

## СЕКЦІЯ 4

## *Прогресивна техніка та технологія машинобудування*

---

**Tanovic, Lj., PhD, full time professor, Mladenovic G., PhD, teaching assistant**  
University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Department for Production  
Engineering, Belgrade, Serbia

### **DEVELOPMENT OF CAD/CAM SYSTEM FOR SCULPTURED SURFACE MILLING**

#### **INTRODUCTION**

The problems of sculptured surface milling are the object of study of many research centers for more than 30 years. Machine parts with sculptured surfaces are present in all branches of engineering. In the field of mechanical engineering, the most common use of these parts is in automotive, aerospace, shipbuilding and die/mold industries. In present days their use is expanded onto the production of consumer goods. When it comes to production of parts with sculptured surfaces, the most commonly used machining procedures are 3 or 5 axis ball-end milling operations. Until now, three methods for sculptured surface milling have been developed: iso-parametric, iso-planar and iso-scallop. Currently, a lot of effort is being invested into development of new methods for tool path generation and optimization. The optimization process can be carried out through a single or multiple criteria. For multi criteria optimization process the introduction of optimization factor parameters is necessary in order to define their significance separately.

Following closely this development, the Department for Production Engineering of Mechanical Engineering Faculty in Belgrade (Serbia) has carried out many years of research in this field. Particular efforts are invested into development of new methods for tool path optimization and CAD/CAM systems, too.

This paper presents the description of the developed CAD/CAM software and multi criteria tool path optimization method based on the loaded part and workpiece CAD models, required surface roughness and tolerance, as well as the database for chosen NC machine tool.

#### **SYSTEM CONCEPT**

The developed system is designed for NC code generation only for parts with square or rectangle base, having sculptured surface on one side based on the iso-plane machining method. Using the procedure for calculating the intersection points of a plane and a triangle, the system performs further calculation of the intersection points for sculptured surface and coordinate planes (XZ and YZ) with an appropriate resolution for the loaded CAD part model in STL file format. Afterwards, the interpolation polynomials are formed for such set of points to calculate minimal curvature radius of the convex part of the path. The minimal curvature radius found among all the calculations is then used to automatically select cutting tool from database [1].

The step over and forward step calculations are performed based on the loaded part geometry, cutting tool diameter and required surface roughness and tolerance [2].

To include the cutting process mechanics a procedure for converting the workpiece CAD model in a model presented by Z map is developed, firstly introduced by Anderson [3]. The advantage of this workpiece representation is faster system calculation performance, which is of great importance in the manufacturing process design.

For such matched CAD models (part/workpiece), the depth and width of cut analysis is further performed along tool path to calculate feedrate in all cutter location points according to the developed cutting force model for chosen workpiece and tool material, as well as geometry [4].

## SOFTWARE DEVELOPMENT

Using the MATLAB software package, a CAD/CAM software solution was developed for automated manufacturing process design according to the previously described procedure.

The simplified use of the software is performed by successively unveiling the entry fields in one window, fig. 1a. When it comes to inability to perform machining in one tool passing, which may be caused by chosen cutting tool and workpiece/part geometry and material, the system gives the notification that it is necessary to perform the machining of the surface in several tool passes. The final output from the developed software is the NC code for manufacturing of loaded CAD part model from the chosen workpiece and machine tool.

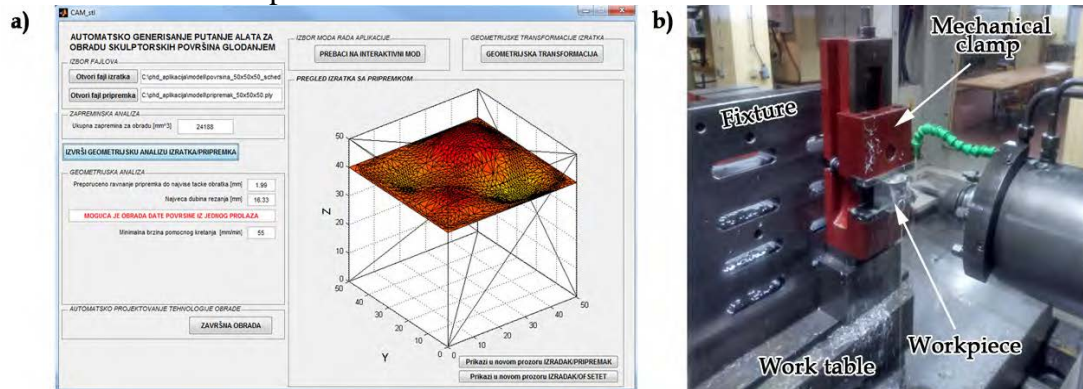


Figure 1. The window of developed CAD/CAM software (a) experimental setup (b)

## EXPERIMENTAL VERIFICATION

An experiment was conducted according to the setup presented on figure 1b. The workpiece 45x45x50 mm in dimensions was fastened in a mechanical clamp through a fixture to the work table of an ILR HMC 500/40 machine. The NC code was generated in the automatic software mode according to multi criteria optimization process for chosen workpiece material (AlMg4.5Mn) and tool material (HSSE 8%Co), as well as geometry (12 mm in diameter, 2 teeth, helix angle of 30°).

The measurement of the machined part surface was further performed using CNC Coordinate Measuring Machine Smartscope CNC 624 (OGP–Optical Gaging Products, Rochester, NY, USA) to generate a point cloud. Using the MATLAB software package the local deviation from the CAD model was determined in the direction normal to the model for all measurement points in order to generate the map of deviation according to the procedure described in [5]

The analysis of the data from the generated map of deviation provided a conclusion that the machining process was performed within the required specs, tolerances and roughness, which verifies the usage of the developed software for NC code generation.

## REFERENCES

- [1] Mladenovic G. (2015) Tool Path Optimization In Sculptured Surface Milling, PhD thesis, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering
- [2] Bojanić P. (2009) A Tool Path Generation For Three-Axis Ball-End Milling Of Sculptured Surfaces. 33<sup>th</sup> Conference On Production Engineering Of Serbia With Foreign Participants, Proceedings, pp. 115-118, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering
- [3] Anderson. R.O. (1978) Detecting and eliminating collisions in NC machining. Computer-Aided Design, 10(4), pp. 231-237.
- [4] Mladenovic G., Tanovic LJ., Ehmann K.F. (2015) Tool Path Generation for Milling of Free Form Surfaces With Feedrate Scheduling. FME Transactions, 43(1): pp. 9-15.
- [5] Poniatowska M. (2015) Free-form surface machining error compensation applying 3D CAD machining pattern model. Computer-Aided Design, 62, pp. 227-235.

## УДК 621.9.06

Кузнєцов Ю.М.<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Бардачов Ю.М.<sup>2</sup>, д.т.н., проф., Дмитрієв Д.О.<sup>2</sup>, д.т.н., проф., Русанов С.А.<sup>2</sup>, к.т.н., доц.

1 – НТУУ "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

2 – Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна

### РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІЙ БАГАТОКООРДИНАТНИХ ШАРНІРНО-СТРИЖНЕВИХ МАНІПУЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНВЕРСІЇ

Сучасне виробництво у промисловості не обмежується технічними задачами, що виконуються саме на території підприємства, цеху або дільниці. В багатьох випадках потрібно мати мобільне оброблююче або позиціонує устаткування, яке б відповідало критеріям точності, економічності і розширеної функціональності. В даному напрямі перспективу мають каркасні малометалоємні компоновки технологічного обладнання з просторовими шарнірно-стрижневими механізмами паралельної структури (МПС) [1]. Однак стала кінематична будова і нерухома несуча основа традиційних компоновок обмежує робочий простір такого обладнання у внутрішньому його просторі [2].

Для вирішення даної задачі в роботі застосовано для МПС із штангами постійної довжини генетичний оператор інверсії [3] і отримано ряд нових компоновок обладнання маніпулювання об'єктами [4] з новими ознаками і розширеною функціональністю (рис.1).

Функціональні і сервісні можливості підвищуються за рахунок перенесення приводів із рухомими каретками на каркасну рухому платформу. Дане рішення дозволяє досягнути значного збільшення варіантів кріплення до зовнішніх опор та спрямованого керування значенням жорсткості виконавчого органу у відповідному напрямі. Тим самим робочий простір переноситься назовні від загальних габаритів компоновки, а рухома платформа утворює окремий модуль, що легко транспортується та встановлюється поряд з об'єктом, який обробляється.

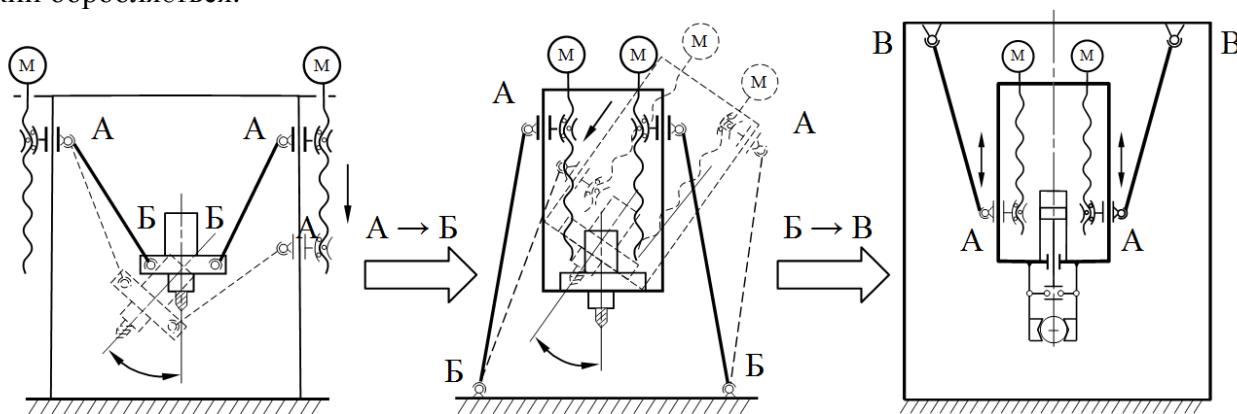
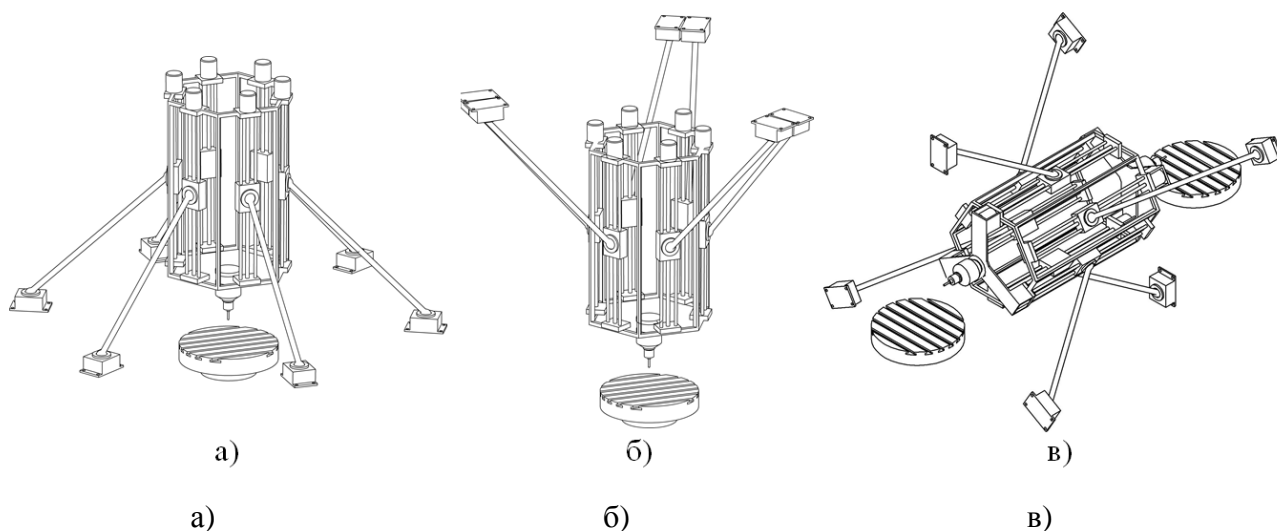


Рис. 1. Схемна реалізація інверсії для отримання нових властивостей маніпуляційних систем з МПС: а – традиційна глайд-компоновка; б – приводи і каретки перенесено на рухому платформу; в - кріплення штанг перенесено на іншу (будь-яку) поверхню

Механізм маніпулювання (рис. 1) складається з рухомої платформи у вигляді каркасу, на якому розташовані крокові двигуни і незалежні приводи. Кожен привод містить гвинтову передачу з рухомою кареткою, що рухається уздовж напрямних, які каркасно об'єднано в єдиний модуль - рухому платформу і штанги постійної довжини з шарнірами з боку рухомої платформи і шарнірами з іншого боку, якими механізм маніпулювання кріпиться до будь-яких зовнішніх опор як в промислових, так і непромислових (польових) умовах. На рухомій платформі може бути розташовано робочий орган - мотор-шпindel з інструментом, схват

маніпулятора, лазер, плазмовий різак і ін. Керування рухами механізму маніпулювання об'єктами в технологічному обладнанні забезпечується системою ЧПК, що формує та подає керуючий сигнал на приводи механізмів поступового руху. Окремі приводи механізму маніпулювання отримують незалежний керуючий сигнал, що дає можливість незалежного переміщення всіх кареток. Дані переміщення змінюють положення рухомої платформи з захватним пристроєм або мотор-шпинделем з інструментом у просторі по незалежним координатним осям.

В залежності від конфігурації і розмірів необхідного робочого простору та умов довколишнього середовища може бути створено інші варіанти кріплення механізму маніпулювання до вертикальних або горизонтальних площин зверху або знизу штангами постійної довжини (рис.2).

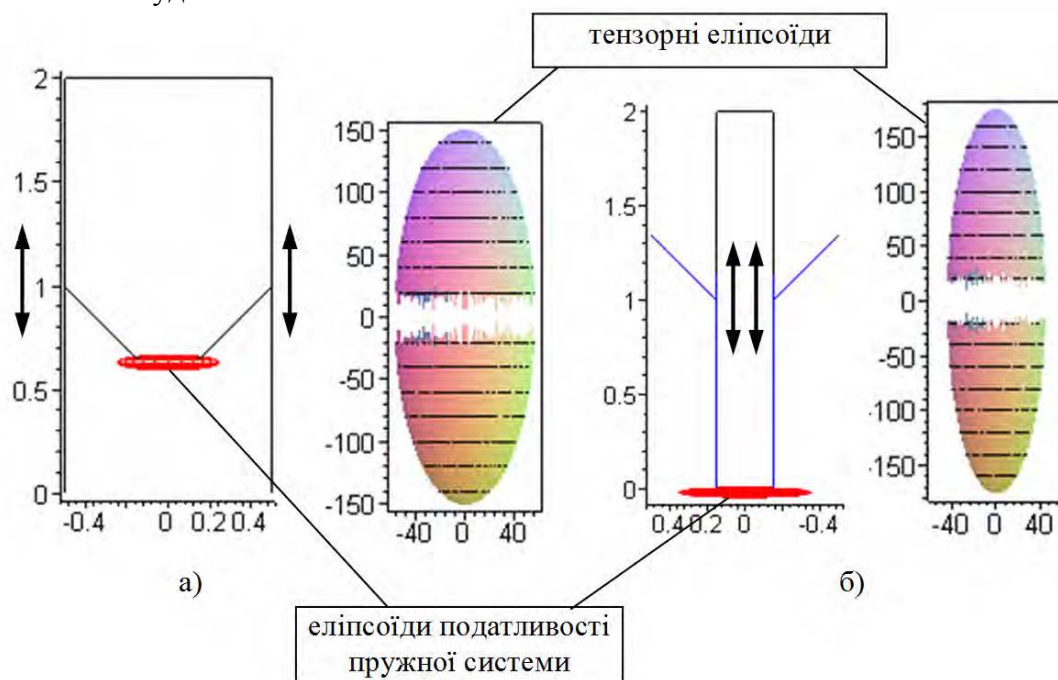


**Рис. 2. Компоновка багатоцільового механізму маніпулювання з різним початковим розташуванням рухомої платформи: а - штанги прикріплено знизу до горизонтальної поверхні і рівномірно розподілено; б – штанги прикріплено зверху до горизонтальної поверхні і з'єднано попарно; в – горизонтальне розташування рухомої платформи і по три штанги окремо прикріплено збоку до двох вертикальних паралельних площин**

Однак для оцінки технічних характеристик і створення програм керування приводами кожного варіанту компоновки необхідне універсальне математичне і інтерактивне програмне забезпечення. На кафедрі основ конструювання ХНТУ спільно із кафедрою конструювання верстатів і машин НТУУ"КПІ" розроблено зовнішні програмні модулі «Tools Glide», «Tools Response», «Tools App» [5]. В основу математичної моделі покладено методи аналітичної геометрії, векторного аналізу, варіаційного числення, скінчених елементів, тензорного числення [6, 7, 8]. Структура програмних модулів «Tools Glide» та «Tools Response» складається з блоків розрахунку кінематики і жорсткості (податливості). На рис. 3 показано розрахунок і порівняння тензорних еліпсоїдів  $(\hat{\mathbf{T}}\mathbf{r})\mathbf{r} = 1$  двох каркасних компонок верстатів з МПС по рис.1, а – "класична схема" і схема, що отримана в результаті інверсії по рис.1, в, з однаковими фізичними властивостями елементів. При цьому  $\mathbf{T}$  – тензор податливостей,  $\mathbf{r}$  – деякий вектор, в якості якого прийняти силу  $\mathbf{F}$ , тоді  $\hat{\mathbf{T}}\mathbf{F} = \mathbf{u}$ , де  $\mathbf{u}$  – вектор переміщення під дією сили  $\mathbf{F}$ , а поверхня  $(\hat{\mathbf{T}}\mathbf{F})\mathbf{F} = \text{const}$  буде поверхнею рівня, пропорційною зусиллю, що виконує в заданому напрямку задану роботу.

