of restoration of large gear boxes*. Dašić, P. (editor): *Modern trends in metalworking*, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – Đ. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
2. Eđi÷eđi ĬĬ., Nrdđčeliř Ĭ.Ĭ., Ōlāiđiār Ř.Ĭ., Ėčđiiliēi Ĭ.Ş., Ćāri÷liēi Ĭ.Ĭ. Ėřiōjāiāl ēiārđčōēl÷il ŋđiēó÷lii Ćóá÷rññčō ōčēliāđč÷ičō d'ldlār÷ // ĭiōiđērōlēil ŋlōiēiātł: iřóēř, ŋlōiēř, ŋlōiēiātł, iñālñr, Ćāiđiā': ŋlčč āiđiālālē ŌXŌ, ēlčirđiāiiz iřóēiāi-d'đrēñč÷iiz ēiōlđliōlž MicroCAD-2023, 17–20 ŋđrāi 2023 đ. / Ćř đlā. d'điō. Nēiēř Ş.Ć. — Ōřđēlā : ĬŇŌ «ŌĐ». – Ň. 171.
3. Henriot, G. "Gears and Planetary Geartrains, Brevini, Reggio nell'Emilia, 2001.
4. Kapelevich, A.L. *Direct Gear Design*, CRC Press, 2013.



ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ МАШИНОБУДІВНИХ ВИРОБІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕРАТИВНИХ МЕТОДІВ ОБРОБЛЕННЯ

Врублевський І. Б. аспірант

Національний університет “Львівська політехніка”

Актуальність дослідження

Сучасні вимоги до якості та складності машинобудівної продукції, а також потреба у скороченні термінів виготовлення, зумовлюють активний пошук нових технологічних рішень. Адитивні (генеративні) методи, зокрема 3D-друк, дають змогу:

- Створювати деталі зі складною геометрією за мінімального використання матеріалів;
- Скорочувати етапи виготовлення шляхом поєднання друку й механічної обробки;
- Оперативно вносити зміни до конструкції виробу без радикального перепланування всього процесу.

Водночас залишаються відкритими питання щодо вибору оптимальних режимів друку, типу насадок (сопел), постобробки надрукованих виробів і встановлення економічної доцільності впровадження цих технологій у масштабах машинобудівного виробництва. Тому дослідження, присвячене підвищенню ефективності виготовлення машинобудівних виробів із використанням генеративних методів, залишається надзвичайно актуальним.

Мета й завдання дослідження

Мета – розробити підходи до оптимізації технологічного процесу виготовлення машинобудівних виробів із використанням адитивних методів, що дасть змогу знизити собівартість і підвищити якість готової продукції.

Основні завдання для досягнення мети:

1. **Здійснити огляд** існуючих адитивних технологій у машинобудуванні та визначити їх переваги й недоліки в контексті великосерійного та дрібносерійного виробництва.
2. **Дослідити** вплив параметрів 3D-друку (швидкість, температура, висота шару) й конструкції сопел на формування структури виробу, а також на його міцність та точність.



3. **Розробити** методику оцінювання загальної ефективності процесу: з урахуванням економічних показників (сировинні витрати, енергоспоживання, продуктивність) та якості кінцевого виробу.

4. **Підготувати** рекомендації щодо інтеграції адитивного друку в існуючі технологічні схеми виробництва машинобудівних підприємств.

Об'єкт і предмет дослідження

• **Об'єкт дослідження:** інтегрований технологічний процес виготовлення машинобудівних деталей із використанням генеративних методів.

• **Предмет дослідження:** вплив параметрів 3D-друку (тип і діаметр сопел, температура екструзії, швидкість подачі матеріалу) на технічні (точність, міцність) та економічні (собівартість, продуктивність) показники процесу.

Попереднє бачення наукової новизни

1. **Передбачається** запропонувати оригінальний підхід до вибору режимів друку для різних конструктивних типів деталей, що знизить вплив деформацій і підвищить довговічність готових виробів.

2. **Очікується** уточнення критеріїв оптимізації, які поєднують технічні та економічні параметри, включно з аналізом життєвого циклу виробу від заготівлі до утилізації відходів.

3. **Будуть розроблені** рекомендації з урахуванням особливостей комбінованого виробництва: 3D-друк в поєднанні з традиційною механічною обробкою для фінішного доведення поверхонь.

Методика і плани подальших досліджень

1. **Теоретичний аналіз** публікацій і патентів у галузі адитивних технологій: визначення оптимальних методів і матеріалів для виготовлення машинобудівних компонентів.

2. Проведення пілотних експериментів:

о Виготовлення тестових зразків на 3D-принтері з різними конфігураціями сопел та режимів друку;

о Вимірювання точності, твердості, міцності, а також ряду інших показників (шорсткість поверхні, геометричні відхилення).

3. **Статистичний аналіз** результатів для виявлення найбільш впливових факторів.

4. **Моделювання процесу** із застосуванням методів скінченних елементів, що дасть змогу оцінити напружено-деформований стан виробу під час формування шарів.

5. **Формування рекомендацій** щодо впровадження: розрахунок витрат, вплив на логістику, можливості використання комбінованих технологій друку й традиційної обробки.



Очікувані результати

1. **Розробка** комплексних критеріїв вибору режимів адитивного друку залежно від вимог до точності й міцності машинобудівних виробів.
2. **Обґрунтування** економічної вигідності генеративних методів за рахунок зниження матеріаломісткості та скорочення часу на виготовлення деталей зі складною геометрією.
3. **Створення** базового алгоритму (або програмного прототипу), що допоможе інженерам-технологам автоматизувати підбір оптимальних параметрів друку під конкретні умови виробництва.
4. **Підготовка** експериментальної платформи для розширеного дослідження впливу температурних і кінематичних параметрів друку на структуру та експлуатаційні характеристики деталей у різних галузях машинобудування.

Висновки та перспективи дослідження

Робота перебуває на початковому етапі, але вже на цьому етапі зрозуміло, що впровадження адитивних технологій у традиційні виробничі цикли дає вагомі переваги: від зменшення кількості відходів до скорочення часу виходу на ринок нових розробок. Подальші експерименти дадуть змогу виявити оптимальні конфігурації режимів друку та методи їх узгодження з механічною обробкою. Це сприятиме формуванню єдиної методики побудови гнучких виробничих ліній, у яких з'єднано переваги як генеративних, так і класичних технологій оброблення.

Література

1. А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок, *Интегрированные генеративные технологии*, 2011



РОЗРОБЛЕННЯ ВІБРАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТЕРА З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРИВОДОМ ТА НЕЗАЛЕЖНИМИ КОЛИВАННЯМИ

Гаврильченко О.В., *к.т.н., професор*, Павлюченко Д.П., *аспірант*
Національний університет «Львівська політехніка»

У роботі представлено нову конструкцію вібраційного транспортера з електромагнітним приводом, яка забезпечує автоматичну віброізоляцію та зниження динамічного впливу на основу. Запропонована тримасова система із динамічним гасником дозволяє ефективно зменшити амплітуду коливань, розширюючи можливості застосування транспортера в промислових умовах.

Вібраційні транспортери широко використовуються у промисловості завдяки їхній здатності транспортувати матеріали безпосередньо внаслідок коливальних рухів. Проте високий рівень вібрацій, який передається на основу, є ключовою проблемою, що обмежує їх застосування. Запропонована конструкція вирішує це питання за допомогою тримасової системи із незалежними пружними вузлами та електромагнітними приводами.

Проведено аналітичні розрахунки жорсткостей пружних елементів та моделювання кінематики системи. Основна увага приділена динамічній поведінці тримасової системи.

Система складається з активної маси m_1 , проміжної маси m_2 та реактивної маси m_3 . Масивні елементи кріпляться до умовно нерухомої стійки через окремі пружні вузли, що забезпечує незалежність коливань мас (рис. 1).

Коливання мас m_1 і m_3 , з амплітудами x_1 і x_3 відповідно, перебувають у протифазі, що забезпечує зрівноваження інерційних сил. Проміжна маса m_2 виконує функцію динамічного гасника, зменшуючи передачу коливань на основу (рис. 2).

Жорсткості резонансних пружних вузлів c_1 , c_2 визначаються за формулами:

$$c_1 = m_1 \left(\frac{\omega}{z} \right)^2,$$

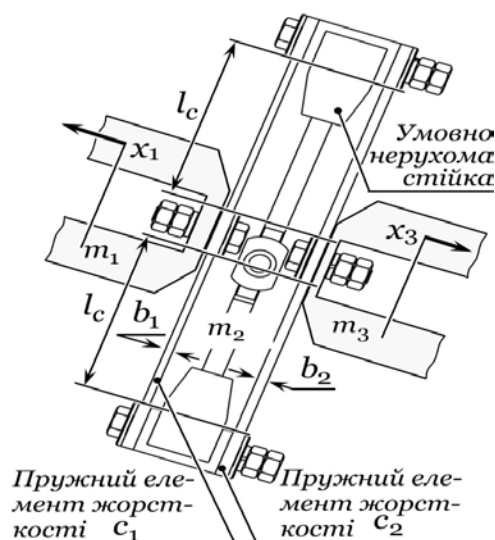


Рис. 1. Тримасова система
із динамічним гасником

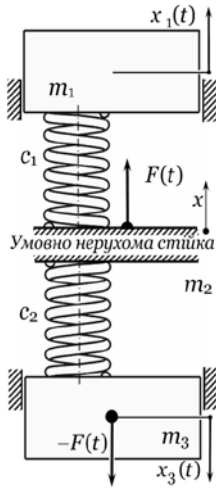


Рис. 2. Розрахункова модель тримасової системи із динамічним гасником за двома одномасовими схемами

$$c_2 = m_3 \left(\frac{\omega}{z} \right)^2,$$

де m_1 і m_3 – відповідно активна та реактивна маси; ω – кутова частота власних коливань системи; z – коефіцієнт, що враховує демпфування та властивості системи.

Конструкція має низку переваг, серед яких зменшення вібраційного впливу на основу, універсальність у налаштуванні частоти коливань, а також підвищення довговічності конструкції та можливість її роботи в різних умовах. Ці залежності забезпечують можливість точного налаштування системи на резонансні частоти, що дозволяє ефективно зменшити амплітуду коливань, які передаються на основу, і покращити віброізоляцію.

Розроблений вібраційний транспортер із тримасовою системою забезпечує високий рівень віброізоляції завдяки взаємодії між масами. Використання проміжної маси як динамічного гасника значно покращує експлуатаційні характеристики транспортера. Конструкція може знайти застосування в різних галузях промисловості, де необхідна мінімізація вібраційного впливу.

ВІБРАЦІЇ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З ЧЕРВ'ЯЧНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ, ЇХ ПРИЧИНИ ТА ВПЛИВ НА ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ І МЕТОДИ ЇХ УСУНЕННЯ

Гелетій В. М., к.т.н, доцент, Новіцький Я.М. к.т.н, доцент
Національний університет «Львівська політехніка»

Розглядаються проблеми експериментального і теоретичного дослідження вібрації механічної системи з черв'ячною передачею на прикладі механізму стабілізації положення люльки автомобільної вишки (рис.1, а) з черв'ячним редуктором (рис.1, б). Механізм почав працювати з нехарактерними для нормальної роботи ривками і шумом. Були виявлені дефекти робочих поверхонь черв'яка і черв'ячного колеса. Причиною цього могли бути попередні переван-



таження черв'ячного редуктора. Виготовлення нових черв'яків для редуктора і його заміни не дали позитивного результату як і заміна мастила.



а



б

Рис.1. Автовишка (а) і механізм стабілізації положення люльки (б)

В результаті замірів одержані значення параметрів черв'ячної передачі, необхідні для проведення розрахунків та експериментальне дослідження параметрів вібрацій люльки вишки при роботі механізму стабілізації її положення.

Огляд поверхонь зубців черв'ячного колеса і черв'яка свідчить про наявність пошкоджень, характерних для задирів однак розрахунки на міцність які проводились на основі розроблених авторами комп'ютерних програм [1] та інших програмних продуктів дали задовільний результат з умов міцності.

Експериментальне дослідження вібрацій люльки вишки при роботі механізму стабілізації її положення проводилось за допомогою аксельрометра. Одержані осцилограми прискорень у трьох напрямках показані на рис. 2 Домінуючі вертикальні вібрації характеризуються основними двома частотами: орієнтовно 0,63 Гц і 2 Гц.

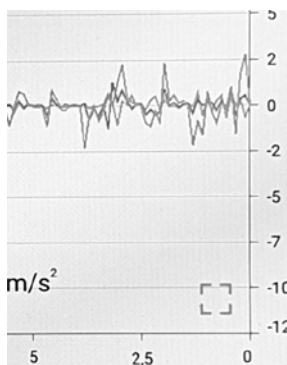


Рис. 2. Осцилограми прискорень

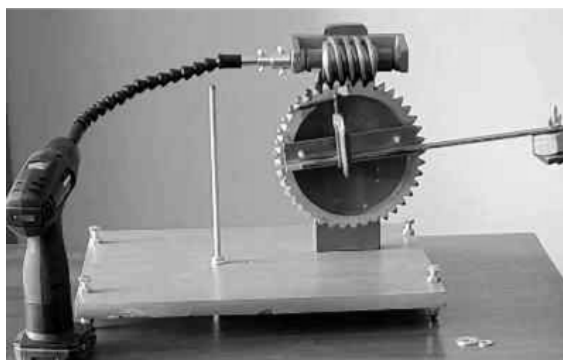


Рис. 3. Експериментальна установка



Такі вібрації можуть виникати через періодичне змінне навантаження пов'язане з зазорами в черв'ячній передачі, особливостями контакту між черв'яком і колесом і його фрикційними характеристиками [2].

Крутильні автоколивання механічної системи з зазором можна описати диференціальним рівнянням:

$$J \varphi'' + c \varphi' + k\varphi = M(t) + F(\delta(t)),$$

де φ , φ' , φ'' – кутова узагальнена координата і її похідні по часу, J – момент інерції системи, c – коефіцієнт демпфування, k – жорсткість зачеплення, $M(t)$ – збурюючий момент, $F(\delta(t))$ – нелінійна функція сили в зачепленні, що залежить від зазору $\delta(t)$. Проведено аналіз такої математичної моделі і її комп'ютерну симуляцію.

При стрибкоподібній функції $F(\delta(t))$ система може переходити у стан автоколивань. Загальні способи зменшення автоколивань зводяться до мінімізації зазорів, збільшення демпфування та встановлення амортизуючих елементів та підбір параметрів роботи так щоб частота збурень передачі не збігалася з власними частотами коливної системи.

Для перевірки прийнятих допущень аналогічні вібрації були відтворені на експериментальній моделі черв'ячної передачі (рис.3) в лабораторних умовах, де досліджувався вплив різних факторів на появу автоколивань.

Література

1. Гелетій В. М. *Технічна механіка і деталі машин: Практикум* / В. М. Гелетій, Р. Я. Предко. – Львів: «Сполом», 2024. – 148 с.
2. Костогриз С.Г., Мисліборський В.В. Автоколивання у фрикційному контакті (наближений розрахунок) *Проблеми трибології (Problems of Tribology)* 2017, № 2 С.62-68



НАПІВАВТОМАТИЧНА СИСТЕМА АЕРОЗОЛЬНОГО МАСУВАННЯ ЕВАКУАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТУ

Глазунов А.Є. *студент*, Довгополов А.Ю. *к. т. н.*,
Некрасов С.С., *к. т. н., доцент*
Сумський державний університет

В сучасних реаліях ведення бойових дій, широко використовується високоточна зброя та різноманітні технічні засоби розвідки – радіолокаційні, лазерні та інфрачервоні. Використання даних видів розвідки не дозволяє своєчасно проводити евакуацію поранених з поля бою, для надання їм необхідної медичної допомоги. Через це, питання маскування евакуаційного транспорту від засобів розвідки противника, в тому числі, і димами, стає як ніколи актуальним.

Авторами для вирішення даної важливої проблеми, була розроблена та виготовлена нова система димового маскування з пультом керування розміщеним в салоні евакуаційного транспорту, даний пульт представлений на рис. 1.

Зазначена система аерозольного маскування, складається із шести мортир (рис. 2, а) розмішених на кузові евакуаційного транспорту, та напівавтоматичного пульта керування цими мортирами. В мортирах розміщуються димові шашки (рис. 2, б), запалювання яких відбувається за рахунок подачі електричного заряду від пульта на електрокапсульну втулку яка розміщена в корпусі димової шашки.



Рис. 1. Загальний вигляд напівавтоматичного пульта керування



а



б

Рис. 2. Загальний вигляд мортири (а) та димової шашки (б) розробленої системи аерозольного маскування



МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО СИСТЕМНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС В МЕТОДАХ НЕПЕРЕРВНОГО ГЕНЕРУВАННЯ

¹Грицай І.Є., *д.т.н., проф.*, ²Громнюк С.І., *інженер*, ¹Вергун В.А., *аспірант*

¹ НУ «Львівська політехніка»

² ТЗОВ «СПР Енерго, м.Львів

Процеси нарізання зубчастих коліс, які здійснюються за неперервного генерування, або в умовах неперервного обкочування належать до найскладніших технологічних процесів в машинобудуванні. Це стосується, зокрема технології черв'ячного зубофрезерування, зуботочіння, відомого сьогодні як Power Skiving, обкочувального зубовбання, а також радіального–колового методу зубооброблення. Спільним для них (крім зубодовбання) є присутність чотирьох координатних рухів: обертання різального інструменту – головний рух різання, обертання заготовки, осьова подача – допоміжні рухи, а також додатковий конструктивний рух, який надається інструменту в кожному з цих методів і який доповнює допоміжні рухи різання-формоутворення. В червячному фрезеруванні – це поздовжній осьовий рух гвинтової поверхні фрези, в Power Skiving – це рух в напрямку осьової подачі, що виникає внаслідок схрещення осей скайвінг-різця та зубчастого колеса, а в радіально-кововому методі – це радіальна осциляція дискової фрези внаслідок ексцентриситету між її кінематичною та геометричною осями. Такі умови накладають істотні обмеження на перебіг процесів, вимагають точної синхронізації кінематичних ланцюгів і приводів, а також значно ускладнюють їх математичне описання і моделювання.

Дослідження цих процесів, які виконувалися протягом тривалого часу дали змогу розробити методологічний підхід до вирішення цієї задачі, який базується на засадах комплексності і системності. Суть цього підходу полягає в поступовому описанні і моделюванні множини субпідрядних явищ і процесів, які реалізують відповідний метод зубонарізання і які супроводять їх перебіг. Взаємозалежність таких процесів і явищ має складну просторову будову, описується нелінійними впливами зі зворотними зв'язками.

Почнемо з загального описання системи ВПД як просторової перетворювальної системи. Її можемо представити як певну чорну скриньку, на яку впливають умови перебігу перетворювальних і супровідних процесів і явищ, якими можна керувати для досягнення заданих параметрів, а також низка випадкових впливів і чинників, що мають стохастичний характер і часто не піддаються опи-



су. На вході системи діє сукупність вхідних чинників і параметрів, на виході – множина параметрів, які треба досягти з допомогою даної системи. Вхідними (початковими) даними є параметри об'єкта процесу – в нашому випадку зубчастого колеса (модуль, кількість і кут нахилу зубців, початковий контур профілю, твердість, ступінь пластичності та міцність матеріалу заготовки, її похибки тощо), властивості верстата і спорядження (жорсткість, приведені маси, діапазон робочих режимів, потужність, геометрична і кінематична точність тощо). Умовами перебігу процесу різання та формоутворення є робочі режими – швидкість різання, подача, глибина різання, параметри інструменту, які піддаються регулюванню. Вихідними параметрами є точність та якість робочих поверхонь, час оброблення, продуктивність та собівартість операції, витрати енергії, задана стійкість інструменту тощо. Випадковими чинниками можуть бути різноманітні зовнішні впливи, наприклад – неоднорідність властивостей заготовки, нестабільність силової енергії, поштовхи та вібрації настилу цеху, коливання температури.

Центральною задачею моделювання процесу нарізання зубчастого колеса є описання всесторонніх процесів та явищ, які становлять суть перетворень в цій системі, а також супутніх процесів і явищ, що виникають при цьому і впливають на результат її функціонування. Такими є процеси деформаційні, силові, контактні, трибологічні, теплові, що за своєю природою можуть бути зі стаціонарними та змінними в часі параметрами, статичні і динамічні.

Особливість методів нарізання зубчастих коліс, які тут розглядаються в тому, що в усіх випадках маємо справу з процесами різання, що належать до багатозубчастих і багатолезових, при цьому параметри зрізів – товщина, ширина, площа зрізу, довжина шляху різання на кожному зубці та лезі неперервно змінюються по кут повороту різального інструменту та є різними в різних ділянках його активної поверхні. Вказані обставини свідчать про складність вирішення поставлених задач та важливість їх практичної реалізації для теорії і практики технології виготовлення зубчастих коліс.

На першому етапі досліджень важливо адекватно описати кінематичну схему відповідного процесу. Це можна показати на прикладі зуботочіння, кінематику якого в сучасній західній науці, як це впливає з аналізу відповідних першоджерел представляють ідентичною з черв'ячним зубофрезеруванням. Насправді рух передньої поверхні зубця скайвінг інструменту в русі різання відповідає коловому руху спряженого з заготовкою зубчастого колеса, в той час як рух зубця черв'ячної фрези відповідає обертанню дискової фрези в площині, близькій до 90° відносно торця заготовки, Така підміна тягне за собою



помилки в оцінці сили різання, впливу кінематичних кутів на перебіг процесу та інші негативні результати.

Наступний ланцюжок первинних взаємозв'язків між елементами структури можна представити такою послідовністю: визначення параметрів елементарних зрізів у функції від кутів повороту інструменту і заготовки → формування моделі просторової недеформованої стружки → встановлення інтенсивності пластичного деформування при різанні від товщини зрізуваного шару → моделювання сили різання (силового просторового поля інструменту): а) одиничні (елементарні) сили різання на лезах б) сумарна сила різання на всіх одночасно працюючих зубцях → описання процесів тертя на поверхнях інструменту → розрахунки роботи різання і роботи для подолання тертя → відтворення теплоти різання → розрахунок теплових потоків на лезах інструменту → моделювання температури → прогнозування зношування інструменту.

Перший етап досліджень – створення геометричної моделі об'ємної стружки є базовим, бо від нього залежить якість і достовірність наступних ітерацій. Вивчення стану в цій галузі показало, що для цього створюють спеціальні програмні продукти, що характеризуються великою складністю та громіздкістю і мають комерційне значення для їх розробників. Авторами цієї публікації запропоновано просте і ефективне рішення. Його суть у тому, що неперервний процес різання розглядається у виді послідовності дискретних відносних положень різального клина і оброблюваної поверхні з урахуванням зміни їх лінійного і кутового положення на кожному наступному кроці. Накладання контурів зубця інструменту в даному і попередніх по осьовій і круговій подачах дає змогу визначити миттєву форму і розміри площі поперечного перерізу зрізу, його товщину і ширину, та виконати це на кожному лезі, виявивши таким чином, які леза беруть участь в різанні в даному миттєвому положенні інструменту і заготовки. Використання цього графоаналітичного методу моделювання базується на відповідному контурі зубця інструменту та кінематиці того чи іншого методу зубообробки і є універсальним. Такий підхід дав змогу описати перехідну поверхню різання, межах якої відбувається зняття припуску і яка відповідає внутрішній поверхні стружки. На основі побудови послідовних миттєвих перерізів формується просторова модель недеформованих стружок в кожному методі зубоутворення.

Наступним кроком є визначення інтенсивності осадження стружки на лезах залежно від товщини зрізів – для цього ми використовуємо систему Деформ 2D для відповідного матеріалу зубчастого колеса. На цій основі стає можливим змодельовати добуток площі зрізу, коефіцієнта осадження та межі



міцності заготовки на зсув силу різання у виді просторового графіка, в якому відображено навантаження різальних елементів інструменту в кожній точці його активного простору. Оскільки різання усіма видами інструментів у наших методах є багатозубим, то треба розрізняти силу однозубого різання і силу багатозубчастого різання, як результат одночасної роботи усіх активних зубців. За силою однозубчастого різання моделюємо тертя на передній та задній поверхнях зубців, визначаємо роботу різання і тертя, а сумарна сила різання служить для визначення ефективної потужності різання і вибору приводу верстата.

Наступний етап наскрізного моделювання полягає в дослідженні теплових потоків на поверхнях і лезах зубців різального інструменту та розрахунку їх температури, що служить підставою для прогнозування інтенсивності зношування зубців, що перебувають в різних зонах інструменту та їх лез. Такі дослідження створюють основу для розроблення рекомендацій щодо удосконалення конструкції інструментів та покращення їх геометрії. Розроблені моделі дозволяють регулювати значеннями осьової подачі та швидкості різання для забезпечення гранично можливої сили різання та максимального періоду стійкості інструментів.

Опис розробленої системи не обмежується вказаними послідовними зв'язками між компонентами структури, в ній мають місце також зворотні та перехресні зв'язки. Зокрема, підвищення температури призводить до зміни межі міцності оброблюваного матеріалу і зменшення сили різання, але лише до певного її значення, яке надалі може зростати через підвищення пластичності припуску і збільшення коефіцієнта осадження.

На силу різання мають істотний вплив умови невірного різання як наслідок одночасної роботи вершинними і боковими лезами на значній частині активного простору для усіх інструментів. Нашарування стружок в ділянках спільних вершин зумовлює збільшення сил тертя і призводить до зростання сумарної сили різання і збільшення пружних деформацій верстатів. Також в усіх схемах різання має місце зміна дійсних кутів інструменту, зокрема на бокових вхідних і вихідних лезах внаслідок схрещення осей. Дійсні (кінематичні) кути відрізняються від їх значень на інструменті поза верстатом, що в свою чергу змінює тертя на бокових поверхнях, збільшуючи силу різання на вихідних лезах і зменшуючи цю силу на вхідних лезах. Зміною значень робочих режимів та кутів інструментів можна досягти бажаних результатів.

Усі процеси, які тут розглядаються відбуваються з циклічною періодичністю зміни параметрів зрізів, що впливає на динамічну систему верстата з динамічною системою процесу різання, викликаючи коливання та вібрації. При



певних початкових даних та режимах різання можливо збільшення інтенсивності коливань і вібрацій вище допустимих меж і навіть втрата сталості в пружній системі. Розроблені динамічні моделі дають змогу запобігти цим негативним явищам і встановити умови сталості і надійної роботи верстатів.

Ще одною особливістю технології зубонарізання є відмінності при нарізанні коліс внутрішнього зачеплення, для виготовлення яких можна використовувати Power Skiving та радіально-коловий методи, розроблені моделі охоплюють також виготовлення таких коліс. Окремою задачею було моделювання процесу врізання при однопрохідному та багатопрохідному нарізанні зовнішніх та внутрішніх зубчастих коліс. Контакт зубців інструменту з поверхнею заготовки, в якій ще відсутня попередньо сформована впадина між зубцями призводить до удару та імпульсу сили різання. Скачок сили, що діє на пружну систему може бути багатократно перевищувати максимальне значення сили в процесі усталеного різання. Дослідження на основі створених моделей дали змогу визначити граничне допустиме значення осьової подачі в поєднанні з глибиною різання, при яких буде забезпечуватися необхідна стійкість інструменту і продуктивність оброблення.

Загалом, підсумовуючи можна констатувати, що розроблена система комплексного моделювання процесів оброблення зубчастих коліс, які (процеси) належать до найскладніших в машинобудуванні, виконує функції підвищення ефективності технологічних операцій зубооброблення, покращення якості цих деталей машин та удосконалення різальних інструментів для їх виконання.

МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ІНСТРУМЕНТУ ЗА ЙОГО ТЕМПЕРАТУРОЮ В ПРОЦЕСІ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС МЕТОДОМ POWER SKIVING

Грицай І.Є., д.т.н, професор, Сліпчук А.М. к.т.н., доцент,
Національний університет «Львівська політехніка»

Протягом останнього часу в практиці виготовлення зубчастих коліс все ширшого розповсюдження набуває метод Power Skiving, відомий раніше як зуботочіння. Ця технологія має істотні переваги перед традиційними методами зубооброблення, а саме – висока продуктивність при забезпеченні якісних параметрів зубчастих поверхонь. Її поширення, що почалося від нарізання коліс



малих модулів внутрішнього зачеплення розширилося до виготовлення зовнішніх великомодульних коліс приводів різноманітних машин і техніки. Разом з тим, аналіз стану в цій галузі показав, що резерви Power Skiving на сьогодні далеко не вичерпані та існує можливість удосконалення цього процесу шляхом оптимізації режимів різання, покращення конструкції різального інструменту та підвищення працездатності, зокрема, збільшення його ресурсу. Інструмент, який використовується в цьому методі базується на відповідності парному зубчастому колесу у верстатному зачепленні з оброблюваним колесом з дотриманням вимог до його різальних параметрів – твердості, міцності, геометрії тощо. Скайвінг різак належить до складних різальних інструментів, а зубчасте колесо, яке покладено в його основу має бути виконано за параметрами кінематичної точності і плавності роботи не нижче, ніж за п'ятим ступенем точності. З цього випливає, що підвищення його стійкості є одним із резервів скорочення виробничих витрат та зменшення вартості зубчастих коліс.

Головним чинником, який впливає на довговічність різальних інструментів є температура, яка встановлюється на їх робочих поверхнях в процесі різання. Цей параметр належить до основних характеристик процесу різання, а визначення та розрахунок температури є однією з найскладніших задач. Дослідження, які проведені авторами і дали змогу змодельовати температуру процесу Power Skiving базуються на комплексному та системному підході, в основу якого покладено усі стадії і етапи моделювання процесу різання та формоутворення і які є взаємозв'язані та взаємозумовленими. Ланцюжок досліджень включає аналіз кінематики процесу та визначення комбінації робочих рухів, 3D моделювання стружки і параметрів зрізів на рівні окремих лез і зубців різця, інтенсивності пластичного деформування зрізувальних шарів, моделювання сили різання, встановлення впливу дійсних (кінематичних) і умов невірного різання біля вершин зубців кутів на силу різання, розрахунки тертя на поверхнях інструменту, роботи зубців та лез, теплових потоків на поверхнях інструменту і їх температури. Для прикладу нижче наведені графіки, які ілюструють деякі аспекти дослідження процесу Power Skiving.

Сукупність розроблених комп'ютерних програм, математичних та графоаналітичних моделей і залежностей дає змогу вирішувати як пряму задачу технологічного проектування цього процесу – прогнозування значень контрольованих параметрів і їх зміни в часі обробки, так і зворотну задачу («реінженірінг») – встановлювати такі вихідні параметри і значення початкових чинників, які забезпечують досягнення заданої мети: продуктивності процесу, точності оброблення, технологічних витрат на операцію і її собівартості,



стійкості інструменту тощо. Такими контрольованими параметрами, через які можна керувати процесом є режими різання (швидкість, подача, глибина різання і кількість проходів), кут установки скайвінг-різця, передній і задній кути різального клина на лезах, захисні покриття, інструментальний матеріал, кількість зубців інструменту.

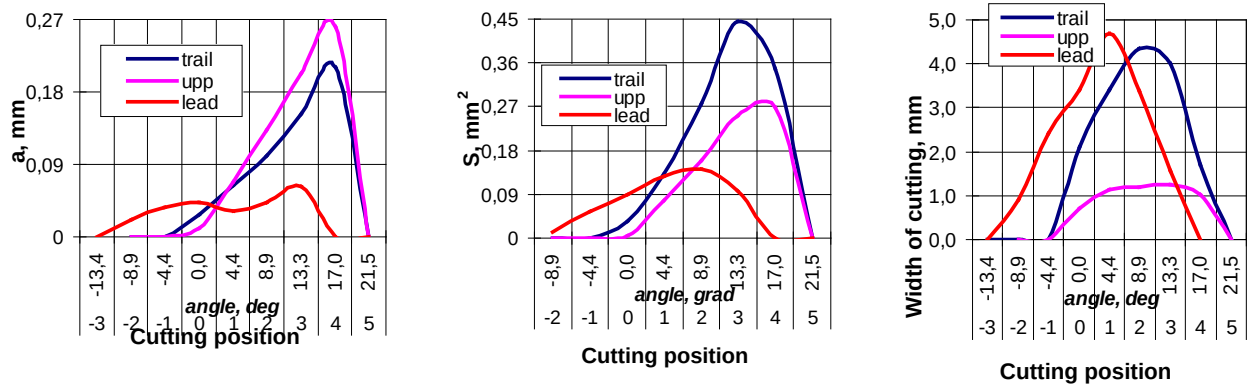


Рис.1. Товщина (а), площа (б) і ширина зрізів на лезах (в)

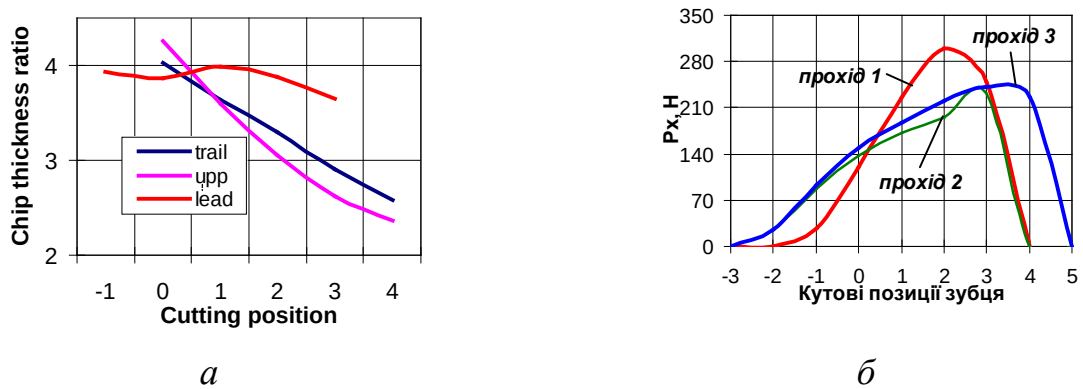


Рис.2. Коефіцієнт осадження стружки на лезах (а) і осьова сила (б), що діє на різець в процесі трьох проходів (б)

Зокрема, з отриманих результатів видно, що для наведених вище початкових даних максимальна температура, яка виникає на вершинах лез значно відрізняється від температури різання внаслідок малої товщини зрізів і інтенсивного осадження стружки, невільного різання, підвищеного тертя та інтенсивних теплових потоків у цих ділянках. Її максимальне значення на вершинному і вихідному лезі (близько 1200°) перевищує критичну температуру теплостійкості багатьох твердих сплавів, що вказує на необхідність вибору відповідного інструментального матеріалу – це різальна кераміка або металокера-



міка, в іншому випадку необхідно змінювати умови перебігу процесу для уникнення теплового перевантаження.