Блок кінематики («Tools Glide») передбачає формування компоновки glide-обладнання та розрахунок  $L$  - координат з підтримкою зворотного зв'язку з модулем відгуку «Tools Response» для врахування роботи шарнірів різних типів. Отримані дані можуть бути передані

в модуль «Tools App», де властивості технологічної системи описуються функцією динамічної податливості, яка характеризує відгук технологічної системи у вигляді переміщень на задане силове збудження.



**Рис. 3. Результати розрахунку програмою «Tools Response» еліпсоїдів податливості і тензорних еліпсоїдів пружного переміщення каркасних компонок МПС: а – класична схема глайду з напрямними і каретками на нерухомій основі; б – інверсна схема глайду з напрямними і каретками на рухомій платформі**

Розроблений механізм може бути ефективно використаний в галузі машинобудування для виконання різних технологічних операцій, пов'язаних з маніпулюванням, переміщенням, обробкою деталей і заготовок, та дозволяє виконувати різні технологічні операції по місцю знаходження об'єктів маніпулювання, особливо в непромислових та польових умовах.

### Список літератури

1. Кузнецов Ю.М., Дмитрієв Д.О., Діневич Г.Ю. Компоновки верстатів з механізмами паралельної структури. Монографія. – Херсон: ПП Вишемирський, 2009. – 456 с., 2010. – 471с.(рос.)
2. Кузнецов Ю.М. Маневреність супорта в робочому просторі багатокоординатного верстату нової компоновки / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрієв //Вестник Херсонского национального технического университета. Вып. 3(32).-Херсон:ХНТУ, 2009 - С.15-21.
3. Кузнецов Ю.Н. Генетический подход – ключ к созданию сложных технических систем /Ю.Н.Кузнецов, В.Ф.Шинкаренко //Научный журнал «Технологичні комплекси», №1,2(5,6), 2012. – с.15 – 29.
4. Кузнецов Ю.М., Бардачов Ю.М., Дмитрієв Д.О., Півень С.М. "Механізм маніпулювання об'єктами в технологічному обладнанні", Заявка на винахід №а201512568 від 21.12.2015.
5. Русанов С.А., Кузнецов Ю.М., Дмитрієв Д.О., Подольський М.І. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір "Комп'ютерна програма «Tools App» – № 57913 від 29.12.2014 –Державна служба інтелектуальної власності.
6. Борисенко А.И. Векторный анализ и начала тензорного исчисления / Борисенко А.И., Тарапов И.Е. – Высшая школа. – М.: 1966. - 250 с.
7. Светлицкий В.А. Механика гибких стержней и нитей. – М.: Машиностроение, 1978. – 222 с.
8. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение. – М.: Машиностроение, 2006. – 286 с.

УДК 621.941-229.3

Волошин В.Н., к.т.н., доц.

Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, м. Тернопіль, Україна

### АДАПТИВНІ МЕХАНІЗМИ ЗАТИСКУ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ

Встановлення деталі та її утримання в процесі обробки супроводжується комплексом фізичних явищ, серед яких: пружні відтискання в приводі затискного механізму (ЗМ) і системі патрон-деталь; пружні та пластичні деформації деталей та стиків і порушення фізичних зв'язків між ними; теплові та інші явища. Здатність ЗМ верстата виконувати робочі функції при змінах умов роботи істотно залежить від можливості їх адаптації до змінних факторів впливу [1, 2]. Тому розробка та дослідження механізмів затиску, що можуть адаптуватися до характеристик заготовки, навантаження, динамічних явищ та ін. є актуальною науковою проблемою.

В результаті аналізу основних характеристик ЗМ токарних верстатів та процесів, які в них відбуваються, було виділено наступні основні напрямки адаптації ЗМ:

1) адаптація ЗМ по навантаженню (забезпечення постійної сили затиску при зміні умов обробки та геометричних параметрів заготовки; забезпечення регулювання сили затиску в процесі обробки на різних режимах та при зміні сил тертя та зчеплення);

2) адаптація ЗМ до геометрії заготовок (самоприспосовуваність до форми заготовок, до різних діаметрів заготовок та їх відхилення, до діапазону затиску оброблюваних заготовок);

3) адаптація ЗМ для забезпечення необхідної жорсткості системи затиску (забезпечення однакового радіального зміщення деталі в різних положеннях різального інструменту за рахунок регулювання бази затиску; автоматичне регулювання сили затиску в залежності від положення різального інструменту; забезпечення однакової радіальної жорсткості ЗМ в різних кутових положеннях);

4) адаптація ЗМ для забезпечення необхідної точності затиску (забезпечення точного позиціонування заготовки після її затиску; забезпечення компенсації зміщень, викликаних силами затиску та різання; здійснення вибірки зазорів в елементах конструкції ЗМ);

5) адаптація ЗМ для забезпечення необхідної динамічної якості (автоматична компенсація відцентрових сил ЗМ; активне балансування ЗМ в процесі обробки; активне демпфування коливань в ЗМ).

Одним із дуже важливих напрямків адаптації ЗМ є адаптація до геометрії, тобто до діаметрів та до діапазону затиску оброблюваних заготовок. Було запропоновано, теоретично і експериментально підтверджено нові принципи створення адаптивних ЗМ з адаптацією до геометрії затиску.

Перший принцип полягає у навмисному введенні в конструкцію затискних елементів (ЗЕ) зон деформації, що дозволяє забезпечити прилягання контактуючої поверхні ЗЕ до поверхні затиску заготовки. Такі зони створені з використанням евристичних прийомів повного та неповного розчленування затискних елементів (ЗЕ), шляхом утворення пустот в ЗЕ, використанням здатних до деформування кільцевих сегментів та ін. Конструкція одного із токарних патронів, розробленого із використанням цього принципу, приведена на рис. 1. Теоретичні дослідження умов контактування ЗЕ із заготовкою, стан зони адаптації проводився за допомогою CAD/CAE-системи. Аналіз результатів моделювання [3] показав, що затискна частина адаптивного ЗЕ працює в зоні пружних деформацій в робочому діапазоні навантажень і забезпечує повний контакт ЗЕ із заготовкою в заданому діапазоні діаметрів.

Другий принцип (принцип концентрації діапазонів затиску) базується на евристичному прийомі об'єднання діапазонів затиску в одному або декількох ЗЕ. Це досягається наступними способами: виконання ЗЕ ступінчастими; розточуванням призматичних n - гранних ЗЕ; виконанням ЗЕ фасонного профілю та ін. Отримані способом інтеграції

діапазонів затиску ЗЕ називаються багатопрофільними і можуть безпосередньо зв'язуватися з передавально-підсилюючою ланкою, бути її частиною, або базуватися на основних ЗЕ. Затискні патрони, розроблені за допомогою цього принципу, приведені на рис. 2.

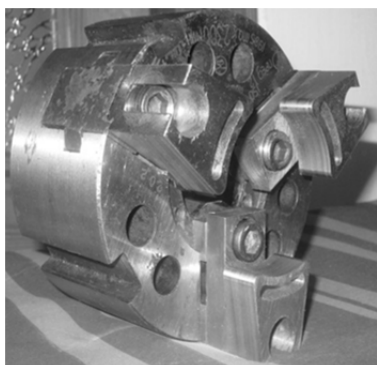


Рис. 1. - Механізований токарний затискний патрон із адаптивними ЗЕ

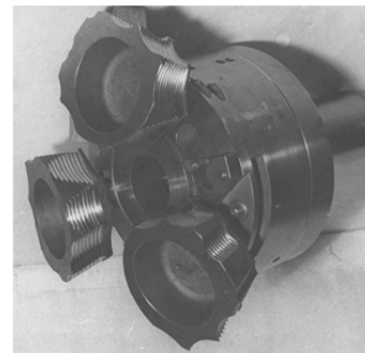


Рис. 2. – Механізовані токарні затискні патрони з багатопрофільними поворотними ЗЕ: а) кулачкового типу; б) плунжерного типу

Адаптація для забезпечення однакової радіальної жорсткості ЗМ в різних кутових положеннях має особливо велике значення при обробці тонкостінних деталей та кілець. Нерівномірна жорсткість затискного пристрою, що має дискретне розташування затискних елементів по контуру затиску, спричиняє зміну складових радіальних відтискань, що негативно впливає на точність форми оброблюваної поверхні [1, 2]. З точки зору забезпечення незмінності радіальної жорсткості по куту повороту найкращим варіантом є затискні пристрої, які побудовані на замкнутому силовому контурі. Такі схеми затиску реалізовані в запропонованих гідравлічних затискних пристроях (рис.3,а) із оболонковими та втулковими ЗЕ (рис.3,б).

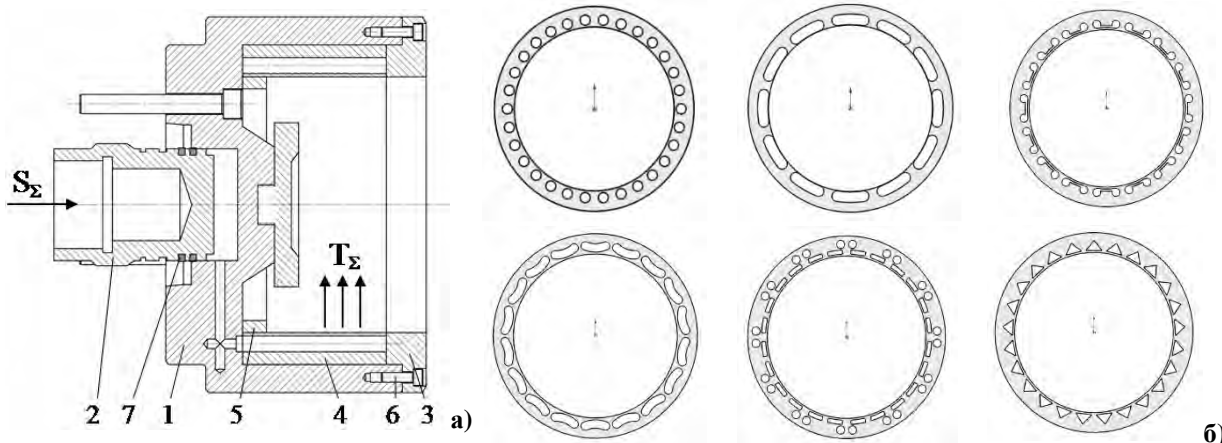


Рис. 3. Конструкція гідравлічного затискного патрона (а) та варіанти конструктивного виконання втулкових ЗЕ із різним діапазоном затиску (б): 1 – корпус; 2 – поршень; 3– фланець; 4 – втулковий ЗЕ; 5 – кільце; 6 – гвинт; 7 – манжета

### Список літератури

1. Технологічне оснащення для високоєфективної обробки деталей на токарних верстатах: Монографія/ [Кузнецов Ю.М., Луців І.В., Шевченко О.В., Волошин В.Н.]. – К.: – Тернопіль: Терно-граф, 2011. – 692 с.
2. Зажимные механизмы и технологическая оснастка для высокоэффективной токарной обработки: монография/ [Кузнецов Ю.Н., Драчев О.И., Луцив И.В. и др.]; под ред. Ю.Н. Кузнецова. – Старый Оскол: ТНТ, 2014. – 480 с.
3. Луців І.В. Адаптивні елементи механізмів затиску автоматизованого обладнання для токарного оброблення/ Луців І.В., Волошин В.Н., Бица Р.О.// Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні та приладобудуванні. – 2013.– Випуск 772. – С.62 – 66.

УДК 621.777.07

Гузенко Ю.М., к.т.н., доц., Олійник В.С., студ.  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### УДОСКОНАЛЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПРЕСУВАННЯ ПРУТКОВИХ ВИРОБІВ

Найбільш прості пристрої для пресування пруткових виробів містять контейнер з одним отвором для встановлення заготовки і пуансона, а також матрицю з отвором для випресовки заготовки, при цьому отвори контейнера і матриці розташовуються співвісно [1]. Проте такі пристрої не забезпечують в період пресування інтенсивне пророблювання (подрібнення, ущільнення, перемішування) встановленої в контейнері заготовки деформаціями зсуву перед випресовуванням через отвір матриці, що знижує міцність (фізико-механічні властивості) виробів.

Для забезпечення такої можливості використовуються пристрої для пресування пруткових виробів, які містять контейнер з двома отворами для встановлення в них заготовки і пуансонів, а також матрицю з отвором для випресовки заготовки, при цьому отвори контейнера розташовуються співвісно між собою і перпендикулярно до отвору матриці, утворюючи разом в одній площині спільну систему каналів Т-подібної форми [2]. Але використання такого пристрою для пресування виробів викликає значні зусилля для випресовування через отвір матриці встановленої в контейнері заготовки, оскільки попередньо стискається в його співвісних отворах.

Виконання в пристрої для пресування пруткових виробів контейнера з двома отворами для встановлення в них двох заготовок і пуансонів, які розташовуються між собою під певним кутом в межах  $70...120^\circ$  і утворюють в одній площині з отвором матриці спільну систему каналів Y-подібної форми, викликає значно менші зусилля для випресовування через отвір матриці встановлених в отворах контейнера заготовок [3]. Крім цього, виконання торців обох пуансонів із сторін заготовок з нахилом до своїх подовжніх вісей і розташування їх в паралельних між собою площинах забезпечує при пресуванні виробів повне видалення заготовок з отворів контейнера.

При реалізації такого пресування виробів окремі заготовки під дією на них сил тиску обох пуансонів зустрічаються перед отвором матриці в одній спільній для них порожнині, в якій відбувається їх сумісна деформація зсуву з двох сторін, а також їх двостороннє кутове пресування з найбільш інтенсивним проникненням матеріалу однієї заготовки в матеріал другої заготовки. Створення такого пресування пруткових виробів забезпечує підвищення ефективності пророблювання обох заготовок перед їх входом в отвір матриці.

Разом з цим, відбувається отримання однорідної маси мікроскопічної, а також субмікро- та нанокристалічної структури підвищеної міцності.

#### Список літератури

1. Жолобов В.В., Зверев Г.И. Прессование металлов. – М.: Металлургия, 1964. – 456 с.
2. А. с. СССР № 549197, МПК В 21 С 23/08. Способ прессования изделий /Л.Г. Степанский, В.С. Стариков, А.П. Шляхин и др. – Оpubл. 05.03.1977. Бюл. № 9.
3. Патент України на корисну модель № 102104, МПК В 21 С 25/00; В 21 С 23/08. Спосіб пресування виробів / В.С. Олійник, Ю.М. Гузенко: власник НТУУ «КПІ». – Оpubл. 12.10.2015. Бюл. № 19.



УДК 620.178.162

Гузенко Ю.М., к.т.н., доц.

НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ НА МАШИНІ ТЕРТЯ СМЦ-2

Переважно для здійснення триботехнічного випробування матеріалів зубчастих передач використовують машини тертя, які забезпечують тертя кочення гладких циліндричних робочих поверхонь роликів зразків однакового діаметра, а також їх тертя кочення з відносним проковзуванням [1]. Проте більшість таких випробувань проводять при ступінчастій зміні відносного проковзування роликів зразків, що не забезпечує достатню точність фізичного моделювання кінематичних умов зачеплення коліс циліндричних зубчастих передач.

Для підвищення точності випробування матеріалів та фізичного моделювання кінематичних умов зачеплення коліс циліндричних зубчастих передач використовують машини тертя, які в своїх приводах обертання роликів зразків однакового діаметра містять ведучі ексцентрично закріплені на валах зубчасті колеса [2]. Але використання в приводах таких машин тертя тільки однієї пари ексцентрично закріплених на їх валах зубчастих коліс не забезпечує плавномінійний обертальний рух обох роликів зразків, а також можливості свого встановлення в приводі машини тертя СМЦ-2.

Встановлення на валах привода машини тертя СМЦ-2 двох пар ексцентрично закріплених зубчастих коліс забезпечує підвищення точності випробування матеріалів зубчастих передач при плавномінійному обертальному русі обох роликів зразків та фізичному моделюванні кінематичних умов зачеплення циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем їх зубців [3]. Обидві пари таких ексцентрично закріплених на валах зубчастих коліс мають однакові геометричні та кінематичні параметри і окремо взаємодіють своїми зубцями.

Два середні ексцентрично закріплені зубчасті колеса обох їх пар закріплені на одному валу і обертаються з однаковою кутовою швидкістю, а два бокові такі зубчасті колеса на окремих валах обертаються з плавномінійною кутовою швидкістю. При таких умовах їх роботи плавне збільшення кутової швидкості одного бокового ексцентрично закріпленого зубчастого колеса супроводжується одночасним зменшенням кутової швидкості другого бокового ексцентрично закріпленого зубчастого колеса і навпаки, а також кінематично зв'язаних з ними роликів зразків.

Така комбінація плавної зміни кутових швидкостей роликів зразків створює умови для найбільш точного випробування матеріалів зубчастих передач.

#### Список літератури.

1. *Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин* /В.Д. Зозуля, Е.Л. Шведков, Д.Я. Ровинский, Э.Д. Браун; Отв. ред. И.М. Федорченко. АН УССР. Ин-т проблем материаловедения. – Киев: Наукова думка, 1990. – 264 с.
2. *Хрущов М.М.* Лабораторные методы испытания на изнашивание материалов для зубчатых колес. – М.: Машиностроение, 1966. – 151 с.
3. *Патент України* на корисну модель № 104266, МПК G 01 N 3/56. Машина тертя для випробування матеріалів зубчастих передач /Ю.М. Гузенко: власник НТУУ «КПІ». – Опубл. 25.01.2016. Бюл. № 2.

УДК 62-229,32

Новік М.А., к.т.н., доц., Музиченко В.В., асп.

НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ І РОЗРАХУНОК НАПРУЖЕНЬ В ТОНКОСТІННИХ ВТУЛКАХ МАЛОГАБАРИТНИХ ГІДРОМЕХАНІЧНИХ ЗАТИСКНИХ ПАТРОНАХ

При чистовій обробці отворів малого діаметру, пазів в композиційних та інших матеріалах необхідно підвищувати швидкість різання, яка може досягати декількох метрів за секунду. Так наприклад, при швидкості різання  $V=2\text{м/с}$  і діаметрі свердла (фрези)  $D=1\text{мм}$ :

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 120}{3,14 \cdot 1} = 38210 (\text{об/хв})$$

Такі високі оберти (до 100 тис.об/хв) забезпечують мотор-шпинделі, але з підвищенням обертів значно збільшуються відцентрові сили, які можуть призвести до зменшення зусилля затиску свердла (фрези) і до аварійної ситуації. Крім цього, при неурівноваженій масі затискного патрона виникає дисбаланс, який знижує якість і точність обробки, а при резонансі може призвести до руйнації затискного патрона. Зважаючи на це затискні патрони, які використовуються при високошвидкісній обробці матеріалів, мусять мати незначні радіальні габаритні розміри і значне зусилля затиску хвостовиків інструментів (заготовок), яке може регулюватися в процесі роботи.

В наш час вітчизняними і закордонними фірмами використовуються патрони з силовим [1], тепловим [2] та гідравлічним [3] способами затиску циліндричних хвостовиків інструментів. Патрони з силовим і тепловим затиском, характеризуються малими радіальними розмірами і неможливістю регулювання зусилля затиску в процесі роботи, що обмежує їх застосування. Найбільш поширеними є патрони з гідравлічним або пневматичним способами затиску. Такі затискні патрони поділяються на безкамерні, двокамерні і трикамерні. У двокамерних [3] і трикамерних патронах [4] камери затиску-розтиску входять в структуру затискного патрона, а в безкамерних [5] затискних патронах, камери затиску-розтиску не входять в його структуру.

У гідромеханічних затискних патронах в якості затискного елемента часто використовуються пружні втулки з циліндричним отвором під хвостовик інструменту або заготовку. При цьому затискна втулка може бути як тонкостінною, так і товстостінною. Затискна втулка вважається тонкостінною, якщо  $S/D \leq 0,1$  і товстостінною –  $S/D \geq 0,1$ , де  $S$  – товщина стінки втулки,  $D$  – внутрішній діаметр втулки [6]. Тонкостінні втулки розраховуються по формулам Ляме, а товстостінні по формулам, виходячи із чотирьох теорій міцності в залежності від характеристик матеріалів втулки.

В роботі приведені залежності і приклади розрахунку напружень в тонкостінній затискній пружній втулці. Визначені точки найбільших радіальних і тангенціальних напружень. Показано, що зі збільшенням радіуса, тангенціальні напруження зменшуються як на внутрішній, так і на зовнішній поверхнях затискної втулки [7].

#### Список літератури

1. Moser S. Werkzeughalmer Schrumpffutter auf dem Vormarsch // Produktion. – 2006. – №31/32. – S.20
2. Thermo Grip. Проспект фирмы Bilz Werkzeug Fabrik GmbH & Co. KG, Ostfildern, 07.2007, 68.
3. Патент України №48105. МПК В23В 31/10, В23В 31/10, Гідромеханічний затискний патрон / Новік М.А., Музиченко В.В.: заявник і патентовласник НТУУ «КПІ», опубл. 10.03.2010р., Бюл.№5
4. Патент України на винахід №109332. МПК В23В 31/10, В23В 31/10, Гідромеханічний затискний патрон / Новік М.А., Музиченко В.В.: опубл. 10.08.2015р., Бюл.№15.
5. Патент України на винахід №108536. МПК В23В 31/10, В23В 31/10, Затискний патрон / Новік М.А., Музиченко В.В.: опубл. 12.05.2015р., Бюл.№9.
6. Элементы гидропривода. (Справочник). Изд. 2-е, перераб. и доп. Абрамов Е. И., Колесниченко К. А., Маслов В. Т. Киев, «Техника», 1977. 320 с
7. Новік М.А. Визначення напружень в затискній пружній втулці гідромеханічного затискного патрона/М.А. Новік, В.В. Музиченко// Вісник Вінницького політехнічного інституту, Вінниця – 2015. - №2(119). 116-122

УДК 623.746: 629.7.083.003.13 (045)

Радько<sup>1</sup> О.В., к.т.н., доц., Скуратовський<sup>2</sup> А.К., к.т.н., доц.

1 - Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

2 - НТУУ "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

### ПОВЕРХНЕВЕ МОДИФІКУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З МЕТОЮ УПРАВЛІННЯ ЇХ РЕСУРСНИМИ ПОКАЗНИКАМИ

Постійне підвищення вимог до надійності та довговічності сучасної техніки висуває до числа найбільш пріоритетних завдань розробку та застосування нових енергозберігаючих методів інженерії поверхні для цілеспрямованого управління ресурсними показниками конструкційних елементів машин і механізмів.

У роботі приведені результати використання імпульсного газотермоциклічного іонного азотування (ГТЦ ІА) [1] для збільшення ресурсного показника (середнього технічного ресурсу) конструкційних елементів на прикладі деталей зі сталі 46Х13. Для формування дифузійних шарів методом ГТЦ ІА використовували розроблену в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАНУ установку «ВПА-1». Технологічні параметри процесу: температура - 500... 90 °С, тиск - 75...115 Па, час обробки - 3...5 годин, співвідношення реакційних газів - 50...80% Ar + 50...20% N<sub>2</sub>. Дослідження виконували за методикою, описаною у [2]. Для скорочення тривалості експерименту було обрано жорсткі умови його проведення: питоме навантаження становило 25 МПа, швидкість ковзання - 0,4 м/с, мастильне середовище - мастило ЦИАТИМ-201. Величину зносу вимірювали через кожні 10 хвилин роботи. Наробіток зразка  $\tau_i$  визначався як час його роботи до досягнення значення величини граничного стану зносу  $\overline{\tau}_j$ . Математичне очікування середнього наробітку зразків до переходу у граничний стан  $\overline{\tau}_j$ , яке за даних умов проведення експерименту, по суті, дорівнювало їхньому середньому наробітку до заміни або середньому технічному ресурсу визначали за формулою:

$$\overline{\tau}_i = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{N}$$

де  $\tau_i$  - наробіток до переходу у граничний стан  $i$ -го зразка;  $N$  - кількість зразків.

В результаті проведених досліджень встановлено, що середній технічний ресурс зміцнених імпульсним ГТЦ ІА зразків зі сталі 46Х13 виявився у 2,2 разу більшим, ніж у термооброблених без імпульсного ГТЦ ІА. Це дозволяє зробити висновок, що використання даного методу на практиці надасть можливість підвищення довговічності деталей сучасних машин із одночасним суттєвим зменшенням витрат на ремонт зношеного обладнання.

#### Список літератури

1. Пат. 10014 Україна, МПК (2006) С23С 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді / Ляшенко Б. А., Рутковський А. В., Мірненко В. І, Радько О. В. ; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. — № 19782 ; заявл. 19.09.06 ; опубл. 15.12.06, бюл. № 12
2. Ляшенко Б. А. Збільшення ресурсних показників сталевих деталей машин через застосування енергозберігаючих технологій поверхневого зміцнення / Б. А. Ляшенко, А. К. Скуратовський, О. В. Радько // Наукові вісті національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". - 2010. - № 1(69). - С. 115-119.

УДК 621.923

**Филатов<sup>1</sup> Ю.Д., д.т.н., проф., Ковалев<sup>1</sup> С.В., к.т.н., Юрчишин<sup>2</sup> О.Я., к.т.н., доц.**<sup>1</sup> - Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев<sup>2</sup> - НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

### **ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПЛОСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ**

Высокая точность формообразования прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем при алмазном полировании может быть достигнута за счет использования оптимальных кинематических и режимных параметрами процесса обработки, выбора наиболее рациональной конструкции и характеристики полировального инструмента.

Интенсивность съема обрабатываемого материала в процессе полирования в зависимости от радиуса  $\rho$  круговых зон обрабатываемой поверхности определяется в соответствии с формулой  $Q(\rho) = \eta(\rho) \cdot L_t$  (где  $\eta(\rho)$  – коэффициент объемного износа;  $L_t$  – длина пути трения элемента обрабатываемой поверхности по поверхности инструмента).

Детали из кварца (плотность 2,65 г/см<sup>3</sup>) диаметром 60 мм полировали на шлифовально-полировальном устройстве, оснащеном системой мониторинга качества полированной поверхности, по методу жестких осей при помощи полировального инструмента «Аквапол» при следующих режимах: частота вращения детали – 800 об/мин, усилие прижима инструмента к детали – 10 Н, время цикла полирования 5–6 мин. При принудительном вращении детали инструмент вращается за счет сил трения между их притирающимися поверхностями. При полировании плоских поверхностей использовался также нетрадиционный метод обработки, при котором для осуществления взаимного перемещения инструмента и детали используется эксцентричное вращение детали, за счет которого происходит изменение расстояния между их центрами.

Сравнительный анализ процесса формообразования плоских поверхностей при полировании указанных деталей в описанных выше условиях показал, что точность формы обработанных поверхностей в обоих случаях практически одинакова и оценивается величиной отклонения от плоскостности 0,3–0,4 мкм. Это позволяет обрабатывать оптические детали высокой и средней точности с плоскостностью поверхности  $N = 2$  интерференционных кольца (приблизительно 0,5 мкм). Следует отметить, что для данного соотношения диаметров инструмента и обрабатываемой детали характер изменения формы обработанной поверхности (на «бугор») соответствует увеличению выпуклости независимо от кинематических параметров настройки станка. Это объясняется тем, что при принятых значениях кинематических параметров настройки использовался обычный инструмент, рабочий слой которого состоял из полировальных элементов «Аквапол» с приблизительно постоянным значением коэффициента заполнения поверхности, усугубляющий неравномерность износа. При полировании прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем, размеры которых не превышают  $D_1/3$ , в соответствии с описанной технологией точность их формообразования  $N_x \leq (1/3)^2 N \approx 0,2$  значительно повышается.

Результаты исследования влияния кинематических параметров на точность геометрической формы обрабатываемой поверхности позволили определить их наиболее рациональные значения, при которых достигается требуемая точность формообразования плоских поверхностей при полировании. Результаты теоретического анализа отклонения формы поверхностей деталей электронной техники и оптических систем подтверждены экспериментальными данными.

УДК 539.5 : 541.16: 66-95: 678.5

Колосов О.Є., д.т.н., с.н.с.

НТУУ "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

## ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ НАНОВУГЛЕЦЕВОГО МОДИФІКУВАННЯ ЕПОКСИДНИХ ОЛІГОМЕРІВ

**Вступ.** Розробляючи конкретний технологічний процес одержання наномодифікованих полімерних композиційних матеріалів (НМПКМ), слід, перш за все, проаналізувати вплив використовуваних нанодисперсних частинок на фізико-механічні властивості наповнених полімерних матриць. Короткий аналіз комплексу фізико-хімічних факторів, що впливають на цей процес, наводиться нижче.

Актуальність обґрунтування впливу нанодисперсних частинок на фізико-механічні властивості полімерних матриць базується на постулаті, згідно з яким прогнозування властивостей дисперсно-наповнених ПКМ є досить складним завданням, оскільки останні характеризуються комплексом фізико-механічних властивостей, пов'язаних з конкретним напружено-деформованим станом (н.д.с.) ПКМ. Це, в свою чергу, обумовлено наявністю різних видів включень та дефектів, які власне і визначають різні механізми руйнування затверділої полімерної матриці при конкретних видах руйнування полімеризованих ПКМ [1].

У свою чергу, прогнозування властивостей кінцевих ПКМ з наповнювачами нанометрового діапазону, в порівнянні з наповнювачами мікрометрового діапазону, є ще більш складним завданням. Це пов'язано з тим, що при цьому необхідно враховувати цілий ряд інших факторів, обумовлених, зокрема, різними механізмами адгезії та когезії, а також особливостями процесу руйнування НМПКМ.

**Виклад основного матеріалу.** Торкаючись першого аспекту, було розглянуто потенційний механізм руйнування дисперсно-наповненої полімерної матриці, який найбільш часто зустрічається в конструкційних ПКМ [2]. При цьому виходили з припущення, що дисперсні включення є фактичною перешкодою для рухомого фронту створюваної тріщини при н.д.с. НМПКМ. У міру того, як цей фронт прогинається між кожною парою сусідніх дисперсних наночастинок, його довжина збільшується.

Згідно з моделлю Ленга [2], збільшена довжина фронту тріщини може вносити істотний внесок в енергію руйнування крихкого композитного матеріалу з дисперсними частинками, яким є епоксидний полімер (ЕП). Також певний вплив на поширення тріщин здійснює розмір наявних дисперсних включень. З одного боку, «великі» частинки ефективно затримують просування тріщин, з іншого – частинки дисперсного наповнювача можна розглядати як своєрідні дефекти всередині полімерної матриці і, отже, ініціатори тріщин та концентрацій напружень, що виникають в процесі формування або навантаження НМПКМ.

Зі сказаного вище можна зробити висновок про те, що чим більше розмір частинки, тим більше напружена зона: як всередині частинок, так і навколо неї, і, таким чином, більше накопичена енергія деформації руйнування, пов'язана з дисперсною частинкою [2]. Такий підхід означає, що за даних умов розтріскування відбувається тільки в тому випадку, коли розмір частинок стає більше деякого критичного розміру  $d_{кр}$ .

У свою чергу, зовнішні напруження, прикладені до матеріалу, не повинні перевищувати межу міцності для крихких матеріалів і межу текучості для пластичних матеріалів. Виходячи з цієї умови й можуть бути оцінені критичні розміри включень ( $d_{кр}$ ), при яких в матеріалі можуть з'явитися відшарування по границі розподілу фаз «полімерна матриця – наповнювач».

Так, наприклад, в разі необроблених апретуючими складами дисперсних наповнювачів для склоподібного ЕП критичний розмір включень становить  $d_{кр} \approx 3 \cdot 10^7$  мкм

[2]. Розрахунки показують, що для ініціювання відшарування в низькомодульних матрицях потрібні відносно «великі» розміри дисперсних включень.

Також важливе значення має ефект орієнтуючого впливу дисперсного наповнювача на рідке полімерне зв'язуюче (ПЗ). Причому орієнтування здійснюється не тільки в адсорбованих молекулах, але і в молекулах, які безпосередньо з ними (тобто з адсорбованими молекулами) пов'язані, і в яких орієнтація відбувається як відгук на ближню взаємодію. У свою чергу, прояв ефекту дальності не обмежується тільки впливом поверхневих силових полів. Встановлено також, що мікроусадкові явища, які спостерігаються в процесі формування НМПКМ, також викликають об'ємне орієнтування [2].

При цьому в прикордонному шарі полімеру відбувається збільшення ступеня кристалічності за рахунок зменшення частки міжглобулярних аморфних шарів полімеру. Тому в прикордонному шарі підвищується щільність полімеру в порівнянні з об'ємною фазою, а також спостерігається впорядкування структури полімеру, в результаті чого проявляється вищезгаданий ефект орієнтації.

Не менш значущим фактором є наявність в об'ємі НМПКМ просторового каркаса, сформованого з частинок дисперсного нанорозмірного наповнювача, які чергуються з структурованою фазою затверділої полімерної матриці. Власне такий каркас утворюється з граничних шарів матриці, а частинки дисперсного наповнювача слугують їх (тобто граничних шарів) носіями. При цьому структура такого каркаса з посиленою матрицею здійснює істотний вплив на фізико-механічні характеристики НМПКМ.

Не менш важливе значення має рівномірність розподілу дисперсного наповнювача в НМПКМ, що обумовлює формування безперервного підсилюючого просторового каркаса з частинок наповнювача, пов'язаних зі структурованими шарами реактопластичного полімеру.

Таким чином, відповідно до вищезазначених факторів, для отримання позитивного ефекту при наповненні густосітчастих термореактивних полімерних матриць жорсткими дисперсними частинками бажано дотримуватися таких умов:

- 1) ступінь наповнення повинна знаходитися в оптимальних (ефективних) межах, обумовлених розміром використовуваних дисперсних частинок;
- 2) бажано використовувати дисперсні частинки нанометрового діапазону;
- 3) дисперсний наповнювач повинен мати гарну адгезію до матеріалу полімерної матриці, переважно з можливістю утворення хімічного зв'язку між наповнювачем і матрицею.

Найбільш повно зазначеним вище вимогам задовольняють дисперсні нанорозмірні наповнювачі у вигляді вуглецевих нанотрубок (ВНТ). При цьому істотний внесок в фізико-хімічні властивості НМПКМ вносять поверхневі атоми багаточарових ВНТ (БВНТ), відносна кількість яких при таких розмірах частинок значно збільшується.

**Висновки.** У загальному випадку необхідно досліджувати вплив параметрів наповнення, природи дисперсних частинок на структурні зміни в полімерному матеріалі з урахуванням всіх гіпотез і чинників «посилення», а також на фізико-механічні характеристики епоксидної матриці і НМПКМ на її основі. Аналіз такого впливу дозволить розробляти оптимальну технологію нановуглецевого модифікування епоксидних олігомерів.

### Список літератури

1. Колосов О.Є. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку: [монографія] / О. Є. Колосов, В. І. Сівецький, О. П. Колосова. – К.: ВПК «Політехніка», 2015. – 295 с.
2. Колосов О.Є. Одержання високоякісних традиційних та наномодифікованих реактопластичних полімерних композиційних матеріалів [монографія] / О. Є. Колосов. – К.: ВПК «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2015. – 227 с.

УДК 621.822.172

**Федориненко Д. Ю.<sup>1</sup>, д.т.н., проф., Космач О.П.<sup>1</sup>, к.т.н., Сапон С.П.<sup>1</sup>, к.т.н., доц., Безручко В.М.<sup>1</sup>, к.т.н., Чуприна В.М.<sup>2</sup>, к.т.н., доц.**

<sup>1</sup> Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

<sup>2</sup> Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил України, м. Чернігів, Україна

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБ'ЄМНИХ ГІДРОПРИВОДІВ ВЕРСТАТІВ**

В умовах постійного зростання цін на енергоносії актуальною проблемою є підвищення енергоефективності машинобудівного виробництва. Окрім того, проблема підвищення енергоефективності безпосередньо пов'язана із збереженням навколишнього середовища, зменшенням викидів шкідливих речовин та скороченням споживання викопних ресурсів. Так, у процесі механічної обробки матеріалів на верстатах лише до 20% споживаної верстатом енергії витрачається саме на обробку, більша ж частина енергії витрачається на забезпечення стабільності параметрів процесу. Споживання енергії шпиндельним вузлом разом із витратою енергії для змащення механізмів й охолодження робочих рідин варіюється у діапазоні від 50 до 70 % залежно від умов обробки на верстатах з ЧПК.