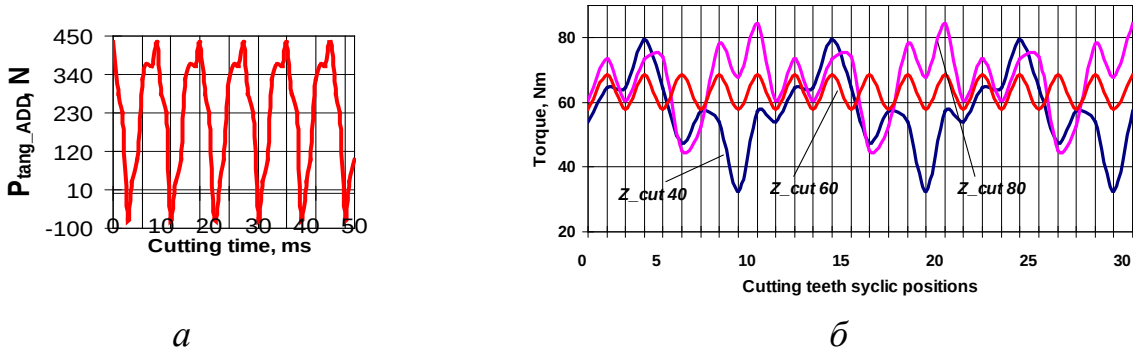


Рис.3. Сумарна тангенціальна (окружна) сила, що діє на різець (а) та крутний момент на різці при різній кількості зубців (б)

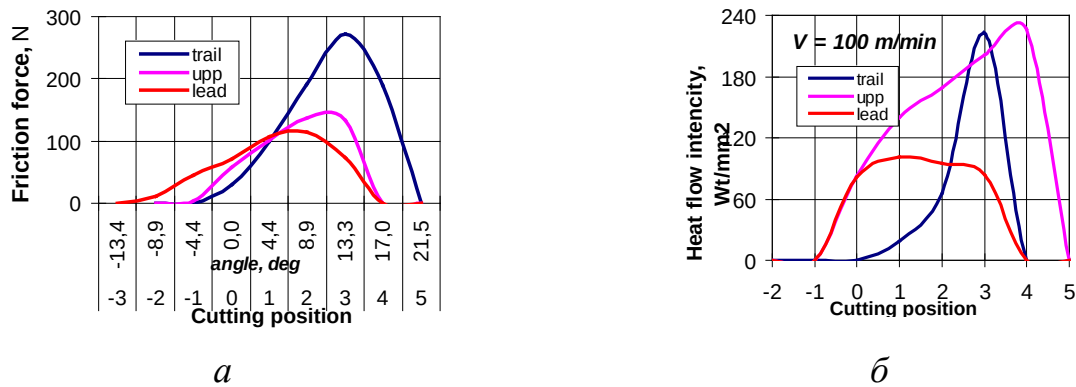


Рис. 4. Сила тертя (а) і теплові потоки на лезах (б)

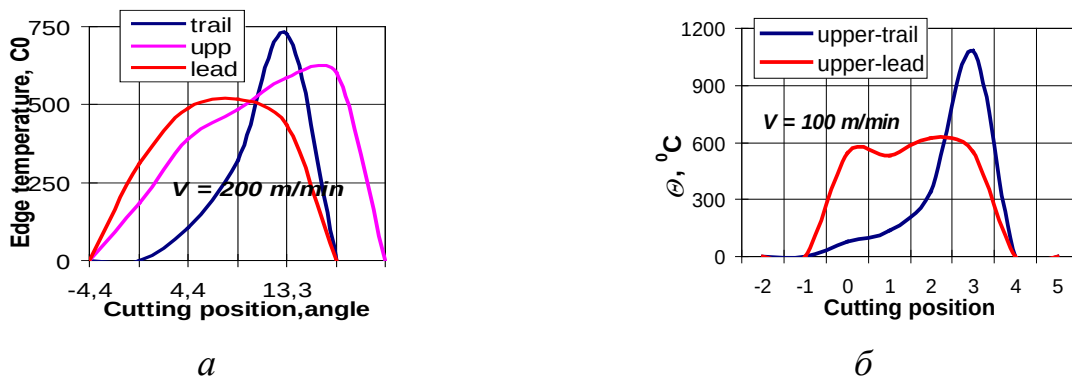


Рис.5. Температура на лезах (а) і на кутниках зубців скайвінг-інструменту (б)

Таким чином, розроблена система дослідження дає змогу охопити різнобічні техніко-економічні аспекти процесу нарізання зубчастих коліс методом Power Skiving та забезпечити його максимальну ефективність.



ВПЛИВ КОЛИВАНЬ НА ФОРМУВАННЯ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ КІНЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

Дядя С.І., *к.т.н, доцент*, Козлова О.Б., *к.т.н, доцент*, Яхно Д.А., *аспірант*,
Дзюба Д. В., *студент*

Національний університет «Запорізька політехніка»

Випуск конкурентоздатної продукції супроводжується, як підвищенням продуктивності для зниження витрат на виробництво, так і високою якістю її виготовлення. Обидві складові нерозривно пов'язані з причинами, які впливають на їх зниження. Однією з них є вібрації, які виникають при різанні. Через переривчасте різання вони найбільш поширені при фрезеруванні, зокрема кінцевому, яке широко застосовується в аерокосмічній галузі при обробці тонкостінних деталей.

Якість поверхні після механічної обробки визначається точністю форми та шорсткістю, на які впливають умови різання. Для визначення їх при кінцевому фрезеруванні використовується розподіл на швидкісні зони коливань. Кожна з п'яти швидкісних зон обмежується граничними значеннями [1], які визначаються при розрахунку визначального співвідношення (BC), що розраховується за формулою:

$$BC = \frac{t_{\text{різ}}}{T_{\text{БК}}}, \quad (1)$$

де $t_{\text{різ}}$ та $T_{\text{БК}}$ – час різання та період вільних коливань деталі відповідно.

Особливістю кінцевого фрезерування тонкостінних деталей є його переривчастість та короткочасність, що, згідно закономірності виникнення коливань при різанні [2], обмежує можливості виникнення сталих автоколивань.

Через те, що час різання при кінцевому фрезеруванні зменшується зі збільшенням швидкості різання, змінюється закон руху деталі та види коливань, що діють при цьому. Механізм формоутворення базується на перенесенні похибок з поверхні різання, як спадковість, на оброблену поверхню.

Також особливістю кінцевого фрезерування є формоутворення обробленої поверхні після зустрічної подачі залишками початкової частини поверхні різання, а при попутному – залишками кінцевої частини поверхні різання.

При різанні у першій швидкісній зоні коливань діють тільки вимушені коливання. При попутному і при зустрічному фрезеруванні час різання постійний. Вільні коливання під час холостого ходу згасають і фреза врізається в нерухому деталь. Однакове положення деталі при різанні, відсутність хвилястості на поверхні різання створюють умови для рівної оброблюваної поверхні.



Але при малій швидкості різання її якість обумовлюється залишками пластичної деформації металу.

При різанні у другій швидкісній зоні коливань з зустрічною подачею до вимушених коливань додаються супроводжуючі вільні (СВК), які накладаються на них. Вони мають невелику інтенсивність, що полегшує процес стружкоутворення. При попутному фрезеруванні СВК не виникають. На цю відмінність впливає те, що при зустрічному фрезеруванні різання починається з найменшої товщини шару, що зрізається, який немає демпфуючих властивостей. При попутному фрезеруванні початок різання з найбільшої товщини шару демпфує виникнення СВК, тому поверхня різання залишається без хвилястості. При обох напрямках подачі фреза врізається в нерухому деталь. Але при зустрічному фрезеруванні залишки хвилястості з поверхні різання, як спадковість, передаються на оброблену поверхню. Крок хвилястості на поверхні різання співпадає з кроком хвилястості на обробленій поверхні.

При різанні у третій швидкісній зоні коливань демпфуючих властивостей початкової товщини шару, що зрізається, при попутному фрезеруванні вже недостатньо і СВК на виході інструменту мають від'ємне затухання. Час різання при зустрічному та попутному напрямках подачі періодично змінюється, що пов'язано з періодичною зміною довжини поверхні різання. При зустрічному фрезеруванні це не впливає на формоутворення, а при попутному, через те, що воно відбувається на кінці різання, на обробленій поверхні залишаються частки западин поверхонь різання починаючи від тієї, що мала найбільшу довжину, до тієї, що мала найменшу довжину. При обох напрямках подачі хвилястість з поверхні різання переноситься на оброблену поверхню. Фрезерування у третій швидкісній зоні коливань супроводжується СВК великої амплітуди і вона вважається найбільш несприятливою для забезпечення якості обробленої поверхні.

При різанні у четвертій та п'ятій швидкісних зонах коливань час різання менший ніж період СВК. Тому вони не виникають. В цих зонах діють тільки вимушені коливання. Фреза завжди врізається в деталь, що коливається. Для забезпечення якості обробленої поверхні необхідно, щоб при зустрічному фрезеруванні було постійне значення точки врізання інструменту, а при попутному – постійне значення точки виходу інструменту. Такі умови забезпечуються, коли частота вільних коливань деталі не буде кратною частоті вимушених коливань.

Кінцеве фрезерування може відбуватися в будь – якій з швидкісних зон коливань. Це залежить від властивостей оброблюваного матеріалу, за якими обирається швидкість різання. Тому знання механізму формоутворення об-



робленої поверхні дозволяє обирати такі варіанти її обробки, при яких забезпечується якість.

Література:

1. Автоколебания при фрезеровании тонкостенных элементов деталей [Электронный ресурс]: монография / [Внуков Ю. Н., Дядя С. И., Козлова Е. Б и др.]; под ред. Ю. Н. Внукова. – Электрон. данные. – Запорожье: ЗНТУ, 2017.-208 с.
2. Influence of cutting time on types of oscillations during blade processing. / Y Vnukov, SI Dyadya, OB Kozlova, PR Trishin, AE Zubarev. // Ukr. J. Mech. Eng. Mater. Sci, 2023. Vol. 9, № 1: 53-66.

ОСОБЛИВОСТІ ВЛАСТИВОСТЕЙ СПЛАВУ ЖС6-У СИНТЕЗОВАНОГО МЕТАЛОТЕРМІЄЮ

¹Жигуц Ю.Ю., д.т.н., професор, ²Козар О.П., д.т.н., професор,

¹Легета Я.П., ст. викладач, ¹Крайняй І.І., ст. викладач

¹ Ужгородський національний університет

² Мукачівський державний університет

ВСТУП. Експериментальне вивчення теплових властивостей твердих металів і сплавів та їх розплавів при високих температурах має великий науковий інтерес і важливе значення для практики використання матеріалів. Однак, роботи, присвячені дослідженню властивостей металів при високих температурах і особливо в рідкій фазі, небагато. Це пояснюється труднощами високотемпературного експерименту, які пов'язані з необхідністю виконання таких умов: тепловий потік повинен поширюватися тільки в бажаному напрямку, без розсіювання; форма і розміри зразків повинні допускати аналітичний опис процесу передачі тепла; у процесі вимірювань досліджуваний метал не повинен взаємодіяти з тиглем і мати незмінний хімічний склад. Крім того, при збільшенні температури зменшується кількість конструкційних матеріалів, які можуть бути використані в експерименті [1-4]. Розплави заліза, нікелю, сплави на їх основі є агресивними в хімічному відношенні матеріалами і взаємодіють практично з усіма металами [1,2,4]. Застосування розроблених методик для дослідження їх властивостей супроводжується значними труднощами. З урахуванням високої хімічної агресивності рідких металів і їх сплавів: при виборі методики експерименту віддають методи, які вимагають малого проміжку часу



на проведення дослідження, і дають змогу отримати комплекс основних теплових характеристик у ході єдиного експерименту.

Приймаємо до уваги вище перераховані умови для вивчення теплофізичних властивостей сплаву на основі заліза і нікелю в твердій і рідкій фазах нами був обраний метод радіальних температурних хвиль [3]. Основна перевага цього методу порівняно з іншими методами в тому, що він надає набагато більше можливостей для використання різних способів вимірювання основних теплових властивостей, здійснювати комплексні вимірювання. Важливою особливістю цього методу є те, що роль теплообміну може бути зведена до введення малих поправок при вимірюванні в інтервалі температури нагріву до 2000 К. І нарешті до переваг методу належить та обставина, що результати розглянутого експерименту можуть бути фактично повтореними стільки разів, скільки періодів коливань реєструється у фазах і потужностях обладнання для вимірювання. Таким чином, метод радіальних температурних хвиль є одним з найбільш перспективних методів, придатних для високотемпературних досліджень.

Об'єктом дослідження був сплав ЖС6-У синтезований металотермією [5] з оксидів відповідних легуючих елементів при високотемпературній взаємодії з порошком алюмінію. Синтезований сплав циліндричної форми у вигляді прутка діаметром 30 мм у подальшому піддавався випробуванням.

За допомогою вказаної вище методики були вивчені теплопровідність, теплоємність і температуропровідність при постійному тиску сплаву ЖС6-У в інтервалі температур до 1600 К.

Аналіз похибок. При виведенні співвідношення не враховувалась роль теплових втрат із зовнішньої поверхні зразка. Для теплообміну в інтервалі температури до 1600 К поправка на теплообмін не перевищує кілька відсотків, а внесена внаслідок цього похибка – 1...2 відсотки.

При роботі з рідким металом необхідно ввести поправку на роль стінки тигля. У нашому експерименті величина цих поправок знаходилася у межах 3-6%; похибка внаслідок неточності введення цієї поправки не більше ~ 1%. Таким чином похибка вимірювання температуропровідності складається в основному з похибок визначення радіусу циліндра ~5%; похибки поправки на тепловідвід з бокової поверхні ~1%, з торців ~0,5% і з стінки тигля ~1%. Максимальна похибка визначення теплоємності складається в основному з похибки визначення амплітуди пульсації температури 4...5%, похибки визначення потужності, що вводиться у зразок ~1% і похибки на тепловідвід, тобто загальна похибка 8...9%.



Проведення експерименту. Після монтажу зразка вмикався в установці форвакуумний, потім дифузійний насоси. По досягненні вакууму $\sim 10^{-4} \dots 10^{-5}$ мм. рт. ст. вмикався нагрівач, а після – модулюючий пристрій. Для встановлення температури зразка, одночасно включалась схема реєстрації. Обробка отриманих осцилограм проводиться методами гармонічного аналізу.

Результати встановлення хімічного складу сплаву, синтезованого металотермією, показані в табл. 1, механічні властивості в табл. 2, а результати вимірювань температуропровідності і теплоємності в табл. 3.

Таблиця 1.

Хімічний склад у % матеріалу ЖС6-У

Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	W	Co	Nb	Ti	Al
до 0,8	0,13–0,2	0,3	0,3	54,3 – 62,7	0,01	0,015	8 – 9,5	1,2 – 2,4	9,5 – 11	9 – 10,5	0,8 – 1,2	2 – 2,9	5,1 – 6

Таблиця 2

Механічні властивості ЖС6У при $T=20^{\circ}\text{C}$

Розмір	σ_s	d_5
мм	МПа	%
30	830	3

Таблиця 3.

Теплові властивості ЖС6-У, при $T=1578\text{ K}$, $\lambda=0,403\text{ Вт/см}$

a , $\text{см}^2/\text{с}$	0,090	0,092	0,090	0,095	0,091
$C_1 \cdot \rho$, $\text{кал/см}^3 \cdot \text{K}$	1,05	1,11	1,08	1,10	1,05

Відхилення результатів окремих вимірювань від середніх значень температуропровідності у межах однієї серії вимірювань становила 5...6%, що узгоджується з оцінками випадкових похибок.

Сплави на основі нікелю (і заліза) в рідкому стані взаємодіють з усіма тугоплавкими металами, в тому числі і з нікелем, який є основним конструкційним матеріалом у цій роботі. Ця обставина суттєвим чином обмежувала точність отриманих експериментальних даних, оскільки взаємодія розплавів досліджуваних зразків з тиглем в кінцевому підсумку призвела до його руйнування. Крім цього постає питання про вплив танталу тигля на теплофізичні характеристики зразків. Це тим більш важливо, що за нашими даними взаємодія танталу з досліджуваними сплавами, скоріш за все приводила до зниження



температури плавлення. Викладене дає підставу вважати, що необхідне подальше вивчення цих зразків з метою уточнення отриманої експериментальної інформації. Насамперед мова повинна йти, про вибір конструкційних матеріалів тиглів, які не взаємодіють з розплавами жароміцних матеріалів. Значення температуропровідності і теплоємності сплаву ЖС6-У в рідкому стані отримані нами, скоріш за все, вперше, тому порівняти їх не з іншими даними не було можливості. Теплопровідність сплаву ЖС6-У при температурі 1578К становить 0,40 Вт/см·град.

З аналізу отриманих даних можна зробити висновок що теплопровідність сплавів ЖС6-У при плавленні зменшується приблизно в 1,3...1,5 рази, а об'ємна теплоємність практично не змінюється. Такий характер поведінки теплопровідності і теплоємності узгоджується з поведінкою цих характеристик для чистих металів [1,2].

Висновок. Проведена оцінка похибки вимірювання температуропровідності і теплоємності для сплаву ЖС6-У при температурі 1300-1600К. Визначена теплопровідність цих сплавів. Встановлено, що теплопровідність сплаву при плавленні зменшується в 1,3-1,5 рази, а теплоємність практично не змінюється.

Література:

1. Haynes, William M. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. – 92nd. – CRC Press, 2011. – ISBN 1439855110.
2. *Термохімічні властивості рідких сплавів заліза з важкими лантанойдами: експеримент та моделювання*/ Н.І. Усенко, М.І. Іванов, Н.В. Котова, Н.В. Головата //Вісник Українського матеріалознавчого товариства. – 2014. – Вип. 7. – С. 107-114. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vumt_2014_7_17.
3. Куцова В.З., Аюпова Т.А., Котова Т.В. та ін. *Основи теорії твердого тіла (Фізика твердого тіла): Навчальний посібник*. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 89 с.
4. *Вимірювальна техніка та метрологія* / Ю.Я. Бобало //Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк [та ін.]; НАН України, НТШ. – К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2005. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-33993>.
5. Zhiguts Yu., Kozar O. *New combined technologies of synthesis materials. Advanced technologies in education, industry and the environment. Monograph: edited by Olga Paraska, Norbert Radek, Oleg Synyuk* – 2020. – P. 33-46.



УСТАНОВКА ДЛЯ ПЛАЗМОВО-ЕЛЕКТРОЛІТИЧНОГО ОКСИДУВАННЯ МЕТАЛІВ З АВТОМАТИЧНОЮ ЗМІНОЮ ВІДСТАНІ МІЖ ЕЛЕКТРОДАМИ

**Імбірович Н.Ю., д.т.н., професор, Повстяной О.Ю., д.т.н., професор,
Сметюх Б.В., аспірант**

Луцький національний технічний університет

Плазмо-електролітичне оксидування (ПЕО) є перспективною технологією обробки поверхні металів, яка дозволяє отримувати керамічні оксидні покриття з унікальними властивостями. До поверхонь, синтезованих з допомогою ПЕО, ставиться ряд вимог, які залежать напряду від сфери застосування. Одним з перспективних напрямків розвитку ПЕО є моделювання і оптимізація процесу. Зміна відстані між електродами є важливим інструментом для контролю процесу ПЕО та отримання покриттів з бажаними властивостями. Правильний вибір відстані дозволяє оптимізувати умови розряду, теплообмін, газовиділення та, як наслідок, мікроструктуру та властивості оксидного шару. Також контрольована зміна відстані під час ПЕО буде впливати на однорідність покриття. Так як під час синтезу з сталою заданою напругою величина струму змінюється в залежності від насичення поверхні оксидами, то виникає проблема нерівномірності мікроструктури поверхні а також появи різноманітних небажаних включень до структури. Тому дуже важливо підтримувати сталість густини струму для досягнення повторюваності результатів.

Для контролю відстані та параметрів оксидування застосовується мехатронна система, зображена на рис.1.

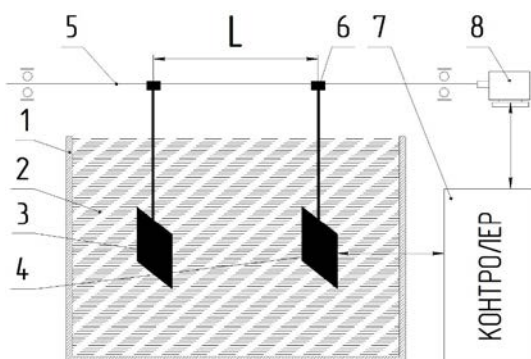


Рис.1. Схема регулювання відстані між електродами при ПЕО

- 1 – ванна; 2 – електроліт; 3 – анод (заготовка);
4 – катод; 5 – ходовий гвинт; 6 – рухома стійка;
7 – програмований контролер; 8 – двигун



Принцип її дії полягає у контролі параметрів оксидування. У ванні з електролітом на певній відстані один від одного знаходяться анод (заготовка) і катод. Маючи таблицю параметрів оксидування для даного типу матеріалу можемо змінювати процес не вносячи змін до самої системи. В програмований контролер заносяться параметри, вибрані для конкретного типу матеріалу і контактної площі нанесення. Після початку оксидування пристрій підтримує сталу напругу, а також зчитує показання сили струму. Якщо струм в системі починає змінюватись, то дані про це надходять до контролера і трансформуються в переміщення катоду відносно аноду (заготовки).

Дана мехатронна система дозволяє стабілізувати сам процес, а також отримувати більш точні результати дослідів, що в подальшому дозволить розвивати цю технологію і вийти на принципово нові рівні.

Література:

1. *Xun Ma, Carsten Blawert, Daniel Höche, Mikhail L. Zheludkevich, Karl U. Kainer, Investigation of electrode distance impact on PEO coating formation assisted by simulation. Applied Surface Science, Volume 388, Part A, 2016, P. 304-312.*
2. *G Sundararajan, L Rama Krishna. Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology. Surface and Coatings Technology, Volume 167, Issues 2–3, 2003, pp. 269-277.*

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗБІРНИХ РІЗЦІВ ДЛЯ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ

**Клименко Г.П., д.т.н., професор, Бородай Р.А., аспірант,
Рєва Є.С., аспірант., Васильченко Ю.В., магістр, Чумаченко В.П., бакалавр
Донбаська державна машинобудівна академія**

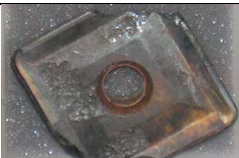
Підвищення рівня автоматизації існуючого металорізального обладнання вимагає особливої уваги до стабільності обробки деталей, скороченню простоїв верстатів, у тому числі й з вини відмов різальних інструментів. Особливо це важливо для важких верстатів з ЧПК, вартість простоїв яких дуже велика. Тому проблема підвищення надійності різального інструменту для важких верстатів набула особливої актуальності. Дослідження умов експлуатації різальних інструментів при обробленні деталей на важких верстатах показує, що поряд зі зношуванням, значне місце займає руйнування різальної частини у вигляді



викрошувань і руйнувань (табл. 1). Причиною руйнування інструменту є стохастичний характер процесу обробки на важких верстатах [1], внаслідок чого велике розсіювання властивостей оброблюваних і інструментальних матеріалів і інших параметрів умов обробки, які призводять до необхідності імовірнісного підходу до визначення конструктивних і технологічних параметрів експлуатації різального інструменту.

Таблиця 1

Види відмов робочої частини твердосплавних різців важких верстатів

Вид відмови різальної пластини	Тангенціальні	Горизонтально розташовані
а) на повну товщину		
б) на повну ширину		
в) на повну товщину, множинне		
г) не на повну товщину або ширину		

Дослідження умов експлуатації збірних токарних різців важких верстатів дозволив виявити найпоширеніші технологічні фактори, які необхідно в першу чергу враховувати при дослідженні надійності інструменту. Встановлено, що для верстатів з $D_{max} = 1250\text{--}2500$ мм серед оброблюваних матеріалів 59% складають леговані сталі, найбільш часто використовують конструкції різців типів Р, S, Н до 79% відмов інструментів припадає на руйнування, сколи та викрашування. Найпоширеніші глибини різання (62%) – 10–19 мм, подачі – 0,9 мм/об. (47%) [2].

Розроблено математичну модель надійності збірного різця з використанням теорії полумарківських процесів у вигляді залежності коефіцієнту готовності різця як системи від параметрів законів розподілу періоду стійкості різця (Вейбула) і експоненціального закону, що не заперечує розподілу часу відновлення працездатності збірного різця.



Обґрунтовано визначення раціонального рівня надійності збірного різця і його окремих елементів. Оптимізація здійснювалась за критерієм приведених витрат і витрати інструменту. Встановлено, що для збірних різців раціональний рівень надійності (коефіцієнт готовності) – 0,64-0,68, а для різальної пластини (імовірність безвідмовної роботи) – 0,75-0,82. Подальше підвищення рівня надійності призводить до необґрунтованого підвищення витрат [3].

Доведено, що для забезпечення раціонального рівня надійності збірного різця необхідна регламентована (примусова) заміна інструменту через період гама-відсоткової стійкості.

Імовірнісний підхід до розрахунку товщини різальної пластини збірного різця дозволив визначити поправочні коефіцієнти на товщину пластини від рівня надійності, які враховують параметри розподілу як властивостей різального інструменту, так і його навантаження.

Досліджено ремонтпридатність збірних різців найпоширеніших конструкцій, які застосовують на верстатах з $D_{max} = 1250\text{--}2500$ мм. 8.

Удосконалена система математичних залежностей для формування цільових функцій з оптимізації режимів різання, яка включає уточнену залежність періоду стійкості, нову модель коефіцієнту готовності. Розроблено рекомендації з вибору режимів різання з урахуванням раціонального рівня надійності збірного різця.

Література:

1. Klymenko G., Kvashnin V. *Reliability assurance technological systems exploitation of heavy lathe /Cutting & tool in technological system 2019; 91: pp. 78–86* <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2019.91.08>
2. Klymenko G., Kovalov V., Vasylenko Y., Korchma D., Boroday R. *Probabilistic approach to calculating the rational thickness of the tool's cutting insert for heavy machine tools. /Cutting & tool in technological system 2023; 99: pp 110–119* <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2023.99>.
3. Klymenko G., Vasylenko Y., Reva Y., Korchma D., Boroday R. *Determination of the stability period of turning cutters for heavy machine tools /Cutting & tool in technological system 2024; 101: pp. 95–102* <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2024.101.09>



СТРУКТУРНИЙ СТАН ОБРОБЛЮВАНОГО МАТЕРІАЛУ ЯК ОКРЕМИЙ ФАКТОР ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ

¹Клименко С.А., *д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України,*

¹Копейкіна М.Ю., *к.т.н., старший науковий співробітник,*

²Павлова Г.О., *к.т.н., доцент*

¹ *Інститут надтвердих матеріалів ім. В.Н. Бакуля НАН України*

² *ПрАТ Краматорський завод важких верстатів*

В загальному випадку теорія різання має враховувати структурний стан оброблюваного матеріалу і базуватися на його незалежних від масштабу фізико-механічних показниках. З огляду на те, що структура матеріалу, у більшості випадків, представлена великою кількістю зерен, для їхньої кількісної оцінки доцільно використовувати методи дослідження, які дають змогу розглядати цей ансамбль якщо не загалом, то в статистично значущій вибірці. У більшості випадків великий вплив на показники структури матеріалів має масштаб її розгляду, що суттєво ускладнює такі дослідження. У той же час, положення фрактального формалізму дозволяють вивчати показники досліджуваного об'єкту незалежно від масштабу розгляду.

Б. Мандельброт охарактеризував фрактал, як структуру, що складається з частинок, подібних до цілого. У якості прикладу фрактального об'єкту він наводить берегову лінію Норвегії, яка представлена кривою з порізаним профілем. Для визначення фрактальних показників досліджуваного об'єкту, вихідний об'єкт розглядається зі збільшенням масштабу, довжина профілю при цьому наближається до нескінченності, а отримані кінцеві показники не пов'язані з масштабним фактором.

Такий підхід може бути застосований під час вивчення довжини границь зерен у структурі матеріалу, їх параметрів тощо. При цьому геометричні показники фрагментів структури досліджуваного матеріалу і сукупність його фізико-механічних властивостей, що відповідають цим фрагментам, мають фрактальний характер. Фрактальному (мультифрактальному) об'єкту притаманний великий комплекс показників, але частіше використовуються: фрактальна розмірність D_0 (визначає однорідність фракталу, пов'язану із заповненням евклідового простору досліджуваною структурою), параметр однорідності F (характеризує розподіл елементів досліджуваної структури в евклідовому просторі), впорядкованість Δ (відображає впорядкованість структури в цілому).



На теперішній час існують загальні уявлення з основ процесу різання, найбільш важливими з яких є поняття щодо механізму утворення стружки. Існують теорії з однією площиною зсуву в зоні стружкоутворення, з віялоподібною зоною зсуву, із зоною формування стружки за рахунок пластичної течії оброблюваного матеріалу та ін. Водночас, за всього різноманіття уявлень про стружкоутворення, оброблюваний матеріал здебільшого розглядають як однорідну систему без урахування наявності в ній зернистої структури. Структурний стан оброблюваного матеріалу проявляється через значення фізико-механічних властивостей його складових, розміру і конфігурації їх границь, впливаючи на механіку і теплофізику стружкоутворення та контактної взаємодії на робочих поверхнях інструменту. При цьому потрібно розуміти, що використовуються усереднені довідкові величини і для ряду фізико-механічних властивостей їхні значення залежні від масштабу оцінки. Особливо складно це враховувати для випадку обробки різанням матеріалу з гетерогенною структурою.

Модель стружкоутворення з урахуванням структурного стану оброблюваного матеріалу на початковому етапі базується на уявленнях щодо особливостей перебігу деформації «стиснення-зсув» у окремих зернах структури матеріалу (які мають відмінний від інших профіль, стан границь і фізико-механічні властивості) в зоні стружкоутворення, як це має місце в моделі з однією площиною зсуву (з урахуванням того, що для кожного зерна має місце різне значення куту зсуву, що пов'язано з різними фізико-механічними властивостями зерен), та після серії послідовних актів деформування зерен у структурі матеріалу в напрямку від вершини інструменту до вільної поверхні оброблюваного виробу вона приймає вигляд, наближений до випадку стружкоутворення з розвиненою зоною деформації. Тобто, має місце лавиноподібний ланцюговий процес деформування сукупності зерен матеріалу. Звичайно, це завдання для комп'ютерного моделювання.

При такому розгляді однорідність оброблюваного матеріалу проявляється у процесі обробки різанням вже на стадії стружкоутворення в параметрах механіки і теплофізики процесу. На контактних ділянках інструменту структурний стан пари «матеріали інструменту і стружка», «матеріали інструменту і виробу» зумовлює механіку та теплофізику контактної взаємодії, механізм зношування інструменту, якість поверхні та стан поверхневого шару обробленого виробу.

Під час оцінки сил різання потрібно враховувати фрактальні показники цілої низки параметрів матеріалу виробу, що обробляється – насамперед це сукупності механічних властивостей поверхневого шару, процесу оброблення – значення глибини різання та довжин робочих ділянок різальних кромek інструменту, стану інструменту – відхилення величини його зносу від мінімального значення. Зазна-



чене зумовлює появу вібрацій у процесі різання і вимагає використання для обробки матеріалів із гетерогенною структурою обладнання (верстатів, пристосувань, інструментів) із високою жорсткістю.

У матеріалах із гетерогенною структурою тепловий фронт має фрактальний характер, що пов'язано з переважним розповсюдженням тепла структурними складовими з найбільшою теплопровідністю. Для аналітичного опису такого теплового фронту використовують рівняння в дрібних похідних.

Для спрощеного оцінювання температури в зоні різання може бути використаний підхід, заснований на застосуванні традиційних методик але за умови використання значення теплопровідності оброблюваного матеріалу, визначеного з урахуванням фрактальності його структури.

Фрактальний аналіз стосовно матеріалу інструменту дає змогу проаналізувати еволюцію його структурного стану як фактору впливу на інтенсивність зношування інструменту протягом часу роботи в залежності від експлуатаційного навантаження, що є базою для оптимізації технології виготовлення матеріалу для оснащення такого інструменту. Крім того, за фрактальними параметрами структурного стану матеріалу можна зробити висновок про механізм адаптації його структури до зовнішнього навантаження.

Важливо відзначити, що традиційно використовувані показники механічних властивостей матеріалів, наприклад, твердість, міцність під час згинання та ін., не повною мірою корелюють зі зносостійкістю оснащених ними інструментів, тоді як комплекс фрактальних показників структурного стану матеріалу дає змогу прогнозувати його поведінку під час навантаження в різальному інструменті – найбільшу працездатність мають різальні інструменти, оснащені матеріалами зі структурою, яка характеризується найбільшими фрактальними параметрами однорідності F і упорядкованості Δ , мінімальними значеннями фрактальної розмірності D_0 структури.

Структурний стан оброблюваного матеріалу є самостійним чинником, що зумовлює зношування різального інструменту. Як показують результати досліджень і практичний досвід, зі зростанням неоднорідності структури оброблюваного матеріалу стійкість інструменту знижується. Поряд з цим, менший вплив на стійкість інструменту набуває швидкість різання.

Впливаючи на перебіг процесу обробки, структурний стан оброблюваного матеріалу безпосередньо впливає на стан поверхневого шару обробленого виробу та якість обробленої поверхні, зокрема, на її шорсткість. При цьому ступінь однорідності оброблюваного матеріалу є самостійним фактором, який обмежує можливості з управління шорсткістю оброблюваної поверхні, не дозволяючи



сформувати шорсткість оброблюваної поверхні з параметрами, що нижчі за допустимі структурним станом оброблюваного матеріалу.

Таким чином, структурний стан матеріалу виробу значною мірою обумовлює його оброблюваність різанням – збільшення неоднорідності оброблюваного матеріалу призводить до зниження швидкості різання, що відповідає заданій стійкості інструменту.

У зв'язку із зазначеним, технологічна собівартість процесу обробки зумовлена не тільки режимами різання і витратами на організацію процесу обробки, а й структурним станом оброблюваного матеріалу. При цьому ступінь впливу структурного стану оброблюваного матеріалу збільшується при зниженні швидкості різання. Це підтверджує відомий експериментально встановлений факт підвищення загальної ефективності обробки матеріалів із гетерогенною структурою зі зростанням швидкості різання.

Для розвитку теорії різання з урахуванням структурного стану оброблюваного матеріалу потрібно, насамперед: – сформувати фрактальні бази структур поверхневого шару матеріалів інструментів та конструкційних матеріалів залежно від умов одержання; – дослідити еволюцію структур матеріалів у процесі експлуатаційного навантаження; – розробити підходи до комп'ютерного моделювання стружкоутворення й контактної взаємодії в зоні різання з урахуванням структурного стану оброблюваного матеріалу; – виконати дослідження з ранжирування пар «матеріал інструменту-оброблюваний матеріалів» в врахуванням показників їх структурного стану.

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ НИТОК ЗІ СКЛЯНОГО ВОЛОКНА

**Кобилянська І.В., магістриня, Матейчук Д.О., студентка,
Медвідь Ю.В., аспірантка, Панчук В.Г., професор, д.т.н.**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Скляні нитки, одержувані з елементарних скляних волокон, знаходять широке застосування у виробництві, зокрема композитної будівельної арматури. В силу впливу різних факторів якісні характеристики скляних ниток можуть відрізнятися одна від одної. Тому скляна нитка перед прийомом у виробництво потребує проходження вхідного контролю для оцінки її механічної міцності на розрив.



Кафедра комп'ютеризованого машинобудування отримала замовлення від одного із підприємств-партнерів на проектування і виготовлення розривної машини для експрес-аналізу міцності скляної нитки на розрив.

Задача полягає у визначенні параметрів установки, проектуванні і виготовленні механічної конструкції пристрою, розробці системи керування процесом вимірювання.

Каркас пристрою виготовлено з алюмінієвого верстатного профілю розміром 30×60 мм. Елементи кріплення профілів і каретка виготовлені на 3D-принтері. Робочий хід каретки 200 мм. Привід каретки здійснюється через гвинтову передачу від крокового двигуна NEMA 17 з планетарним редуктором з передавальним відношенням 19:1.

Мікропроцесорна система керування виготовлена на базі материнської плати Arduino Due. Технічна характеристика:

- Мікроконтролер: SAM3X8E (ARM Cortex-M3, 32-бітний)
- Робоча частота: 84 МГц
- Кількість цифрових виводів: 54 (12 із них підтримують ШІМ)
- Кількість аналогових входів: 12
- Пам'ять: 512 КБ флеш-пам'яті, 96 КБ SRAM
- Інтерфейси: UART, SPI, I2C, USB OTG

Для керування установкою і відображення графічних даних використано сенсорний дисплей TFT LCD 2.4" Touch Screen Shield на базі ILI9341.

Основні характеристики:

- Діагональ екрану: 2,4 дюйми
- Розділова здатність: 240х320 пікселів
- Тип дисплея: кольоровий TFT
- Контролер: ILI9341
- Тип сенсору: резистивний
- Інтерфейс: SPI
- Сумісність: стандартний shield для Arduino Due/Uno

На основі попереднього експерименту встановлено, що скляна нитка витримує навантаження на розтяг не більше 500 Н. Тому в якості вимірювального елемента використано тензометричний давач з драйвером HX711.

Основні характеристики тензодавача:

- Тип: резистивний тензодавач
- Робочий діапазон навантажень: до 50 кг
- Точність: $\leq 0,01$ кг



Основні характеристики драйвера НХ711:

- Тип АЦП: 24-бітний
- Напруга живлення: 2,7–5 В
- Частота дискретизації: 10 Гц/80 Гц
- Інтерфейс: двоканальний з підсиленням сигналу (32, 64 або 128)



Рис. 1. Установка вимірювання міцності скляної нитки на розрив

Система керування забезпечує роботу установки в ручному і автоматичному режимах. Ручний режим забезпечує керування двигуном від сенсорних кнопок на екрані дисплею. В автоматичному режимі реалізується цикл дослідження скляної нитки на розривну міцність. В процесі навантаження нитки здійснюється зчитування інформації з датчика, запам'ятовування даних і вивід на екран графіка сили натягу.

Висновок. Таким чином в процесі виконання магістерської роботи на замовлення підприємства реалізована установка (рис. 1) для експрес-тестування скляної нитки. Кафедра комп'ютеризованого машинобудування продовжує практику реалізації здобувачами реальних проектів в процесі виконання кваліфікаційних робіт і відмічає, що така практика сприяє підвищенню рівня студентської самооцінки, забезпечує покращення практичної підготовки майбутніх інженерів, поглиблює співпрацю з роботодавцями і формує у них позитивні враження про випускників і професійний рівень роботи викладацького складу.



МЕТОДИКА СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ КОНСТРУКЦІЙ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ

**Ковальов В. Д., д.т.н., професор, Шаповалов М.В., к.т.н., доцент,
Сукова Т.О. к.т.н., Хорошайло В.В., к.т.н., доцент,
Григоренко Д.М., аспірант, Голубицький Е.В., магістр**
Донбаська державна машинобудівна академія

Переоснащення підприємств важкого машинобудування ефективним обладнанням є стратегічним завданням для України у воєнний та післявоєнний періоди. Це дозволяє вирішувати нагальні питання оборони, сприяти економічному відновленню та зберігати промисловий потенціал країни. Виробництво великогабаритних деталей, необхідних для оборонного комплексу, відновлення інфраструктури та важкої промисловості має свої особливості: деталі довжиною до 24000 мм, діаметром до 5000 мм, масою до 250 тон і більше, спеціальні конструкції інструментів, велике розсіювання параметрів обробки, підвищена ймовірність руйнування інструменту, необхідність враховувати надійність інструменту при обробці великогабаритних і дорогих деталей (рис.1).



Рис. 1. Деталі-представники важкого машинобудування

Складність завдання обґрунтування характеристик нових верстатів або вибору раціональних параметрів верстатів обумовлена великою кількістю факторів: різноманіття схем побудови технологічних операцій, конструктивно - геометрична форма, габаритні розміри, матеріал і метод отримання заготовки, точність і шорсткість поверхонь, маса, термооброблення, трудомісткість, програма випуску й ін.

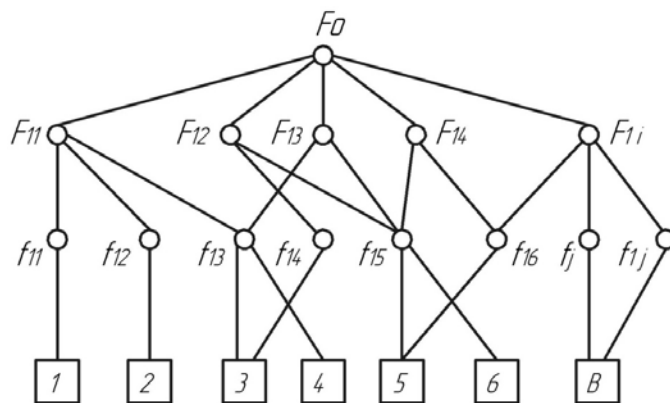
Вибір раціональних параметрів важкого металорізального обладнання, що найбільш повною мірою відповідає вимогам замовника, запропоновано здійсню-



вати з розробкою його технологічної структури у вигляді функціонально-структурної моделі та обґрунтуванням основних технологічних параметрів (клас точності, розміри робочого простору, необхідні силові параметри, режими різання).

Розроблено функціональну модель основного процесу побудови функціонально-структурної моделі металорізального обладнання, що дало змогу встановити всі процеси, які входять в основний процес, їхній взаємозв'язок, вхідну та вихідну інформацію. Розроблено декомпозиції основного процесу, що формалізують послідовність розроблення комплексних деталей-представників певної складності та побудови відповідних функціонально-структурних моделей верстатів. Одержані математичні моделі дають змогу встановити функціональні залежності між складністю деталей, що підлягають обробленню, функціями обладнання та функціональними блоками, що їх реалізують [1].

Запропоновано залежності для визначення уніфікованого складу функціональних блоків для побудови всієї гами нового обладнання на єдиній елементній базі. Загальний вигляд функціонально-структурної моделі верстата з ЧПУ подано на рис. 2.



F_0 загальносистемна функція; $F_{11} \dots F_{1i}$ основні функції;

$f_1 \dots f_j$ допоміжні функції; 1-8 функціональні блоки верстата

Рис. 2. Загальний вигляд функціонально-структурної моделі верстата з ЧПУ

Із застосуванням функціонально-вартісного аналізу сформульовано головну, основні та допоміжні функції верстата і розроблено його узагальнену функціональну модель. Як основні функції верстата прийняті його формують-ворюючі координати, від складу яких в основному залежить ефективність обладнання. Розроблено функціонально-структурну модель верстата, що узгоджує функції з функціональними блоками [2].

Запропоновано формули для оцінювання значущості функцій нового верстата та визначення функціонально виправданих витрат на їх реалізацію.



Побудова функціонально-структурної моделі дає змогу встановити комплекс необхідних і достатніх (оптимальних) функцій, що реалізуються верстатом, і виконавчих механізмів, що їх забезпечують (агрегатів, вузлів тощо).

Література:

1. Kovalov V. , Vasilchenko Y., Klymenko G., Sukova T., Saenko M. *Development of decision – making system for the implementation of optimal adaptive control. Modern trends in material processing: collective monograph / Edited by Predrag Dašić P. Vrnjačka, 2018. Pp. 122-143. ISBN 978-86-6075-065-7.*
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), Articlno. 012119: pp. 1-6. ISSN 1757-8981. <https://doi.org/10.1088/1757-8981/568/1/012119>.*

АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНИХ РЕСУРСІВ В PLM З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ СИСТЕМ

Копей В. Б., д.т.н., професор, Букатка Ю. С., аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Industry 4.0 передбачає використання концепції PLM для прийняття складних рішень, що пов'язані з якістю виробу і витратами на різних етапах його життєвого циклу (ЖЦ). PLM-система об'єднує велику кількість гетерогенних інформаційних ресурсів (ІР), тому її впровадження потребує точного знання можливостей і класів ІР та класів їхніх бінарних відношень.

Проблемою є те, що інформаційних ресурсів дуже багато. В машинобудуванні це у першу чергу такі інформаційні системи як CAD, CAE, CAM, ERP, MES, SCADA, SCM, IETM, CRM. До них можна додати різні бази даних і знань, моделі, алгоритми, методи і методики та інше. Як їх доцільно застосовувати в ЖЦ і як їх ефективно комбінувати? Очевидно, що метод повного перебору призведе до комбінаторного вибуху. Але теорія систем, можливості якої значною мірою недооцінюються, може ефективно розв'язати цю задачу.

Основним принципом теорії систем є трансдисциплінарний принцип ізоморфізму [1], який вказує на подібність закономірностей функціонування і розвитку в різних складних системах. Цей принцип можна використати для



синтезу ефективних PLM-систем. Загальносистемні закономірності, добре вивчені в одних системах, можуть бути застосовані для дослідження та створення інших систем. Зокрема закономірність історичності говорить про наявність в системах характерних ЖЦ з виходом на вищий рівень якості. Циклічні процеси мають ізоморфну структуру та її вивчають теорії різних галузей, як теорія коливань, теорія біологічної еволюції, теорія наукових парадигм, еволюційна економіка, теорія систем [2]. Циклічну природу діяльності вивчають теорія діяльності, теорія прийняття рішень, теорія управління, системний аналіз, менеджмент, системна інженерія. Ізоморфізм діяльності дозволяє її структури, методи та засоби з однієї галузі перенести в іншу [2].

Закономірність інтегративності дозволяє застосувати метод дихотомії для класифікації етапів ЖЦ. Існують різні способи ділення цілого на дві рівні частини. Розглянемо один з них (таблиця 1). ЖЦ виробу (PLM-діяльності), як і цикли інших діяльностей, можна поділити на два етапи: «периферійний» етап планування і «центральный» етап реалізації.

Таблиця 1

Ознаки дихотомічної класифікації ЖЦ з етапами 1-8 і рівнями I-III

Етап Рівень	1	2	3	4	5	6	7	8
I	1	1	0	0	0	0	1	1
II	1	0	0	1	1	0	0	1
III	1	0	1	0	1	0	1	0

Етапу (1, 2, 7, 8) з ознаками I-1 характерні ідеї, гіпотези, концепції, розумові конструкції, абстрактні моделі, формулювання вимог, пошук рішень. Ці IP працюють з уявним – концепції, ескізи, моделі, програми. Тут застосовують CAD, CAE, CAM, IETM, аналітичні CRM.

Етапу (3-6) з ознаками I-0 характерні конкретні рішення, технології, факти, реалізації. Ці IP працюють з чимось більш реальним, що може спостерігатися або відчуватися, – технологічним обладнанням, інструментами, деталями, готовими виробами. Тут застосовують ERP, MES, SCADA, SCM.

Перехід від I-1 до I-0 – це перехід від абстрактного до конкретного. Це помітно у V-моделі ЖЦ, відомій в системній інженерії. В PLM вершина «V» є моментом прийняття остаточних рішень, максимумом «реалізації», точкою переходу від проектування до впровадження. Тоді як початок «V» – це концепція виробу, а кінець – експлуатація і обслуговування. Відома динамічна модель PLM-системи «гармонічний осцилятор», що описуються диференціальними



рівняннями з розв'язками у вигляді синусоїдальних функцій [2] і в якій ознаки рівня I можна описати функцією косинусоїди на одному періоді. Теорія типів інформаційного метаболізму [3] називає ознаку I-1 «розсудливість», а ознаку I-0 – «рішучість».

Закономірності ієрархічності та фрактальності показують наявність в системах і ЖЦ ієрархічних самоподібних структур. Якщо знову виконати дихотомічне ділення, але вже етапів (7, 8, 1, 2) та (3, 4, 5, 6), то можна на рівні ієрархії II отримати бінарні ознаки II-1 і II-0 (таблиця 1).

Етапи 1, 4, 5, 8 з ознаками II-1 є переломними (це екстремуми косинусоїди), на яких часто інтуїтивно виявляється проблема або відбувається затвердження рішення. Тому їм характерні методи активізації інтуїції спеціалістів (МАІС) – евристичні методи, морфологічні, стохастичний пошук варіантів, еволюційні алгоритми, концептуальні моделі, ескізні проекти. Тут практикується використання ефективних, але не доведених положень. Як правило цілей тут багато, а способів їх досягнення мало.

Етапи 2, 3, 6, 7 з ознаками II-0 використовують методи формалізованого подання систем (МФПС) – детерміновані та логічні методи, бази даних і знань, експертні системи. {2, 3} – етап аналізів і мотивів (пошук рішення і оцінка альтернатив, технічний проект). {6, 7} – етап реалізації та її оцінки (експлуатація, економічні методи оцінювання, аналіз витрат і вигод. Як правило цілей на цих етапах мало, а способів їх досягнення багато.

Структура етапів 1-4 і 5-8 на рівні II ізоморфна до структури етапів 1-8 на рівні I. Динамічна модель [2] рівня II – це косинусоїда з удвічі більшою частотою. Відомі назви цих ознак – «ірраціональність» і «раціональність» [3].

Знову ділимо етапи (8, 1) (2, 3) (4, 5) (6, 7) на рівні II і отримуємо бінарні ознаки рівня III (таблиця 1). Їхня інтерпретація є гіпотетичною.

Відповідно до теорії [3] ознакам III-1 (етапи 1, 3, 5, 7) характерне застосування небагатьох стандартних і перевірених методів, зосередження на одному процесі, що веде до ідеального результату. В галузі аналізу і проектуванню систем відомі два протилежні підходи. Базовий аналіз показує, що ознакам III-1 характерний підхід "знизу" (каузальний, термінальний, композиції, морфологічний, лінгвістичний, тезаурусний, процесний), що описує систему в термінах впливу одних елементів на інші, у вигляді "простору станів". Його застосовують, коли цілі не можна виділити.

Ознакам III-0 (етапи 2, 4, 6, 8) характерне застосування багатьох альтернативних і маловивчених методів, зосередження на досягненні швидких результатів [3]. Застосовується підхід "зверху" (аксіологічний, ціленаправлений, цільо-



вий, декомпозиції, структуризації), що описує систему в термінах цілей і цільових функціоналів. Наприклад метод дерева цілей.

Динамічна модель III – це косинусоїда з учетверо більшою частотою. Початок ЖЦ завжди має ознаку III-1, а кінець – III-0 (таблиця 1). ЖЦ можна розглядати як послідовність пар (1, 2), (3, 4), (5, 6), (7, 8), де кожна пара має спільні цінності, але застосовує протилежні методи. Наприклад метод «чорної скрині» (1, 3, 5, 7) та метод «білої скрині» (2, 4, 6, 8).

Чергування протилежних ознак спостерігається на усіх рівнях ієрархії ЖЦ – перехід від абстрактного до конкретного, чергування розв’язування фундаментальних і прикладних проблем, чергування МАІС та МФПС тощо. Цілі вищого рівня ієрархії є більш загальними.

Мабуть найпростіше виявити ознаки етапу 1. Очевидно, що початок будь-якої діяльності має ознаки I-1 (концепції), II-1 (МАІС), III-1 (не чіткі цілі). Аналіз стадій творчого мислення, методик прийняття рішення та системного аналізу [2] дозволяє виділити в етапі 1 методи генерації ідей (пошук, інсайт, "абстрактне рішення", розробка концепції, МАІС) та методи висування вимог (проблемна ситуація, інкубація, орієнтування, формулювання потреб, вимірювання, спостереження, виявлення проблеми, функціональна недостатність). Типовий ІР тут – засоби концептуального моделювання та САД. Зверніть увагу, що етапи 1-6 – це діалектичний перехід 1 у свою протилежність 6, тоді як весь ЖЦ – це тектологічний акт.

Наступний етап (2) виконує аналіз цих ідей (етап аналізу, перевірка, "конкретне рішення", технічна розробка, МФПС) та ідентифікує ресурси, за допомогою яких забезпечуються вимоги. Він має ознаки I-1 (концепції), II-0 (МФПС), III-0 (чіткі цілі). Типовий ІР тут – системи комп’ютерної математики та САЕ.

Таким чином принцип ізоморфізму, закономірності інтегративності, історичності та ієрархічності дозволили вивести цю структуру PLM-діяльності з позицій теорії систем. Більш глибокий аналіз дозволить виділити додаткові ознаки і точніше класифікувати інформаційні ресурси в PLM-системах.

Література:

1. Bertalanffy L. von. *General System theory: Foundations, Development, Applications*. 1st ed. New York: George Braziller, Inc., 1968. 289 p.
2. Коней В.Б. Абстрактна модель інформаційної системи підтримки життєвого циклу виробу // Прикарпатський вісник НТШ. Число. №2(38). 2017. С.71-96.
3. Букалов О. В. Соціоніка та сучасна гуманітарна культура // Менеджмент і кадри: психологія управління, соціоніка і соціологія. №1-2. 2022. С.40-42. <https://publishing.socionica.info/index.php/management/article/download/2872/2759>



РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОВНІШНІХ І ВНУТРІШНІХ СХОПЛЮВАЧІВ ДЛЯ МІЖОПЕРАЦІЙНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ КІЛЬЦЕПОДІБНИХ ДЕТАЛЕЙ

**Корендій В.М., к.т.н., доцент, Качур О.Ю., д-р філософії, доцент,
Пилип М.В., аспірант, Карпин Р.Б., аспірант**

Національний університет «Львівська політехніка»

В сучасному машинобудуванні все більшої актуальності набуває автоматизація виробничих процесів, зокрема, у сфері обробки деталей складної форми [1]. Одним з ключових аспектів автоматизації є ефективне та надійне переміщення деталей між різними операціями технологічного циклу. Зокрема, це стосується кільцеподібних деталей, які широко застосовуються в різних галузях промисловості, наприклад, в авіабудуванні, енергетиці, автомобілебудуванні.

Традиційні методи захоплення та переміщення кільцеподібних деталей, засновані на використанні стандартних захватних пристроїв, часто виявляються неефективними та не забезпечують необхідної точності та надійності [2]. Це пов'язано із низкою факторів, таких як [3]: 1) різноманітність форм та розмірів кільцеподібних деталей. Існують кільця з різними діаметрами, товщиною стінок, наявністю внутрішніх або зовнішніх виступів, що ускладнює використання універсальних схоплювачів; 2) необхідність збереження цілісності поверхні. Багато кільцеподібних деталей виготовляються з матеріалів, чутливих до механічних пошкоджень, тому захватні пристрої повинні забезпечувати надійну фіксацію без деформації та подряпин; 3) вимоги до точності позиціонування. В деяких випадках точність установки кільця на наступну операцію має вирішальне значення для якості обробки.

Враховуючи вищезазначене, розробка спеціалізованих захватних пристроїв для міжопераційного переміщення кільцеподібних деталей є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої дозволить підвищити ефективність та якість виробничих і технологічних процесів. Дослідження зовнішніх та внутрішніх схоплювачів, їх конструктивних особливостей, а також аналіз їх переваг та недоліків є важливим кроком на шляху до створення оптимальних рішень для автоматизованого переміщення кільцеподібних деталей.

Запропонований авторами внутрішній схоплювач промислового робота представлений на рис. 1. Він фіксується через фланець 20 на валу поворотного електродвигуна, встановленого на кінці руки маніпулятора. Сам фланець 20



приєднується до корпусу 7 схоплювача за допомогою системи гвинтів 34. Дві губки 33 схоплювача монтуються за допомогою системи пластин і кронштейнів (5, 6, 8, 17) та мають можливість рухатися вздовж напрямних 1 за рахунок роликів 4, що встановлені на осях 3. У приводі губок застосовано передачу «гвинт-гайка», яка приводиться в рух від крокового електродвигуна та прямозубу зубчасту передачу, що закриті кожухами 19 і 21. Прогумовані губки схоплювача спроектовані таким чином, щоб мати змогу захоплювати з рольганга або стрічкового транспортера кільцеподібні заготовки зовнішнім і внутрішнім діаметром, відповідно, 450 мм і 355 мм, товщиною 65 мм, масою близько 30 кг та позиціонувати їх у відповідний патрон верстата з ЧПК для подальшого автоматичного нарізання шліців. За необхідності, губки схоплювача можуть бути замінені для переміщення кільцеподібних деталей інших габаритних розмірів.

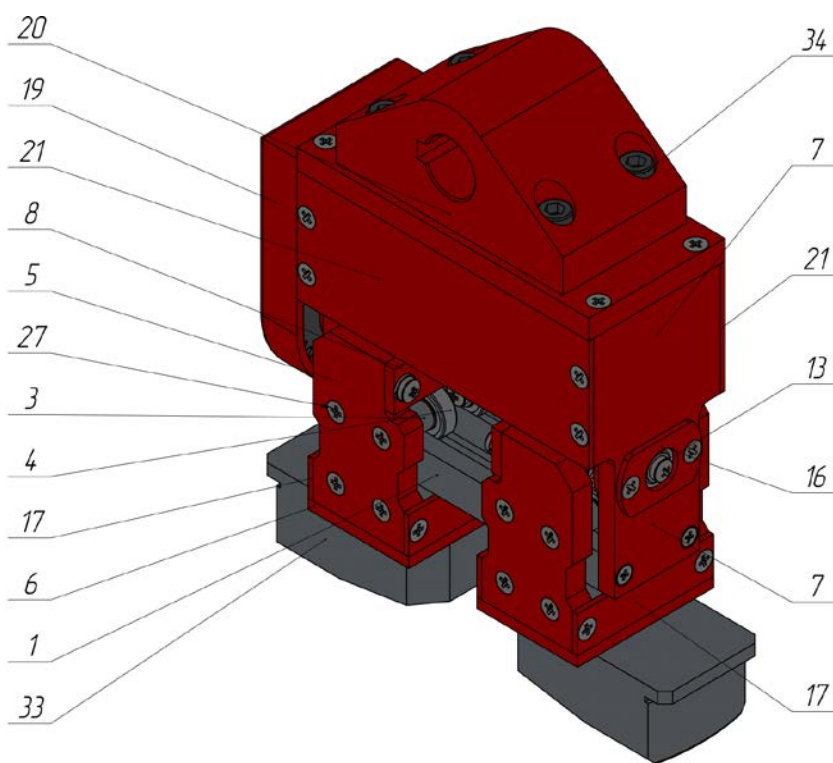


Рис. 1. Розроблена конструкція внутрішнього схоплювача

Запропонований авторами зовнішній схоплювач промислового робота зображений на рис. 2. Він аналогічно фіксується через фланець 35 на валу поворотного електродвигуна, що розміщений на торці руки маніпулятора. Фланець 35 приєднується до корпусу 7 схоплювача за допомогою системи гвинтів 36. Дві губки 34 схоплювача монтуються за допомогою системи пластин і кронштейнів (5, 6, 8, 19) та мають можливість рухатися вздовж напрямних 1 за



рахунок роликів 4, що встановлені на осях 3. Аналогічно як і в попередньому випадку, у приводі губок використано прямозубу зубчасту передачу та передачу «гвинт-гайка», гвинт якої з'єднується із валом крокового електродвигуна. В цілях безпеки експлуатації, відповідні передачі закриті кожухом 19 та пластинами 21. Прогумовані губки захоплювача приєднуються до пластин 6 за допомогою системи гвинтів. Самі ж губки виконані таким чином, щоб мати можливість захоплювати циліндричні заготовки діаметром до 30 мм та позиціонувати їх в трьохкулачковий патрон токарного верстата з ЧПК.

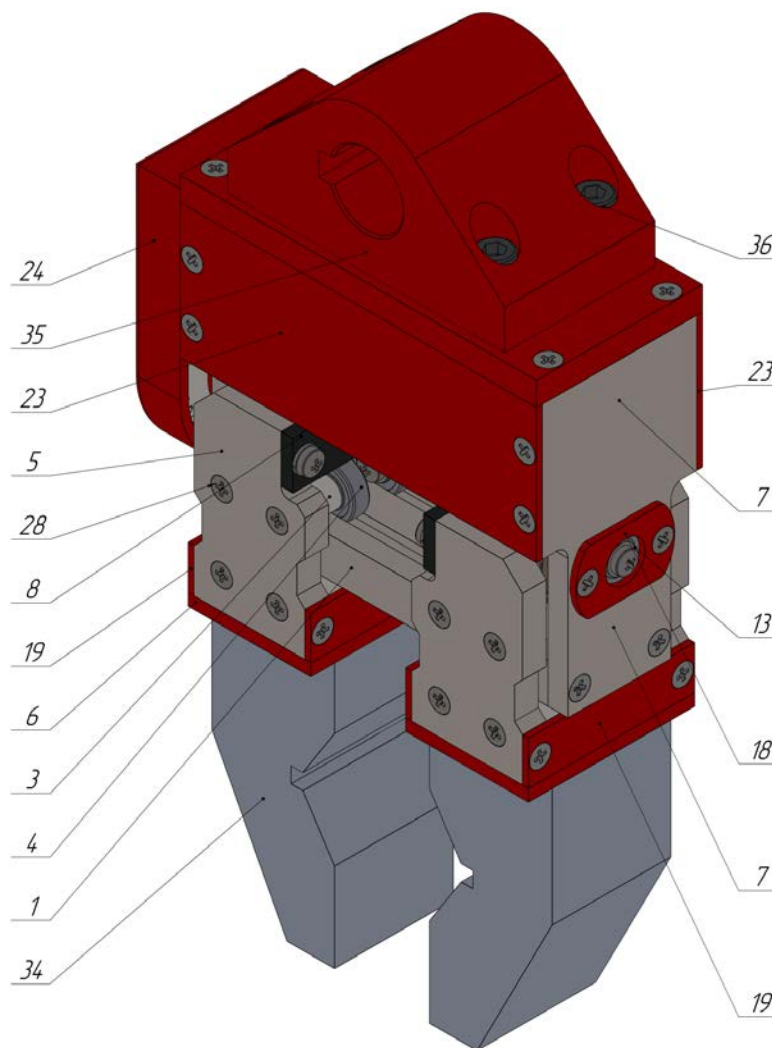


Рис. 2. Розроблена конструкція зовнішнього захоплювача

Література:

1. Korendiy V., Kachur O., Augousti A., Lanets O. Optimizing the structural parameters of the robotic system to ensure the efficiency and reliability of work in the production environment // CEUR Workshop Proceedings. – 2024. – Vol. 3699. – pp. 180–197.



2. Korendiy V., Zinko R., Cherevko Y. Structural and kinematic analysis of pantograph-type manipulator with three degrees of freedom // *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. – 2019. – Vol. 5, No. 2. – pp. 68–82.
3. Korendiy V. et al. Analysis of kinematic characteristics of a mobile caterpillar robot with a SCARA-type manipulator // *Transport Technologies*. – 2023. – Vol. 4, No. 2. – pp. 56–67.

ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНИХ СХЕМ МЕХАНІЗМІВ ДЛЯ ЗБУРЕННЯ КОЛИВАНЬ ВІБРАЦІЙНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

**Корендій В.М., к.т.н., доцент, Парашин О.Я., аспірант,
Вільчинський Т.Р., аспірант, Киричук В.В., аспірант, Янів О.М., аспірант
Національний університет «Львівська політехніка»**

Вібраційне технологічне обладнання знайшло широке застосування в різних галузях промисловості, таких як будівництво, гірничодобувна промисловість, сільське господарство, хімічна та харчова промисловість. Зокрема, воно використовується для виконання різноманітних технологічних операцій, включаючи ущільнення матеріалів, транспортування сипких речовин, сортування, змішування, подрібнення та багато іншого.

Ефективність та надійність роботи вібраційного обладнання безпосередньо залежить від характеристик коливань, що генеруються віброзбудниками. Збурення коливань може здійснюватися за допомогою різних механізмів, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Вибір оптимального механізму та його структурної схеми є важливим завданням, що вимагає ретельного аналізу та обґрунтування. Неправильний вибір може призвести до зниження ефективності роботи обладнання, збільшення енергоспоживання, підвищення рівня шуму та виникнення паразитних коливань, а також до передчасного зносу деталей.

Проблема обґрунтування структурних схем механізмів для збурення коливань вібраційного технологічного обладнання є актуальною з огляду на її вплив на ефективність, надійність та безпеку роботи цього обладнання. Оптимальний вибір структурної схеми дозволяє: 1) підвищити ефективність технологічного процесу, наприклад, шляхом оптимізації траєкторії, амплітуди та частоти коливань для конкретного типу матеріалу; 2) зменшити енергоспоживання, наприклад, за рахунок зменшення втрат енергії на тертя; 3) підвищити надійність та довговічність обладнання шляхом зменшення навантаження на деталі та вузли.



Завданням даної роботи є обґрунтування структурних схем механізмів для збудження коливань вібраційного технологічного обладнання з метою підвищення ефективності та надійності його роботи.

На рис. 1 згруповано основні структурні схеми шарнірно-важільних і зубчастих механізмів, які можуть використовуватися у приводах інерційних віброзбудників різноманітного вібраційного технологічного обладнання та запропоновані авторами в статтях [1–5].

Дослідження [1] показало, що планетарний механізм може бути ефективно застосований в основі інерційного віброзбудника, який, у свою чергу, може бути використаний у приводах різноманітного вібраційного технологічного обладнання. Залежно від геометричних параметрів механізму можна генерувати кругові, еліптичні та прямолінійні траєкторії руху незбалансованої маси, що дозволяє керувати коливаннями робочого органу для різних типів матеріалів. У статті [2] було обґрунтовано можливості інерційного планетарного віброзбудника генерувати трикутні, прямокутні, шестикутні та інші багатокутні траєкторії коливань одноступенчатої механічної коливальної системи. Такі траєкторії коливань можуть бути ефективно застосовані у вібророздільниках і вібророздільниках.

Дослідження динаміки вібраційного грохота-конвеєра зі здвоєним кривошипно-повзунним механізмом збудження коливань, представлене у [3] і [4], показало, що зміна кутів установки напрямних повзунів дозволяє змінювати форму траєкторії руху робочого органу (прямолінійна, еліптична, кругова) та його кінематичні параметри (амплітуду, пришвидження). Це дозволяє керувати процесами переміщення та просіювання сипких, кускових та інших матеріалів.

У статті [5] встановлено, що геометричні параметри кривошипно-повзунного механізму визначають траєкторію руху точки на шатуні, у якій може бути закріплена незрівноважена маса інерційного віброзбудника. Запропонований варіант компоновки віброзбудника дозволяє досягти заданої колової, еліптичної або лінійної траєкторії руху шатунної точки (і незбалансованої маси), що може бути використано для керування траєкторією руху робочого органу тієї чи іншої вібраційної технологічної машини, наприклад, вібротранспортера, вібророздільника чи віброгрохота.