Задачею даної роботи є аналіз існуючих підходів щодо підвищення енергоефективності об'ємних гідроприводів та дослідження ефективності використання частотно-регульованого приводу насоса у гідроприводах токарних верстатів.

Проведено аналіз наукових підходів до підвищення енергоефективності об'ємних гідроприводів. Відзначена перспективність використання регуляторів для керування подачею насоса залежно від режиму роботи машини. Широке застосування знаходять системи чутливі до навантаження з метою регулювання подачею рідини від насоса. Перспективним також є, для підвищення енергоефективності найбільш поширених у верстатах дросельних систем регулювання, застосування гідравлічних акумуляторів з метою часткового живлення виконавчих механізмів приводів. Вочевидь, найбільш перспективним є застосування пропорційного регулювання подачею рідини з метою мінімізації енергоспоживання гідроприводів. Підвищення ефективності гідравлічних систем можливо за рахунок мінімізації об'ємних, механічних та гідравлічних втрат енергії. Також ефективність гідросистем можливо підвищити за рахунок модульного виконання структури, що зменшує втрати тиску у магістралях та у місцевих опорах; термостабілізації середовища за рахунок відводу тепла через стінки бака та елементів системи живлення.

З метою підвищення енергоефективності системи живлення гідростатичних підшипників токарного верстата УТ16А в роботі запропоновано використовувати насосно-акумуляторний частотно-регульований привод. Живлення підшипників при виконанні верстатом холостих ходів здійснюється від гідроакумулятора, а при виконанні робочих ходів від насоса, причому потужність створювана насосною установкою регулюється залежно від режимів обробки різанням. Для цього система керування оснащена інвертором, який програмно за допомогою мікропроцесорного пристрою задає швидкість обертання вала асинхронного електродвигуна приводу гідравлічного насоса. Експериментальним шляхом встановлено, що застосування запропонованого схемного рішення дозволило знизити споживання електричної енергії верстатом УТ16А до 3,5 разів при механічній обробці партії заготовок. Досліджено вплив режимів роботи насосної установки ( $p=\text{const}$ ,  $Q=\text{const}$ ), режимів різання, дисбалансу заготовки на споживану електричну потужність токарного верстата. Встановлені раціональні експлуатаційні параметри гідроприводу та режими різання, які при заданій якості обробки відповідають мінімальному енергоспоживанню токарного верстата.

УДК 621.9.06 -752

Гущин А.М., к.т.н., доц., Зелинский С.А., к.т.н., доц., Серебряй Ю.А., аспирантка  
Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

### НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ МЕХАТРОННЫХ МАТЕРИАЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ

Традиция следования в фарватере технического прогресса высокоразвитых стран не обеспечило конкурентность металлообрабатывающего оборудования Украины на внешнем рынке. Поэтому единственный путь – создавать принципиально новую, наукоемкую продукцию с показателями «цена/качество», существенно выше мировых достижений.

Возникает вопрос – насколько это реально для возможностей промышленности Украины сегодня в условиях ограниченного финансирования и устаревшего технологического парка. Кроме того, классическая методология проектирования металлорежущих станков уже подошла к своим технологическим пределам, когда показатели качества увеличиваются незначительно, а затраты на их производство растут по экспоненциальному закону.

Поэтому один из наиболее реальных путей достижения конкурентоспособности металлорежущих станков – создание функционально законченных, наукоемких технических систем (ТС) на основе использования принципиально новых возможностей мехатроники.

Эффективность реализации современных возможностей мехатроники в металлообрабатывающих станках наглядно продемонстрировано достижениями фирмы Sodick (Япония). На станках этой фирмы качество обработки сложных поверхностей в 3-5 D изделиях достигло нанометровых рубежей [1].

Однако эффективность возможностей современной мехатроники фирмы Sodick ограничено областью преимущественно электроэрозионной обработки, то есть в условиях отсутствия отрицательного влияния силовых факторов, сопровождающих процесс обработки резанием.

Анализируя достижения показателей качества фирмы Sodick, можно сделать следующий вывод: такие же показатели качества и точности обработки деталей могут быть достигнуты и при обработке на станках со снятием стружки в случае сведения к минимуму влияние силовых факторов процесса резания на традиционных металлорежущих станках.

На протяжении последних 50-ти лет эту задачу пытались решить за счет оснащения станков системами адаптивного управления (САУ). Функции САУ заключались в стабилизации силовых параметров процесса резания, что позволило существенно повысить точность обработки. Однако, САУ не нашли практического применения в промышленности по причине необходимости дополнительного оснащения станков различными датчиками и другими дополнительными приборами. Это существенно усложняет эксплуатацию станка в производстве, и демонстрировало высокую эффективность, как правило, в лабораторных условиях.

Поэтому в статье предлагается принципиально новый подход к конструированию металлорежущих станков, реализующих принципы адаптивного управления силовыми параметрами лезвийной обработки, за счет новых возможностей мехатронных технических систем.

Это достигнуто за счет создания принципиально новых конструкций материалобрабатывающих станков с ЧПУ, в которых применены мехатронные модули, реализующие принципы САУ и выполняющие роль интерфейса механической системы станка с его электронно-компьютерными компонентами.

Связующая функция интерфейса обеспечивается за счет мехатронного модуля, выполненного в виде перепрограммируемой предохранительной муфты [2,3]. В конструкции



муфты предусмотрено использование линейного электрического двигателя, датчика линейных перемещений, что обеспечивает не только плавное дистанционное регулирование передаваемого крутящего момента, но и возможность автоматического управления процессом работы станка или технологической машины от персонального компьютера.

Созданные на этом принципе материалобрабатываемые станки продемонстрировали принципиально новые технологические возможности по обработке 3-5 D изделий из материалов с любыми физико-механическими характеристиками, в том числе сверхвысокой твердости.

### Список литературы

1. Sodick - мировой лидер в области электроэрозионных технологий <http://www.sodick.org/>
2. Предохранительная муфта конструкции А.М. Гущина № 1315681, Авторское свидетельство Бюл. № 21, 07.06.87
3. Запобіжна муфта. Гриньов Б.В., Шишкин О.В., Гущин А.М. Патент на винахід № 75172 Бюл. № 3, 15.03.2006

---

### УДК 621.391.175

Гущин А.М., к.т.н., доц., Зелинский С.А., к.т.н., доц., Серебрий Ю.А., аспирантка  
Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА ШЛИФОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОФИЛЕЙ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

В Украине производство конкурентных станков в значительной мере отстает от аналогичных разработок промышленно-развитых стран мира, а попытки приспособить имеющееся оборудование для реализации принципиально новых технологических процессов изначально обречены на провал.

Создание технических систем, отвечающих требованиям рынка, предполагает интеграцию последних достижений науки и техники в единых технологических комплексах, как правило, дорогостоящих, поэтому вопросы гарантированного качества наукоемкой продукции становятся, чуть ли не первоочередными. Эта проблема становится еще более актуальной в связи со вступлением Украины в ВТО и предстоящим членством в ЕС.

Уровень качества в большой степени зависит от комплексного подхода к решению конструкторских и технологических задач, отвечающих конкурентоспособности на международном рынке, который определяет требования не только к конкретному изделию, но и практически ко всем этапам разработки, производства любого вида продукции. Поэтому традиционная методология инженерного проектирования и создания объектов новой техники, которая формировалась длительное время и предполагала улучшение лишь «внутренних» особенностей машины (производительность, надежность, долговечность и т.д.) в условиях современных рыночных отношений уже не может дать желаемого результата.

В ходе выполнения научно-исследовательских работ учеными Одесского национального политехнического университета выработаны новые подходы к проектированию сложных адаптивных технических систем управления ходом технологических процессов, в частности для окончательного формообразования деталей аэродинамического профиля.

Финишная обработка сложнопрофильных деталей, применяемых в авиационной и ракетно-космической технике, всегда представляла сложную инженерную задачу и не только в виду многообразия конструктивных вариантов такого рода изделий, но и отсутствия технологий, реализующих силовое взаимодействие в зоне контакта «инструмент-

обрабатываемая деталь» на уровне чувствительности организма человека. Поэтому в современных технологиях финишной обработки профиля пера турбинной лопатки до сих пор велика доля ручного труда. Это является огромным недостатком существующих технологий, так как присутствие «человеческого фактора» в процессе изготовления однотипных деталей, имеющих аэродинамический профиль, не может гарантировать качества, требуемого для таких ответственных и необходимых в больших количествах изделий.

В этой связи необходимо отметить некоторые аспекты проблем финишной обработки профиля пера турбинной лопатки, имеющих приоритетное значение при создании принципиально новой техники:

1. Турбинная лопатка - одна из важнейших и ответственных деталей газовых и прочих турбин, в конечном счете, определяет не только надежность газотурбинных двигателей (ГТД), но и в значительной степени их конкурентоспособность.

2. С механизацией и автоматизацией формообразования лопаток и других аэродинамических профилей связано развитие, быстрое освоение и обновление авиационной техники, нефтяного, энергетического, судостроительного и прочего оборудования.

3. При отклонении геометрических форм и размеров профиля лопаток от расчетных ухудшается газодинамическая устойчивость двигателя, возрастают аэродинамические потери, приводящие к уменьшению КПД компрессора и турбины, к потере мощности и, как следствие, к снижению экономичности двигателя. Поэтому, изготовление профильной части лопаток в строгом соответствии с расчетными данными является необходимым условием работоспособности, экономичности и надежности ГТД. В связи с этим, комплексная механизация и автоматизация чистовых и финишных операций пера лопаток и других сложнопрофильных поверхностей, где формируются показатели качества поверхности и следовательно, стабильность эксплуатационных характеристик двигателей, являются особо актуальными.

4. После фрезерной обработки, выполняемой, как правило, на 5-ти и 6-ти координатных станках с ЧПУ (рис. 1) возникают и остаются на поверхностях деталей следы обработки - риски, царапины, задиры, вмятины, трещины, заусенцы, которые необходимо удалить на финишной операции.

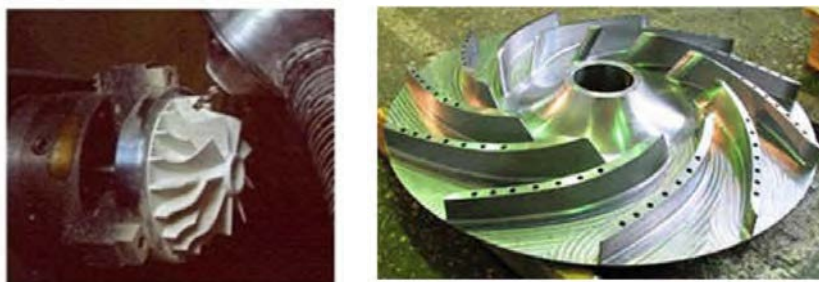


Рис. 1. Дефекты на поверхностях деталей после фрезерования

5. Особенности тепловых явлений на операции окончательного формообразования шлифованием могут привести к диффузии, особенно при воздействии повышенных температур, вследствие чего в поверхностном слое возникают химические соединения основного металла с проникающими извне веществами. При повышенных температурах усиливается диффузионная подвижность атомов, приводящая к перераспределению концентрации легирующих элементов, что приводит к преждевременному выходу, из строя не только дорогостоящих изделий, но и к тому же ответственных за безаварийную работу машин и аппаратов.

В связи с этим, актуальной задачей является изыскание принципиально новых подходов к решению этой проблемы, не исчезнувшей до сих пор не только у нас в стране, но и за ее пределами.

Целью теоретических исследований параметров процесса финишной обработки профиля пера турбинной лопатки шлифованием является установление основных закономерностей между режимами обработки, геометрией инструмента, материала, из которого он изготовлен, а также условиями обеспечения качественной поверхности рабочей части лопатки без нарушения его химико-механических свойств.

Следует отметить, что указанные задачи сложны, и пути их корректного решения, пригодного для практической реализации, пока не найдены.

В основу исследований положены теоретические фундаментальные законы теплофизики для каждого из твердых тел, участвующих в процессе резания, получены аналитические зависимости, пригодные для практического использования, которые реализованы на экспериментальном оборудовании при обработке профиля пера турбинной лопатки.

---

**УДК 681.33: 621.9**

**Майданюк С.В. аспірант, Плівак О.А., асистент**  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### **МОДУЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛ РІЗАННЯ**

Процес оброблення різанням супроводжується великою кількістю явищ, пов'язаних із пластичним деформуванням та руйнуванням оброблюваного матеріалу в процесі зняття стружки, теплові, електромагнітні, хімічні, динамічні тощо, які є взаємозалежні.

В процесі різання виникають сили протидії, які називають силою різання [1]. Сила різання є одним з найбільш значних показників процесу різання та використовується при проектуванні інструменту, та є одним з параметрів оптимізації при визначенні геометрії різальної частини інструментів, режимів різання та стійкості. Тому питання визначення сил різання є актуальним питанням.

Використання сил різання як комплексного показника роботи інструменту та технологічної системи верстат-пристрій-інструмент-заготовка, викликає потребу в методах, які дозволяють проводити вимірювання сил різання з достатньою точністю, при цьому виникає проблема вибору технічних засобів визначення сили різання. Сучасний рівень наукових досліджень зобов'язує дослідників використовувати для визначення складових сили різання комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи різного призначення та конфігурації. Однак відомі пристрої використовують не завжди адаптовані до умов вимірювань, програмних та апаратних засобів. У зв'язку з цим розробка таких систем є актуальною задачею.

Метою роботи є розробка та створення універсального комплексу по вимірюванню сил різання.

Сучасні силовимірювальні комплекси використовують, в переважній більшості, метод безпосереднього вимірювання за допомогою силовимірювальних датчиків, який дозволяє визначати величину середнього значення сили, та фіксувати її зміну в часі; одночасно вимірювати кілька складових сили різання. Основним елементом, що сприймає сили є силовимірювальний датчик, принцип дії якого полягає в тому, що вимірюване зусилля передається на чутливий пружний елемент, викликаючи його деформацію.

Найчастіше, при визначенні сил різання, використовується динамометри на основі тензорезисторних датчиків – тензорезисторні динамометри, які використовуються як для статичних, так і для динамічних вимірювань в діапазоні вимірювання сил від 5Н до 5МН, з високою точністю вимірювання, меншою 0,03% [2, 3, 4]. Внаслідок великої жорсткості ці динамометри відрізняються досить високою власною частотою, яка може досягати декількох

кілогерц. Використання тензорезисторних датчиків добре підходить також у випадках з більш високою частотою та тривалому знакозмінному навантаженні.

Одним з тензорезисторних динамометрів для вимірюванні сил різання є динамометр конструкції ВНДІ – універсальний динамометр УДМ [5]. За допомогою динамометра УДМ можна одночасно вимірювати три взаємно перпендикулярні складові сили різання, а також крутний момент, при цьому, показання динамометра не залежать від того, в якій точці буде прикладена сила різання. В якості чутливого елемента динамометра виступають тензометричні датчики (тензодатчики), принцип роботи яких заснований на зміні опору провідника при механічному впливі на нього[5]:

Вимірювання за допомогою тензодатчиків вимагають реєстрації дуже малих змін опору. Щоб вимірювати мале змінювання опору та компенсувати температурну похибку, тензодатчики з'єднані в напівмостову схему моста Уїтстона, що дає можливість підвищити чутливість схеми вимірювання.

При розробці системи збору інформації з високою роздільною здатністю має бути приділена особлива увага методу та джерелу збудження датчика, а також схемі підключення, призначеної для передачі дуже малих аналогових сигналів від датчика до АЦП. На рис. 1 показана узагальнена схема системи збору даних на базі тензодатчиків [6, 7].

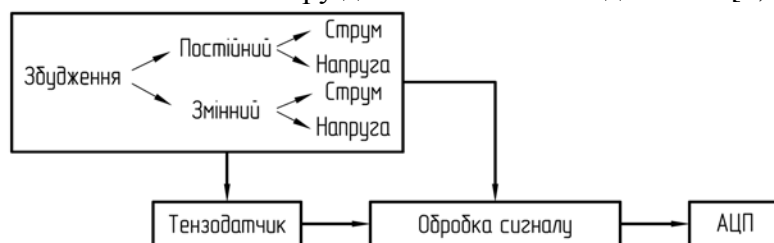


Рис. 1. Узагальнена схема системи збору даних на базі тензодатчиків

Відповідно до рис. 1, тензодатчики можуть збуджуватися за допомогою контрольованого струму або напруги. У системах збору даних, зазвичай, застосовується збудження постійною напругою, але там, де є багато перешкод, струмове збудження, в загальному випадку, є кращим. Крім того, збудження датчика може проводитися за допомогою сигналу або постійного, або змінного струму. Система зі збудженням датчика постійним струмом дещо простіша конструктивно та в застосуванні, але є труднощі поділу вимірюваного сигналу та паразитного сигналу зміщення підсилювача і сигналу паразитних термопар. Зміщення схильне до дрейфу; змінюється непередбачувано при зміні температури, а також під дією шуму виду  $1/f$ .

Для швидкопротікаючих, динамічних процесів більш ефективним буде збудження датчика змінним струмом. Джерело збудження датчика періодично перемикає полярність сигналу збудження, а амплітуда сигналу вимірюється і усереднюється для отримання результату. Таким чином пригнічується вплив шумів виду  $1/f$  і сигналів паразитних термопар на вимірюваний сигнал. Це дозволяє значно зменшити амплітуду сигналу збудження, що, в свою чергу, зменшує похибки, пов'язані з саморозігрівом тензорезистора. Ці переваги зазвичай переважають недоліки, система стає більш складною та дорогою; виникає необхідність враховувати час встановлення сигналу після перемикавання полярності збудження. Таким чином, для збудження тензодатчиків, при динамічних вимірюваннях сил різання, більш доцільним буде збудження датчика змінним струмом [6, 7, 8, 9].

На основі вище наведеного був розроблений модуль вимірювання сил різання, на основі динамометра УДМ, який має поліпшені технічні характеристики — швидкодію, точність, енергоспоживання, взаємну ізоляцію силової та інформаційної частин. (рис. 2).