Вибір оптимальної структурної схеми механізму збудження коливань для вібраційного технологічного обладнання є ключовим фактором для забезпечення його ефективної та надійної роботи. Різні типи механізмів, такі як шарнірно-важільні (кривошипно-шатунні), зубчасті (планетарні), пропонують різні можливості для генерації коливань з різними траєкторіями, амплітудами та іншими кінематичними і динамічними характеристиками. Залежно від потреб конкрет-



ного технологічного процесу, можна обрати механізм, який дозволить оптимізувати рух робочого органу та досягти найкращих результатів.

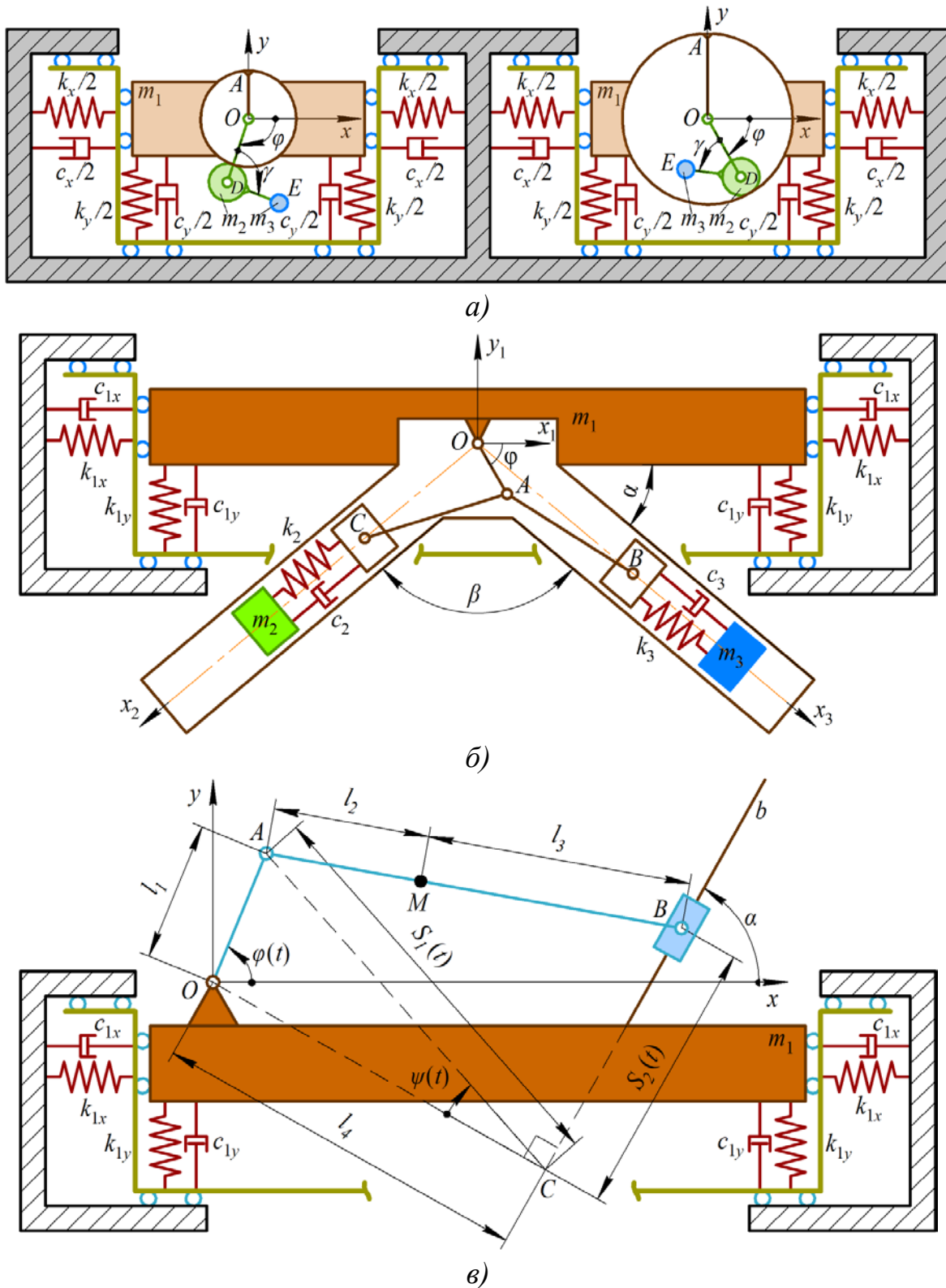


Рис. 1. Структурні схеми механізмів у приводах інерційних вібробудувачів



Правильний вибір структурної схеми механізму збудження коливань дозволяє підвищити ефективність технологічного процесу, зменшити енергоспоживання та підвищити надійність і довговічність обладнання. Це досягається шляхом оптимізації траєкторії, амплітуди та частоти коливань, зменшення втрат енергії на тертя та зменшення навантаження на деталі та вузли обладнання. Таким чином, обґрунтування структурних схем механізмів для збудження коливань вібраційного технологічного обладнання є важливим завданням, яке вимагає ретельного аналізу та врахування конкретних вимог технологічного процесу.

Література:

1. Korendiy V. et al. Kinematic analysis and geometrical parameters justification of a planetary-type mechanism for actuating an inertial vibration exciter // *Vibroengineering Procedia*. – 2023. – Vol. 52. – pp. 35–41.
2. Korendiy V. et al. Generating various motion paths of single-mass vibratory system equipped with symmetric planetary-type vibration exciter // *Vibroengineering Procedia*. – 2022. – Vol. 43. – pp. 7–13.
3. Korendiy V. et al. Dynamic analysis of three-mass vibratory system with twin crank-slider excitation mechanism // *Vibrations in Physical Systems*. – 2023. – Vol. 34, No. 2. – pp. 1–9.
4. Korendiy V. et al. Analysis of the force and power characteristics of a twin crank-type mechanism of an enhanced vibration exciter // *Vibroengineering Procedia*. – 2024. – Vol. 55. – pp. 1–7.
5. Korendiy V. et al. Trajectory-based synthesis of a slider-crank mechanism for applications in inertial vibration exciters // *Vibroengineering Procedia*. – 2024. – Vol. 56. – pp. 176–182.

РОЗРОБЛЕННЯ ОСВІТНЬО-НАУКОВОЇ ПРОГРАМИ «ПРОМИСЛОВИЙ ІНЖИНІРИНГ І УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЧИМИ СИСТЕМАМИ»

¹Кусий Я.М., д.т.н, професор, ^{2,3}Іванов В.О., д.т.н, професор, ¹Литвиняк Я.М., к.т.н, доцент

¹ Національний університет «Львівська політехніка», Україна

² Сумський державний університет, Україна

³ Технічний університет у Кошице, Словаччина

Нові виклики у вищій освіті, підвищення вимог стейкхолдерів та зміни на ринку праці в умовах військової агресії росії вимагають розроблення нових інтегрованих підходів у підготовці та реалізації навчального процесу в українських вишах і їхніх структурних підрозділах. Поряд з тим, проблема виїзду молоді за



кордон, у першу чергу чоловічої статі, та пов'язане з цим зменшення наборів на бакалаврському та магістерському рівнях вищої освіти залишаються найбільш шкідливими на даному етапі розвитку вищої освіти в Україні.

Вирішення окреслених проблем і розв'язання важливих завдань вимагає мобілізації потенціалу професорсько-викладацького складу кафедр українських вишів та об'єднання зусиль на усіх рівнях створення, формування та впровадження нових прогресивних освітніх програм.

Розроблення міждисциплінарних освітньо-професійних і освітньо-наукових програм є пріоритетним напрямком розвитку Національного університету «Львівська політехніка» на найближчий період. Однак, розроблення міждисциплінарних програм вимагає високого ступеня узгодженості паспортів спеціальностей та галузей знань так певного досвіду та напрацювань членів спільної проектної групи.

На нашу думку, проміжним кроком до створення міждисциплінарних освітніх програм є розроблення програм на бакалаврському та магістерському рівнях вищої освіти із кількома професійними лініями, які представляють освітньо-науковий доробок профілюючих кафедр різних інститутів факультетів) українського вишу.

Безперервне підвищення регламентованих вимог до якості продукції вимагає переформатування ключових напрямків народного господарства, зокрема і машинобудівної галузі, та еволюцію основних критеріїв ефективності виробництва, пов'язаних із особливостями науково-технічних революцій. У період російської агресії, з однієї сторони, та в еру цифрових технологій, з іншої, гостріше відчуються проблеми забезпечення цілей сталого розвитку у промисловості, зокрема у машинобудуванні, та пріоритетних вимог Індустрії 4.0/5.0, що істотно підвищує попит на фахівців у сфері технології машинобудування, робототехніки та комп'ютерно-інтегрованих технологій [1]. Поряд з тим, забезпечення управлінських компетентностей і підвищення рівня знань з економічних дисциплін розширить кругозір випускників механічних спеціальностей і дозволить їм швидше адаптуватися до реалій сучасного ринку праці.

У зв'язку з цим, нова освітня програма «Промисловий інжиніринг і управління виробничими системами (Industrial Engineering and Management of Production System)», яка розроблена у співпраці кафедри «Робототехніка та інтегровані технології машинобудування» навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту із кафедрою «Менеджмент організацій» навчально-наукового інституту економіки і менеджменту у Національному університеті «Львівська політехніка», дозволить у найближчій перспективі готувати



висококваліфікованих спеціалістів, які зможуть ефективно впроваджувати ресурсоощадні технології та практики у машинобудівній галузі, зокрема, у механообробці, складанні, діагностиці, технічному обслуговуванні та ремонті виробів, що є актуальним і першочерговим як у воєнний час, так і у післявоєнний період відбудови народного господарства. Особливо це відчутно у сфері промислового інжинірингу та керування виробничими процесами, системами та персоналом в процесі проектування нових виробів, відновлення та ремонту деталей та машин, які втратили свої початкові характеристики в процесі експлуатації. Підготовлені фахівці зможуть розробляти та впроваджувати інноваційні технології, які будуть спрямовані на захист навколишнього середовища, забезпечення економічної ефективності та соціальної відповідальності виробничих підприємств. Такі фахівці будуть незамінними менеджерами середньої та вищої ланки управління виробничим машинобудівним підприємством та ключовими виконавцями у розв'язанні складних інженерно-технічних завдань і вирішенні наукових проблем у післявоєнний період відбудови та подальшого інтенсивного розвитку вітчизняної економіки [2].

Основними завданнями фахівців у сфері промислового інжинірингу та керування виробничими системами є розуміння принципів та підходів, орієнтованих на системне технологічне забезпечення важливих стадій та етапів у життєвому циклі машинобудівних виробів та управління сучасними технологічними процесами і фізичними системами у сферах механічної обробки деталей, складання механізмів і машин, їхньої діагностики, раціонального технічного обслуговування та ефективного ремонту у машинобудуванні та суміжних галузях вітчизняної економіки.

Навчальні дисципліни пропонованої освітньо-наукової програми «Промисловий інжиніринг і управління виробничими системами (Industrial Engineering and Management of Production Systems)» для другого (магістерського) рівня вищої освіти формують поглиблені знання з комплексного розуміння проблем енергоефективності у машинобудуванні, раціонального керування виробничими процесами і системами та навичок з метою розроблення та впровадження рішень, спрямованих на забезпечення сталого розвитку машинобудівної галузі народного господарства.

Освітньо-наукова програма «Промисловий інжиніринг і управління виробничими системами (Industrial Engineering and Management of Production Systems)» орієнтує на таку спеціалізацію здобувачів спеціальності G9 – Прикладна механіка, галузі знань G – Інженерія, виробництво та будівництво, в рамках якої можлива конкурентоспроможна подальша професійна та наукова кар'єра



випускників кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту та кафедри менеджменту організацій навчально-наукового інституту економіки та менеджменту – фахівців із розроблення сучасних технологічних процесів механічного оброблення деталей машин, ефективного ремонту та складання виробів та керування виробництвом з урахуванням існуючих викликів і перспектив сталого розвитку економіки. Академічна цінність освітньої програми ґрунтується на її сучасному та актуальному змісті, що враховує найновіші тенденції та інновації у галузі мехобробки та машинобудування та суміжних галузях промисловості. Її основна мета – формування висококваліфікованих фахівців, здатних до ефективного впровадження енергоефективних рішень у машинобудуванні та активної участі у створенні сталої та екологічно-свідомої інфраструктури, що відкриває перед випускниками необмежені перспективи працевлаштування. Вони можуть займати посади у конструкторсько-технологічних, виробничо-технічних, експлуатаційних службах машинобудівних підприємств і підприємств сфери обслуговування, у проектних установах, закладах освіти, управління, місцевого самоврядування та галузевих асоціаціях. Також вони можуть здійснювати науково-дослідну роботу в галузі сталого машинобудівного виробництва та брати активну участь у розробленні та впровадженні інноваційних проектів для підвищення конкурентоздатності машинобудівної продукції та забезпечення якості відповідно до вимог Індустрії 4.0/5.0.

Доцільність відкриття освітньо-наукової програми «Промисловий інжиніринг і управління виробничими системами (Industrial Engineering and Management of Production Systems)» для другого (магістерського) рівня вищої освіти на базі кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування навчально-наукового інституту механічної інженерії та транспорту спричинена тим, що в даний час, особливо в період післявоєнної відбудови, гостро стоїть проблема забезпечення сталого функціонування суспільства та збереження ресурсів шляхом раціонального використання енергоефективних та ощадливих технологій, створення та впровадження передових інженерних рішень.

Багаточисельні висновки останніх досліджень європейських і світових вчених підтверджують, що застосування підходів сталого розвитку у машинобудівній галузі мають значні перспективи порівняно із конвенційними напрямками як в процесі виготовлення нових виробів, так і відновленні чи ремонті існуючих. Новітні інноваційні, наукоємні технології набувають все більшої популярності та стають необхідною складовою сучасного машинобудування.



Кафедра робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування, на базі якої впроваджуватиметься розроблена освітньо-наукова програма, здійснює активну співпрацю із широким колом підприємств та фірм, де використовуються сучасні конкурентоздатні технології виготовлення продукції. Студенти, які досягають значних успіхів у навчанні та науково-дослідній роботі, мають можливість проходити практику та працевлаштовуватися на відомих підприємствах машинобудівної галузі. Колектив кафедри активно займається виконанням наукових досліджень із зарубіжними партнерами із Німеччини, Італії, Литви, Польщі, Словаччини та інших країн, зокрема, у спільних науково-дослідницьких проектах, стипендіальних програмах, програмах міжнародної мобільності ERASMUS тощо.

На підставі листів-звернень підприємств встановлено кадровий дефіцит (понад 70 осіб) у фахівцях із промислового інжинірингу і управління виробничими системами на ринку праці, що відображає фактичну потребу у здобувачах розробленої освітньо-наукової програми на вітчизняних підприємствах.

Література

1. Kumar, K., Zindani, D., and Davim, J.P.: *Sustainable Manufacturing and Design*. Woodhead Publishing, Cambridge, United Kingdom (2021).
2. Kusyi, Y., Onysko, O., Kuk, A., Solohub, B., Kopei, V. *Development of the Technique for Designing Rational Routes of the Functional Surfaces Processing of Products. Lecture Notes in Networks and Systems* 472, 135–143 (2022).

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ КОНТИНУАЛЬНОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ ВІБРАЦІЙНОГО ТРАНСПОРТЕРА З ВРАХУВАННЯМ НАЯВНОСТІ ЗОСЕРЕДЖЕНОЇ МАСИ

**Ланець О.С., д.т.н., професор, Кішка І.Л., аспірант,
Деревенько І. А., к.т.н., доцент**
Національний університет «Львівська політехніка»

Нерівномірне транспортування виробів в робочих органах (лотках) одномасових вібраційних конвеєрів з інерційними віброзбуджувачами спонукало до проведення дослідження спрямованого на встановлення власної частоти та форми коливань континуальної системи, а саме довгомірного робочого органу конвеєра, як тіла з розподіленими параметрами у вигляді балки із жорстко закріпленою зосередженою масою. Перш за все для вирішення цієї задачі необ-



хідно скласти рівняння поперечного прогину балки з врахуванням зосередженої маси та крайових умов на її кінцях.

Формування математичної моделі. 3D-модель вібраційного конвеєра, до робочого органа якого жорстко закріплені два інерційних віброзбуджувачі, зображено на рис. 1. Заготовкою для конструктивної реалізації робочого органа (лотка) взято стандартний двотавр. Вібраційний конвеєр на фундамент опирається через вісім віброізоляторів, що виконані з витих пружин.

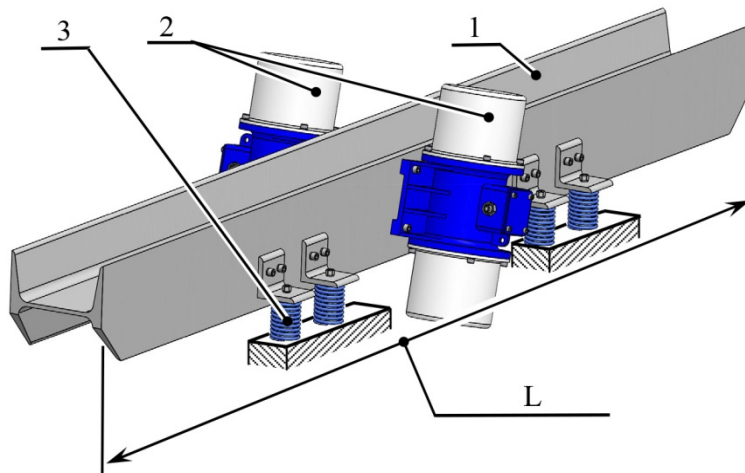


Рис. 1. 3D-модель вібраційного конвеєра:

1 – робочий орган (лоток), виконаний з двотавра; 2 – два інерційних віброзбуджувачі; 3 – віброізолятори, виконані з витих пружин

Об'єктом наших досліджень є робочий орган (лоток у вигляді двотавра), який зводимо до однорідної балки, яку розглядаємо як тіло з розподіленими параметрами з вільними кінцями та без опор по його довжині (рис. 2). Сумарну масу двох моторів-вібраторів відображаємо через зосереджену масу m_c . Впливом віброізоляторів нехтуємо. Вважаємо, що балка здійснює поперечні коливання лише в площині w , x – в площині дії знакозмінної сумарної вимушеної сили збурення, спричиненої дією інерційних сил від двох віброзбуджувачів.

Балку розбиваємо на два прольоти, довжини яких відповідно L_1 та L_2 , розділені між собою зосередженою масою m_c . Вплив зосередженої маси як на власну частоту коливань балки, так і на її форму коливань, відбуватиметься через два інерційних параметри: інерційну силу F_i , спричинену її рухом, і силу збурення F_f , спричинену силовою дією інерційних віброзбуджувачів.

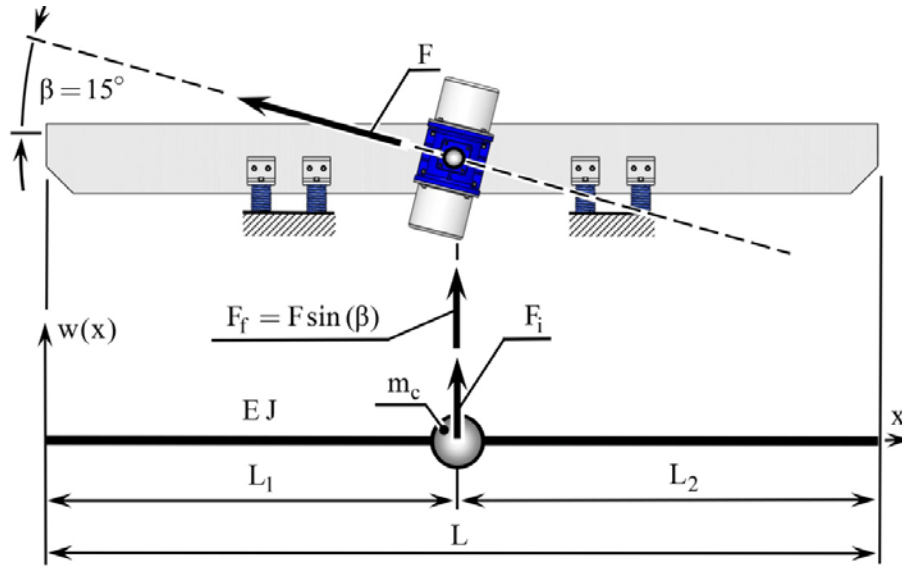


Рис. 2. Розрахункова схема вібраційного конвеєра, що відображений у вигляді балки, як тіла з розподіленими параметрами, з закріпленою до неї зосередженою масою m_c

Система двох рівнянь, що задовольняє крайовим умовам балки із зосередженою масою m_c матиме вигляд:

$$\begin{cases} A \cdot U(\xi L) + B \cdot V(\xi L) + \frac{F_f + m_c \omega^2 (A \cdot S(\xi L_1) + B \cdot T(\xi L_1))}{\xi^3 E J} \cdot T(\xi (L - L_1)) = 0; \\ A \cdot T(\xi L) + B \cdot U(\xi L) + \frac{F_f + m_c \omega^2 (A \cdot S(\xi L_1) + B \cdot T(\xi L_1))}{\xi^3 E J} \cdot S(\xi (L - L_1)) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де $U(\xi L) = \frac{1}{2}(\text{ch}(\xi L) - \cos(\xi L))$; $V(\xi L) = \frac{1}{2}(\text{sh}(\xi L) - \sin(\xi L))$;

$S(\xi L_1) = \frac{1}{2}(\text{ch}(\xi L_1) + \cos(\xi L_1))$; $T(\xi L_1) = \frac{1}{2}(\text{sh}(\xi L_1) + \sin(\xi L_1))$;

$T(\xi L) = \frac{1}{2}(\text{sh}(\xi L) + \sin(\xi L))$; $S(\xi (L - L_1)) = \frac{1}{2}(\text{ch}(\xi (L - L_1)) + \cos(\xi (L - L_1)))$;

$T(\xi (L - L_1)) = \frac{1}{2}(\text{sh}(\xi (L - L_1)) + \sin(\xi (L - L_1)))$ – функції Крилова; A та B – довільні постійні.

Крім того введено позначення $\xi = \sqrt[4]{m_u \omega^2 / E J}$, де ω – колова частота коливань балки; E – модуль пружності; J – момент інерції поперечного перерізу балки відносно нейтральної лінії перерізу, перпендикулярної до площини



згину; EJ – жорсткість поперечного перерізу балки на згин; m_u – маса одиниці довжини балки.

З метою, щоб усунути в явному вигляді колову частоту коливань ω , переписемо вираз для ξ у вигляді $\xi^4 = m_u \omega^2 / (EJ)$. Тоді можна записати наступне:

$$\frac{m_c \omega^2}{\xi^3 EJ} = \frac{m_c \xi L}{m_u L} = n \xi L, \quad (2)$$

де n – відношення зосередженої маси m_c до маси балки $m_u L$.

У такому випадку система рівнянь (1) набуде вигляду

$$\begin{cases} A \cdot U(\xi L) + B \cdot V(\xi L) + \left[\frac{F_f}{\xi^3 EJ} + n \xi L (A \cdot S(\xi L_1) + B \cdot T(\xi L_1)) \right] \cdot T(\xi (L - L_1)) = 0; \\ A \cdot T(\xi L) + B \cdot U(\xi L) + \left[\frac{F_f}{\xi^3 EJ} + n \xi L (A \cdot S(\xi L_1) + B \cdot T(\xi L_1)) \right] \cdot S(\xi (L - L_1)) = 0. \end{cases}$$

Згрупувавши члени системи рівнянь при невідомих A та B , остаточно отримаємо:

$$\begin{cases} A \cdot [U(\xi L) + n \xi L \cdot S(\xi L_1) T(\xi (L - L_1))] + \\ + B \cdot [V(\xi L) + n \xi L \cdot T(\xi L_1) T(\xi (L - L_1))] + \frac{F_f}{\xi^3 EJ} T(\xi (L - L_1)) = 0; \\ A \cdot [T(\xi L) + n \xi L \cdot S(\xi L_1) S(\xi (L - L_1))] + \\ + B \cdot [U(\xi L) + n \xi L \cdot T(\xi L_1) S(\xi (L - L_1))] + \frac{F_f}{\xi^3 EJ} S(\xi (L - L_1)) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Тож, використовуючи (3), виділивши коефіцієнти при невідомих A та B , можна сформувати частотну матрицю, яка і дозволить встановити власну частоту коливань балки (довгомірного робочого органа транспортера) з врахуванням зосередженої маси.

Література:

1. Rao S.S., *Mechanical Vibrations*, 5th ed., Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2011.
2. De Silva C.W., *Vibration: Fundamentals and Practice*, 2nd Edition, Taylor and Francis, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2007.
3. Lanets O., Kachur O., Korendiy V., Dmyterko P., Nikipchuk S., Derevenko I., *Determination of the first natural frequency of an elastic rod of a discrete-continuous vibratory system*, *Vibroengineering Procedia* 37 (2021) 7-12.



МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ЗБОРКИ З НАТЯГОМ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ (МКЕ)

Лещенко О. І., к.т.н., доцент

Приазовський державний технічний університет, м. Маріуполь, м. Дніпро

Завдання нерухомості зовнішніх і внутрішніх кілець підшипників, встановлених за пресою посадкою, є першорядною проблемою конструктора. І хоча протягом століть фахівцями накопичено значний практичний досвід та набір залежностей, у більшості емпіричних, що визначають умови за яких знижується ймовірність «повороту» кілець підшипника в процесі його експлуатації, все ж ця проблема залишається актуальною. Особливо це важливо при роботі підшипникової групи, пов'язаної із зубчастими зачепленнями, тому що «проворот» кілець неминуче призводить до втрати осьового переднатягу підшипників та порушення параметрів зачеплення (норм бокового зазору та плями контакту) зубчастої передачі в цілому.

Розглянемо роботу механізму двошнекового екструдера, який керує подачею сировини до бункеру засипного апарату. У CAD системі побудована модель механізму (рис. 1), куди входить вал – шестерня 1 ($z=20$, $m=8$), що передає крутний момент на бункерну засувку. Шестерня базується в нерухомому кільці 2 корпусу приводу на підшипникових опорах 3 – кулькових радіальних однорядних (тип підшипника 1046920). Внутрішні кільця підшипників встановлюються на провідний вал – шестерню з посадкою $\varnothing 110 L6/p6$, яка працює при гарантованому натягу, значення якого знаходиться в діапазоні від 0,03 до 0,09 мм. Зовнішні кільця підшипників встановлюються в обойму корпусу з посадкою $\varnothing 140 P7/l6$, яка працює при гарантованому натягу в діапазоні від 0,02...0,04 мм.

Поставлено завдання: при вибраній посадці з натягом для даного з'єднання, у якого деформація внутрішнього та зовнішнього кілець підшипника від зусиль при його запресовуванні не повинна перевищити величину зазору між елементами кочення – кульками та круговими доріжками для них. Види ($C1, C2, \dots, CN$) та величини цих зазорів у підшипниках регламентовані стандартам ISO 5753-1:2009 і для обраного типу підшипників не повинні перевищувати $[\delta] = 40$ мкм

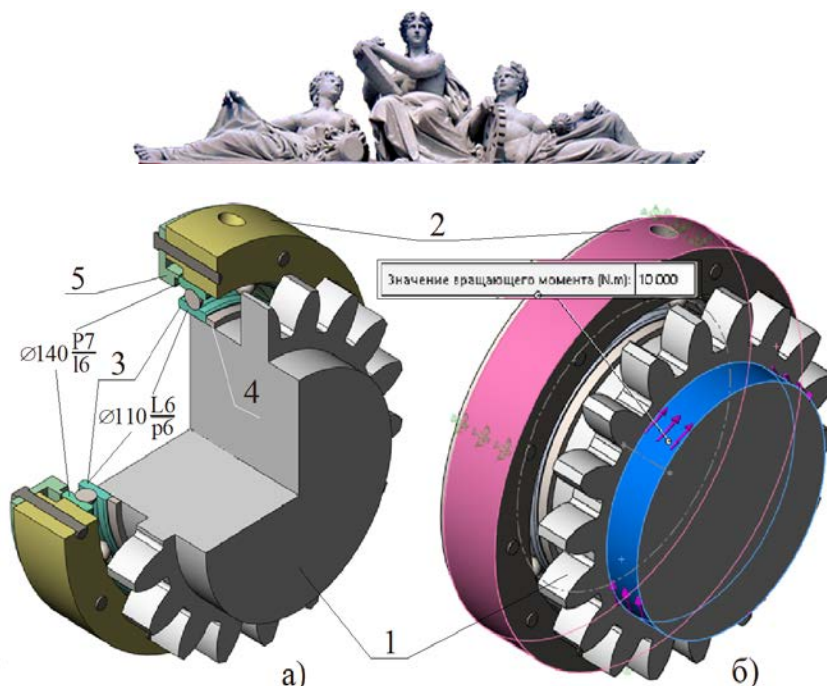


Рис. 1. CAD модель механізму керування подачею сировини до засипного бункера

З метою зберегти в підшипниковому з'єднанні тертя кочення і разом з тим забезпечити його міцність, тобто відсутність зсувів деталей вузла під дією зовнішніх навантажень, необхідно виконати розрахунок допустимої посадки з гарантованим натягом. Аналітичний розрахунок заснований на відомих значеннях зовнішніх навантажень, розмірами з'єднання та максимальному тиску на контактних поверхнях зовнішнього та внутрішнього кілець підшипника. Одночасно в розрахунку необхідно враховувати поправки на властивості матеріалу, змінання нерівностей контактних поверхонь деталей при утворенні з'єднання – відмінність між шліфованими поверхнями і поверхнями після лезової обробки, зміну температури середовища при складанні, відмінність коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів деталей та інше. Тому визначення допустимих відхилень для посадки з натягом за допомогою формул, отриманих з умов міцності деталей вузла та емпіричних залежностей, як коригувальних поправок є далеко не тривіальним завданням. Тому на сьогоднішній день це завдання вирішується шляхом побудови моделі процесу та аналізу деформації від контактних тисків у вузлі, зібраному за пресою посадкою на платформі CAE системи, наприклад, Solidwork Simulation.

Аналіз пресої посадки відноситься до класу проблем, в яких вирішальну роль грає адекватне моделювання контактних граничних умов. У цьому випадку модель складання (рис. 1) включає ті тіла, що взаємодіють з номінальними розмірами в «плюс» – у наведеному прикладі механізму це +0.09 і +0.04. Що до глобальних контактів – діють умови «Ні проникнення». При типі з'єднання гаряча посадка CAE система допускає інтерференцію твердотільних елементів, яка є джерелом натягу. Визначаємо тип дослідження "Статичний"



при накладенні обмеження на переміщення кільця – обойми корпусу 2 "Зафіксована геометрія". Розрахунковий «Обертальний момент» на валу (рис. 1, б), з урахуванням пікових пускових навантажень приймаємо до $M_B = 10 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

При встановленні підшипників у корпус механізму, їх кільця в осьовому напрямку фіксуються: внутрішнє – стопорним кільцем 4 і зовнішнє – фланцем кришки 5. Як показують дані довідників контактні тиски на поверхнях з'єднання при запресуванні з основним відхиленням полів допусків отвору «р» дорівнюють 200 МПа (рис. 2, а). Вказуємо два «набори» контактів «внутрішнє кільце підшипника – вал» та «зовнішнє кільце підшипника – обойма корпусу», для яких приймаємо коефіцієнт тертя при запресуванні 0.05. Також враховуємо, що тиск на внутрішнє кільце підшипника зазвичай більше, ніж на зовнішнє приблизно на 25%.

Робочі навантаження в механізмі виникають між нерухомими контактуючими, циліндричними поверхнями – зовнішнім кільцем підшипника та обоймою корпусу. При цьому циклічна робота засипного апарату може викликати коливальне навантаження. У координатній системі ХУ пов'язаної з віссю обертання валу вибираємо синусоїдальний розподіл «Робочого навантаження» з розрахунковими проекціями на осі $X=19 \text{ кН}$ та $Y=26 \text{ кН}$ (рис. 2, б). Запускаємо програму «Виконати» та після її успішного виконання буде створена папка «Результати» у дереві дослідження Simulation, з епюрами вказаними при налаштуванні, такими як:

- епюра переміщення (рис. 3), що містить значення деформацій елементів від сил, прикладених до деталі вузла. В даному випадку максимальна деформація кільця підшипника менша від допустимого зазору: $27 < [40] = [\delta] \text{ мкм}$;

- епюра запасу міцності для зовнішнього та внутрішнього кілець підшипника при максимальній напрузі по Mises $[N/m^2] = 2.75e+0.8$ дорівнює $1.197 > 1$, отже конструкція міцна, але на межі надійною працездатності.