Модуль виконано в блочно-модульному виконанні, який передбачає використовувати для кожного окремого вимірювального каналу сил різання індивідуальний вимірювальний модуль, який включає в себе джерело живлення, збудження тензомоста, тензопідсилювач сигналу і модулятор, що дозволяє індивідуально проектувати та налаштовувати

вимірювальні модулі для кожного окремого вимірювального каналу сил різання. В результаті вдається досягти високих метрологічних характеристик системи, за рахунок збільшення трудомісткості проектування та налаштування.

Він входить в систему визначення зусиль різання, до нього під'єднується багатокомпонентний силовимірювальний динамометр конструкції УДМ, а сам, через плату аналого-цифрового перетворювача (АЦП), під'єднується до IBM-сумісного комп'ютера. Модуль вимірювання сил різання побудовано за модульним принципом, містить чотири аналогічних канали та виконує наступні функції: живлення динамометра УДМ, підсилення та нормалізацію, оброблення, сигналів, які надходять від силовимірювального динамометра; прийом і передачу даних вимірювань до ПК через аналого-цифровий перетворювач.

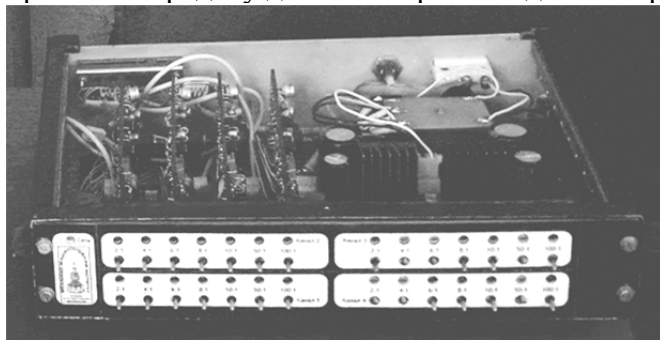


Рис. 2. Фото модуля вимірювання сил різання

не тільки огинаючу сигналу, але і його полярність, що необхідно при роботі датчиків в умовах знакозмінного навантаження. В результаті демодуляції на виході фільтра виникає струм, що змінюється за законом вимірюваного процесу, після чого він передається на вихідний багатокаскадний інструментальний підсилювач, а потім на АЦП, розташовану в персональному комп'ютері, де відбувається перетворення аналогового сигналу в цифровий та обробка отриманого сигналу.

Даний модуль забезпечує вимірювання сил різання по чотирьох каналах силовимірювального датчика одночасно, його комплекс можливо використовувати в лабораторних та науково-дослідних роботах для дослідження силових характеристик при різанні.

### Список літератури

1. Розенберг Ю. А. Силы резания и методы их определения: в 2 ч. / Ю. А. Розенберг, С. И. Тахман. – Курган: КМИ, 1995– . – Ч. 1: Общие положения. – 1995. – 128 с.
2. Обзор силоизмерительных датчиков [електронний ресурс] // Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) GmbH. – Режим доступу до інтернет-сторінки: <http://www.anwit.kiev.ua/article/24/t/page/4/>
3. Тензорезисторы [електронний ресурс] // Энциклопедия АСУ ТП. – Режим доступу до інтернет-сторінки: [http://www.bookasutp.ru/Chapter6\\_3\\_5.aspx](http://www.bookasutp.ru/Chapter6_3_5.aspx)
4. Wang L., Tan K.C. Modern Industrial Automation Software Design. Principles and Real-World Applications. - John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey. 2006. - 313 p.
5. Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ. – М.; ВНИИ, 1979. – 23с.
6. О'Греди А. Методы возбуждения измерительных датчиков и применение ИС AD7711 и AD7730 [електронний ресурс] // Рынок микроэлектроники. – Режим доступу до інтернет-сторінки: [http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03\\_03/stat\\_50.htm](http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_03/stat_50.htm)
7. Динамические характеристики тензометрических измерительных систем для прочностных испытаний [електронний ресурс] // Инженерное бюро авиационного института. – Режим доступу до інтернет-сторінки: <http://inburo.com.ua/ru/pages/58/>
8. Герштенхабер М. Схема возбуждения мостового тензодатчика переменным током [електронний ресурс] / AN-683R Руководство по применению // Analog Devices, Inc. – 2003. – Режим доступу до інтернет-сторінки: <http://www.analog.com/media/ru/technical-documentation/application-notes/38829122935342AN683R.pdf>
9. Теория тензоизмерений, схемы подключения тензорезисторов [електронний ресурс] // Zetlab. Простые решения сложных задач. – Режим доступу до інтернет-сторінки: <http://www.zetlab.ru/support/articles/tenzometriya/teoriya-tenzoizmereniy-skhemy-podklyucheniya-tenzorezistorov-k-zetsensor/>

УДК 621.873

Неженцев А.Б. к.т.н., доц.

НТУУ "Киевский политехнический институт", г. Киев, Украина

### АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА НА ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ И ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ

Решение задачи обеспечения максимальной производительности грузоподъемных кранов при минимуме энергопотребления в значительной степени зависит от выбора их номинальных скоростей.

Анализ влияния скорости передвижения крана на потери энергии, динамические нагрузки и быстродействие выполнен на примере мостового крана г/п 20т, представленного трехмассовой динамической моделью [1, 2]. Исследовались процессы разгона мостового крана до различных скоростей, определяемых передаточными числами редуктора  $u_m$  из параметрического ряда (9,80; 12,64; 16,30; 19,88; 24,90; 32,42), и перемещение крана на усредненный путь, равный 30м.

Движение динамической модели крана описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений [1, 2], которая интегрировалась численным методом Рунге-Кутты. По результатам интегрирования дифференциальных уравнений были построены зависимости потерь энергии  $\Delta E$ , времени разгона  $t_p$  и продолжительности перемещения крана  $t_\Sigma$  от номинальной скорости  $V$ , величина которой соответствует передаточным числам редуктора механизма передвижения  $u_m$  из указанного параметрического ряда (см. рис. 1).

Из рис. 1 видно, что при повышении номинальной скорости крана увеличивается время разгона  $t_p$ , уменьшается общая продолжительность перемещения крана  $t_\Sigma$  и растут потери энергии  $\Delta E$ . При этом максимальные значения горизонтальных динамических нагрузок, действующих на металлоконструкцию крана  $P_m^{\max}$  и груз  $P_{гр}^{\max}$  уменьшаются (см. рис. 2).

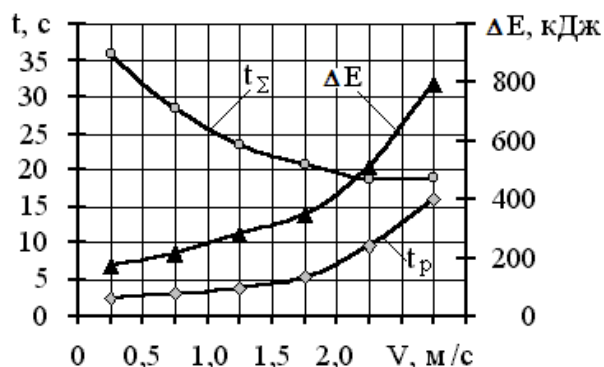


Рис. 1 - Зависимости  $\Delta E$ ,  $t_p$  и  $t_\Sigma$  от номинальной скорости  $V$  мостового крана г/п 20т

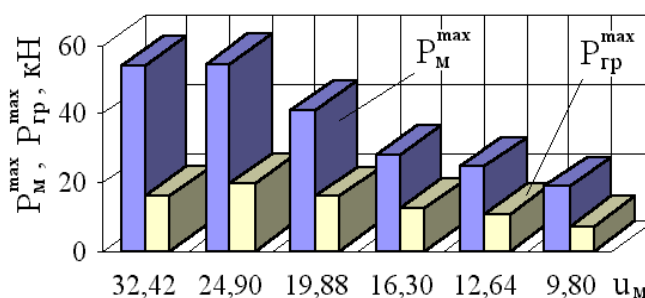


Рис. 2 - Зависимости нагрузок  $P_m^{\max}$  и  $P_{гр}^{\max}$  от передаточного числа редуктора  $u_m$

Анализ приведенных графиков показал, что изменяя величину номинальной скорости передвижения крана (например, за счет применения редукторов с различным передаточным числом  $u_m$ ), можно более чем в четыре раза уменьшить потери энергии при перемещении груза на расстояние 30м. Вместе с тем даже незначительное повышение производительности грузоподъемного крана, обусловленное увеличением его номинальной скорости, сопровождается существенным ростом потерь энергии.

Повышение передаточного числа  $u_m$  с 9,80 до 32,42 приводит к снижению скорости крана во столько же раз (с 2,67 до 0,81м/с), а величина приведенной к ходовым колесам силы

привода  $P_d$  - во столько же раз увеличивается (с 19,17 до 62,68кН). При этом общая продолжительность перемещения крана  $t_{\Sigma}$  выросла почти в два раза (с 19 до 36с).

При разгоне и передвижении крана по разным механическим характеристикам потери энергии и динамические нагрузки существенно отличаются по величине (см. рис. 3). Суммарные потери энергии  $\Delta E$  при разгоне и передвижении крана на 30м по 1-й механической характеристике превышают аналогичные потери по 4-й характеристике на 32%. При этом следует учесть, что при разгоне по искусственным характеристикам невозможно достичь номинальной скорости передвижения крана (например, по 1-й характеристике кран передвигался со скоростью достигающей лишь 70% от номинальной).

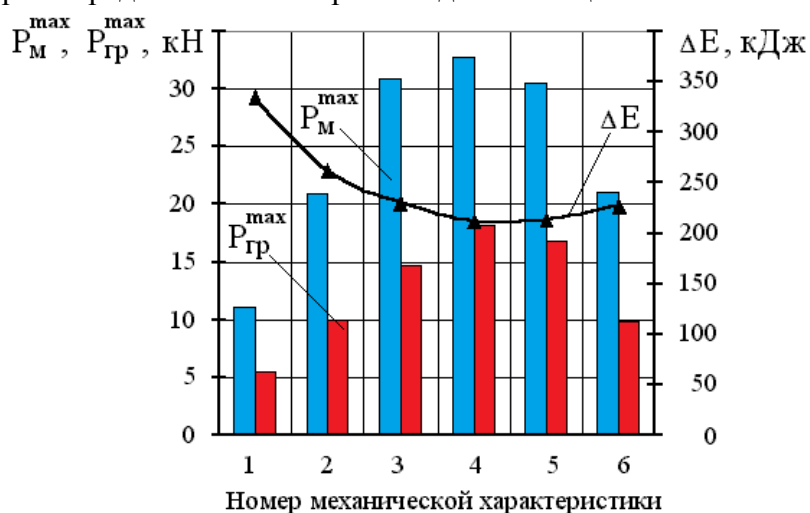


Рис. 3 - Зависимости  $P_M^{\max}$ ,  $P_{Гр}^{\max}$  и  $\Delta E$  от механической характеристики электропривода передвижения крана при  $u_m = 12,64$

Минимальные потери энергии имели место при разгоне и передвижении мостового крана г/п 20т по 4-й механической характеристике, которая создает наибольшую среднепусковую приведенную силу привода и сопровождается наибольшими динамическими нагрузками  $P_M^{\max}$  и  $P_{Гр}^{\max}$  (см. рис. 3). Следовательно, использование механических характеристик кранового электропривода с низкими потерями энергии, приводит к росту ускорений, динамических нагрузок и амплитуды раскачивания груза.

**Выводы:** - исследования потерь энергии и динамических нагрузок грузоподъемных кранов необходимо осуществлять с помощью математических моделей, учитывающих все основные параметры электромеханической системы «привод – металлоконструкция - груз» [2, 3]. Это позволит повысить точность расчета потерь энергии при передвижении грузоподъемных кранов на 13 – 25%;

- поскольку изменение номинальной скорости грузоподъемных кранов приводит к улучшению одних показателей и ухудшению других, то целесообразно при проектировании кранов (особенно тяжелого режима работы А6 - А7) устанавливать значения номинальных скоростей с учетом потерь энергии, динамических нагрузок и времени передвижения крана.

#### Список литературы:

1. Будиков Л.Я., Нгуен Н.К., Неженцев А.Б. Исследование динамики грузоподъемных кранов // Вестник машиностроения, №4. - М.: Изд-во Машиностроение, 1981, - с. 39-42.
2. Неженцев А.Б. Моделирование потерь энергии при передвижении грузоподъемного крана // Вісник Східноукраїнського національного ун-ту ім. В. Даля, № 10 (56). – Луганськ: Вид-во СНУ, 2002. – с. 179-185.
3. Неженцев А.Б., Харитонов М.С. Методика расчета энергопотребления при передвижении грузоподъемных кранов // Вісник Східноукраїнського державного ун-ту, №6(28). – Луганськ: Вид-во СУДУ, 2000. - с. 64-72.

УДК 621.923.91

Турманидзе Р.С., д.т.н., проф., Бачанадзе В.И., Попхадзе Г.З.  
Грузинский Технический Университет (ГТУ), Тбилиси, Грузия

### ЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ МИКРОСВЁРЛ ДЛЯ ГЛУБОКОГО СВЕРЛЕНИЯ ПАКЕТА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

**Abstract:** In this work are given the results of the study of power characteristics of the process of deep drilling of printed circuit boards package for microelectronic devices, including for the production of individual control units mechatronic systems carbide micro drills depending on the depth of drilling, cutting conditions and the geometry of the drill. In particular studied the nature of changes in axial efforts and torque depending on the drilling depth drill with different inclinations of the spiral grooves using specially designed highly sensitive devices, enabling direct measurement method. Based on the analysis of the results of the study, changes in the geometry of existing standard drills. Proposed new construction of micro drills vary-angle spiral grooves in such a way that the angle is the maximum value at the top of the drill and uniformly decreases towards the end of the working parts. The drills are manufactured with different inclinations of the spiral grooves. Based on the experiments of them chosen more for its near standing power rates to the standard drill bit and its comparative test with a standard drill bit, bringing them up to the breakage, thanks to which the proven advantages of drills new design. Taking into account the results of the experiments proposed drill elongated structures to improve performance by increasing the processing drilling depth and accordingly the number of plates in the package of printed circuit boards.

#### Введение и постановка задачи

Современную технику, начиная от бытовой и заканчивая космической аппаратурой, невозможно представить без электронных узлов. Производство базовых деталей электронной аппаратуры - печатных плат, связано с процессом сверления огромного количества отверстий малого диаметра (около 1 мм и меньше). Сверление осуществляют разными методами, но самым эффективным является сверление микросвёрлами из твёрдого сплава, геометрические параметры которого установлены исследователями разных стран на основе многократных экспериментов в соответствующих лабораториях и предприятиях. В частности установлено, что оптимальный передний угол и соответственно угол наклона спиральной канавки составляет примерно  $30^{\circ}$ , а задний угол  $18^{\circ}$ . Их перетачивают через каждое 1000 отверстие и рассчитаны на 3-4 переточку.

Производство печатных плат это массовое производство, где с целью увеличения производительности осуществляется сверление пакета, составленной из несколько пластин, то есть имеет место глубокое сверление, где глубина сверления превышает размера диаметра  $8 \div 10$  раз.

В производстве печатных плат простой дорогостоящего технологического оборудования связан не только с предусмотренной заменой инструмента с целью их переточки, но и с непредусмотренной, вызванной хрупким разрушением даже до первой переточки, что связаны со значительными экономическими потерями. Вероятность хрупкого разрушения значительно растёт при глубоком сверлении пакета печатных плат. При этом зона разрушения находится в близости конца спиральной канавки.

Учитывая массовость производственных процессов изготовления печатных плат, можно сказать, что хотя бы незначительное повышение стойкости и хрупкой прочности микросвёрл и соответственно производительности процессов сверления, может дать существенный экономический эффект.

#### Методика и результаты исследования

Исследовательские работы с целью повышения стойкости твердосплавных микросверл и производительности процесса глубокого сверления пакета печатных плат были проведены в лаборатории прецизионных микроинструментов департамента «Производственные технологий инженерии механики» Грузинского технического университета в тесном



сотрудничестве со специалистами Магдебургского технического университета им. Отто Фон Гурике (Германия) в рамках совместного международного проекта.

Исследования были начаты изучением характера изменения силовых показателей – крутящего момента и осевого усилия в зависимости от глубины и режимов резания сверления пакета печатных плат из стеклотекстолита.

Для измерения осевого усилия был изготовлен прибор на основе известных методов и существующих аналогов, измеряющим элементом, которого является система тензодатчиков, смонтированная на упругом корпусе (см. фиг. 1).

Что касается измерения крутящего момента, то в нашем случае существующие разные методы, в том числе и косвенный метод при котором измерение осуществляют с помощью измерения мощности процесса резания непригоден, так как дело имеем с очень низкими величинами показателей. Поэтому нужно использовать такой метод, который даст возможность измерить непосредственно крутящий момент, при этом с высокой точностью. С этой целью нами был спроектирован и изготовлен специальный прибор (см. фиг. 2), в котором стол заготовок для сверления оснащен вращающим высокоточным и высокочувствительным рычажным механизмом. В качестве измерительного элемента здесь тоже применяется упругий элемент с системой тензодатчиков, только более высокой точностью измерения (0,12 грамм).



Фиг.1. Прибор для измерения осевого усилия



Фиг. 2. Прибор для измерения крутящего момента

Эксперименты проводились сверлами из твердого сплава марки ВК60М диаметром  $\phi$  0,9мм длиной спиральной канавки  $l = 10\text{мм}$ . Передний угол и соответственно угол наклона спиральной канавки  $\omega = 30^\circ$ , задний угол составлял  $18^\circ$ .

Осуществлялось сверление пакета печатных плат из стеклотекстолита толщиной 1,6 мм составленной из 5 пластин с общей толщиной 8 мм.