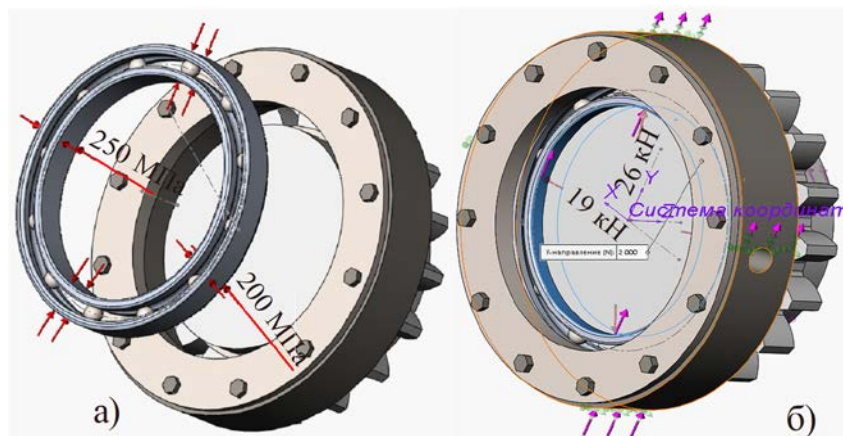


Рис. 2. Схема силових впливів на елементи механічної системи

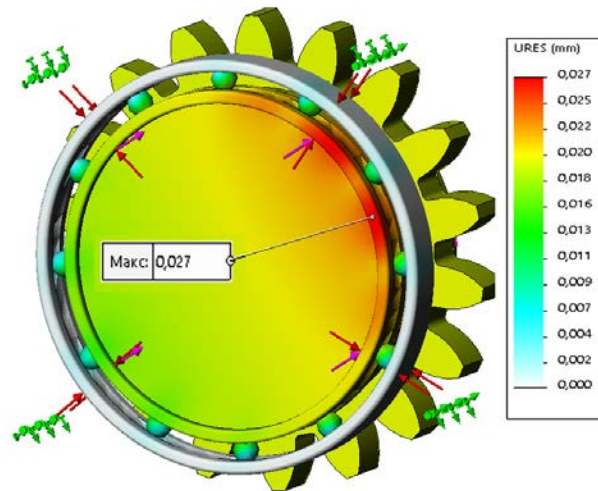


Рис. 3. Епюра деформацій підшипника (URES mm)
від сил, що діють на вузол

Висновки. Стаття присвячена вирішенню проблеми збереження в полі допуску, після пресової операції необхідних відхилень. Безперечно, такими методами може користуватися конструктор для початкових висновків. Точніші результати можуть бути отримані на спеціалізованих пакетах, наприклад, Ansys. Остаточний висновок буде зроблено за результатами лабораторних випробувань.

Література

1. ISO 7190:2001-02, *Interference fits – Calculation and design rules*

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ПОРОШКОВИМИ СТРІЧКАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БАЛІСТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ БРОНЕПЛАСТИН

Медвідь Ю.В., *аспірант*, Панчук В.Г., *д.т.н., професор*,
Присяжнюк П.М., *д.т.н., доцент*

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Від початку повномасштабного вторгнення Росії в Україну гостро відчувається потреба забезпечення військовослужбовців засобами захисту. Одним із широко використовуваних захисних елементів є сталеві бронепластини, які, незважаючи на свою вагу, отримали широке застосування за умов обмежених поставок військової допомоги. Основними матеріалами для їх виробництва



виступають імпортовані сталі таких брендів, як Hardox® та Armoх® (SSAB, Швеція), розроблені для забезпечення високої стійкості до балістичних ударів. Проте характеристики цих сталей, представлених на ринку України, не завжди відповідають вимогам. Наприклад, при балістичних випробуваннях бронепластин з Armoх® 440T товщиною 6 мм, проведених за стандартом ДСТУ 8782:2018 із застосуванням снайперської гвинтівки СВД і легкої кулі з сталевим нетермозміцненим сердечником, випущеної з відстані 10 м при швидкості 830 ± 15 м/с, було виявлено, що при таких умовах спостерігається наскрізне пробиття.

Раціональним та економічно ефективним методом підвищення балістичної стійкості є автоматизоване наплавлення порошковими стрічками, яке дозволяє регулювати параметри швидкості, наплавлення та, відповідно, структуру поверхневого шару.

Із метою автоматизації процесу наплавлення та використання обладнання з числовим програмним керуванням було розроблено установку для наплавлення на базі 3D-принтера для FDM друку (рис. 1). Вказана установка дозволяє використовувати однозамкові порошкові стрічки із високим вмістом легувальних елементів. Для порівняльного аналізу було проведено ручне та автоматизоване наплавлення стрічками які містили мас. %: Mo – 20, Mn – 14, Cr – 4, B – 3, решта Fe. Наплавлення проводилось на зворотній полярності за струму 150-180 А та напруги 19-22 В.

Порівняння електронномікроскопічних знімків структур наплавлених шарів після ручного та автоматизованого наплавлення (рис. 2) показали, що в обох випадках зона сплавлення характеризується суцільністю без видимих дефектів, що свідчить про високу якість металургійного зв'язку. Однак, у випадку автоматизованого наплавлення (рис. 2, б) структура є більш дрібнозернистою, що забезпечує більш рівномірний розподіл мікротвердості в межах $\sim 14 - 18$ ГПа, тоді як для зразків наплавлених у ручному режимі твердість змінюється у широкому діапазоні від ~ 9 до 21 ГПа. Це зумовлено формуванням масивних зерен фази $(\text{Mo}, \text{Cr})_2(\text{Fe}, \text{Mn})\text{B}_2$ із тетрагональною структурою (просторова група $R4/m\bar{3}m$) та твердістю понад 20 ГПа [1].

Таким чином, використання автоматизованого наплавлення дозволяє забезпечити формування більш дрібнозернистої структури, порівняно із ручним електродуговим наплавленням із збереженням аналогічного фазового складу. Це дозволяє отримати поверхневий шар із прогнозованим рівнем механічних властивостей та підвищеною тріщиностійкістю, що є важливо для забезпечення високого рівня балістичної стійкості.

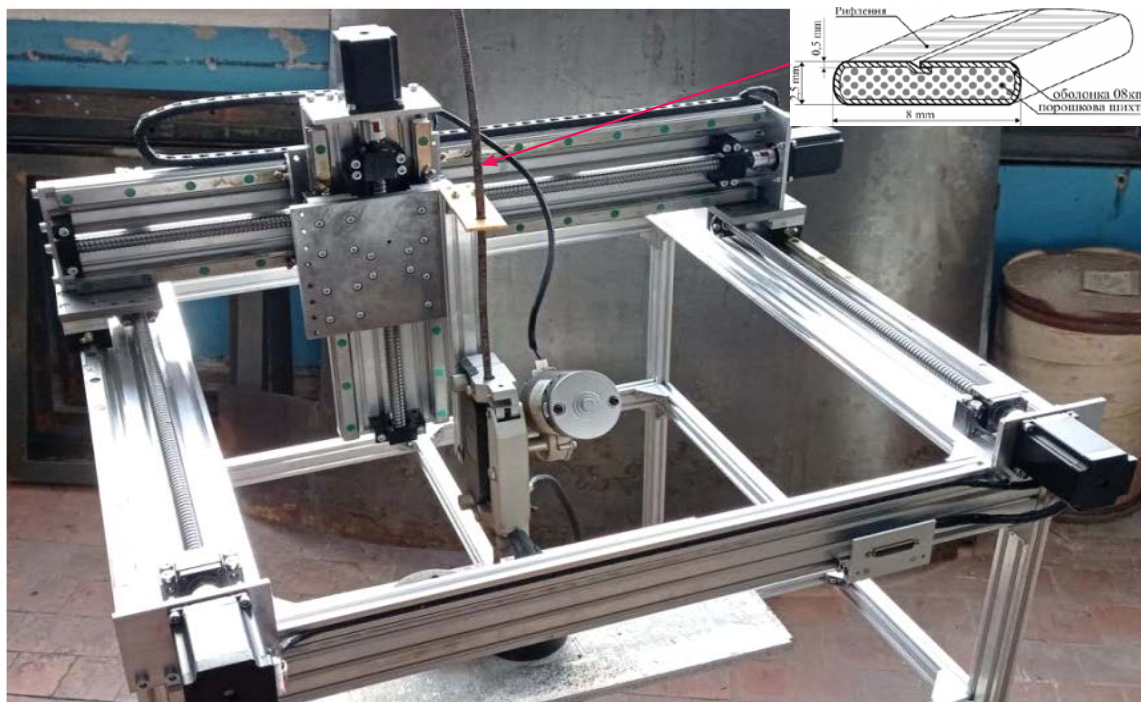
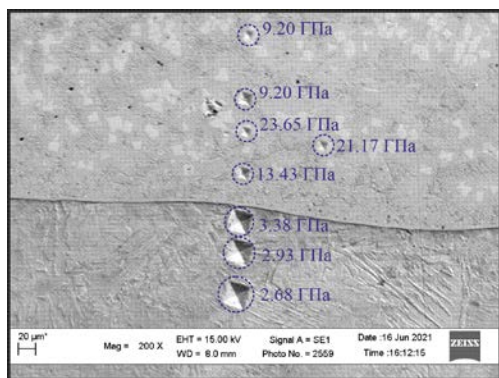
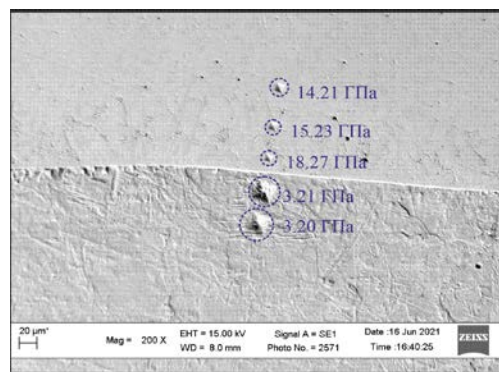


Рис. 1 Установка для автоматизованого електродугового наплавлення порошковими стрічками



а



б

Рис. 2 Мікроструктура наплавлених зразків, отриманих із використанням ручного дугового (а) та автоматизованого наплавлення (б)

Література

1. P. Prysazhnyuk and D. Di Tommaso, "The thermodynamic and mechanical properties of Earth-abundant metal ternary borides $\text{Mo}_2(\text{Fe}, \text{Mn})\text{B}_2$ solid solutions for impact-and wear-resistant alloys," *Materials Advances*, vol. 4, pp. 3822–3838, 2023.



ГРАФОВА МОДЕЛЬ ЗБІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ БЛОЧНО-МОДУЛЬНИХ РІЗЦІВ ДЛЯ ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ

Мироненко Є.В., д.т.н., професор, Міранцов С.Л., к.т.н., доцент
Донбаська державна машинобудівна академія.

У багатoeлементних різальних інструментах значний вплив на їх робочі характеристики мають експлуатаційні властивості (ЕВ) поверхонь їх контактуючих деталей.

Для кожних з умов контактування даних поверхонь існує система геометричних (параметри макровідхилення, хвилястості, шорсткості, субшорсткості), фізико-механічних та комплексних параметрів їх стану, які визначаються матеріалом, конструктивним виконанням та методом обробки. Дані параметри стану являють собою комплексний параметр (Сх) та істотно впливають на ЕВ поверхонь, а також визначають параметри надійності інструменту.

У роботі запропоновано методику моделювання ЕВ та вибору методів обробки контактуючих поверхонь елементів збірних конструкцій блочно-модульних різців з використанням теорії графів та математичного апарату відповідностей.

Графова модель складається, вважаючи вершинами графа елемент множини ЕВ, елемент множини якості поверхні, комплексний параметр її стану, елемент конструкції різального інструменту, які пов'язані не спрямованими зв'язками – дугами (ребрами) графа.

Елементи поверхонь деталей блочно-модульних токарних інструментів, їх ЕВ, умови їх контакту, а також система комплексних параметрів, що застосовуються для них, їх взаємозв'язок, наприклад, для різця, наведеного на рисунку 1а, може бути зображена за допомогою графа, рисунок 1б й 1в.

На цьому графі: П – комплексний параметр несучої здатності, Д – довговічності, З – рівномірного зношування, Сх – рівноважного стану поверхонь тертя, Н – поверхонь, що працюють в упор, F – поверхонь, що контактують із зовнішнім середовищем, К – герметичність з'єднань, Т – точність різьби, РЕ – різальний елемент, КР – корпус різця, КБ – корпус блоку, ОП – опорні пластини, РгЕ – регульовальні елементи, Пр – притискувачі та прихоплювачі, ЕФ – елементи фіксації, Г – гвинти, ЕК – елементи контролю, З – зносостійкість, УП – утомна міцність, КЖ – контактна жорсткість, ПСП – міцність зчеплення покриттів, ЕП – електропровідність, КС – корозійна стійкість, КПП – комплексні параметри стану поверхні, ЕКІ – елементи конструкції інструменту.



Ці взаємозв'язки розглядаються відносно частки графа – ЕКІ, що дозволяє вибрати для конкретних умов експлуатації обмежений набір частки графа КПП. Частка графа, у разі, об'єднує його вершини одне безліч G , яке включає однотипні елементи: $G_{кпп_i}$, $G_{кпп_j}$, $G_{кпп_k}$ (елементи безлічі КПП, ЕКІ, ЕС відповідно).

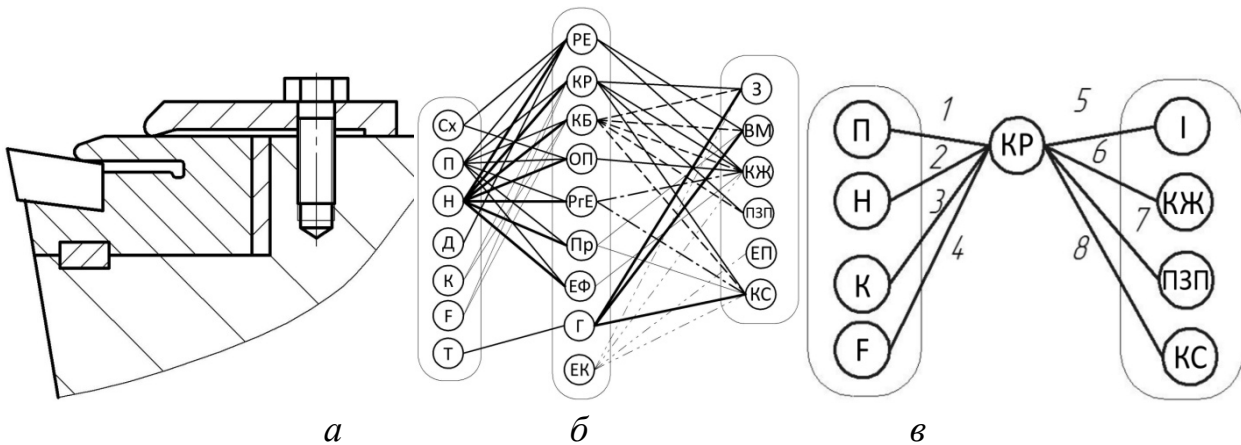


Рис. 1. Графова модель експлуатаційних властивостей конструкцій блочно-модульних різців:

а – приклад конструкції блочно-модульного різця; *б* – графова модель ЕВ блочно-модульного різця; *в* – графова модель ЕВ корпусу різця

Граф, наведений на рисунку 1, можна описати різними способами, як, наприклад, графічним способом, перерахуванням ребер, або за допомогою матриці інцидентності та матриці суміжності, рівнянь зв'язку.

За допомогою математичного апарату відповідностей може бути побудований графік відповідностей, рисунок 2.

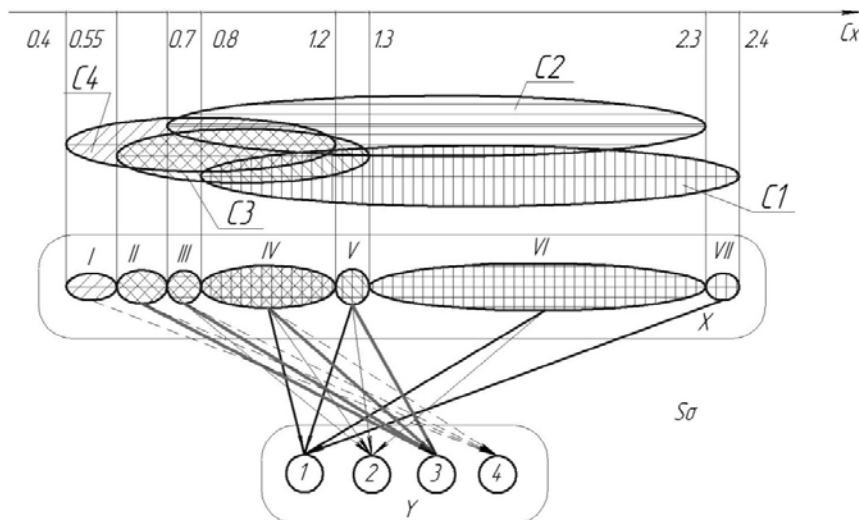


Рис. 2. Графік відповідностей графової моделі

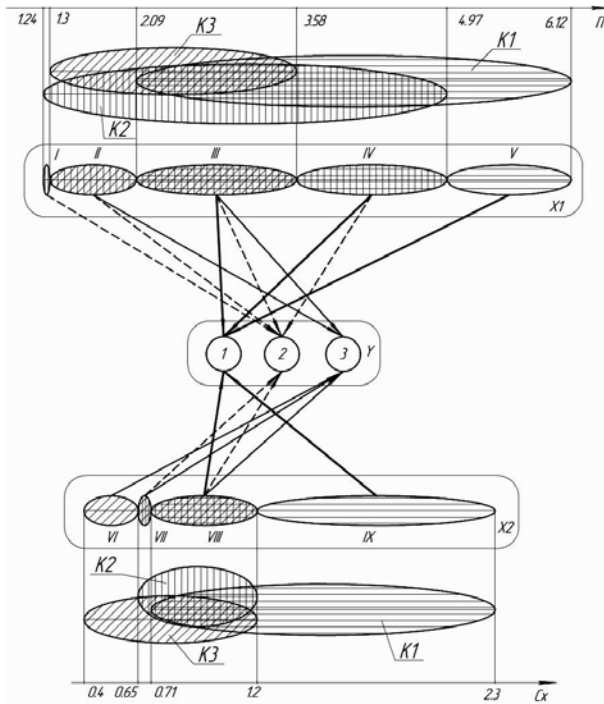


Рис. 3. Графік відповідностей методів для вибору методів обробки поверхонь

Вибрати метод механічної обробки поверхні деталі за регламентації комплексного параметра рівноважного стану поверхонь тертя S_x можна також за допомогою математичного апарату відповістей, для чого будується графік відповістей, рисунок 3, в якому в заданому діапазоні параметра S_x знаходиться пара елементів множин X і Y , що відповідає шуканому методу обробки.

Вхідним параметром графіка відповістей є відповідні діапазони комплексних параметрів S_x і Π . Вихідним параметром – метод механічної обробки (елементи області прибуття Y). Елементи області відправлення є діапазонами значень

відповідного комплексного параметра Π і S_x . Елементи області прибуття – це конкретні методи обробки. Пріоритет методу обробки, що у області прибуття, порівняні з іншими, визначається за кількістю логічних одиниць у сфері відправлення таблиці відповістей.

Застосування запропонованих методів моделювання дозволяє виявити умови контактної взаємодії поверхонь деталей блочно-модульних токарних різців, визначити перелік ЕВ та їх діапазон для поверхонь деталей інструменту, використовуючи комплексні параметри стану вибрати метод обробки за таблицями та графіками відповістей.

Література:

1. Проектирование блочно-модульных инструментов для тяжелых токарных станков [Текст] / Е.В. Мироненко, А.Н. Кравцов; Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС. Краматорск: ДГМА; 2014 – 299 с.



ОЦІНКА ПОВЕРХНЕВОГО СТАНУ МЕТАЛУ ШЛЯХОМ ЗОНДУВАННЯ АКУСТИЧНИМИ ХВИЛЯМИ РЕЛЕЯ

Мокрий О.М., *д.т.н.*, Романишин І.М., *к.т.н.*

Фізико-механічний інститут НАН України ім. Г.В. Карпенка

З метою покращення експлуатаційних характеристик металів широко використовують модифікацію поверхневих шарів металів з допомогою різноманітних технологічних процесів (поверхнева термічна та лазерна обробка, поверхнєве легування, інтенсивна поверхнева пластична деформація, дробоструменева обробка). Такі технології змінюють властивості поверхневого шару металу, що покращує втомні, корозійні та трибологічні характеристики виробів. Актуальною проблемою є неруйнівний контроль поверхневого модифікованого шару металу. Перспективним підходом для вирішення цієї задачі є використання поверхневих акустичних хвиль (ПАХ) Релея [1, 2]. Особливістю цих хвиль є те, що вони поширюються в поверхневому шарі матеріалу, товщина якого становить близько довжини ПАХ. Відповідно характеристики поширення ПАХ визначаються фізичними властивостями матеріалу в цьому поверхневому шарі. Інформаційною характеристикою, яка використовується для діагностики стану матеріалу є швидкість поширення в ньому ПАХ. Величина швидкості ПАХ залежить від пружних модулів та густини середовища, в якому вона поширюється:

$$V_R = \sqrt{\frac{F(C)}{\rho}}, \quad (1)$$

де $F(C)$ – функція пружних модулів, ρ – густина матеріалу. Таким чином, вимірюючи зміну швидкості ПАХ, можна оцінити зміну пружних модулів та густини поверхневого шару матеріалу, яка відбулась в результаті відповідних технологічних процесів, що є фізичною основою їх контролю.

Для визначення розподілу властивостей матеріалу за глибиною необхідно провести вимірювання швидкості ПАХ для різних її частот. На основі цих вимірювань можна визначити товщину модифікованого шару, а також його характеристики.

Для оцінки параметрів шару з НКС було використано підхід, представлений в праці [3]. Згідно з ним швидкість ПАХ V_R в матеріалі із модифікованим поверхневим шаром товщиною H , задається виразом:

$$V_R = W_1 V_1 + W_2 V_2, \quad (2)$$

де $W_1 = 5/3 (H/\lambda) - 2/3 (H/\lambda)^{5/2}$, $W_2 = 1 - W_1$, λ – довжина акустичної хвилі.



Величини V_1 і V_2 можна визначити згідно [3] як:

$$V_i = V_{si} (0,87 + 1,12\nu) / (1 + \nu), \quad (3)$$

де $i=1, 2$; V_{s1} – швидкість поперечної хвилі в модифікованому шарі, V_{s2} – швидкість поперечної хвилі в основному матеріалі, ν – коефіцієнт Пуассона. Таким чином величина V_1 відповідає швидкості ПАХ в модифікованому шарі за умови, що хвиля поширюється в однорідному середовищі із властивостями цього шару, V_2 відповідає швидкості ПАХ в матеріалі основи.

Даний підхід дає можливість оцінити вплив величин V_1 , V_2 , та H на частотну залежність швидкості ПАХ в середовищі, яке має модифікований поверхневий шар товщиною H . Використовуючи вираз (2), можна з допомогою експериментального визначення швидкостей V_{Ri} для хвиль з різною частотою f_i оцінити величини V_1 , V_2 та H . Швидкість ПАХ потрібно виміряти як мінімум для хвиль трьох різних частот. Шукані величини визначають з умови мінімуму функціоналу:

$$\sum_{i=1}^n (V_{Ri}(f_i) - V_R(V_1, V_2, H, f_i))^2. \quad (4)$$

Швидкість V_1 містить інформацію про поверхневий модифікований шар і може бути використана для кількісної оцінки результатів відповідного технологічного процесу. Також важливим параметром, який контролюється даним підходом, є товщина модифікованого шару H , яка суттєво впливає на експлуатаційні характеристики виробу.

Література

1. V. R. Skalskyi, O. M. Mokryi, O. I. Zvirko, V. I. Kyrlyliv, I. M. Romanyshyn, and O. V. Maksymiv *Estimation of Characteristics of Nanocrystalline Layer Using the Surface Acoustic Waves* // *Materials Science*, 59, No. 2, 180-185, (2023) P.180-185 <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00760-3>
2. V. Skalskyi, M. Student, O. Mokryy, W. Dudda, Y. Kharchenko, H. Chumalo, and V. Hvozdettskyi, *The use of surface acoustic waves to evaluate of the near-surface layers of metal processed shot peening*, // *Diagnostyka*, 22, Is. 3, 51–57 (2021); <https://doi.org/10.29354/diag/141232>
3. E. C. Leong, and A. M. W. Aung, *Weighted average velocity forward modelling of Rayleigh surface waves* // *Soil Dynamics and Earthquake Eng.*, 43, 218–228 (2012); <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.07.030>



ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЙНОГО ТЕРТЯ В ТІЛІ РІЗЦЯ НА ДЕМПФУВАННЯ АВТОКОЛИВАНЬ СИСТЕМИ ВПІД

**Новіцький Ю.Я., к.т.н., доцент, Сліпчук А.М., к.т.н., доцент,
Новіцький М. Я., аспірант**

Національний університет “Львівська політехніка”

Як відомо, автоколивання, що виникають в процесі різання деяких важко-оброблюваних матеріалів (корозійностійкі та жароміцні сталі і сплави), негативно впливають на якість поверхні деталі, стійкість інструмента та ресурс верстата [1], тому амплітуду цих коливань по можливості необхідно зменшувати.

Одним із способів зменшення амплітуди автоколивань є використання спеціального інструменту із здатністю демпфувати частину енергії коливань системи ВПІД.

В даній роботі оцінюється можливість використання конструкційного тертя всередині державки токарного різця для пасивного демпфування енергії автоколивань.

На рис. 1, а зображено процес формування петлі гістерезису [2] між пластиною та основою, до якої вона притиснута контактним тиском p . Площа цієї петлі є енергією, що розсіюється протягом циклу коливань. По осі ординат відкладено відносне переміщення торця пластини від 0 до 1. При цьому повний зсув пластини відносно основи неможливий допоки сила, що зсуває пластину буде меншою від сили тертя, тобто зсув буде відбуватися тільки на певній довжині пластини, і чим більшою буде ця довжина, тим більшою буде площа петлі гістерезису, а отже, і енергія розсіювання.

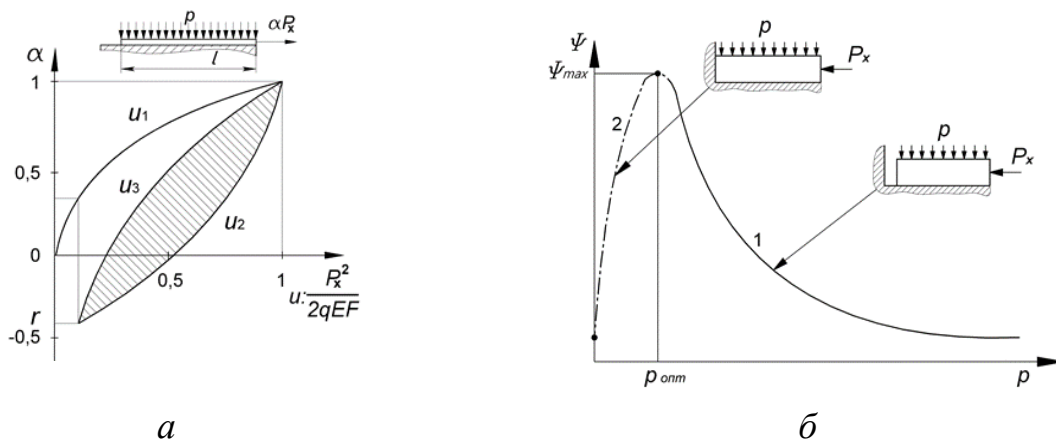


Рис. 1. Розсіювання енергії коливань протягом одного циклу:
а – петля гістерезису; б – енергія розсіювання



На рис. 1, б представлено графічну залежність енергії розсіювання протягом циклу коливання від контактного тиску. Як видно із рисунка, оптимум тиску лежить на границі повного зсуву пластини відносно основи. Для нашого випадку кращим варіантом є опертий задній торець пластини, що відображено штрих-пунктирною лінією.

Як впливає із аналізу цієї залежності, існує оптимальне значення контактного тиску відносно сили зсуву пластини, відхилення від якого призводить до зменшення розсіювання енергії коливань.

Конструкція різця, в якій реалізовано даний принцип розсіювання енергії коливань, представлена на рис. 2.

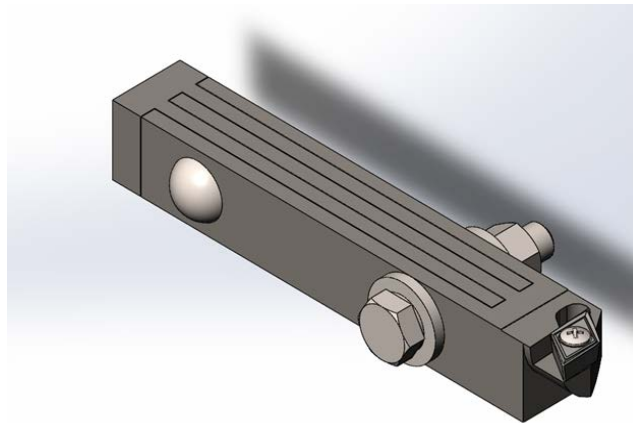


Рис. 2. Модель різця із конструкційним демпфуванням

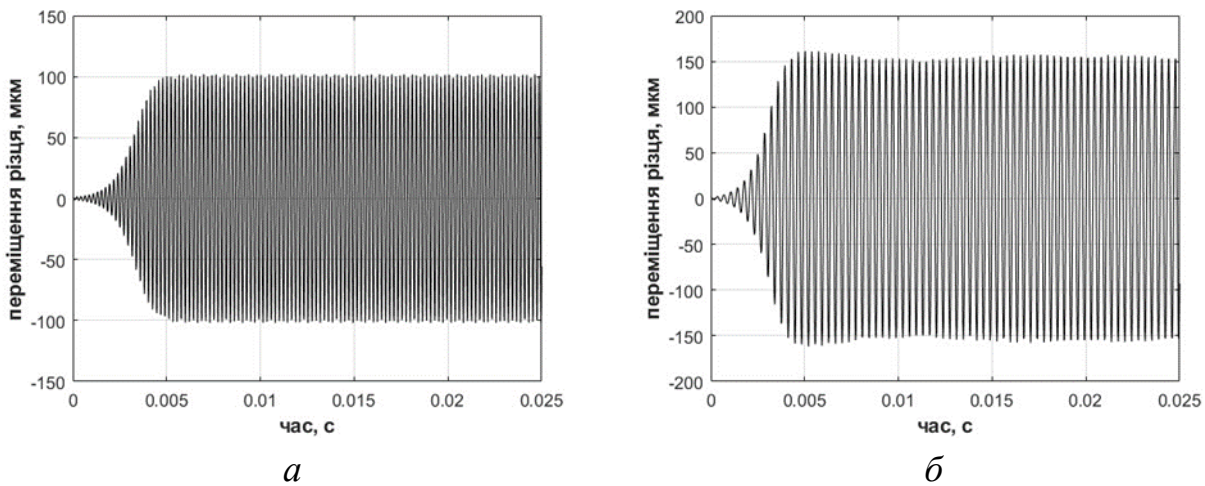
Як видно із рисунка, державка різця з розмірами 12x12x80 розділена на дві частини не електроіскровому верстаті дротом діаметром 0,1 мм. Обидві частини з'єднані між собою болтовим з'єднанням. Болт М5 встановлено із зазором в отворі, діаметром 6 мм. В задній частині збірної державки виконано заклепкове з'єднання, яке не бере участі в процесі демпфування, а служить упором. Значення сили тертя між двома частинами державки регулюється затяжкою болта.

У зв'язку з розрізанням різця на дві частини та виконанням поперечного отвору в передній частині державки, жорсткість інструменту зменшується, що може негативно позначитися на амплітуді коливань. Значення жорсткості різця із суцільною державкою становлять: $C_x=63,29 \times 10^6$ Н/м; $C_y=14,64 \times 10^6$ Н/м; $C_z=12,27 \times 10^6$ Н/м, а для випадку розрізної державки: $C_x=40,98 \times 10^6$ Н/м (-35%); $C_y=8,85 \times 10^6$ Н/м (-40%); $C_z=4,03 \times 10^6$ Н/м (-67%). Як бачимо, жорсткість різця із розрізною державкою суттєво зменшилася.



Автоколивання системи ВПД досліджувалися розв'язуванням системи диференціальних рівнянь чотиримасової коливальної системи, яка складається із супорта, різця, оброблюваної деталі та шпинделя, що з'єднані між собою та станиною верстата пружними зв'язками із демпферами, відповідно до схеми класичного токарного верстата, маса станини якого є значно більшою за масу окремих його вузлів, тому їх коливання розглядаються відносно умовно нерухомої станини [1, 3].

Результати досліджень – амплітуди автоколивань різця, представлені на рис.3.



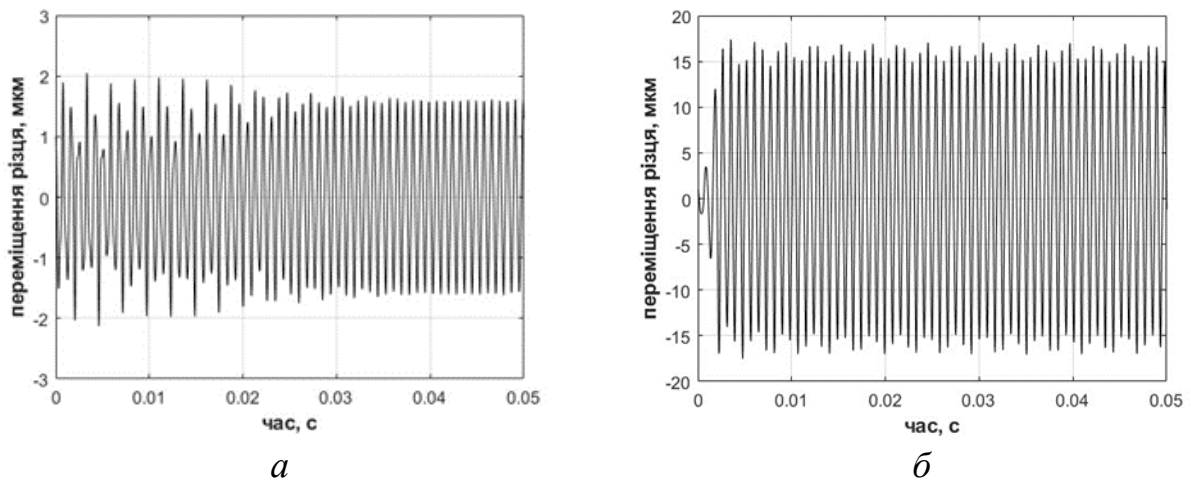
*Рис. 3. Амплітуда автоколивань різця:
а – із суцільною державкою; б – із розрізною державкою*

Як видно із рисунка, амплітуда коливань різця із розрізною державкою зросла в півтора рази, а частота коливань зменшилась, що є характерно для зменшення жорсткості автоколивальної системи.