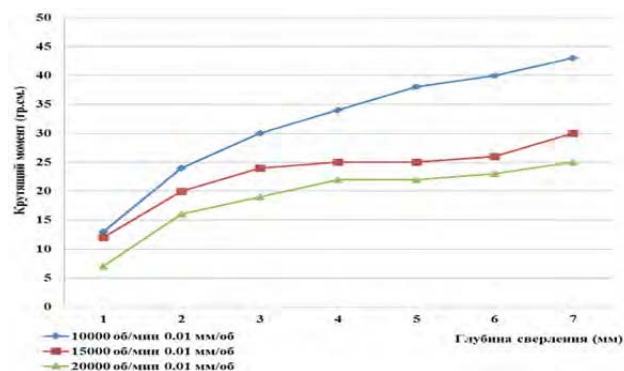
Сверление заготовок осуществлялось при разных режимах резания глубиной до 7 мм и через каждый 1мм глубины фиксировались показания измерительных приборов. Для получения каждого показателя эксперименты повторялись 8 раз. Усредненные результаты экспериментов показаны на фиг. 3 и 4.

Из этих результатов явно видно, что, как и ожидалось, силовые нагрузки с увеличением глубины прогрессивно растут. При этом если осевое усилие растет приблизительно 1,5 раза, то величина крутящего момента увеличивается 3÷4 раза.

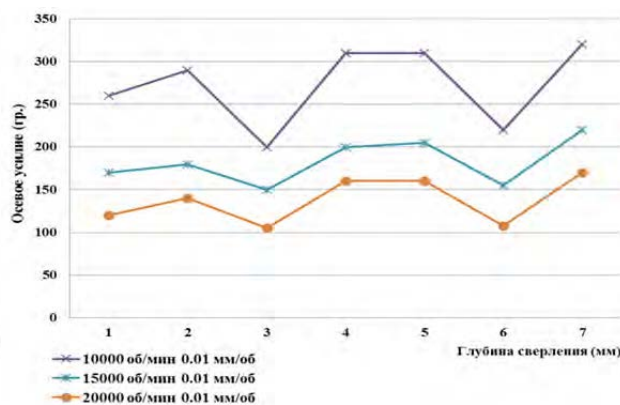
Ставится вопрос, чем вызван такой рост силовых показателей? Условия резания у режущей кромки сверла с увеличением глубины не меняется. Единственной причиной этого

может быть увеличение площади контакта абразивной стружки с поверхностью обработанного отверстия и возникшего от него сил трения.

Нужно отметить, что резкое падение осевого усилия на участках глубины 2-3 и 5-6 (см. фиг. 4) обусловлено отсутствием на этих участках обрабатываемой заготовки медного слоя.



Фиг. 3. График крутящего момента для стандартных свёрл  $\omega = 30^0$ .



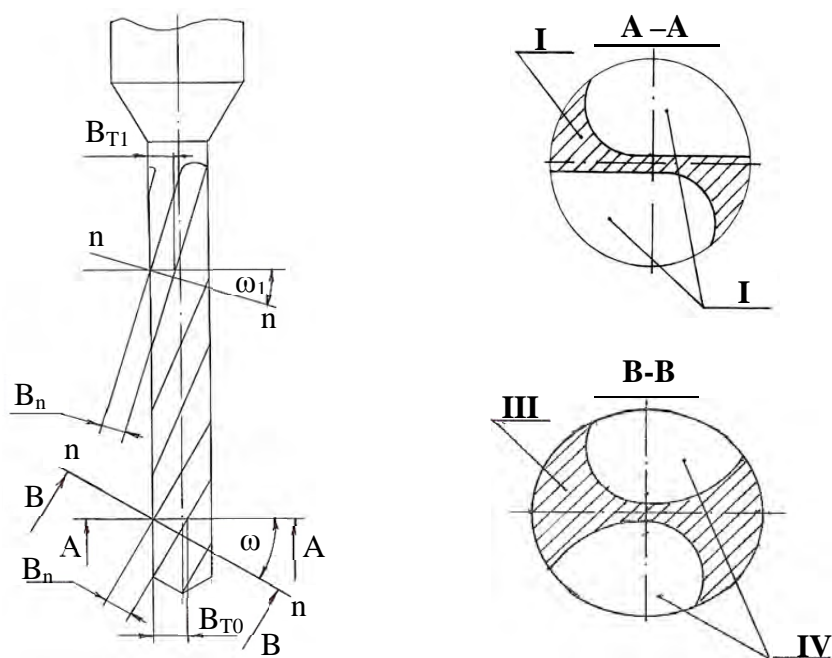
Фиг. 4. График осевого усилия для стандартных свёрл  $\omega = 30^0$ .

Главным фактором повышения вероятности хрупкого разрушения режущего инструмента из этих двух силовых показателей может стать не рост осевого усилия, а более прогрессивное увеличение крутящего момента, так как прочностные показатели твердосплавных материалов на сжатие значительно превышают показателей на кручение.

Улучшение процесса стружкоудаления из зоны резания способствовало бы уменьшению сил трения и соответственно повышению надежности процесса сверления. Проблему удаления стружки при сверлении глубоких отверстий в разных случаях решают разными путями. Например, при сверлении сверлами крупных размеров это осуществляют методом вымывания с помощью смазочно-охлаждающей жидкости, который подаётся в отверстие через каналы, выполненной в самом теле сверла. В других случаях, когда размеры сверл не дают возможность подачи охлаждающей жидкости вышеуказанным методом, с целью удаления стружки применяют прерывистый метод сверления, при котором после просверления определенной глубины периодически осуществляется отвод сверла из отверстия быстрым ходом.

Применение этих методов в нашем случае невозможно т.к. во первых дело имеем с микросверлами, во вторых применение смазочно-охлаждающей жидкости в производстве печатных плат не допустимо. Нецелесообразен и метод прерывистого сверления, так как это привело бы сильному падению производительности процесса. При обработке глубоких отверстий микросверлами ускоряющим фактором удаления стружки может стать увеличение шага спиральной канавки, то есть уменьшение угла наклона, но это привело бы к ухудшению условий резания, так – как уменьшится передний угол сверла.

Если конструкцию сверла выполнять таким образом, что у вершины сохранить нужный передний угол, а в направлении конца спиральной канавки постепенно уменьшить его угол наклона, то есть спиральную канавку нарезать с переменным углом и постепенно увеличить его шаг, это привело бы к ускорению процесса стружкоудаления и облегчило бы условия сверления [1, 2, 3, 4].



Фиг. 5. Схема сверла с переменным углом наклона спиральной канавки, I - Полезное торцевое сечение сверла, II - Торцевое сечение канавки, III - Полезное нормальное сечение сверла, IV- Нормальное сечение канавки.

На фиг. 5 показана схема сверла с переменным углом наклона спиральной канавки, где угол наклона канавки у вершины сверла  $\omega_0$ , а в конце рабочей части  $\omega_1$ . Ширина канавки в нормальном сечении  $B_n$  по всей длине не меняется, но меняется в торцевом сечении и у вершины составляет:  $B_{T0} = \frac{B_n}{\cos \omega_0}$ , а в конце рабочей части -  $B_{T1} = \frac{B_n}{\cos \omega_1}$ .

Меняется и полезное торцевое сечение сверла.

$$\text{Полезное сечение у вершины} - S_o = \frac{\Pi d^2}{4} - \frac{2S_n}{\cos \omega_0},$$

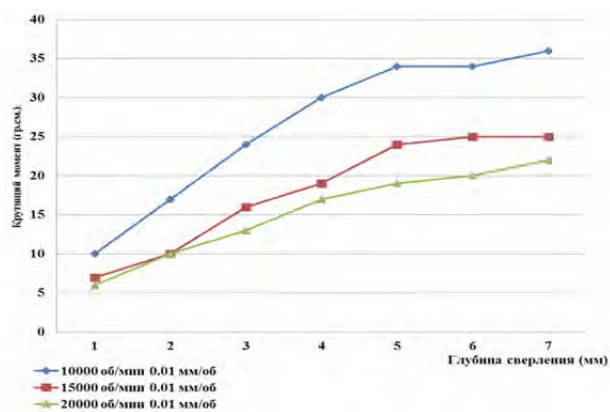
$$\text{а в конце рабочей части} - S_1 = \frac{\Pi d^2}{4} - \frac{2S_n}{\cos \omega_1},$$

где  $S_n$  - площадь канавки в нормальном сечении,  $d$  – диаметр сверла.

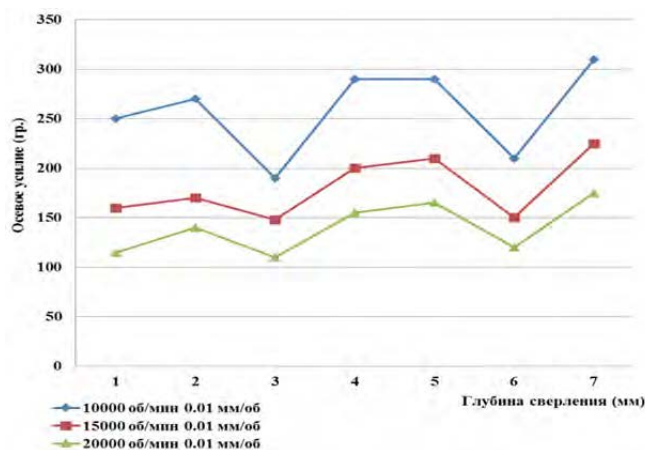
Если учтём, что  $\omega_0 > \omega_1$ , то получается, что в направлении конца рабочей части полезное сечение сверла увеличивается. То есть такие сверла по сравнению с стандартными должны выдерживать повышенные нагрузки.

Нами были сконструированы и изготовлены опытные образцы сверл с переменным углом наклона  $\omega = 30 - 17^\circ$ ,  $\omega = 35 - 20^\circ$ ,  $\omega = 40 - 22^\circ$ , и  $\omega = 43 - 23^\circ$ .

На всех этих свёрлах были проведены такие же эксперименты, как на стандартных свёрлах. Из них самые лучшие результаты показали свёрла  $\omega = 30 - 17^\circ$  (см. фиг. 6 – 7).



Фиг. 6. График изменения крутящего момента для сверл  $\omega = 30 - 17^{\circ}$ .



Фиг. 7. График изменения осевого усилия для сверл  $\omega = 30 - 17^{\circ}$ .

### Анализ результатов

Анализ этих графиков показывает что: для сверл  $\omega = 30 - 17^{\circ}$  показатели осевого усилия почти не отличаются от стандартного сверла  $\omega = 30^{\circ}$ , что так и ожидалось, так как у этих сверл одинаковый передний угол и соответственно, условия резания у режущей кромки. Что касается показателей крутящего момента, они на сверле  $\omega = 30 - 17^{\circ}$  в зависимости от режимов резания занижены на 12-16%-ов.

С целью сравнения стандартных сверл  $\omega = 30^{\circ}$  и сверл с переменным углом наклона спиральной канавки  $\omega = 30 - 17^{\circ}$  эксперименты продолжались до их поломки.

Статистика показала, что поломка стандартных сверл  $\omega = 30^{\circ}$  происходит в диапазоне от 1150 до 1300 отверстий, а сверл с переменным углом  $\omega = 30 - 17^{\circ}$  от – 1400 до – 1600.

### Выводы:

1. Твердосплавные микросверла с переменным углом наклона спиральной канавки при глубоком сверлении пакета печатных плат обеспечивают улучшение интенсивности процесса стружкоудаления из обработанного отверстия, способствуя этим занижению сил трения и соответственно крутящего момента на оси сверла.
2. Выполнение спиральных канавок с постепенным занижением угла наклона  $\omega$  – от вершины сверла в сторону конца рабочей части, обеспечивает увеличение полезного сечения сверла, занижая этим вероятность хрупкого разрушения.
3. Исходя из вышесказанного, появляется возможность изготовить сверла с удлиненной рабочей частью на 2–2,5 мм и в обрабатываемом пакете печатных плат добавить еще одну пластину, что даст возможность увеличить количество одновременно обрабатываемых плат и соответственно количество просверленных отверстий между переточками на 20%-ов.

### Список литературы

1. R.Turmanidze, D.Adamia, M.Amiridze. Influence of the Gradient Angle of the Screw Groove on Wear-Resistant of Fine-Sized Spiral Drills. Transactions of the Academy of Sciences of Georgia «Science and Technologies». Tbilisi, №10-12, 2002, 2 pages.
2. D.Adamia, V.Bachanadze, Z.Gviniashvili. Peculiarities of formation of shavings groves of spiral drill of alloy with variable inclination. Transport and Machinebuilding. Tbilisi, #3(15), 2009.
3. R.Turmanidze, O. Kushnarenko, D. Adamia, Z. Gviniashvili. Fine-sized hardmetal spiral drills with variable setting angle of chip grooves. 10th International scientific conference “New Ways in Manufacturing Technologies”. NWMT-2010. 17-19 June 2010. Prešov, Slovak Republic. Pages 217-226.
4. R.Turmanidze, Z. Gviniashvili. Peculiarities of manufacture of fine-sized spiral drills with variable inclination angle of chip grooves and results of their tests. The 66th International Congress of Precision Machining ICPM 2011. Liverpool John Moores University, 13th–15th September 2011. Day 1. Liverpool. Pages 253-258.

УДК 621.375.826:621

Романенко В.В., к.т.н., доц.

НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

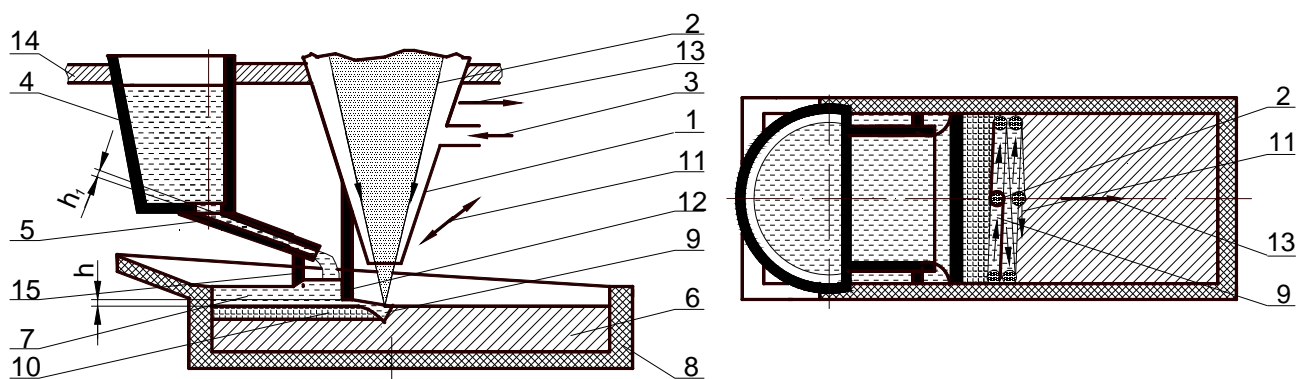
## ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ЛИВАРНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ

В наш час в багатьох галузях промисловості широке застосування набувають матеріали, виготовлені при надійному з'єднанні двох металів – біметали. Біметали поєднують можливості звичайних сталей (підложки) з особливими властивостями матеріалу покриття (плакувального шару). В останній час інтенсивні роботи ведуться при використанні лазерного променя у поєднанні з ливарним процесом для виготовлення біметалів з високою міцністю зчеплення його шарів.

Пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів включає виливницю, в якій встановлена підложка, засіб для подання у виливницю розплавленого металу для отримання плакувального шару та лазерний промінь для нагрівання підложки до температури плавлення. Завдяки плавленню підложки та вільній тепловій конвекції плакувального металу та розплаву підложки створюється перехідний сплав, який забезпечує високий рівень міцності зчеплення шарів біметалу. Проте такий пристрій має той недолік, що досить проблематично постійно підтримувати край розплаву плакувального матеріалу на заданій відстані від сконцентрованого лазерного променя та забезпечувати строге дозування кількості плакувального розплаву, що подається в зону наплавлення. Таке дозування потрібне для надійного змішування двох розплавів металів (плакувального та основи), що забезпечує високий рівень міцності зчеплення шарів біметалу.

Розроблений пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів містить газолазерне сопло 1 для подачі сконцентрованого лазерного променя 2 та захисного газу 3 в зону обробки. Пристрій забезпечений також засобом для подачі розплавленого металу, який включає в себе лоток 4 з розплавом та жолоб 5 для рівномірного нанесення на основу 6 плакувального шару 7 для отримання біметалу. Перед заливкою рідким плакувальним металом 7 основа 6 встановлюється в виливницю 8. За рахунок лазерного променя 2 в середовищі захисного газу 3 в основі 6 утворюється локальна ванна 9 розплаву основи. При подальшому змішуванні в цій ванні рідкого металу основи та плакувального металу за рахунок вільної теплової конвекції створюється перехідний шар 10, який забезпечує надійне зчеплення шарів біметалу. Для забезпечення створення локальної ванни 9 розплаву основи по всій її ширині сконцентрованому лазерному випромінюванню 2 може завдаватися скануючий рух 11. Вільному розтіканню плакувального металу 7 по основі 6 перешкоджає заслінка 12, виконана із термостійкого матеріалу, наприклад, графіту. Синхронізація швидкості руху 13 заслінки 12 уподовж виливниці 8 з швидкістю руху лазерного променя 2 забезпечується конструктивно тим, що засіб для подання плакувального металу розміщений на рухомій уподовж виливниці 8 каретці 14 лазерного обладнання разом з газолазерним соплом 1. Проміжок між заслінкою 12 та основою 6 висотою  $h$  забезпечує потрібне дозування кількості плакувального розплаву. Для стабілізації в процесі обробки потрібної кількості металу за заслінкою 12 висоту жолоба 5  $h_1$  підбирають із розрахунку, щоб величина перерізу цього жолоба була рівною величині перерізу проміжку між заслінкою та основою. Для забезпечення потрібної висоти плакувального шару біметалу на лотку 4 може бути розміщений шкребок 15.

Пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів працює в такий спосіб. Спочатку основа 6 для виготовлення біметалу встановлюється в виливницю 8. За допомогою фокусуємого елемента, що входить до складу газолазерного сопла 1, лазерний промінь 2 концентрується на поверхні основи 6 так, щоб цієї концентрації було достатньо для розплавлення її поверхні і утворення локальної ванни 9 розплаву. Завдяки захисному газу 3,



ванна розплаву 9 захищається від окислення. За допомогою засобу для подання розплавленого металічного матеріалу, який включає в себе лоток 4 з розплавом та жолоб 5, на поверхню основи 6 виливається потрібний металічний матеріал, дякуючи якому створюється плакувальний шар 7 біметалу. Плакувальний матеріал заливається на основу у безпосередній близькості від локальної ванни 9, так що ця ванна не встигає кристалізуватися, і, завдяки вільній тепловій конвекції та перемішуванню плакувального металу та розплаву основи, створюється перехідний сплав 10, який забезпечує високий рівень міцності зчеплення основних шарів біметалу. В залежності від потужності лазерного випромінювання може бути виготовлений біметал різної ширини. Для забезпечення обробки по всій ширині основи 6 лазерному випромінюванню 2 може завдаватися скануючий рух 11.

Швидкість течії плакувального матеріалу по поверхні основи залежить як від природи самого матеріалу, так і інших чинників (наприклад, його температури). Разом з тим, для плавлення основи та створення локальної ванни розплаву цілком достатньо використовувати лазерне випромінювання невисокої потужності (до 1 кВт). Проте швидкість переміщення лазерного променя уподовж виливниці при цьому значно знижується і, як правило, набагато нижча швидкості течії плакувального матеріалу по поверхні основи. Для обмеження швидкості течії розплаву та її синхронізації зі швидкістю переміщення лазерного променя уподовж виливниці використовується заслінка 12, яка розміщується на газолазерному соплі 1. При цьому між заслінкою 12 та основою 6 залишають проміжок висотою  $h$ , що забезпечує потрібне дозування кількості плакувального розплаву, який необхідний для створення перехідного шару 10 для надійного зчеплення основи з плакувальним шаром. Оптимальне значення величини проміжку  $h$  залежить від природи плакувального металу і може бути встановлене експериментально.

На початку обробки плакувальний матеріал накопичується біля заслінки 12, створюючи шар рідкого металу висотою декілька більшою, ніж необхідна висота плакувального шару. Після цього подається лазерне випромінювання 2, якому придається скануючий рух 11 та рух 13 уподовж виливниці 8. При утворенні локальної ванни розплаву в основі 6 розігріваються також нижні шари плакувального металу біля заслінки 12, і метал починає витікати з під заслінки 12 та перемішуватися з металом локальної ванни 9, утворюючи перехідний шар 10. Для стабілізації такого процесу під час обробки потрібне постійне підживлення кількості матеріалу за заслінкою 12 з лотка 4 через жолоб 5. Висота жолоба 5  $h_1$  вибирається із міркування, що величина перерізу цього жолоба повинна бути рівною величині перерізу проміжку між заслінкою та основою. Щоб забезпечити потрібну висоту та рівномірність плакувального шару біметалу, може бути використаний шкребок 15, який можна розмістити, наприклад, на лотку 12.

Таким чином, запропонований пристрій для лазерно-ливарного виготовлення біметалів істотно розширює можливості свого застосування за рахунок підвищення якості процесу в результаті забезпечення високого рівня міцності зчеплення шарів біметалу, що гарантує низьку вірогідність відокремлення плакувального шару від основи в процесі подальшого використання біметалу.

УДК 621.9-1/-9:62-2

**Чуприна В.М., к.т.н., доц.**

Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил України, м. Чернігів, Україна

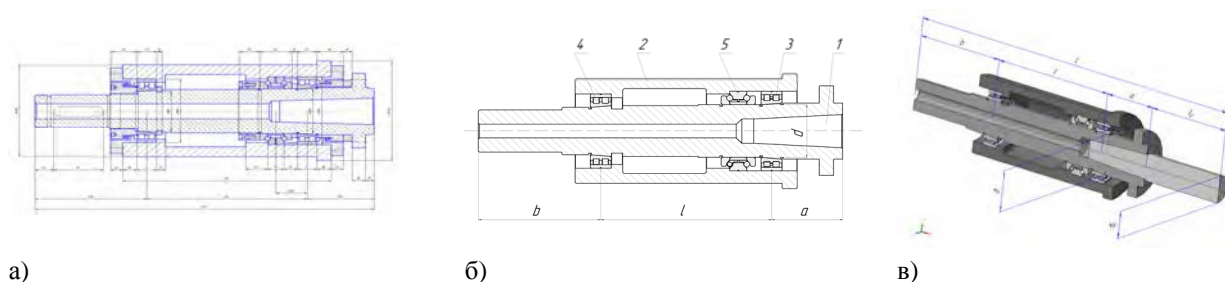
**ДИНАМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙ КОМПЛЕКТНИХ ШПИНДЕЛЬНИХ ВУЗЛІВ НА ОПОРАХ КОЧЕННЯ НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРИЧНИХ 3D-МОДЕЛЕЙ**

Одним із сучасних напрямків розвитку світового машинобудування є принцип агрегативання – складання конструкцій, зокрема металорізальних верстатів і роботизованих верстатних комплексів, з готових вузлів і модулів. До таких модулів відносяться комплектні шпиндельні вузли (КШВ) на опорах кочення (наприклад, механічні або електрошпинделі). Шпиндельні вузли є відповідальними вузлами обробних машин, які у великій мірі визначають їх якість при різанні, зокрема жорсткість (особливо динамічну) [1,2].

При проектуванні КШВ в системах автоматизованого проектування (САПР) створюють реалістичні віртуальні 3D-моделі окремих деталей і складальних одиниць, які доцільно використовувати не тільки для отримання технічної документації, але і для проектних розрахунків з метою оцінки вихідних показників та вибору раціональних параметрів конструкції [3,4].

Дослідження з оптимізації конструкцій КШВ зручно виконувати на основі параметричних 3D-моделей, що дає можливість, змінюючи варіативні параметри вузла, змінювати конструкцію в цілому. Параметризація дозволяє багаторазово використовувати один раз створену параметричну 3D-модель КШВ, що значно скорочує час на побудову нових її модифікацій, зокрема при моделюванні. Крім того, якщо для базових параметрів задати нормалізовані ряди розмірів, то за допомогою однієї параметричної 3D-моделі можна створити необмежений ряд типових конструкцій КШВ, який охоплює весь розмірний ряд верстатів даного типу. Такі ряди розроблені також з представлених нижче КШВ.

На рисунку 1 показана конструкція типового КШВ, а на рисунку 2 – приклади створених параметричних моделей КШВ для різних типів верстатів.



**Рис.1- Комплектний шпиндельний вузол (КШВ):**  
а) креслення; б) схема компоновки; в) спрощена 3D-модель (з оправкою)



**Рис.2- Варіанти параметричних 3D-моделей КШВ:**  
а) токарних верстатів; б) фрезерних верстатів; в) шліфувальних верстатів

Узагальнена схема компоновки типового КШВ (рис.1-б) складається із базових елементів: 1-шпindel, 2 – корпус, 3 – передній радіальний підшипник, 4 - задній радіальний підшипник, 5 – упорно-радіальний (упорний) підшипник. В розроблених моделях КШВ основними варіативними параметрами, що керують компоновкою (формою, розмірами і розташуванням елементів вузла), є наступні базові розміри (рис.1-б,в):  $a$  – виліт консолі шпинделя,  $l$  – відстань між радіальними опорами (серединами опор),  $d$  – діаметр шпинделя в передній опорі,  $b$  – довжина хвостовика шпинделя. При використанні для моделювання інструментальної оправки (рис.1-в) додатково враховуються її довжина  $l_o$  та діаметр  $d_o$ . Розміри інших деталей прив'язані до цих параметрів математичними і табличними співвідношеннями. В повних параметричних 3D-моделях (рис.2), окрім базових елементів, присутні також різні допоміжні деталі (фланці, дистанційні кільця, гайки, ущільнювачі, метизні вироби), що суттєво ускладнює розробку детальної параметричної моделі вузла. Створені параметричні моделі основних стандартизованих елементів ШВ (шпиндельних підшипників, кінців шпинделів і інших) та оригінальних деталей оформлені у прикладні бібліотеки, що значно прискорює процес проектування і підвищують його якість. При зміні будь-яких з базових компоновочних параметрів (одного чи декількох) 3D-модель автоматично перебудовується.

Розроблені параметричні моделі нормалізованих рядів КШВ можуть бути використані для запровадження в спеціалізованих САПР та у спеціалізованих виробництвах агрегатних вузлів, верстатів і комплексів.

На основі створених моделей КШВ здійснювалась багатокритеріальна параметрична оптимізація динамічної жорсткості конструкції з залученням теорії оптимального планування експерименту [5]. Для прикладу у вибраній моделі КШВ (рис.1-а) з метою візуалізації змінювались тільки два базових параметри  $d(X_1)$  і  $l(X_2)$  в межах 80-120 мм та 180-400 мм відповідно. Для кожного варіанту конструкції розраховувались динамічні характеристики в формі амплітудно-частотних характеристик (АЧХ). В якості критеріїв оцінки застосовувались наступні параметри АЧХ: статична податливість  $K$ , перша резонансна частота  $\omega_1$ ; перша резонансна амплітуда  $A_1$  (звично максимальна).

Функції відгуку для окремих з перелічених показників, що позначені відповідно як  $Y_1, Y_2$  і  $Y_3$ , мають екстремуми (рис.3). Вони представлені поліномами другого порядку:

$$Y_1 = 0,0189 - 0,00433X_1 - 0,00107X_2 - 0,00055X_1X_2 + 0,00021X_1^2 + 0,0017X_2^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 481,3 + 16,051X_1 + 13,58363X_2 + 5,25X_1X_2 - 12,10738X_1^2 - 9,28012X_2^2; \quad (2)$$

$$Y_3 = 0,2488 - 0,16933X_1 + 0,00542X_2 - 0,04072X_1X_2 + 0,09985X_1^2 + 0,04446X_2^2. \quad (3)$$

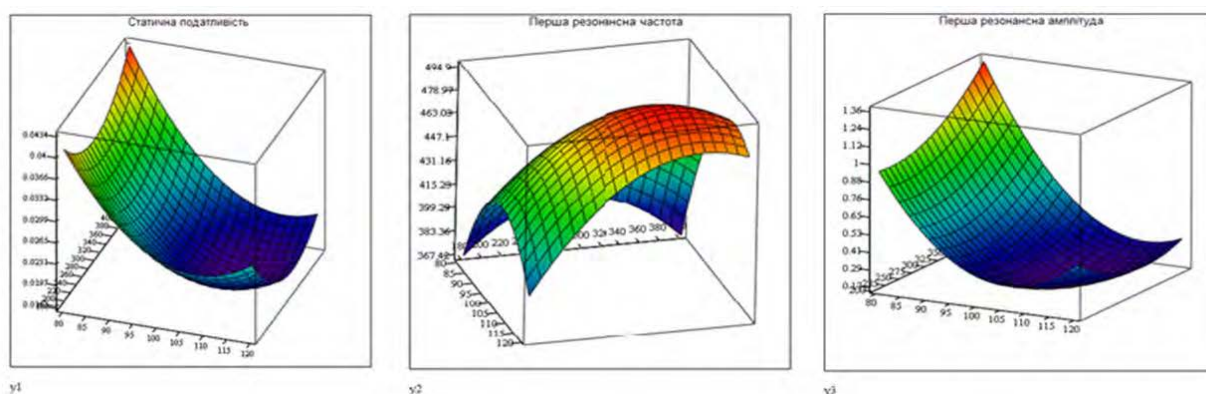


Рис.3. Графічне зображення функцій відгуку у вигляді 3D-поверхонь

Отримані раціональні параметри  $d$  і  $l$  конструкції КШВ по кожному з критеріїв суттєво відрізняються (до 15-25%). Тому була застосована багатокритеріальна параметрична



оптимізація за методом Парето. На сьогодні це є найбільш ефективний метод пошуку оптимуму в масиві неополіщуваних рішень [6].

З метою порівняння значень різнорідних критеріїв їх слід нормувати згідно виразу

$$\tilde{k}_i = (k_i - k_{\min}) / (k_{\max} - k_{\min}), \quad (4)$$

де  $\tilde{k}_i$  - нормоване значення критерію;  $k_i$  - плинне значення критерію;  $k_{\min}$ ,  $k_{\max}$  - мінімальне та максимальне значення критерію.

На рисунку 4 показана визначена ефективна множина (45 точок) з тисячного масиву нормованих неополіщуваних рішень Парето, а на рисунку 5 – їх наочна візуалізація у вигляді модулів радіус-векторів (у відносних безрозмірних одиницях). Мінімуму значенню з цих 45 модулів (точка 21) відповідають наступні раціональні за динамічними критеріями параметри вибраного КШВ:  $d=118\text{мм}$  та  $l=345\text{мм}$ .

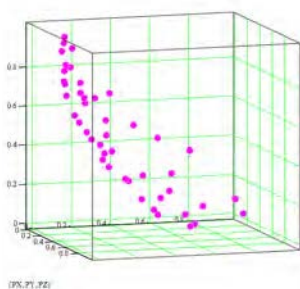


Рис.4- Ефективна множина Парето

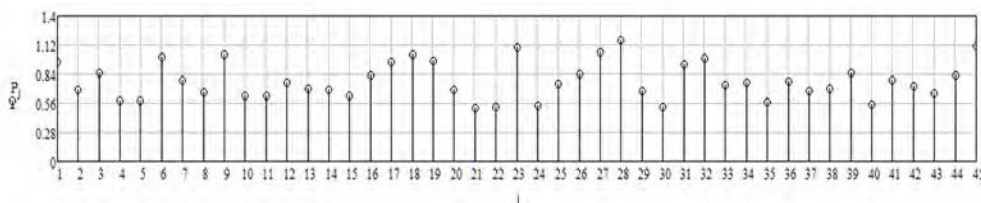


Рис.5- Візуалізація нормованих ефективних рішень множини Парето

Розроблена методика оптимізації з використанням параметричних 3D-моделей дозволяє найбільш ефективно визначати раціональні параметри конструкцій КШВ. Кількість варіативних параметрів  $n$  може бути прийнята значно більшою ( $n > 2$ ), практично необмеженою. Однак, візуалізація в цьому  $n$ -мірному просторі параметрів буде неможливою. В якості критеріїв можуть застосовуватись не тільки динамічні показники, але й такі, наприклад, як точність, швидкохідність, температура і інші.

### Список літератури

1. Кудинов В.А. Динамика станков. М., Машиностроение, 1967 – 360 с.
2. Струтинський В.Б., Чуприна В.М. Розробка тензорно-геометричної моделі просторової жорсткості шпиндельного вузла металорізального верстата // Системи обробки інформації. — 2016. — № 1(138). — С. 47-52.
3. Чуприна В.М., Мельник С.В. Розробка спеціалізованої САПР привода головного руху металорізальних верстатів. // Вісник ЧДТУ. Серія "Технічні науки"- Чернігів, 2001, № 12.- с.12-19.
4. Чуприна В.М. Оптимізація динамічних показників комплектних шпиндельних вузлів в CAD-CAE системі SolidWorks/CosmosWorks // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2012. – № 1(55). – С. 88 - 95.
5. Нинул А.С. Оптимизация целевых функций: Аналитика. Численные методы. Планирование эксперимента. — М.: Издательство Физико-математической литературы, 2009, 336с.
6. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. Учеб. пособие для вузов/ И. М. Соболев, Р. Б. Статников. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Дрофа, 2006. —175 с.

УДК 621.375.826:621

Романенко В.В., к.т.н., доц.

НТУУ “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

### ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА БІМЕТАЛІВ ЛАЗЕРНО-ЛИВАРНИМ МЕТОДОМ

Біметали застосовуються в багатьох галузях промисловості: корозійностійкий біметал використовується для виготовлення корпусів нафтохімічного і атомно-енергетичного устаткування; антифрикційні біметали — при виготовленні підшипників ковзання; біметали з особливими властивостями — при виготовленні вузлів ракетно-космічної техніки.

На сьогодні найбільше розповсюдження отримали такі способи виготовлення біметалів, як електрошлакове і багаточарове дугове наплавлення, електрошлакова і дифузійна зварка, здобуття біметалів литвом та плющенням, виготовлення біметалічної заготовки пресуванням і волочінням. В останній час інтенсивні роботи в цьому напрямку ведуться при використанні лазерного променя у поєднанні з ливарним процесом.

Для теоретичної оцінки можливості реалізації лазерно-ливарної технології виробництва біметалів розроблена схема постановки задачі, представлена на рис. 1.

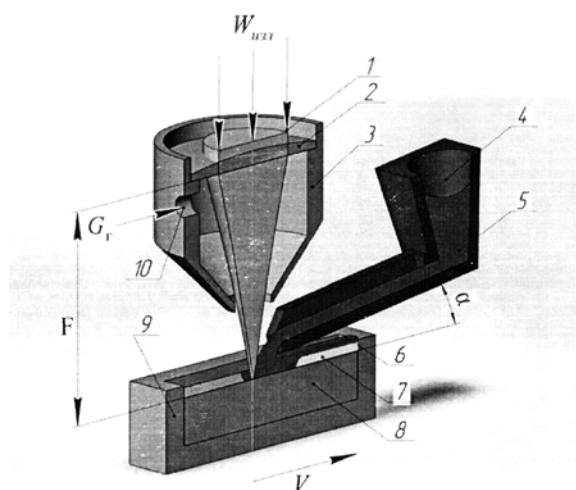


Рис. 1. Технологічна схема лазерно-ливарного методу виготовлення біметалів: 1 - лазерне випромінювання; 2 - лінза; 3 - сопло; 4 - лоток; 5 - плакуючий розплав; 6 - поверхневий шар; 7 - твердий шар; 8 - заготовка; 9 - обмежувачі; 10 - захисний газ.

Рішення теплової задачі числовими методами дозволило встановити вплив густини потужності і швидкості руху лазерного променя на глибину і довжину ванни розплаву.