Затягування болта, в передній частині різця, повинно створювати силу тертя між частинами розрізаної державки, пропорційну до значення сили затяжки.

На рис. 4 представлено амплітуди автоколивань різця із різними значеннями сили затяжки болта.

Як видно із рис. 4. *а*, затяжка болта створює силу тертя, яка призводить до значного зменшення амплітуди автоколивань внаслідок розсіювання енергії цих коливань, проте подальше збільшення затяжки болта (рис. 4, *б*) призводить до зростання амплітуди коливань.



*Рис. 4. Амплітуда автоколивань різця
із різними значеннями сили затяжки болта: а – 50 Н; б – 500 Н*

Як показують проведені теоретичні дослідження математичної моделі, подальше збільшення контактного тиску між окремими частинами державки різця призводить до зменшення енергії розсіювання коливань, і, як наслідок, до зростання їх амплітуди, що повністю корелюється із графічною залежністю, представленою на рис. 1,б.

Отже, забезпечуючи оптимальне значення сили тертя в розрізній державці різця, можна запобігати виникненню автоколивань в процесі різання важкооброблюваного матеріалу, або ж значно зменшувати їх амплітуду.

Література

1. Новіцький Ю. Я., Дмитерко П. Р. Оптимізація параметрів демфування автоколивань багаточастотної коливальної системи // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2017. – № 867. – С. 51–55.
2. Пановко Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем / Я. Г. Пановко. – М.: Гос. изд. физ-мат. лит., 1960. – 190 с.
3. Stupnytskyi V., Novitskyi Y., Novitskyi Y., Xianning S. Comprehensive system for simulation of vibration processes during the titanium alloys machining // Archive of Mechanical Engineering. – 2023. – Vol. 70, iss. 1. – P. 85–105.



КІНЕМАТИЧНІ АСПЕКТИ ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ХОДОВИХ ВАЛІВ

Онисько О.Р., д.т.н., професор, Веркалець А.А. студент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Виготовлення конічних нарізей для замкових з'єднань у бурильних колонах відбувається з використанням токарних різців. Відомі виробники інструментів представляють для точіння велико-крокових нарізей тільки одониткові різальні пластинки [1]. Здебільшого це карбідні пластинки із трьома змінними позиціями різальної крайки профіль якої відповідає профілю заданої нарізі (рис. 1)

На противагу одонитковим пластинкам ті ж виробники постачають і багато-ниткові пластинки для точіння нарізі. Проте це не стосується велико-крокових конічних нарізей, до яких відносять і замкові нарізі. На рис. 2 представлено модель такої пластини, саме для точіння замкової нарізі за формою Ш.

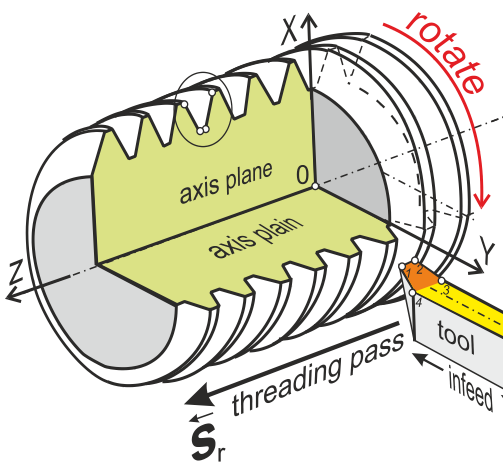


Рис. 1. Схема точіння трапецієвидної циліндричної нарізі

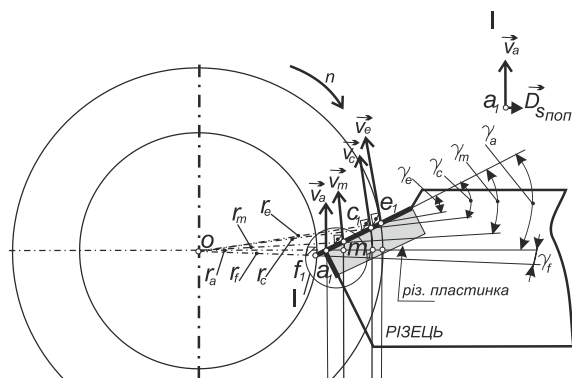


Рис. 2. Профіль різальної двониткової пластинки для конічної замкової нарізі форми Ш

Згідно із дослідженням [2] швидкість головного руху при циліндричному нарізеточінні для заданої точки різальної крайки з використанням одиничних колових функцій циліндричної системи координат буде :

$$\frac{d\vec{r}}{d\vartheta} = \left(\frac{d_3}{2} - \Delta + b \right) \vec{g}(\vartheta) + \vec{k} P / 2\pi, \quad (1)$$

де b – зріз вершини нарізі; Δ – радіальна віддаленість довільної точки m різальної крайки від зовнішньої вершини вихідного трикутника; d_3 – зовнішній діаметр нарізі.



На рис. 2 першому доданку формули (1) відповідає вектор тангенціального переміщення $\vec{V}$ другому – вектор осьового переміщення $\vec{V}_o$. Отже [2,3] :

$$\vec{V}(\vartheta) = \vec{V} + \vec{V}_o \quad (2)$$

Отже формули (1) та (2) ілюструють необхідні напрямки рухів довільних нарізе-утворюючих точок різальної крайки різця для забезпечення формоутворення циліндричних нарізей, у тому числі з трапецієвидним профілем, що застосовують у ходових гвинтах (рис. 2).

Література

1. *Технічне Керівництво Sandvik Coromant Посібник коромант по різьбі «Різьбонарізання точіння і фрезерування різьби»*
2. Онисько О. Р. Методи забезпечення точності виготовлення різьбових кінців труб нафтогазового сортаменту. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2014. № 3(52). С. 107–115.
3. Onysko O. R., Kopey V. B., Panchuk V. G. Theoretical investigation of the tapered thread joint surface contact pressure in the dependence on the profile and the geometric parameters of the threading turning tool. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 749 (2020) 012007

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВЕЛИЧИНИ КРОКУ ХОДОВОГО ГВИНТА НА ТОЧНІСТЬ ЙОГО ПРОФІЛЮ У ПРОЦЕСІ ВИХРОВОГО ТОЧІННЯ

**Онисько О.Р., д.т.н., професор, Лукань Т.В. асистент,
Сливка Р.П., студент**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Все зростаючу потребу щодо збільшення кількості вироблених 3D-принтерів, а значить ходових валів значною мірою задовільняють технології вихрового точіння, де вихрова головка містить відразу кілька різців і обертається з високою частотою ексцентрично відносно заготовки, що обертається повільно [1]. (рис.1). Подача на оберт повздовжнього руху вихрової головки ідентична кроку нарізі.

Для високо-прецизійних машин частіше використовують вали із круглим профілем, що необхідно для кульково-гвинтової пари. Проте для менш дорогої техніки, наприклад навчальних 3D-принтерів застосовують гвинти із трапе-



цієвидним профілем за стандартом ISO чи наприклад ASME, котрий тим не менше декларує доволі жорсткі вимоги щодо точності профілю трапецієвидної нарізі (таб.1).

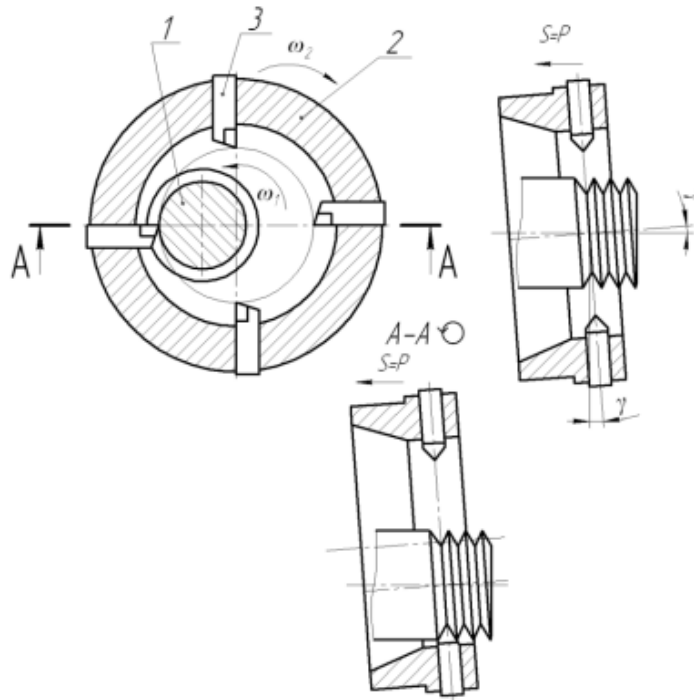


Рис. 1. Схема вихрового точіння нарізі:
1 – заготовка; 2 - нарізевий різець; 3- обертова головка.

Таблиця 1

Точність пів-профільного кута 14.5° нарізі АСМЕ

Кількість витків / дюйм	Заокруглена величина кроку, мм	Відхили від номіналу 14,5°, min
8	4,5	35
4	6,4	25
3	8,5	22
2	12,7	18

Для забезпечення придатних умов експлуатації головка розміщена під кутом нахилу λ відносно осі заготовки. Цей кут вибирають близьким чи ідентичним до кута підйому нарізі. Величина цього кута залежить від кроку гвинта та його діаметра:

$$\lambda = \arctan\left(\frac{P}{2D}\right), \quad (1)$$



Водночас таке розміщення різців означає нахил різальної крайки різця λ , а значить криволінійність бічної різбового профілю AD (рис.2) у координатах YX за формулою [2]:

$$Y(x) = \tan(\sigma)x \frac{\sin \tau}{\sin \eta} - \frac{P}{2\pi} \tau, \quad (2)$$

$$\tau = \eta - \arcsin\left(\frac{r_a \sin \eta}{x}\right), \quad (3)$$

$$\eta = \arctan\left(\frac{P \sin \lambda}{H}\right); \quad (4)$$

Трансцендентне рівняння (2) по суті описує лінію, що максимально наближена до прямої при умові, що кут λ не перевищує 40° . За умови, що діаметр ходового гвинта D становить 20 мм, а крок $P=8$ мм, кут λ за формулою (1) становитиме $11,3^\circ$. Отже отриманий при точінні профіль AD фактично буде прямолінійним, проте профільний кут φ слід буде визначити за формулою:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Y_a - Y_d}{D - D_1}\right); \quad (5)$$

Розрахунок цього кута за умови, що діаметр гвинта становить 24 мм, а крок 8 мм вказує величину $14,7^\circ$, що на $0, 2^\circ$, тобто на 12 тін більше від номіналу. Беручи до уваги табл.1 доходимо до висновку, що перевищення становить 31% допуску.

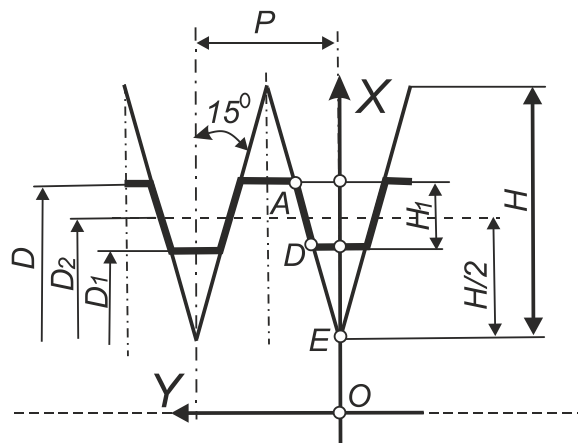


Рис. 2. Схема трапецієвидного профілю згідно ГОСТ-ISO:

D – зовнішній діаметр; D_2 – середній діаметр; D_1 внутрішній діаметр; H – висота вихідного трикутника; H_1 – робоча висота вихідного трикутника; P – крок.

Отже застосування швидкісного методу вихроточіння дає можливість отримувати профілі ходових гвинтів із заданою точністю профіля.

Література:

1. Andriy Diachun; Vasyl Vasyukiv; Oleg Korol; Volodymyr Myhailiuk; Ivan Golovaty; Andriy Kuras. Investigation of geometrical parameters in screw surfaces whirling process. Scientific



Journal of the Ternopil National Technical University 2021, № 1 (101). DOI: 10.33108/visnyk_tntu2021.01

2. Oleh Onysko, Volodymyr Kopei, Cristian Barz, Yaroslav Kusyi, Saulius Baskutis, Michal Bembenek, Predrag Dašić and Vitalii Panchuk. Analytical Model of Tapered Thread Made by Turning from Different Machinability Workpieces. *Machines* 2024, 12(5), 313; <https://doi.org/10.3390/machines12050313>

СИНТЕЗУВАННЯ ТА АНАЛІЗУВАННЯ УРУХОМЛЮВАЧА ЕЛЕВОНА ПОБУДОВАНОГО НА ОСНОВІ ШАРНІРНОГО ЧОТИРИЛАНКОВИКА

**Пасіка В. Р., д.т.н., професор, Кіяшок В. О., студент,
Козловський Я., В., студент, Краснонос С. О., студент**
Національний університет «Львівська політехніка»

Причиною появи цієї роботи є безпілотний літальний апарат «Гриф», а саме проблема недостатньої міцності механізму урухомлення елевона. Літак спроектований за схемою «безхвостка», тобто у аеродинамічній схемі відсутній стабілізатор. Така схема дозволяє знизити аеродинамічний опір та зменшити габарити літального апарата (ЛА). Особливістю такої схеми є розміщення аеродинамічних поверхонь контролю тангажу (елеваторів) та крену (елеронів) на крилі. Інколи для спрощення конструкції функціонал обох поверхонь поєднують в одній – елевоні, який і використаний у досліджуваному ЛА.

Сучасний швидкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) не дозволяє оперативно проводити фундаментальні теоретичні дослідження різноманітних механічних систем ЛА. У доступній літературі практично відсутні дані про аналізування кінематичних чи кінетостатичних характеристик механізмів урухомлення елевонів. Перевага надається конструктивній доцільності і досвідченості конструктора. Для ЛА такий підхід не раціональний. Лише після проведення аналітичних досліджень можна стверджувати про рівень навантажень, які діють в механічних системах під дією зовнішніх сил. Це дозволить мінімізувати сили тяжіння та інерційне навантаження і тим самим зменшити вагу ЛА.

Мета роботи – визначення зусиль, які виникають у тязі елевона при зміні висоти лету БПЛА тину «Гриф».

Відповідно до мети, необхідно:

– вибрати структурну схему механізму урухомлення елевона;



Невідомі коефіцієнти визначаємо за такими граничними умовами:

$$k=0 \rightarrow \varphi_1=0 \text{ і } \varphi'_1=0 \text{ і } k=1 \rightarrow \varphi_1=\varphi_e \text{ і } \varphi'_1=0,$$

де φ_e – кут нахилу елевона φ_{eu} або φ_{ed} .

Закон руху урухомчої ланки та її похідні дорівнюють:

$$\varphi_1=a_0+a_2k^2+a_3k^3; \quad \varphi'_1=2a_2k+3a_3k^2; \quad \varphi''_1=2a_2+6a_3k.$$

Кінематичне аналізування проведено відповідно до аналітичних залежностей виведених у роботі [1]. Аналітичні залежності на стадії підймання і опускання однакові за винятком синтезованого закону руху ланки¹

Як приклад покажемо деякі формули для обчислення кутових швидкостей і пришвидшення:

$$\omega_2 = \frac{v_A \cos(\varphi_3 - \varphi_A)}{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)}; \quad \omega_3 = \frac{v_A \cos(\varphi_2 - \varphi_A)}{l_3 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)};$$

$$\varepsilon_3 = \frac{a_A \cos(\psi_A - \varphi_2) + l_3 \omega_3^2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3) - l_2 \omega_2^2}{l_3 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)},$$

де v_A і a_A – швидкість і пришвидшення точки A ; φ_2 і φ_3 – кути нахилу ланок l_{AB} і l_{BC} до осі абсцис.

В роботі обчислені вектори швидкості і пришвидшення центра мас системи коромисло-елевон, який збігається з точкою E .

Реакції у кінематичних парах, зрівноважувальний момент і зусилля у гонку AB визначено методом кінетостатики [1]. Зрівноважувальний момент додатково визначений методом балансу потужностей і проведено порівняння. Похибка лежить в межах $10^{-12} - 10^{-10} \%$. Аеродинамічні сили під дією ламінарного потоку повітря зі швидкістю лету ЛА 200 км/год зведено до однієї сили F_B , яка діє у центрі ваги елевона.

Деякі результати аналізування зображені на іл. 2 для таких даних:

$$a=120 \text{ мм}; \quad l_{BC}=30 \text{ мм}; \quad l_{CS_3}=l_{BC}; \quad \varphi_{eu} 40^\circ; \quad \varphi_{ed}=30^\circ; \quad \mu_{02}=28,15^\circ; \quad \mu_{01}=95,66^\circ;$$

$$m_1=10 \text{ г}; \quad m_3=100 \text{ г}; \quad J_{S_3}=0.001 \text{ кгм}^2; \quad F_B=15 \text{ Н}.$$

Синтезовано: $l_{OA}=16,15 \text{ мм}; \quad l_{AB}=129,45 \text{ мм}.$

Дослідження показують, що гонок на стадії підймання працює на стиск, а на стадії опускання – на розтяг. Виявлено, що зусилля в гонку для прийнятих даних на стадії підймання більший ніж на стадії опускання більш як у тричі.

На іл. 2, а зображені кінематичні характеристики руху коромисла, а на іл. 2, б – зусилля у гонку AB на стадії підймання.



Усі завдання, які поставлені у меті виконанні і зроблені такі висновки:

- розглянуто кілька структурних схем механізмів для урухомлення елевонів і показано їх позитивні і негативні характеристики;
 - синтезовано геометричні розміри урухомлювача елевона;
 - синтезовано закон руху урухомчої ланки за умовами руху;
 - змодельовано аеродинамічні сили, що діють на елевон;
- визначено силу у тязі механізму урухомлення елевона і сформовано таким чином підґрунтя для подальшого розрахунку на міцність і стійкість.

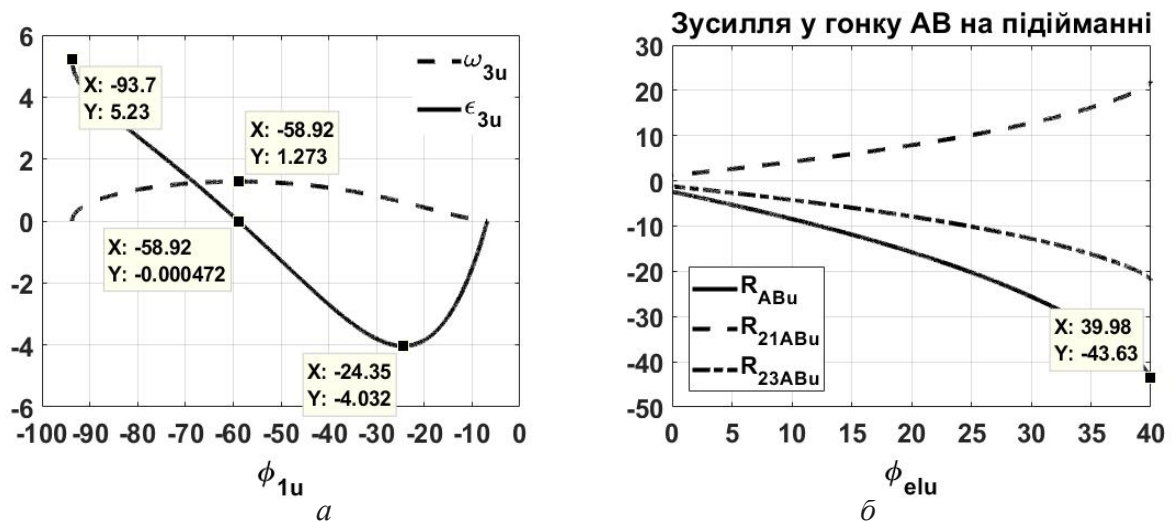


Рис. 2. Деякі графічні результати на стадії підймання:
а – кутові швидкість і прискорення елевона б – сила в гонку R_{ABu}

Література

1. Пасіка В. Р. Аналітичний метод у дослідженні важільних механізмів II класу / В. Р. Пасіка, В. М. Гелетій. Навчальний посібник. Дрогобич: «Посвіт». – 2019. – 142 с.
2. Moir Ian. Aircraft Systems. Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration / Ian Moir, Allan Seabridge. – 2008. – 536 p.



НАЗЕМНІ РОБОТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА АНАЛІЗ

Пасічник В.А., д.т.н., професор, Дощенко М.А., аспірант

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ефективна реакція на потреби замовника стосовно використання наземних роботизованих комплексів має ґрунтуватись на відповідності засобу реалізації з відповідними параметрами до вимог замовника. Часто на цьому шляху спостерігається непорозуміння. Однією з причин є відсутність системи класифікації, яка б полегшувала вирішення цієї задач.

Аналіз останніх досліджень. Джерело [1] містить загальну класифікацію та систематизацію різних типів роботизованих систем, яка розподіляє їх на:

- **Маніпулятори** (*Industrial Robots*) – призначені для виконання конкретних завдань, таких як збирання, зварювання, фарбування, тестування тощо;
- **Мобільні роботи** (*Mobile Robots*) – здатні переміщуватися в просторі, включаючи автономні транспортні засоби та роботи, що виконують завдання в непередбачуваних середовищах;
- **Гуманоїдні роботи** (*Humanoid Robots*) – імітують людське тіло і здатні виконувати рухи, подібні до людських;
- **Мікро- та нанороботи** (*Micro and Nano Robots*) – розмір яких може варіюватися від мікроскопічного до нанорозмірного рівня. Вони використовуються у медицині (наприклад, для доставки ліків або хірургічних процедур на клітинному рівні) та в дослідженнях на дуже малих масштабах;
- **Паралельні роботи** (*Parallel Robots*) – мають кілька елементів, які спільно працюють для виконання завдання, що дозволяє досягти високої точності та швидкості. Вони часто використовуються у високоточних операціях, таких як обробка матеріалів чи віртуальна реальність;
- **Роботи з біонічними елементами** (*Biohybrid and Bionic Robots*) – включають роботи, які інтегрують живі організми чи біологічні матеріали з роботизованими системами. Наприклад, роботи, які мають біологічні тканини або використовують біонічні протези для відновлення функцій людського тіла.

В той же час подальша деталізація, в т.ч. в класі «**Мобільні роботи**» практично відсутня. Стосовно наземних роботів часто застосовується термін «**наземні дрони**» (англ. – *UGV, Unmanned Ground Vehicles*). Відсутність визнаної



системи класифікації роботів такого класу спонукає до її пошуку і обґрунтування. Саме на це націлене дане дослідження.

Пропонується система класифікації «ЕРАМ», яка передбачає класифікацію класу мобільних роботів за такими ознаками: за **середовищем** застосування (від англ. – *Environment*); за **призначенням** (від англ. – *Purpose*); за **автономністю** (від англ. – *Autonomy*); за **мобільністю** (від англ. – *Mobility*).

Визначимо множини можливих значень за кожною ознакою.

Множина за ознакою середовища застосування $\{E\} = \{ pr \text{ (paved road)}$ – для застосування на дорогах з твердим покриттям та розміткою; **$dr \text{ (dirt road)}$** – для застосування на дорогах з ґрунтовим покриттям; **$rt \text{ (rough terrain)}$** – для застосування в умовах бездоріжжя; **$o \text{ (other)}$** – для застосування в інших умовах }.

Множина $\{E\}$ може містити значення: E_{pr} – платформи для застосування на дорогах з твердим покриттям та розміткою; E_{dr} – платформи для застосування на дорогах з ґрунтовим покриттям; E_{rt} – для застосування в умовах бездоріжжя; E_o – платформи для застосування в інших умовах. Платформи з комбінованим типом застосування можуть зазначаються як набір з $\{E\}$. Наприклад: $E_{\{pr,dr\}}$ – платформа для застосування по дорогах різних типів; $E_{\{dr,rt,o\}}$ – платформа застосування якої можливе в будь-яких умовах окрім доріг з твердим покриттям.

Множина за ознакою призначення $\{P\} = \{ t \text{ (transportation)}$ – транспортування, доставка, евакуація; **$p \text{ (patrol)}$** – патрулювання, спостереження; **$s \text{ (supply)}$** – забезпечення (несення корисного навантаження), **$o \text{ (other)}$** – інші }.

Множина $\{P\}$ може містити значення: P_t – платформи для транспортування і доставки вантажів, евакуації поранених; P_p – платформи патрулювання, спостереження, розвідки; P_s – платформи забезпечення, наприклад встановлення корисного навантаження різного призначення; P_o – платформи для іншого застосування, наприклад платформи для навчання/розваг, демонстраційних цілей, спеціалізованих місій тощо. Платформи комбінованого призначення зазначаються як набір з $\{P\}$. Наприклад: $P_{\{t,p\}}$ – платформа на для транспортування та патрулювання; $P_{\{p,a\}}$ – платформа для патрулювання та забезпечення встановлення додаткових модулів, наприклад бойових.

Множина за однакою автономності $\{A\} = \{ p \text{ (programmable)}$ – програмовані; **$rc \text{ (remote controlled)}$** – дистанційно керовані; **$a \text{ (autonomous)}$** – автономні; **$o \text{ (other)}$** – інші }.

Множина $\{A\}$ може містити значення: A_p – програмовані платформи, які мають можливість виконувати різноманітні завдання на основі заздалегідь визначених алгоритмів або програм; A_{rc} – автономні платформи, що дистан-



ційно керуються оператором; A_a – платформи, що можуть виконувати завдання без постійного контролю з боку людини, включаючи навігацію та прийняття рішень на основі сенсорних даних, штучного інтелекту та адаптивних систем для виконання складних завдань у різних середовищах; A_o – платформи на іншому способі керування, наприклад з керуванням за допомогою біоінтерфейсів. Платформи з комбінованою автономністю (гібридні) зазначаються як набір з $\{A\}$. Наприклад: $A_{\{rc,a\}}$ – платформа передбачає наявність дистанційного керування та автономного.

Множина за однакою мобільності $\{M\} = \{ w$ (wheel) – колісні; t (track) – гусеничні; l (leg) – крокуючі, o (other) – інші }.

Множина $\{M\}$ може містити значення: M_w – платформи на колісному ході; M_t – платформи на гусеничному ході; M_l – крокуючі платформи; M_o – платформи на іншому способі руху, наприклад шнековому. Платформи з комбінованим типом переміщення зазначаються як набір з $\{M\}$. Наприклад: $M_{\{w,t\}}$ – платформа на колісно-гусеничному ході; $M_{\{w,l\}}$ – платформа, переміщення якої забезпечується колесами та ногами.

Множина TR всіх технічних рішень наземних роботизованих комплексів являє собою декартовий добуток множин, а саме:

$$TR = E \times P \times A \times M,$$

де TR – технічне рішення; E, P, A, M , – множини визначені за правилами, що наведені вище.

Наведемо приклади ідентифікації двох вітчизняних і двох зарубіжних наземних роботизованих комплексів, відповідно до запропонованої системи.

Таблиця.

Приклади класифікації

Наземний роботизований комплекс	Класифікаційний опис
BRO-U6, Гусенична роботизована платформа [2]	$E_{\{pr,dr,rt\}} P_{\{p,s,o\}} A_{\{p,rc\}} M_{\{t\}}$
TerMIT – Tracked Modular Infantry Transporter [3]	$E_{\{dr,rt,o\}} P_{\{t,p,s,o\}} A_{\{p,rc\}} M_{\{t\}}$
THeMIS UGV Milrem Robotics [4]	$E_{\{dr,rt,rt\}} P_{\{t,p,s,o\}} A_{\{rc,a\}} M_{\{t\}}$
Rheinmetall Mission Master SP [5]	$E_{\{dr,rt,rt,o\}} P_{\{t,p,s,o\}} A_{\{p,rc,a\}} M_{\{w\}}$

Очевидно, що порівняння платформ буде достатньо простою задачею, коли вони рівні і буде ускладнюватись по мірі віддалення їхніх описів. Порівняння ідентичних за описом моделей має вестись відповідно до технічних параметрів, які дана класифікація не охоплює.



Висновки. Проблема наявності бази для порівняння різних наземних роботизованих комплексів має ґрунтуватись на подальшій деталізації класу «Мобільні роботи». Запропонована система класифікації «ЕРАМ», що ґрунтується на ознаках **Е** – середовища застосування, **Р** – призначення, **А** – автономності, **М** – мобільності. Для кожної ознаки визначена множина можливих значень та показано, що опис конкретного технічного рішення являє собою чотиривимірний декартовий добуток множин. Дія запропонованої системи проілюстрована на прикладах опису наявних вітчизняних і закордонних роботизованих комплексів.

Література

1. *Springer Handbook of Robotics*. Bruno Siciliano, Oussama Khatib (Eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016, 2227 p. ISBN: 978-3-319-32550-7 e-ISBN: 978-3-319-32552-1, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1>
2. BRO, “BRO U6: Гусеничні роботизовані платформи.” <https://bro.in.ua>.
3. Tencore, “TerMIT.” <https://www.tencore.com.ua/>
4. Milrem Robotics, “THeMIS.” <https://milremrobotics.com/defence/>.
5. Rheinmetall, “Mission Master SP” <https://www.rheinmetall.com/en/products/uncrewed-vehicles/uncrewed-ground-systems/mission-master-a-ugs/#anchor-mission-master-sp>

АНАЛІЗ ТА РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ СИЛ РІЗАННЯ В УМОВАХ ПРЕВЕНТИВНОГО НАГРІВУ

Пастернак С. М., аспірант, Ступницький В.В., д.т.н., професор
Національний університет «Львівська політехніка»

Вимірювання сил різання є одним із ключових методів контролю якості та оптимізації процесів механічної обробки матеріалів. У промисловій сфері постійно зростає потреба в надійних і точних вимірювальних системах, які б забезпечували отримання даних про навантаження на ріжучі інструменти під час точіння. Ця інформація необхідна для підвищення ефективності обробки, зниження витрат на інструменти та забезпечення стабільної якості готової продукції. Сили, що виникають під час різання, мають значний вплив на зношуваність інструментів, енергоспоживання та продуктивність, тому їхнє точне вимірювання стає критично важливим для різних галузей промисловості. Серед сучасних рішень вимірювання сил різання особливий інтерес викликають п'єзоелектричні та тензометричні датчики, які відзначаються високою чутливістю та точністю, дозволяючи вимірювати сили у трьох напрямках одночасно. Такі



датчики стають дедалі популярнішими для досліджень і промислових застосувань, зокрема, коли йдеться про обробку важкооброблюваних матеріалів, таких як: титан і суперсплави, що активно використовуються в авіакосмічній та енергетичній промисловості.

Основною метою цього дослідження є розробка й аналіз конструкцій устаткування, що використовується для визначення сил різання в умовах превентивного нагріву. Розроблений динамометр FlexiForce40X (Рис.1) для вимірювання сил різання, базується на механічній системі з тензометричними датчиками. Динамометр складається з основної несучої рами, яка закріплюється на місце різців у токарному станку, тензодатчиків для фіксації силових впливів, програмного забезпечення на базі платформи Arduino, що керує процесом збору та обробки даних, і відповідною системою тарування для калібрування вимірювальної системи.



Рис.1. Конструкція динамометра

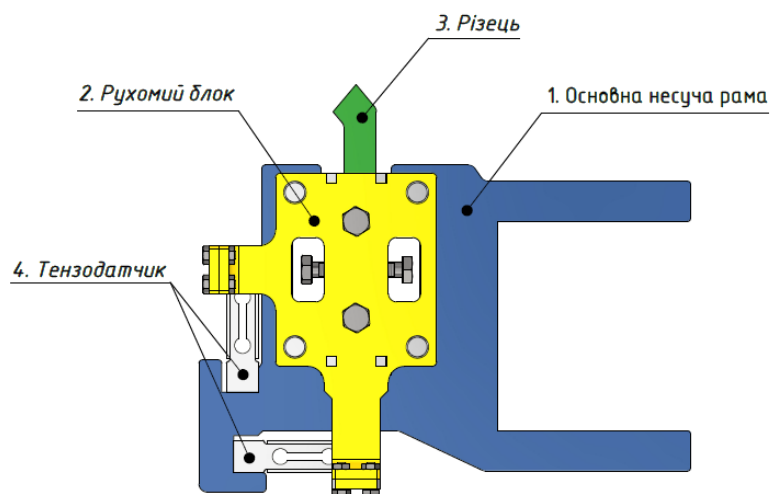


Рис.2. Устаткування у робот

Конструкція динамометра складається з декількох основних частин (Рис.2):

1. Основна несуча рама.
2. Рухомий блок.
3. Різець.
4. Тензометричні датчики.



Для збору і обробки даних із тензодатчиків використовується програмне забезпечення на базі платформи Arduino. Arduino – це відкрита платформа для розробки електронних пристроїв, яка дозволяє легко підключати датчики і працювати з ними за допомогою спеціального програмного коду. Arduino у цій системі виконує такі функції:

- Зчитування показників із тензодатчиків, підключених до аналогових або цифрових входів плати.
- Обробка сигналів і перетворення їх у числові значення сили різання.
- Виведення результатів на екран або передача даних на комп'ютер для подальшого аналізу.

Установка FlexiForce40X для вимірювання сил різання має значний потенціал завдяки її економічності, гнучкості, легкості в налаштуванні та адаптації для різних застосувань. Серед аналогічних пристроїв даний динамометр відрізняється низькою вартістю та простотою обслуговування, що робить його привабливим рішенням для виробничих підприємств, науково-дослідних лабораторій та інженерних установ.

Установку можна використовувати не тільки для вимірювання сил різання, але й для інших механічних навантажень. Наприклад, вона може бути адаптована для вимірювання навантажень у фрезерних верстатах, пресах або навіть для тестування матеріалів на розтяг чи стиск. Усі ці задачі можна реалізувати за рахунок відповідного налаштування датчиків та прошивки на платформі Arduino.

Висновки. Вимірювання сил різання є важливим елементом оптимізації механічної обробки матеріалів, що забезпечує високу якість обробки та зниження виробничих витрат. П'єзоелектричні та тензометричні системи є найбільш точними для обробки матеріалів із високим опором.

Розроблений динамометр на платформі Arduino демонструє ефективність вимірювання сил різання, навіть в умовах превентивного нагріву заготовок. Завдяки гнучкості налаштувань платформи Arduino динамометр можна адаптувати для різних діапазонів вимірювань, що робить його економічно привабливим для лабораторних досліджень і малих підприємств.

FlexiForce40X може інтегруватися в автоматизовані системи контролю, дозволяючи стежити за параметрами різання в режимі реального часу, що особливо важливо для сучасних виробництв. Крім того, його компактність, низькі витрати на обслуговування та гнучкість дозволяють адаптувати установку до різних умов обробки.



Загалом, даний динамометр є надійним та економічним рішенням, що може підвищити якість обробки, продовжити термін служби інструментів і знизити енергетичні витрати. Використання такого динамометра сприятиме розвитку автоматизованих систем контролю та відкриє нові можливості для обробки складних матеріалів.

Література

1. D. A. Stephenson, end J. S. Agapiou, «Metal Cutting Theory and Practice», Third Edition, CRC press, 947 p., 2018.
2. H. A. Kishawy, end A. Hosseini, *Machining Difficult-to-Cut Materials*, Cham: Springer International Publishing, 2019.
3. <https://www.kistler.com/INT/en/c/force-sensors/CG21-force-sensors/> Piezoelectric force sensors.
4. [https://www.pcb.com/ Force Sensors for Research & Development](https://www.pcb.com/Force%20Sensors%20for%20Research%20&%20Development)
5. A. Khairul, end Yohanes, «Rancang bangun dynamometer berbasis strain gauge dengan batang sensor tipe four square stalk untuk pengukuran gaya potong mesin bubut», *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*, vol. 3, no. 2, pp. 1-7, 2016.

ПЕРЕБІГ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОЦЕСУ ТА НАПРУЖЕНЬ В ЗОНІ РІЗАННЯ ПРИ ОБРОБЛЕННІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ Ti-6Al-4V

Пірогов Д.О., аспірант, Воронцов Б.С., д.т.н, професор

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

Різання металу є одним з основних методів виготовлення прецизійних компонентів, а вимоги до якості постійно зростають. Теплові явища відіграють значну роль в автоматизації технологічних процесів різання металів. Теплові процеси визначають температуру в зоні різання, впливають на характер пластичної деформації, перебіг утворення стружки, її усадку, опір різанню і мікроструктуру поверхневого шару. В результаті всі ці фактори впливають на швидкість зношування і термін служби інструменту.

Для моделювання процесу точіння та визначення перебігу температурного процесу було використано середовище Third Wave AdvantEdge В якості заготовки було обрано титановий сплав Ti-6Al-4V, ріжуча пластина та рекомендований режим обробки згідно з каталогом Sandvik Coromat. Дослідження проводились для трьох варіацій швидкості різання для швидкості 45 м/хв, 55 м/хв та 65 м/хв,



глибина різання та подача не змінювались 1 мм, та 0,2 мм/об відповідно. Експериментальна довжина оброблення 10 мм.

Визначено, що при збільшенні швидкості різання температура та швидкість деформації відповідно зростає. Температура поступово підвищується в міру обробки заготовки. Найвищі температури спостерігаються в зоні контакту стружки з вістрям інструменту, де найбільш ймовірним є налипання стружки, а також утворення кратерів і знос інструменту в зоні найвищих температур. Під час процесу різання температура підвищується, що викликає термічне розм'якшення поверхні заготовки, яке знижує міцність матеріалу на різання і полегшує механічну обробку. Як показано на рис. 1, температура зростає зі збільшенням швидкості різання, але характер і площа нагріву залишаються незмінними [1].

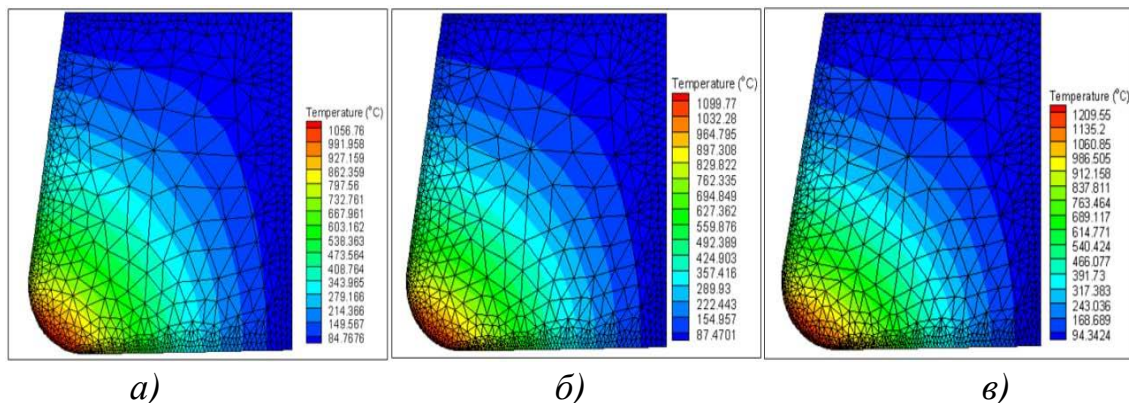


Рис. 1. Локалізація температури на вістрі ріжучого інструменту:
а – $V=45$ м/хв, б – $V=55$ м/хв, в – $V=65$ м/хв

Вищі швидкості різання підвищують температуру і ефект термічного розм'якшення оброблюваного матеріалу. Тому стружка починає відділятися від заготовки, утворюючи переривчасту стружку або стружку надлому (рис. 2, б) при високих швидкостях різання і суцільну стружку (рис. 2, а) при низьких швидкостях різання [1].

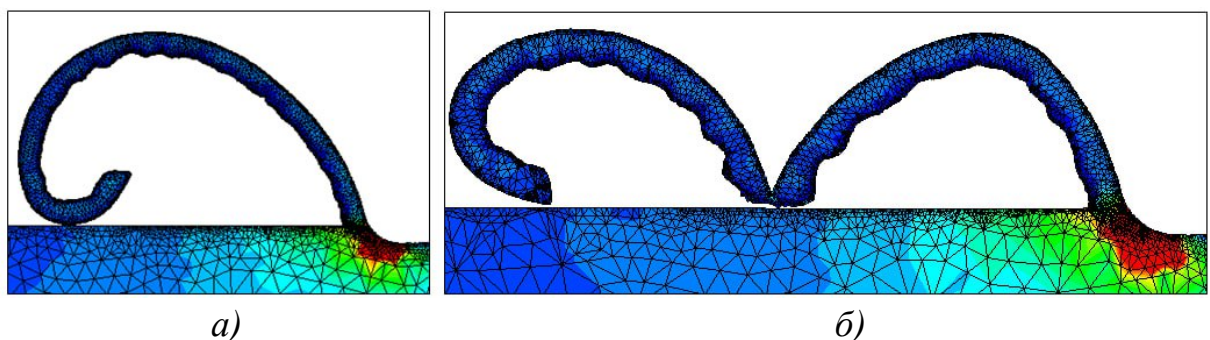


Рис. 2. Утворення стружки:
а – уцільна; б – переривчаста/надлому

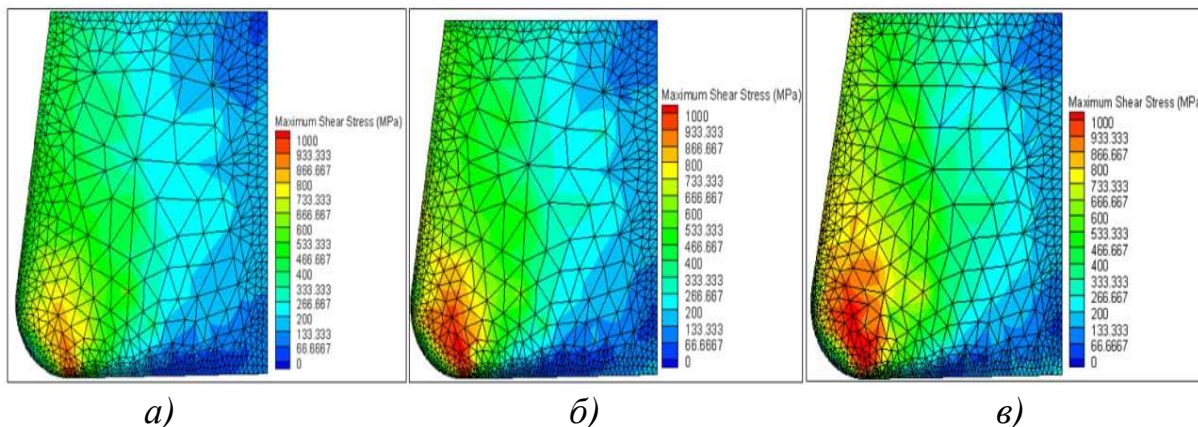


Рис. 3. Локалізація напружень на вістрі ріжучого інструменту:
а – $V=45$ м/хв; б – $V=55$ м/хв; в – $V=65$ м/хв.

Напруга на ріжучому інструменті розташована на передній стороні пластини на глибині 1 мм від ріжучої кромки і її зміна пов'язана зі збільшенням швидкості різання, вищі швидкості різання призводять до вищих напружень. Максимальне значення напруги не змінюється, але характер і площа порізу збільшується, як показано на рисунку 3 [1].

Література

1. Пірогов, Д. О., Воронцов, Б. С. (2024). Аналіз впливу швидкості різання на температуру й сили різання при точінні заготовок із титанового сплаву TI-6AL-4V. *Технічні науки та технології*, 2 (36), 65–73. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2\(36\)-65-73](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-2(36)-65-73)

ЗАХИСТ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ВІД КОРОЗІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОКРИТТІВ

Посвятенко Н.І., к.т.н., доцент

Національний транспортний університет

Процеси корозії є одними з основних, що впливають на вихід із ладу деталей машин і металоконструкцій. За даними інформаційних джерел близько 200 000 т обладнання стає непридатним до експлуатації через вплив корозії, за мінімальними оцінками сума корозійних втрат в США складає біля 70 млрд. дол. на рік [1]. За характером корозійного руйнування розрізняють загальну і місцеву корозії.

Одним з найбільш ефективних методів захисту поверхонь від корозії є нанесення спеціальних покриттів. Найбільш розповсюджені способи захисту –



наплавлення і напилення з використанням різноманітних джерел енергії [1–5]. Максимальна ефективність захисних покриттів відмічена при експлуатації виробів в особливо несприятливих умовах, таких як агресивні промислові забруднення і середовища, хімічні засоби, вплив високих температур, а для засобів транспорту небезпечним є ще і обледеніння доріг у зимовий час, що викликає корозію основних деталей машин і конструкцій.

Успішному використанню тієї чи іншої передової технології сприяє систематизована інформація про можливості, переваги і недоліки того чи іншого способу нанесення захисних покриттів [1–3, 5]. То ж коротко розглянемо і про аналізуємо їх у даній роботі.

При виборі покриття мають бути враховані такі фактори як, призначення виробу, деталі, конструкції; умови експлуатації; призначення покриття і його властивості.

Залежно від виду використаної для створення покриттів енергії розрізняють газополуменеву, електродугову, детонаційну, плазмову, лазерну технології [1, 3, 4].

Електротермічні процеси наплавки і напилення покриттів використовують завдяки їх перевагам. Для наплавлення це:

- можливість нанесення металевого покриття великої товщини, що важливо при відновленні деталей зі значним зношуванням;
- висока продуктивність процесу;
- відносна простота використовуваного обладнання для виконання робіт, що можуть здійснюватись зовні приміщень;
- відсутність обмежень на розміри поверхонь, що наплавляються;
- можливість нанесення зносостійкого покриття на основний метал будь-якого складу (якщо необхідно, то можуть попередньо наносити підшарок, якій поліпшую схоплюваність покриття).

В той же час необхідно звертати увагу і на недоліки, такі як: погіршення властивостей наплавленого шару через потрапляння елементів основного металу; нерівномірність властивостей напиленого шару; деформація виробу викликана питомою енергією наплавлення; складність наплавлення дрібних виробів складної форми.

В той же час напилення принципово відрізняється від процесу наплавлення покриттів відсутністю оплавлення поверхні основного матеріалу деталі. Електротермічна технологія напилення забезпечує наступні переваги.

- Можливість нанесення покриттів на вироби з будь-якого матеріалу (метал, скло, фаянс, дерево, фарфор, тканина, картон). Цієї переваги немає жоден інший спосіб поверхневої обробки.



– Відсутність обмежень по розміру виробів, що напилюються (обмеження можуть виникнути тільки для металопокриттів, що наносяться зануренням у розплав через габарити ванни).

– Можливість нанесення значного шару покриття (більш ніж 1 мм).

– Широкий вибір матеріалів для напилення. Можуть використовуватись як різноманітні метали, так і сплави, і сполуки металів з оксидами і т.п. При чому є можливість нанесення багат шарових покриттів з різноманітними матеріалами.

– Невелика деформація виробів під впливом напилення.

– Простота технологічних операцій, відносно невелика трудомісткість при високій продуктивності.

– Нескладна конструкція обладнання для здійснення технології.

Основними недоліками даної технології є: невисока ефективність нанесення покриттів на дрібні деталі через низький коефіцієнт використання напиленого матеріалу; шкідливі умови праці операторів як при підготовці до напилення, так і під час виконання самого процесу (виділення диму, вплив аерозолей і т.і.)

Газополуменеве наплавлення і напилення покриттів, не дивлячись на подібність до електротермічного нанесення матеріалу, мають свої особливості, що дають їм переваги, наприклад: незначне проплавлення основного металу; можливість наплавлення дрібних деталей складної форми; зниження небезпеки виникнення тріщин, тому що процес наплавлення передбачає попередній підігрів і наступне повільне охолодження виробу; низька вартість і компактність використовуваного обладнання. Одним із суттєвих недоліків цієї технології нанесення покриття є низька продуктивність при наплавленні масивних деталей.

Використання як джерело енергії лазерний промінь дозволяє розробити широкий ряд способів поверхневої обробки, легко регулювати структуру поверхневого шару і його властивості, такі, як твердість, зносостійкість, а також геометричні розміри оброблених зон. Транспортування випромінювання на значні відстані і підвід його з допомогою спеціальних оптичних систем у важкодоступні місця дозволяє проводити обробку в тих випадках, коли інші способи застосувати не можливо. Це дозволяє значно розширити коло технологічних операцій по обробці різних деталей машин.

Недоліки лазерної технології отримання захисних покриттів – значна вартість обладнання; лазерне загартування відрізняється низькою продуктивністю, малою глибиною обробки і нерівномірною поверхневою твердістю.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновки про перспективність застосування розглянутих способів наплавлення і напилення як захисних покриттів від корозії для деталей машин і конструкцій. Захисні функції гарантуються



тільки в тих випадках, коли покриття мають необхідні показники якості, що характеризуються складом, структурою, твердістю, внутрішніми напруженнями покриттів, їх пористістю, товщиною і міцністю зчеплення з виробом та відсутністю тріщин. Показники якості залежать від правильного вибору матеріалу покриття, режимів нанесення і їх стабільністю.

Література

1. *Інженерія поверхні* / Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. Київ: Наукова думка, 2007. 558 с.
2. Канарчук В., Посвятенко Е., Лопата Л. Шляхи удосконалення методів інженерії поверхні деталей машин // *Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdow samochodowych I maszyn roboczych samojedznych. „Sakon-2000” Rzeszow, 2000. С.139–144.*
3. Посвятенко Н.І., Посвятенко Е.К. Становлення техніки та технології методів інженерії поверхні деталей машин на початок ХХ століття // *Інженерія поверхні і реновація виробів: Матеріали 11-ї міжнар. наук.-техн. конф. 23-27 травня 2011 р., м. Ялта. – К.: АТМ України, 2011. – С.167–168.*
4. Посвятенко Е.К., Ляшенко Б.А., Посвятенко Н.І. Модифікування деталей засобів транспорту термічними методами інженерії поверхні // *Інженерія поверхні і реновація виробів: Матеріали 18-ї міжнар. наук.-техн. конф., 4 – 8 червня 2018р., м. Свалява, Київ: АТМ України, 2018. С.126–130.*
5. Посвятенко Е.К., Посвятенко Н.І. Захисні газу у практиці отримання покриттів напиленням // *Інженерія поверхні і реновація виробів: Матеріали 15-ї міжнар. наук.-техн. конф., 01–05 червня 2015р., К.: АТМ України, 2015. С. 126–134.*

ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ У ВИГОТОВЛЕННІ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ ТА ІНШИХ ЕЛЕМЕНТІВ МІЛІТАРНОГО НАПРЯМКУ

Проданчук О.О., аспірант

Національний університет «Львівська політехніка»

Упродовж останніх десятиліть композитні матеріали здобули широке визнання в авіаційній, космічній, автомобільній та інших високотехнологічних галузях завдяки своїй малій вазі, високій міцності та стійкості до корозії. Водночас, застосування подібних матеріалів у виробництві вогнепальної зброї й інших військових елементів досі залишається викликом. Основні проблеми пов'язані з забезпеченням належної надійності й безпеки під час експлуатації, технологічними особливостями виробництва, а також необхідністю проведення



комплексних випробувань на витривалість та термостійкість. Крім того, складність прогнозування поведінки новітніх композитів у екстремальних умовах бойового застосування вимагає детального наукового обґрунтування й розроблення нормативної бази. З огляду на зростаючі потреби оборонної сфери та швидкий розвиток технологій, аналіз цих проблем та пошук інноваційних рішень стають важливим завданням як для конструкторів, так і для дослідників у даній галузі [1].



Рис.1. Приклади композитних виробів оборонного призначення

Основними композитними матеріалами, що застосовуються у виробництві продукції оборонної тематики є РА (поліамід), РС (полікарбонат), РОМ (поліацеталь) та Бакеліт. Кожен із них має свої особливості [2].

Поліамід (РА) вирізняється високою міцністю та зносостійкістю, добре витримує механічні навантаження і є відносно легким у переробці, проте потребує контролю вмісту вологи, оскільки гігроскопічність може впливати на розміри деталей та її характеристики.

Полікарбонат (РС) характеризується чудовою ударостійкістю, термостійкістю та прозорістю (що може бути корисним при виготовленні захисних елементів), однак вимагає ретельного контролю температурного режиму в процесі лиття для запобігання внутрішнім напруженням.

Поліацеталь (РОМ) має високу твердість, низький коефіцієнт тертя й добру стабільність розмірів, що є важливим для деталей зі складною геометрією та підвищеними вимогами до точності.

Бакеліт, як термореактивна смола, забезпечує високу термостійкість і електроізоляційні властивості, проте через жорсткість і крихкість вимагає уважного підбору параметрів формування та часто використовується для виготовлення



руків'їв, корпусів та інших компонентів, що мають витримувати високу температуру чи механічне навантаження.

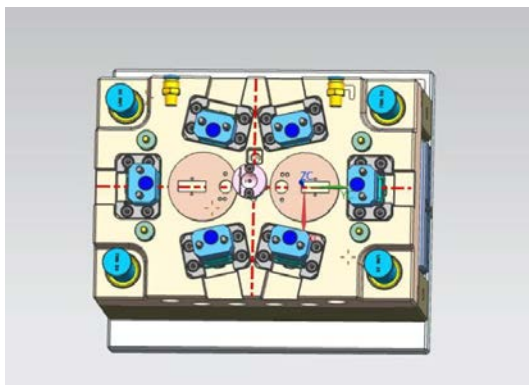


Рис. 2. Конструкція прес-форми

Основними спільними проблемами для виготовлення виробів з даних матеріалів методом лиття під тиском можна назвати:

1. Складність виготовлення прес-форм. Для лиття зазначених матеріалів потрібно використовувати високоякісні сталі підвищеної міцності з значними показниками стійкості до корозії. Це потрібно для забезпечення високих показників зносостійкості і подовження часу експлуатації прес-форми без втрати якості кінцевого виробу.

2. Швидке зношування пари шнек циліндр. Так як матеріали що використовуються в оборонній промисловості потребують високих температур плавлення, часто бувають агресивними та призводять до інтенсивного зношування поверхні шнека та циліндра.

3. Потреба інтенсивної передвиробничої підготовки сировини, дотримання суворих вимог зберігання грануляту.

4. Ускладнене управління усадкою та деформаціями: описані матеріали по-різному поведуться під час охолодження у формі, тому потрібна оптимізація конфігурації прес-форми та параметрів охолодження для запобігання викривленням і тріщинам.

Вирішення описаних проблем можливе виключно з застосуванням комплексного підходу, починаючи від проектування прес-форми до встановлення температурних режимів при безпосередньому процесі лиття.

Сировина повинна зберігатись в герметичній тарі, а перед подачею до станка попередньо просувуватись. Важливо зазначити, що для матеріалів, які застосовуються в оборонній промисловості просушування в класичному бункері потоком гарячого повітря не дасть належних результатів. Натомість варто



використовувати сушильні установки з подачею попередньо осушеного повітря (dehumidifying dryer), або сушильні камери.

Моделювання конструкції прес-форм необхідно проводити з застосуванням симуляторів процесу лиття та попереднім виконанням симуляцій імітаційного процесу різання [3], щоб підібрати оптимальні режими обробки з максимальною ефективністю. Також необхідно врахувати можливість додавання в конструкцію змінних елементів у зонах найінтенсивнішого зношування.

Модернізація конструкції самого термопластавтомата хоч і потребує значних додаткових витрат, але суттєво підвищує ефективність його роботи. До прикладу, при роботі з склонаповненим РА варто встановити зміцнені біметалеві шнек та циліндр. Така зміна не тільки дозволить подовжити термін експлуатації обладнання, але й вплине на якість лиття. Також варто враховувати саму конструкцію шнека.

Література

1. *International plastics handbook* / T. A. Osswald et al. München : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2006. URL: <https://doi.org/10.3139/9783446407923>.
2. *Malloy R. A. Plastic part design for injection molding*. München : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2010. URL: <https://doi.org/10.3139/9783446433748>.
3. *Stupnytsky, V., Prodanchuk, O., Stupnytska, N. Simulation Studies of High-Speed Machining. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Peraković, D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 332-344.*



ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОЗКРОЮ КРЕМНІЄВИХ ЧИПІВ ВОДО-КРИЖАНИМ ВПЛИВОМ

¹Саленко О.Ф., *д.т.н., професор*, ²Орел В.М., *к.т.н.*,

¹Гаврушкевич А.Ю., *к.т.н.*, ³Габузян Г.В.

¹*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» ім. І.Сікорського*

² *Харківський національний університет внутрішніх справ, Кременчуцький льотний коледж*

³ *Фаховий коледж Кременчуцького національного університету ім. М.Остроградського*

Традиційні методи різання листових матеріалів і напівпровідникових пластин, які використовують в металообробній промисловості, не завжди можуть бути використані для розділення напівпровідникових пластин з сформованими інтегральними структурами (функціональними схемами), так як напівпровідникові матеріали та діелектричні підкладки мікročіпів (кремній, германій, арсенід галію, карбід кремнію, сапфір, ситал) відрізняються високою міцністю і крихкістю [1,2]. Напівпровідникова пластина, яка поступає на операцію розділення і акумулює в себе значні трудові і матеріальні затрати, має високу вартість, а традиційне механічне різання супроводжується великими втратами високовартісного напівпровідникового матеріалу [3]. Ці обставини накладають високу відповідальність на операцію розділення і визначають їй важливе місце у всій технологічній ланці виробництва.

Струминні методи оброблення знаходять все більше застосування у виробничій практиці для виконання операцій різання, полірування, шліфування, очищення різних заготовок від поверхневих забруднень і захисних плівок тощо.

При цьому багато дослідників сходяться на думці [4], що струминні методи розкрою є досить ефективними у порівнянні із іншими відомими, як то лазерним скрайбуванням термомеханічним,

Такі процеси володіють широкими технологічними можливостями; струмין рідини постає ідеалізованим точковим інструментом або інструментом інтегральної дії, який, при зміні умов його формування, здатен здійснювати вибірко́вий керований вплив на оброблювані заготовки, формуючи поверхневий шар або виконуючи формоутворення в цілому.

Серед значної кількості процесів, що базуються на використанні струменя рідини як ефективного носія кінетичної енергії окрему долю складають процеси



водо-крижаного різання. Зазвичай, на основі узагальнень [3] Kiyohashi H., Handa K Máša, V., Kuba P. можна відзначити, що внаслідок сполучення двох потоків – рідинного, який витікає крізь сопловий насадок, та кріогенного (наприклад, рідкого азоту, що надходить до змішувальної камери крізь дроселюючу шайбу), відбувається формування потоку дрібних крижинок, які розганяються водою та, запасавши кінетичну енергію, прямують до поверхні, де і здійснюють роботу руйнування.

При використанні водокрижаного різання його ефективність є вищою порівняно зі струминним, хоча і меншою за гідроабразивний спосіб розкрою. Причиною є те, що крижинки мають значно меншу твердість, порівняно з абразивними частинками, і виконують меншу роботу руйнування.

Процес формування крижинок та їх взаємодія зі струменем води надзвичайно складний. Це обумовлюється наступними аспектами: розподіл швидкостей потоку в різних точках поперечного перетину струменя нерівномірний; за довжиною струменя характер розподілу швидкостей у перетині змінюється з виокремленням так званого ядра (рис.1 за [4]); з віддаленням від сопла компактність струменя порушується: вона губить свою початкову циліндричну форму та поступово переходить у потік дрібних крапель; при русі крижинок уздовж калібрувального каналу вони постійно удараються між собою та об стінку каналу. Механізм утворення водокрижаного струменя: робоча рідина високого тиску з надзвуковою швидкістю витікає з сопла 5. Проходячи через змішувальну камеру 3, струмінь рідини 4 створює розрідження і охолоджується рідким азотом, що надходить до камери через штуцер 6. Виконавши охолодження, азот активно випаровується, внаслідок чого в камері зростає тиск. За час прямуювання до каналу 2 калібруючої трубки 1 частинки води перетворюються на кригу, і до каналу потрапляють вже мікрокрижинки, які розганяються водяним потоком і формують різальний струмінь.

Внаслідок цих явищ не всі частки однаково взаємодіють із струменем: одні проникають до ядра потоку і їх швидкості при цьому швидко зростають; інші захоплюються межовим шаром, швидкість якого відносно невелика, і тому швидкість та енергія цих часток теж будуть малими. Окрім того, ці частки будуть втрачати енергію із-за ударів по стінках калібруючого каналу.

Раніше виконані дослідження показали, що явища, що відбуваються в ряді систем верстата, не є сталими, самі елементи зазнають пошкоджень, внаслідок чого умови взаємодії швидкоплинного двофазного потоку з перепорою – оброблюваним тілом – різко змінюється. Це веде до погіршення якості обробки, і навіть до її повного унеможливлення. Отже, проблемою надійності методу



струминного різання напівпровідникових пластин є зменшення втрат від браку на основі прогнозування надійності та поліпшення стабільності процесу технічними і технологічними засобами.

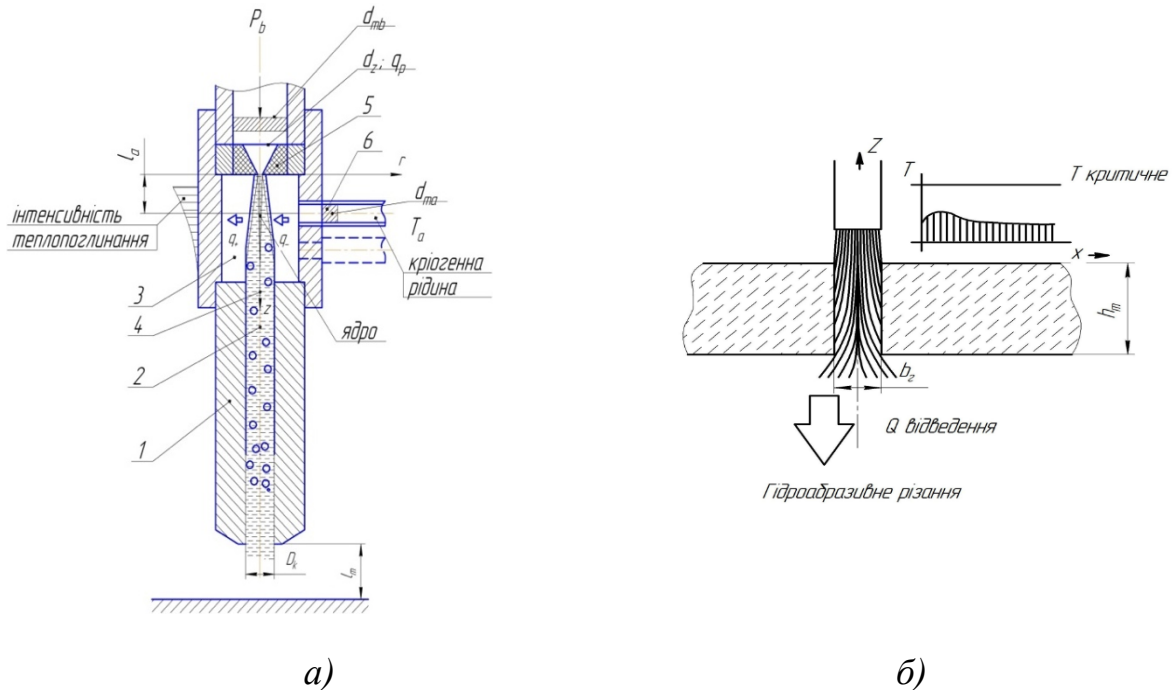


Рис. 1. Схема водокрижаного різання (а) та формування борозенки різа (б)

Нами встановлено, що нормальний хід технологічного процесу струминного різання порушують випадкові (раптові) та повільно протікаючі явища. Явища випадкового характеру характеризуються тим, що їхній прояв завжди супроводжується певною невизначеністю, і про наслідки таких явищ можна говорити лише виключно як про ймовірність отримання того чи іншого показника системи, і, як наслідок, конкретного вихідного показника – показника якості обробки. Відповідно до [5] повільно протікаючі явища мають квазістабільний, довготривалий характер і можуть бути описані функціональними закономірностями, виявленими на основі статистичних спостережень за процесом або на основі теоретичного аналізу перетворень, що протікають при його реалізації.

У загальному вигляді картина настання параметриної відмови та утворення браку відповідає рис. 2.

Тут позначено: $P(T)$ – імовірність відмов; А,В,С – розподіл імовірностей виходу з ладу системи після періоду експлуатації T_{min} ; τ – плинний час; $T_{раптове}$ – час настання раптової відмови. $T_{ресурсу}$ – повний час (враховує можливі ремонти і повернення до робочого стану); T_{max} – максимальний час до настання відмови.

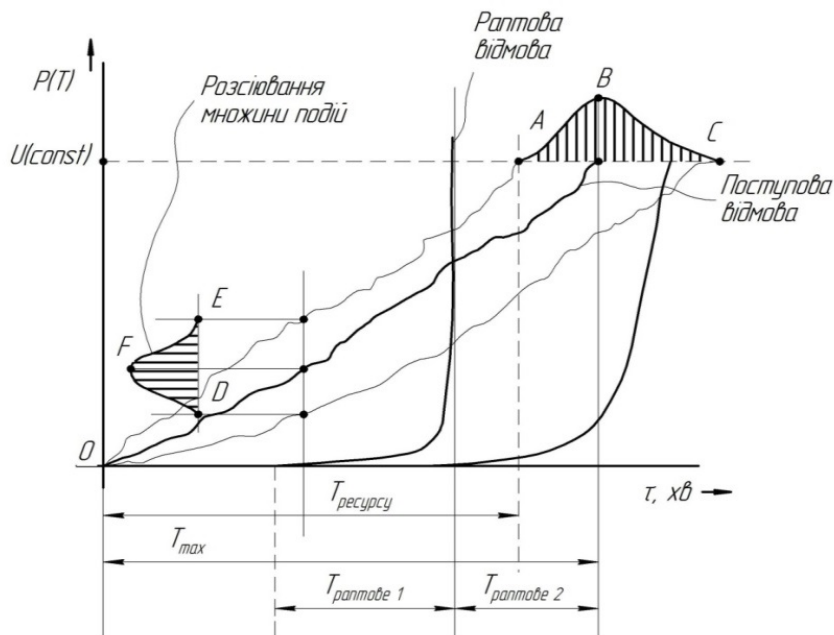


Рис. 2. Модель настання відмови та виникнення браку при розкроюванні мікросхем

Тож забезпечення надійності розкрою кремнієвих чипів водо-крижаним впливом вбачається в ідентифікації наведеної ймовірнісної моделі на основі аналізу формування водо-крижаного потоку та закономірностей його взаємодії з оброблюваною пластинкою.

Література

1. Hammond, M. L., "Moore's Law: The First 70 Years," *Semiconductor International*, 2004.
2. Intel, Inc., <http://www.intel.com/education/makingchips>.
3. Elliott, D., *Microlithography Process Technology for IC Fabrication*, pp. 311–350, McGraw-Hill, New York, 1986.
4. Jerman, M. et al. Thermal aspects of ice abrasive water jet technology, *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7, pp. 1–9
5. Особливості моделі надійності гідроабразивного різання для сучасних композиційних матеріалів. – В.О. Дудюк, П.П. Мельничук. – Вісник КрНУ. – 2016.



ВПЛИВ ЗМІНИ НАВАНТАЖЕНЬ НА ТАЗОВУ КІСТКУ ЛЮДИНИ ВНАСЛІДОК ЕНДОПРОТЕЗУВАННЯ КУЛЬШОВОГО СУГЛОБУ

Сонечь О.В., аспірант, Воронцов Б.С., д.т.н., професор

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Як відомо з медицини, кістка постійно адаптується до впливу зовнішніх чинників. Якщо кістка отримує навантаження вона перебудовується на рівні мікроструктури, завдяки біохімічним процесам стає міцнішою. І навпаки, якщо навантажень немає або вони недостатньо великі, то кісткова тканина стає менш міцною, більш крихкою. Відбувається зниження кісткової маси в одиниці об'єму та порушення мікроархітектури, що призводить до підвищення крихкості кісток.

Модулі пружності кісткової тканини та титанового сплаву, а зокрема $Ti6Al4V$, який є на сьогодні найбільш використовуваним матеріалом в цьому напрямку, дуже суттєво відрізняються. Так, модулі пружності кортикальної кістки, виміряні в різних джерелах, коливаються в діапазоні від 4 до 22 ГПа, губчастої кісткової тканини від 0,05 до 1,5 ГПа і більше [1, 2, 3, 4]. А для таких найбільш розповсюджених матеріалів, з яких виготовляють імпланти, як титановий сплав $Ti6Al4V$, нержавіюча сталь 316L та кобальт-хромовий сплав $CoCrMo$ ця характеристика лежить в межах приблизно від 112 до 240 ГПа відповідно. [5,6]

Для оцінки патологічної зміни властивостей кістки важливим є також характер структурно-функціональних порушень та ступінь дезорганізації елементів її мікроструктури. Всі ці параметри взаємопов'язані й визначають якість кістки. На нинішньому рівні теоретичних уявлень про будову і функції кісткової тканини термін «якість кістки» слід розглядати як збірне, інтегральне поняття. На сьогодні поки що немає однозначної класифікації кісткової тканини. [7]

Оскільки кожен протез є індивідуальним унікальним виробом, наразі немає можливості науково обґрунтовувати форму кожної деталі з якої складається протез. Це стосується як ніжки, так і чашки. У зв'язку з цим необхідно виділити спільну характеристику в геометрії деталі, утворити критерій, за яким можна було б оптимізувати спроектовану форму, базуючись на підґрунті проведених наукових досліджень. До складових частин цілого ендопротезу кульшового суглобу входять ніжка, полімерний вкладиш голівка та чашка.

Як було сказано раніше – кісткова тканина адаптується під навантаження. Однією з основних причин відмови імплантату є його асептичне розхитування



через зниження щільності кісткової тканини, що викликано недостатнім навантаженням, яке діє на оточуючу ендопротез кістку, оскільки кісткова тканина утворюється та закріплюється в напрямку ліній дії механічних напружень [8]. Цей процес називається «екрануванням напружень» (Stress shielding), виникнення його обумовлене тим, що для виготовлення імплантатів використовуються метали і сплави, модулі пружності яких значно перевищують модулі пружності кісткових тканин, що призводить до виникнення дотичних напружень в зоні контакту між кісткою та її замінником [9].

З цієї причини важливим є питання дослідження розподілу та передачі навантажень від кінцівки, через деталі протезу в кістку. Чашка кульшового ендопротезу контактує безпосередньо із тазовою кісткою в яку власне і кріпиться. Зміна градієнту навантажень на тазову кістку може негативно суттєво вплинути на однорідність структури кісткової тканини через ефект екранування і як наслідок правильну роботу всього опорно-рухового апарату в подальшому в продовж всього терміну експлуатації протезу.

Література:

1. Кадурін О. К., Вирва О. Є., Леонтьєва Ф. С. Біофізичні властивості компактної кісткової тканини. — Х.: Прапор, 2007.— 136 с.
2. Arendts F.J., Sigolotto C. Mechanical characteristics of the human mandible and study of in vivo behavior of compact bone tissue, a contribution to the description of biomechanics of the mandible-II // *Biomed Tech.* 1990 35(6):123-30.
3. Misch C.E., Qu Z, Bidez M.W. Mechanical properties of trabecular bone in the human mandible: implications for dental implant treatment planning and surgical placement. *J Oral Maxillofac Surg.* 1999 Jun; 57(6):700-6;
4. Schwartz-Dabney C.L., Dechow P.C. Variations in cortical material properties throughout the human dentate mandible // *American journal of physical anthropology* 120:252–277 (2003).
5. Костенко, А. О., Тимошенко, О. В., & Коваль, В. В. (2020). Дослідження механічних характеристик матеріалу отриманого методом 3д друку. *Інновації молоді в машинобудуванні*, (2), 49-56.
6. Geetha, M., Singh, A.K., Asokamani, R., Gogia, A.K. (2009) Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants: A review. *Progress in Materials Science*, 3 (54), 397–425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.06.004>
7. Бобир, М. І. (2024). Комп'ютерно-інтегрована технологія проектування та виготовлення індивідуальних ендопротезів: Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 3 квітня 2024 року. *Вісник Національної академії наук України*, (6), 62-68.
8. Kuibida V., Kokhanets P. and Lopatynska V. (2021) Mechanism of strengthening the skeleton using plyometrics. *Journal of Physical Education and Sport*, 3 (21), 1309–1316. DOI: <https://doi.org/10.7752/jpes.2021.03166>
9. Arabnejad, S., Johnston, B., Tanzer, M., Pasini, D. (2017) Fully porous 3D printed titanium femoral stem to reduce stress-shielding following total hip arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Research*, 8 (35), 1774–1783. DOI: <https://doi.org/10.1002/jor.23445>



АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРОМИСЛОВИХ ПОДРІБНЮВАЧІВ

Фик С.В., аспірант

Національний університет «Львівська політехніка»

Подрібнювальна техніка є важливим обладнанням сферах рециркуляції, деревообробки, металопереробки та будівництва. Її актуальність стрімко зростає через збільшення обсягів відходів та потребу в ефективних рішеннях для їх утилізації. Особливо гостро ця потреба проявляється на українському ринку. Наслідки руйнувань, спричинених повномасштабним вторгненням росії, створили безпрецедентний обсяг будівельного сміття, металевих конструкцій та інших відходів, які потребують переробки. У таких умовах подрібнювальна техніка стає не лише економічно вигідним рішенням, а й важливим елементом у відновленні країни.

Доповідь присвячена аналізу конструктивних особливостей двохвальних подрібнювачів (промислових шредерів), які довели свою ефективність у роботі з великогабаритними та різномірними матеріалами. Особливу увагу приділено їх ключовому елементу — подрібнюючим валам, конструкція яких є визначальною для забезпечення продуктивності та довговічності даного типу обладнання.

Подрібнюючі вали є найбільш важливим елементом шредерів. Від їхньої конструкції, матеріалів і точності виготовлення залежить ефективність подрібнення, продуктивність машини та її довговічність. Ці компоненти мають витримувати надзвичайно високі механічні навантаження, знос від абразивних матеріалів і працювати в умовах постійного тертя.

Сучасні виробники подрібнювальної техніки, такі як Arjes, Hammel, Lindner і Pronar, зосереджують значні ресурси на розробці подрібнюючих валів. Більшість із них використовують повністю зварну конструкцію, де несучі елементи виготовляються зі сталей класу S355, а ріжучі елементи — зі спеціальних зносостійких сталей, таких як HARDOX 400/450/500 або Creusabro. Ці матеріали забезпечують високу стійкість до абразивного зносу і дозволяють подрібнювачам працювати навіть з найскладнішими матеріалами, такими як металеві відходи чи будівельне сміття.

Однак зварні конструкції мають свої недоліки: вони складні у виготовленні, потребують високої точності зварювання, а їх виробництво займає багато часу. Це позначається на собівартості, яка залишається однією з найбільших проблем у галузі.



Кожен виробник підходить до вирішення цих викликів по-своєму. Наприклад, Arjes впроваджує модульні конструкції валів, що дозволяють швидко змінювати окремі ріжучі сегменти, зменшуючи час обслуговування. Hammel використовує спеціально розроблену геометрію ріжучих елементів, яка мінімізує застрягання матеріалу та покращує продуктивність. Lindner робить акцент на термообробці і вдосконаленні зносостійких покриттів, щоб подовжити термін служби валів.

Проте жодна з цих інновацій не вирішує повністю проблему високої вартості виготовлення та тривалого часу виробництва. Саме тому пошук нових рішень у виробництві подрібнюючих валів залишається одним із ключових завдань для галузі.

Українська компанія KIBIШСЕРВІС активно займається розробкою новітньої технології виготовлення подрібнюючих валів із використанням зварювання литих сегментів. Ця технологія має потенціал кардинально змінити підхід до виробництва валів, зменшивши їхню собівартість, час виготовлення та підвищивши надійність конструкції.

Ідея полягає в тому, щоб замінити складні багатокomпонентні зварні конструкції валів на рішення, де більші сегменти виготовляються шляхом лиття, а з'єднання між ними виконуються за допомогою мінімальної кількості зварних швів. Це не лише спрощує процес виробництва, але й зменшує кількість потенційно слабких місць у конструкції. Литі сегменти мають підвищену міцність і можуть бути оптимізовані за формою, щоб забезпечити максимальну ефективність подрібнення.

Водночас, поки ця технологія перебуває у стадії активної розробки, KIBIШСЕРВІС продовжує виготовляти композитні зварні вали. Завдяки вдосконаленням у конструкції, технологічному процесі зварювання та складання, а також підбору матеріалів, компанії вдалося суттєво покращити продуктивність і надійність валів.

Нові конструкції мають оптимізовані ріжучі елементи, що підвищує ефективність подрібнення навіть у випадку найскладніших матеріалів, таких як будівельне сміття чи металеві конструкції. Крім того, вдосконалені технології складання і зварювання зменшують час виробництва, підвищують стабільність швів та їх стійкість до навантажень.

Таким чином проблемно-орієнтований вибір конструктивних та технологічних рішень подрібнюючих валів є важливою науково-прикладною задачею утилізаційного сегменту промислового ринку праці. Інноваційні рішення, такі як розробка технології зварювання литих сегментів, створюють нові



можливості для зменшення витрат і часу виготовлення, а також підвищення надійності техніки.

Перспективи розвитку подрібнювальної техніки полягають у впровадженні автоматизованих систем, використанні новітніх матеріалів і підходів до дизайну, які дозволять підвищити продуктивність та енергоефективність обладнання. Завдяки таким рішенням, українські виробники можуть не лише конкурувати на світовому ринку, але й займати лідерські позиції на світовому ринку виготовлення промислових шредерів.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСЬОВИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ, ЯКІ ВИНИКАЮТЬ ПРИ НАКАТУВАННІ РІЗЕЙ

Четвержук Т.І., к.т.н., доцент, Редько Р.Г., к.т.н., доцент.,

Полінкевич Р.М., к.т.н., доцент.

Луцький національний технічний університет

Зовнішні різі у машинобудівному виробництві будь-якого промислового підприємства виготовляються методами пластичного деформування (накатуванням) та різанням з використанням різних способів. Накатування зовнішніх різей є одним з найбільш прогресивних високопродуктивних технологічних методів, що дозволяє отримувати різі високої якості та підвищеної міцності [1]. Серед різноманіття способів метод накатування різей різенакатними роликами або головками (рис.1) тангенціального типу відносно новий і мало досліджений.



а)



б)

Рис. 1. Процес накатування зовнішньої різі (а), різенакатні ролики (б).



Особливістю накатування зовнішніх різей роликами є використання пари роликів, на одному з яких на периферії є ділянки з затилувальним різьбовим профілем. Другий ролик виконується циліндричним, конструкція якого нічим не відрізняється від конструкції звичайних роликів, крім паза під шпонку.

Для накатування різей на периферії робочої частини ролика (рис.2) виконуються три ділянки: забірна, калібруюча і скидаюча. Для забезпечення попадання заготовки в зону накатування у ролика виконуються пази. Для проведення цієї роботи було відібрано діючі креслення виробництва ТОВ «БАС МОТОР» та проаналізовано конструкції різенакатних роликів. В результаті зроблено деякі висновки.

Забірна частина виконує основну роботу в процесі накатування різі. Саме на ній відбувається подача та основне навантаження. Величина подачі залежить від багатьох факторів: матеріал оброблюваної деталі, довжина поверхні деталі, на якій накатується профіль різі, параметри верстата, жорсткість систем пристосувань і т.д. Калібруюча частина фіксує профіль різі та на цій ділянці відбувається компенсація внутрішніх сил напружень. У процесі накатування на забірній частині пластична деформація змінює міжосьову відстань роликів, а необхідність калібрування пояснюється статичним формуванням профілю. З огляду на властивості деяких матеріалів калібруюча частина може бути відсутньою, але рекомендується передбачити ділянку хоча б на один оберт оброблюваної деталі.

Скидаюча частина необхідна і її значення є важливим. Через внутрішні напруження, що виникають у процесі накатування, при різкому скиданні відбувається ефект «удару» і на поверхні різьблення виникає поздовжній слід, що робить деталь бракованою. Хоча величина цієї ділянки мала порівняно з іншими, але необхідно забезпечити плавність виходу деталі із зони оброблення.

Основні конструктивні параметри різенакатних роликів можна визначити за наступними формулами. Максимальна та мінімальна висота головки профілю інструменту розраховується:

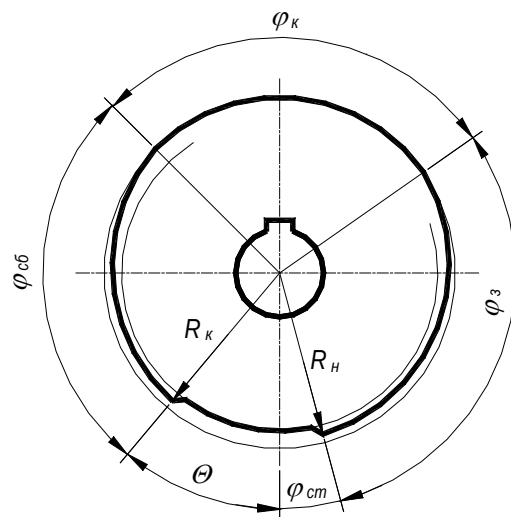


Рис. 2. Робоча частина різенакатного ролика



$$h'_{u \max} = \frac{d_{2 \max} - d_{2 \min}}{2} + \delta \cdot S + \delta \cdot a$$

$$h'_{u \min} = \frac{d_{\max} - d_{2 \max}}{2} + \Delta S$$

Радіус скруглення профілю різи інструменту:

$$R_{\min} = \left(\frac{S}{4} \cdot \operatorname{ctg} \alpha/2 - h'_{u \max} \right) \cdot \frac{\sin \alpha/2}{1 - \sin \alpha/2}$$

Число заходів різьблення роликів:

$$\frac{A_{\max}}{d_2} > k + 1 > \frac{A_{\min}}{d_2}$$

Література:

1. Т. Четвержук, О. Залета. Методика проєктування різенакатних роликів для забезпечення параметрів точності та міцності різей. Матеріали VI міжнародної науково-практичної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження». Івано-Франківськ, 14-16 травня 2024. С. 59-61.

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ІНІЦІАТИВНОЮ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЮ РОБОТОЮ В КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО

Юрчишин О.Я., к.т.н., доцент, Собецька А.В., провідний фахівець

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Згідно ст. 26, п. 2 Закону України «Про вищу освіту» [1] одним з основних завдань закладу вищої освіти (ЗВО) є «проведення наукової діяльності шляхом проведення наукових досліджень і забезпечення творчої діяльності учасників освітнього процесу, підготовки наукових кадрів вищої кваліфікації і використання отриманих результатів в освітньому процесі», а ст. п.1 та п.3 того ж Закону вказує на обов'язок науково-педагогічних та наукових працівників проваджувати наукову, науково-технічну, науково-організаційну та мистецьку діяльність відповідно до кваліфікації. Сам процес провадження такої діяльності може здійснюватися як за рахунок залучення фінансування через гранти, договори, проєкти, так і без залучення такого фінансування. В останньому випадку мова йде



про так звану «другу половину дня» науково-педагогічного працівника, яку часто оформлюють як «ініціативну тематику». Встановлюючи законом вимогу проваджувати наукову діяльність і виділяючи на це час, засновник ЗВО по суті фінансує таку діяльність, тож така діяльність не є неоплачуваною, вона просто обмежена у виділенні додаткових ресурсів, які можуть бути необхідні для проведення експериментів, публікування та представлення наукових результатів.

Мета. Задля організації та контролю за провадженням ініціативної науково-дослідної роботи ЗВО часто розробляють власні положення. КПП ім. Ігоря Сікорського така діяльність здійснюється на основі «Положення про виконання ініціативних кафедральних науково-дослідних робіт» [2]. Ініціативна кафедральна НДР оформлюється групою науково-педагогічних працівників за браком окремого фінансування наукової діяльності із загального й спеціального фонду державного бюджету України та з міжнародних джерел.

Викладення основного матеріалу. Положення визначає базову термінологію, яка стосується відкритої науки, дослідницьких даних (FAIR-дані), науково-технічний звіт, наукова діяльність, наукова (науково-технічна) продукція, науково-технічний (прикладний) результат, науково-технічні (експериментальні) розробки, фундаментальні та прикладні наукові дослідження. Загальне керівництво виконанням ініціативних НДР у КПП ім. Ігоря Сікорського покладено на проректора з наукової роботи. Координацію й організаційне забезпечення наукової діяльності забезпечує відділ науково-інноваційного супроводу освітнього процесу.

Керівництво науковими ініціативними НДР за пріоритетними напрямками, визначеними законодавством України та світовими трендами актуальних досліджень і розробок, здійснюють керівники колективів, які ці НДР формують, планують та виконують спільно з членами наукової групи (директори навчально-наукових інститутів, декани факультетів, завідувачі кафедр, керівники лабораторій і тимчасових наукових колективів).

Наукові ініціативні НДР виконуються тимчасовими науковими колективами, які формуються за відповідними науковими напрямками. Прикладні й фундаментальні наукові дослідження виконуються – до 3-х років, науково-технічні (експериментальні) розробки – до 2-х років. НДР тривалістю понад 1 рік мають бути розділені на етапи, кожен із яких завершується наприкінці календарного року при плануванні ініціативних НДР.

НДР, включені до тематичного плану КПП ім. Ігоря Сікорського, підлягають обов'язковій державній реєстрації в УкрІНТЕІ. Державна реєстрація і облік відкритих НДР регламентується нормативним документом «Порядок державної реєстрації та обліку відкритих науково-дослідних, дослідно-конструкторських



робіт і дисертацій». Науково-технічна продукція, створена за результатами виконання НДР, є інтелектуальною власністю КПІ ім. Ігоря Сікорського. Авторське право належить авторам НДР.

Виконавцями ініціативних НДР є науково-педагогічні працівники, наукові працівники, докторанти та здобувачі вищої освіти – у процесі виконання дисертацій, курсових, дипломних проєктів, інших дослідницьких робіт, передбачених навчальними планами, а також у наукових та інженерних гуртках тощо. Максимальна кількість виконавців ініціативної НДР не може перевищувати 10 осіб, включаючи аспірантів та магістрантів.

Результати виконання наукових ініціативних НДР підлягають щорічному обговоренню на засіданнях кафедр, вчених радах факультетів і навчально-наукових інститутів, та затверджуються НТР КПІ ім. Ігоря Сікорського. Виконання наукових ініціативних НДР конкретним виконавцем підтверджується наявністю його прізвища у складі виконавців у плані та звіті: остаточному – після завершення всієї роботи, чи проміжному – після завершення річного етапу. Створені в межах ініціативних НДР дослідні (експериментальні) зразки мають бути взяті на облік згідно з вимогами законодавства. Представлення дослідних (експериментальних) зразків як експонатів у виставках підтверджує відділ науково-інноваційного супроводу освітнього процесу. За річний період виконання ініціативної НДР керівник теми подає проміжний, а після завершення виконання НДР остаточний звіт за формою, що відповідає Наказу МОН України №1304 від 11.09.2024 «Про затвердження Змін до Порядку державної реєстрації та обліку науково-дослідних, дослідно-конструкторських робіт і дисертацій» [3]. Тут особлива увага приділяється контролю за досягненням показників з переліку форми, які в КПІ ім. Ігоря Сікорського рішення Вченої ради визначені як пріоритетні. Таких показників є 12, з яких 6 є обов'язковим при плануванні нових ініціативних НДР. До показників/індикаторів за якими готується звіт не можуть бути включені будь-які публікації (включно із співавторством), конференції, впровадження, охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності тощо держав (їх представників), визнаних в установленому порядку державою-агресором або державою-окупантом, а також будь-які публікації, конференції без зазначення приналежності авторів до КПІ ім. Ігоря Сікорського, а також охоронні документи на об'єкти права інтелектуальної власності, право власності на які не належить КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Після розгляду й затвердження остаточного звіту про виконання НДР на засіданні кафедри, розгляду та погодження на засіданні вченої ради навчально-наукового інституту / факультету науковий керівник роботи в паперовій та електронній формі подає його до відділу науково-інноваційного супроводу ос-



вітнього процесу. Звіт розглядається на НТР КПІ ім. Ігоря Сікорського, за її рішенням може спрямовуватись на розгляд Експертної комісії з питань таємниць КПІ ім. Ігоря Сікорського та остаточно затверджується проректором з наукової роботи.

Станом на кінець 2024 року в КПІ ім. Ігоря Сікорського виконується 210 ініціативних науково-дослідних робіт, з них в поточному році завершено 33. У виконанні таких робіт задіяні науково-педагогічні та наукових працівники 23-х структурних підрозділів університету.

Висновки. Чинне «Положення про виконання ініціативних кафедральних науково-дослідних робіт» є дієвим інструментом для організації їх планування та контролю за виконанням. Воно надає можливість організовувати планування і виконання показників наукової та науково-технічної діяльності, які є пріоритетними на даному етапі розвитку нашого університету.

Література:

1. Закон України «Про вищу освіту» – <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18#Text>
2. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Наука, інновації, дослідження, розробки – <https://science.kpi.ua/bez-rubriki/initsiatyvna-tematyka/>
3. Наказу МОН України №1304 від 11.09.2024 «Про затвердження Змін до Порядку державної реєстрації та обліку науково-дослідних, дослідно-конструкторських робіт і дисертацій» – <https://mon.gov.ua/npa/pro-zatverdzhennia-zmin-do-poriadku-derzhavnoi-reiestratsii-ta-obliku-naukovo-doslidnykh-doslidno-konstruktorskykh-robit-i-dysertatsii-zareiestrovanyi-u-ministerstvi-iustytzii-ukrainy-16-zhov>

ДОСЛІДЖЕННЯ СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИХ МОДЕЛЕЙ ТИПОВИХ ОПОРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ МЕТОДОМ СТАТИЧНОГО АНАЛІЗУ

Юсупов Д.А., аспірант, Євтухов А.В., к.т.н., доцент
Сумський державний університет

З метою пошуку потенційних шляхів підвищення ефективності типових опорних елементів верстатних пристроїв було проведено дослідження їх скінченно-елементних моделей методом статичного аналізу.

Як дослідні прототипи для побудови скінченно-елементних моделей були вибрані геометричні моделі типових опорних елементів виробника LEAVE INDUSTRIAL CO., LTD [1], номенклатура виробів якого характеризується



великою кількістю найменувань і типорозмірів: колона BP07-500500-0600 SQUARE TOOLING COLUMN (CNC Tombstone) (500×500×600 мм) [2]; плита M/C BASE PLATE BP06-75500-0500-18 (500×500×75 мм) [3]; кутник BP20-340500-0500 M/C ANGLE PLATE (500×500×340) [4].

Геометричні моделі опорних елементів були побудовані з використанням CAD-системи SolidWorks.

Для побудови скінченно-елементних моделей опорних елементів та розрахунку їх статичних характеристик використовувався пакет інженерного аналізу Ansys Workbench (модуль Static Structural). Скінченно-елементні моделі для всіх типів опорних елементів були побудовані в автоматичному режимі з адаптивним вибором розмірів скінченних елементів.

Для розрахунку статичних характеристик скінченно-елементних моделей були використані дві схеми навантаження, які відповідають умовам свердління та торцевого фрезерування.

Для реалізації умов навантажень, типових для свердління, розглядалася нормально прикладена до робочої поверхні опорного елемента осьова складова сили різання $P_o = 8000$ Н (типова для свердління отвору спіральним свердлом діаметром 20 мм). Враховуючи те, що під час обробки заготовки різальний інструмент не взаємодіє безпосередньо з опорним елементом верстатного пристрою, сила різання P_o в умовах розрахунку задавалася опосередковано через тиск, тобто сила P_o розподілялася на площі кругової ділянки з діаметром 200 мм (0,255 МПа).

Для реалізації умов навантажень, характерних для торцевого фрезерування розглядались радіальна складова сили різання $P_y = 12000$ Н і крутний момент $M_{кр} = 3600$ Нм (типові для чорнового фрезерування фрезою діаметром 200 мм).

Для розрахунку статичних характеристик моделей опорних елементів шляхом вибору установчої плоскої поверхні та установчих отворів досліджуваного опорного елемента було задано фіксацію моделей в просторі.

В результаті розрахунку моделей згідно з заданими умовами статичного навантаження отримано діаграми розподілення повних деформацій (Total Deformation) та внутрішніх напружень (Equivalent (von-Mises) Stress).

Аналіз діаграми сумарних деформацій колони, побудованої для умов свердління, показав їх максимальне значення 10,8 мкм, що є допустимим значенням (< 50 мкм). Аналіз діаграми внутрішніх напружень показав, що їх максимальне значення зосереджене на стику колони та її основи, тобто в місці концентрації напружень, і становить 3,2 МПа, що є допустимим значенням порівняно з межею текучості середньо-вуглецевої конструкційної сталі (250 МПа). Аналіз діаграм, побудованих для умов торцевого фрезерування, показав максимальне



значення сумарних деформацій 32 мкм, що є досить великим, але допустимим значенням. Максимальне значення внутрішніх напружень зосереджене на краю монтажного отвору колони, тобто в місці концентрації напружень, і становить 8,5 МПа, що також є допустимим значенням.

Аналіз діаграми сумарних деформацій плити, побудованої для умов свердління, показав їх максимальне значення 2,1 мкм, що є допустимим значенням. Аналіз діаграми внутрішніх напружень показав, що їх максимальне значення зосереджене на краю монтажного отвору, тобто в місці концентрації напружень, і становить 1,3 МПа, що є допустимим значенням. Аналіз діаграм, побудованих для умов торцевого фрезерування, показав максимальне значення сумарних деформацій 1,5 мкм, що є допустимим значенням. Максимальне значення внутрішніх напружень зосереджене на краю монтажного отвору, тобто в місці концентрації напружень, і становить 7 МПа, що є допустимим значенням.

Аналіз діаграми сумарних деформацій кутника, побудованої для умов свердління, показав їх максимальне значення 7,9 мкм, що є допустимим значенням. Аналіз діаграми внутрішніх напружень показав, що їх максимальне значення зосереджене на краю монтажного отвору, тобто в місці концентрації напружень, і становить 3,7 МПа, що є допустимим значенням. Аналіз діаграм, побудованих для умов торцевого фрезерування, показав максимальне значення сумарних деформацій 10,8 мкм, що є допустимим значенням. Максимальне значення внутрішніх напружень зосереджене на краю монтажного отвору, тобто в місці концентрації напружень, і становить 9 МПа, що є допустимим значенням.

Так, статичний аналіз моделей зазначених типових опорних елементів верстатних пристроїв показав, що всі їх характеристики (сумарні деформації та внутрішні напруження) знаходяться в допустимих межах з певним запасом. Це у свою чергу дозволяє говорити про потенційну можливість зменшення матеріаломісткості опорних елементів, зокрема, шляхом структурної (топологічної) оптимізації їх конструкцій.

Література

1. Leave industrial co., ltd. <https://www.leave-fixture.com/en-us/>
2. Bp07-500500-0600 square tooling column (cnc tombstone). <https://www.leave-fixture.com/en-us/p673-bp07-500500-0600>
3. M/c base plate bp06-75500-0500-18. <https://www.leave-fixture.com/en-us/p667-bp06-75500-0500-18>
4. Bp20-340500-0500 m/c angle plate. <https://www.leave-fixture.com/en-us/p904-bp20-340500-0500>



СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

**Яковенко І.Е., к.т.н., професор, Похил А.В., аспірант,
Сотниченко В.В., аспірант**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Бурхливий розвиток інформаційних технологій, різних систем математичного моделювання та програмних комплексів на їх основі створили передумови для дедалі ширшої оптимізації технологічних процесів у всіх галузях, у тому числі й машинобудуванні. Проте проведення оптимізації вимагає додаткових інвестицій, залучення яких у повному обсязі не завжди можливе. Тобто завдання полягає у тому, щоб визначити цільовий поетапний напрямок інвестицій, який може забезпечити найбільшу ефективність фінансових вкладень, з точки зору наступних економічних та конкурентних переваг підприємства. Особливо це стосується ММСП, які, завдяки своїм особливостям та гнучкості, мають можливість досить швидкого освоювання інвестицій, придбання необхідного обладнання та програмного забезпечення, навчання персоналу та впровадження нових технологій у виробничий процес.

Автори провели аналіз основних напрямів варіантів оптимізації технологічних процесів машинобудівного виробництва переважно для мікро, малих та середніх підприємств (ММСП). У загальному вигляді основні напрями оптимізації технологічних процесів підприємств машинобудівної галузі можна розділити на три категорії:

- загальновиробничі (екологізація процесів, реінжиніринг виробничих процесів, зовнішня логістика та ін.);
- техніко-технологічні методи (впровадження принципів ощадливого виробництва, адитивні технології, високошвидкісна обробка, покращене охолодження, прогресивне обладнання та інструмент, автоматизація допоміжних процесів обробки та ін.);
- використання сучасних математичних моделей та автоматизація технологічного й етапів виробничого процесу (CALS технології, впровадження різних систем CAD/CAM/CAE/ERP/PDM/CRM, машинне навчання, нейронні мережі та штучний інтелект, цифрові двійники та ін.);

Особливо важливо при оптимізації технологічних процесів у ММСП правильно оцінити та спрямувати інвестиції відповідно до рівня ефективності цього впровадження. Для цього автори пропонують математичну модель, яка ґрунтується на методі, аналогічному до SWOT аналізу (рис.1). На наведеній схемі



оцінка ефективності запропонованих варіантів структури автоматизованої технологічної системи та вибір оптимального здійснюється на підставі експертної оцінки технічної складової проекту та економічних розрахунків окупності інвестицій та ефективності вкладень.

У системі координат інвестиції-ефективність розташовуються конкретні можливі методи оптимізації технологічних процесів з урахуванням взаємозв'язків між ними (це може бути або придбання ПО, обладнання, інструменту, або на наведеній схемі оцінка ефективності запропонованих варіантів структури автоматизованої технологічної системи та вибір оптимального здійснюється на підставі експертної оцінки технічної складової проекту та економічних розрахунків окупності інвестицій та ефективності вкладень).

Використання такої системи дає можливість керівництву підприємства визначити найбільш ефективну послідовність інвестування коштів (досягнення необхідного ефекту при мінімумі витрат). У тих випадках, коли придбання будь-якого елемента потребує значних витрат (наприклад, придбання повного комплексу обладнання шестигранники з суцільною лінією), застосовують метод декомпозиції з поділом покупки окремих елементів загальної системи на етапи (шестигранники з переривчастою лінією).

У ході аналізу можливих варіантів та вибору найбільш перспективного автори пропонують використовувати нейронні мережі.

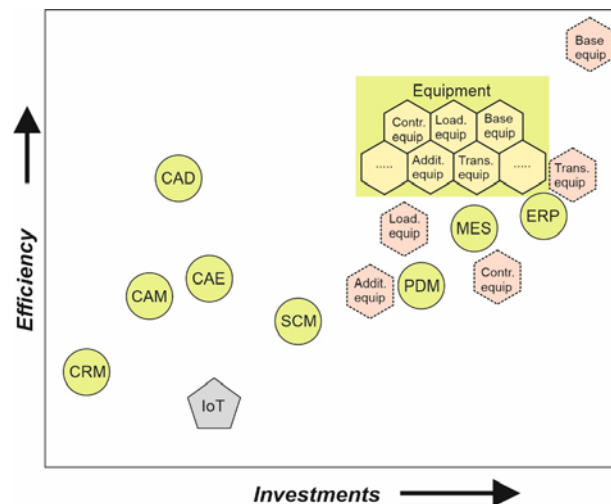


Рис. 1. Схема розташування можливих методів автоматизації технологічних процесів підприємства

Література:

1. Яковенко І.Е., Линник О.І., Пермяков О.А., Басова Є.В. Технологічні інновації як засіб забезпечення конкурентної переваги мікро, малих і середніх машинобудівних підприємств // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2024– № 2(10). С. 75-87.
2. Яковенко І.Е. Автоматизація малих та середніх машинобудівних підприємств України на основі цифрових інновацій / І.Е. Яковенко, О.А. Пермяков, Є.В. Басова, Д.О. Льїн // Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези одинадцятої міжнародної науково-технічної конференції. Українською та англійською мовами –Харків: НТУ"ХПІ", 2024. с. 163.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ЗБІРНИК
НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

**XIII Міжнародної
науково-технічної конференції**

**ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ
В МАШИНОБУДУВАННІ**

18–21 лютого 2025 року

Підписано до друку 12.02.2025
Формат 60×84¹/₁₆. Папір офсетний. Друк офсетний
Умовн. друк. арк. 8,1. Обл.-вид. арк. 6,5
Наклад 45 прим. Зам. 250108

Видавець і виготівник: Видавництво Львівської політехніки
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4459 від 27.12.2012 р.

вул. Ф. Колесси, 4, Львів, 79013
тел. +380 32 2584103, факс +380 32 2584101
vlp.com.ua, ел. пошта: vmr@vlp.com.ua