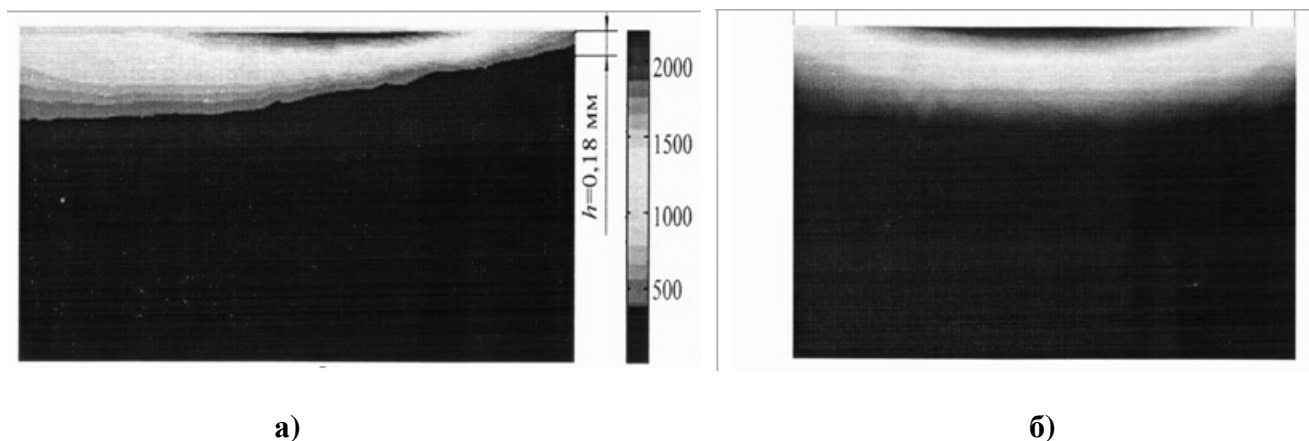


Рис. 2. Глибина ванни розплаву (а) та розподіл температури в поперечній площині зразка біметалу (б) при густині потужності  $W_p = 5,4 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2$  для швидкості руху лазерного променя  $V = 0,7 \text{ м/с}$

Приведені розрахунки вказують на можливість отримання перехідної литої зони в біметалі за час дії лазерного випромінювання на вказаних режимах обробки.

Спостереження за зоною заливки основного металу плакуючим розплавом показали, що швидкість поширення розплаву по поверхні металу основи значно нижче вказаної в експериментах швидкості плавлення основи лазерним променем. Так, швидкість поширення розплаву може складати лише 0,03...0,1 м/с (залежно від типу розплаву і його температури), тоді як оптимальна швидкість плавлення на вибраних режимах складає 0,7 м/с.

Як результат, може бути запропонована схема заливки біметалу при одночасному плавленні його основи лазерним випромінюванням, коли лазерний промінь спільно і сканується в поперечному напрямі зі швидкістю, що забезпечує плавлення основи, тобто зі швидкістю  $V_{ск.} = 0,7$  м/с, і рухається у напрямку заливки зі швидкістю вільного витікання плакуючого розплаву, тобто зі швидкістю  $V_{роз.} = 0,03...0,1$  м/с.

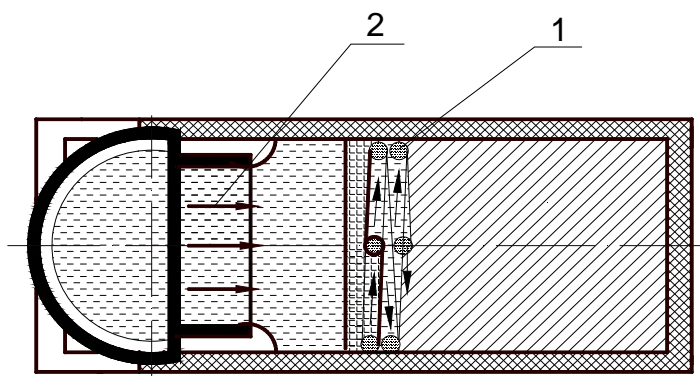
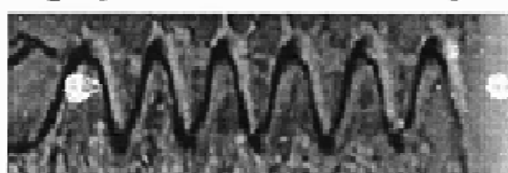
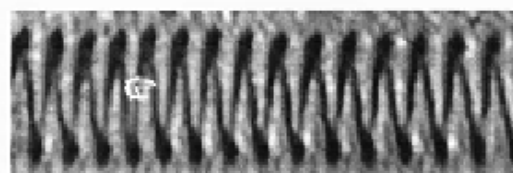


Рис.3. Схема заливки біметалу вільною течією плакуючого розплаву при одночасному плавленні його основи скануючим лазерним випромінюванням: 1 - скановане лазерне випромінювання; 2 - вільне витікання розплаву.

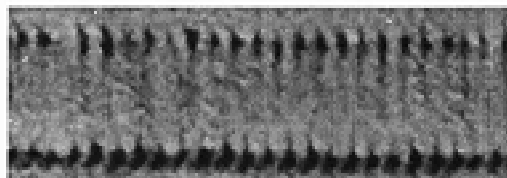
Залежно від співвідношення швидкостей  $V_{ск.}$  і  $V_{роз.}$  можливі наступні умови обробки:



$V_{ск.} = 2 * V_{роз.}$



$V_{ск.} = 3,5 * V_{роз.}$



$V_{ск.} = 5 * V_{роз.}$



$V_{ск.} = 7 * V_{роз.}$

Рис. 4. Реалізація умов плавлення основи біметалу при різних співвідношеннях швидкостей сканування лазерного променя і заливки розплаву.

При цьому при виготовленні біметалу скануючим лазерним променем і заливкою плакуючим розплавом ширина зони сканування, а, отже, і ширина отриманого біметалу може складати до 150 мм, що цілком прийнятно для виробництва біметалічних матеріалів. При зростанні потужності лазерного устаткування, що використовується, відповідно можуть зростати і розміри отримуваних пластин біметалу.

УДК 621.785

**Ключников Ю.В., к.ф.-м.н., доц., Скляр А.В.**  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

### ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОЧОГО ІНСТРУМЕНТУ

У роботі приведені результати підвищення ефективності робочого інструменту із сталей У8, Х12М шляхом формування на їх поверхнях різних покриттів, нанесених лазерним наплавленням та хіміко-термічною обробкою. Проведені дослідження та аналіз мікрогеометрії з використанням методів растрової мікроскопії. Встановлені особливості формування покриттів. Аналіз поверхонь зразків показав, що в процесі тривалої експлуатації (більше 700 годин) відбувається їх руйнування (поява мікротріщин, збільшення мікронерівностей, відколів та інших мікродфектів), яке призводить до різкого зниження функціональних властивостей цих покриттів і працездатності інструмента в цілому.

В результаті склерометричних досліджень адгезійних властивостей покриттів встановлено, що критичне навантаження, при якому з'являлися перші відколи і відшаровування покриття складало 145...165 Н, що значно перевищує критичне ударне навантаження в 10 Н/мм<sup>2</sup> при експлуатації інструментів (перового свердла) із сталі У8 без покриття.

У роботі приведені результати визначення модуля пружності покриттів, який дозволяє точно визначити величину залишкової напруги. Один з можливих шляхів визначення модуля заснований на вимірюванні вигину консольнозакріпленої пластинки з покриттям під дією заданого навантаження. Оскільки розміри пластинки, співвідношення товщини шарів матеріалу основи і покриття, модуль пружності матеріалу основи відомі, то не представляє особливої праці обчислити значення модуля пружності покриття, у свою чергу, воно може бути використане при обчисленні величини залишкової напруги в покритті по початковому прогину пластинки з покриттям, а також для точної оцінки коефіцієнта термічного розширення матеріалу покриття.

Отримані методом атомно-силової мікроскопії за допомогою приладу NT-206V профілі інструменту із сталей Х12М та У8 без покриття і з покриттями вказують на високу суцільність покриття навіть після його тривалої експлуатації, яка в 1,4...1,6 рази перевищує час експлуатації інструменту без покриття за тих же режимів. Результати дослідження робочих інструментів без покриття та з покриттям дозволили підвищити термін експлуатації інструменту до 1300 годин порівняно з інструментом без покриття – 850 годин при зусиллі на інструмент 180 Н.

УДК 621. 875

**Сердітов О.Т., к.т.н., доц., Горобець О.І., Пижов М.С.**  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАХИСНИХ КАРБІДНИХ ПОКРИТТІВ

В роботі приведені результати досліджень захисних неметалічних шарів, що утворюються в процесі тертя ковзання інструментальних матеріалів (твердого сплаву ВК8 і швидкорізальної сталі Р6М5) з покриттями TiC, VC, (Ti,V)C. На твердий сплав ВК8 ці покриття товщиною 6 мкм наносили методом хімічного осадження з газової фази. Випробування проводили на токарному верстаті по схемі палець – кільце. Навантаження

(450Н) до пальця (з нанесеним покриттям) прикладали за допомогою пружинного пристрою. Силу тертя вимірювали за допомогою датчиків опору. Перед початком кожного випробування поверхню сталевого зразка оновлювали чистовим точінням різцем. Випробування проводили при різних швидкостях ковзання (від 30 до 250 м/с) і різних шляхах тертя (від 1 до 100м). В процесі випробування зразок з покриттям безперервно переміщався відносно “свіжої” поверхні.

В результаті проведеного дослідження встановлено, що на усіх покриттях утворюються оксидні шари. Адгезія оксидних шарів істотно нижча, ніж покриттів. Твердість цих шарів ( $HV = 8$  ГПа) істотно нижча за твердість покриттів ( $HV = 30$  ГПа).

В роботі приведені результати порівняльних випробувань при терті кочення роликів (на контактну втому) покритих TiC, VC, (Ti,V)C. Випробування проводилися на машині типу Амслера з мінеральним маслом. Навантаження (500 Н) і швидкість обох роликів (0,42 м/с) зберігалися в процесі випробувань постійними, температура масла 310 К.

Отримана висока відповідність експериментальних результатів з розрахунковим визначенням розподілу напружень в контактній зоні роликів. Додаткові випробування при сухому терті підтвердили чудові триботехнічні властивості покриттів, особливо (Ti,V)C, значення коефіцієнта тертя складало 0,15 – 0,18.

Проведені дослідження показали, що для покриттів характерна мілкодисперсна структура із стовпчастими кристалітами розміром 80 – 180 нм. Рентгеноструктурним аналізом встановлено, що покриття складається з TiC або VC, або (Ti,V)C. Перехідна зона між покриттям і основою дуже мала (0,4 мкм для P6M5, 0,6 мкм для VK8), фазовий склад її відповідає фазовому складу покриттів.

---

УДК 621. 875

**Сердітов О.Т., к.т.н., доц., Горобець О.І., Моїсеєнко Г.С.**  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### **СТІЙКІСТЬ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ КАРБІДАМИ ТИТАНУ ТА ВАНАДІЮ**

Застосування, у якості покриттів на основі карбідів титану та ванадію, привело до змін у загальній технології хіміко-термічної обробки різноманітних сталей та інших сплавів для суттєвого підвищення їх стійкості. Особливий інтерес становлять сплави, які працюють в умовах абразивного зношування.

Основною метою роботи є дослідження стійкості сталі У10 у вихідному стані (гартування та відпуск) та з твердими покриттями типу карбід титану – карбід ванадію. Виконані дослідження та отримані результати показали, що зносостійкість сталі У10 з покриттям значно підвищується в 1,4 – 1,7 рази. Такий результат зумовлений високою мікротвердістю покриттів на основі карбідів титану та ванадію (30,0 – 32,0 ГПа), особливостями структури та низьким коефіцієнтом тертя в зоні контакту. Мікроаналіз поверхонь зношування сталі з покриттям показав, що за умов мінімальних контактних навантажень і швидкостей ковзання, спостерігаються лінії, направлені по ходу тертя. Виникнення цих ліній зумовлено дією твердих часток карбіду титану та ванадію, які відокремлюються від покриття і діють як абразивний матеріал.

При руйнуванні покриття у разі торцевого до поверхні навантаження утворюється тріщина довжиною  $s$  за навантаження  $P_1$ . Для характеристики міцності покриття у реальних

умовах напруженого стану запропоновано використати величину під назвою мікроміцність  $\sigma$ , яку визначили за виразом (1):

$$\sigma = P_1/c^2 \quad (1)$$

За відомих навантажень утворення тріщини  $P_1$ , довжини тріщини  $c$ , максимального навантаження  $P_2$  та діагоналі відбитка  $d$  визначили показник мікрокрихкості  $\gamma$  за виразом (2):

$$\gamma = 1,854P_2c^2/P_1d^2 \quad (2)$$

Виконані дослідження та отримані результати дозволяють стверджувати, що показник мікрокрихкості є ефективною характеристикою покриття, що відповідає його фазовому стану. Можна вважати, що величина  $P_2/d^2$  характеризує мікротвердість, а  $P_1/c^2$  – мікроміцність.

Шляхом експериментальних досліджень встановлено значну кореляцію отриманих результатів з показниками мікрокрихкості. Встановлено, що мікротвердість покриттів на основі карбїду титану перевищує мікротвердість шару двохкомпонентних карбїдів титану та ванадію (Ti, V) С у 1,5 рази, а абразивна стійкість покриттів на основі карбїдів титану TiC перевищує в 1,3 рази стійкість (Ti, V) С.

Таким чином можна зазначити, що стійкість покриттів при випробуванні вільним абразивом буде визначатися показником мікрокрихкості  $\gamma$  – чим вище значення  $\gamma$ , тим вища зносостійкість. Стійкість сталей У10 з покриттям TiC та (Ti, V) С перевищує зносостійкість вихідної після гартування та відпуску (HRC 61) відповідно в 1,8 та 1,4 разів.

**УДК 621.785**

**Ключников Ю.В., к. ф.-м. наук, доц., Мунир Аль Хавальди**  
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

### **УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЕЙ КАРБИДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

Износ инструмента представляет особую проблему при обработке различных деталей. Поэтому повышение долговечности инструмента за счет упрочняющих покрытий является актуальной задачей.

На наш взгляд, наиболее перспективными являются многокомпонентные карбидные покрытия на основе титана и ванадия полученные химико-термической обработкой инструмента.

Общеизвестно, что упрочняющим покрытиям присущи такие характерные недостатки как отслоение и растрескивание при повышенных контактных нагрузках в условиях эксплуатации. Именно эти процессы ограничивают срок службы инструмента с покрытием. Покрытия (Ti,V) С, нанесенные методами газофазного осаждения, ощутимо повышают долговечность инструмента [1].

В тех же режимах эксплуатации эти же покрытия, нанесенные другими методами, не показали заметного повышения долговечности из-за низкой адгезионной износостойкости и прочности покрытия. Кроме того, например, гальванического покрытия из-за недостаточной прочности сцепления требуют дополнительной обработки, что удорожает изготовление инструмента.

Следует особо отметить, что для повышения эксплуатационных характеристик изделий, в первую очередь, требуется выбрать технологию упрочнения поверхности

карбидами, состав покрытия и толщину [2]. Выбор этих факторов, существенно влияющих на степень упрочнения, определяется маркой материала, из которого изготовлено изделие, а также условием его работы.

Исходя из этого, упрочненные изделия по виду работы можно разделить на следующие группы:

1. Изделия, работающие в условиях разнохарактерного износа при температуре, которая не выше 373К:
  - а) абразивного изнашивания;
  - б) сухого трения скольжения.
2. Изделия, работающие в условиях агрессивных сред.
3. Изделия, работающие в контакте с расплавленными металлами и сплавами.

Таким образом, выше рассмотренные результаты исследований свойств карбидных покрытий позволили подобрать для каждой из перечисленных групп изделий наиболее эффективный тип упрочнения их поверхности покрытиями из карбидов титана и ванадия с целью максимального увеличения прочностных свойств изделий с учетом условий воздействия внешней среды и нагрузки.

В табл.1 представлен перечень изделий, инструмента и технологической оснастки, объединенных в вышеуказанные группы с учетом разнохарактерного вида их работ, для которого можно рекомендовать тип упрочнения покрытиями из карбидов титана и ванадия.

Таблица 1

Рекомендуемые типы покрытия для упрочнения изделий

Наименование изделий	Параметры процесса, Т, К	Толщина слоя, мкм	Рекомендуемый тип покрытия
	время, час		
сверла, метчики, плашки, фрезы, фильеры, пластины	1223	12	карбид титана
	2	12 – 16	карбид титана и ванадия
детали машин и технологическая оснастка	1323	10 – 12	карбид титана
	1	10 – 12	карбид титана и ванадия
детали машин и технологическая оснастка химического производства	1173	20-22	карбид титана
	6		карбид титана и ванадия
детали штампов и прессформ	1223	10 – 12	карбид ванадия
	2	12 – 16	карбид титана и ванадия

### Список литературы

1. *Иванов В.Е., Нечипоренко Е.П., Криворучко В.М., Сагалевиц В.В.* Кристаллизация тугоплавких металлов из газовой фазы. – М.; Атомиздат 1974. – 264 с., ил.
2. *Мулякаев Л.М.* О механизме формирования диффузионного слоя. – В кн.: Защитные покрытия на металлах. Киев: Наукова думка, 1974, вып.8., с 12-17

УДК 621.375.826:621

Романенко В.В., к.т.н., доц.

НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ БІМЕТАЛІВ ЛАЗЕРНО-ЛИВАРНИМ МЕТОДОМ

Біметали застосовуються в багатьох галузях промисловості. На сьогодні найбільше розповсюдження отримали такі способи виготовлення біметалів, як електрошлакове і багатопарове дугове наплавлення, електрошлакова і дифузійна зварка, здобуття біметалів литвом та плющенням, виготовлення біметалічної заготовки пресуванням і волочінням. В останній час інтенсивні роботи в цьому напрямку ведуться при використанні лазерного променя у поєднанні з ливарним процесом.

Для оцінки можливості лазерно-ливарного виготовлення біметалів були проведені пошукові експерименти по можливості виробництва біметалічних пар металів при використанні лазерного випромінювання для розплавлення поверхні металу-основи з утворенням перехідного шару для зчеплення цих металів. В якості лазерного устаткування застосовувалася технологічна лазерна установка "Латус - 31".

В якості складових біметалів були підібрані наступні пари металів: «сталь Ст.3 – чугун СЧ30», «сталь Ст.3 – чугун ЧХ16», «сталь Ст.3 – бронза Бр05Ц5С5», «сталь Ст.3 – алюмінієвий сплав АК7».

Нижче представлені біметалічні з'єднання при використанні названих вище пар металів.

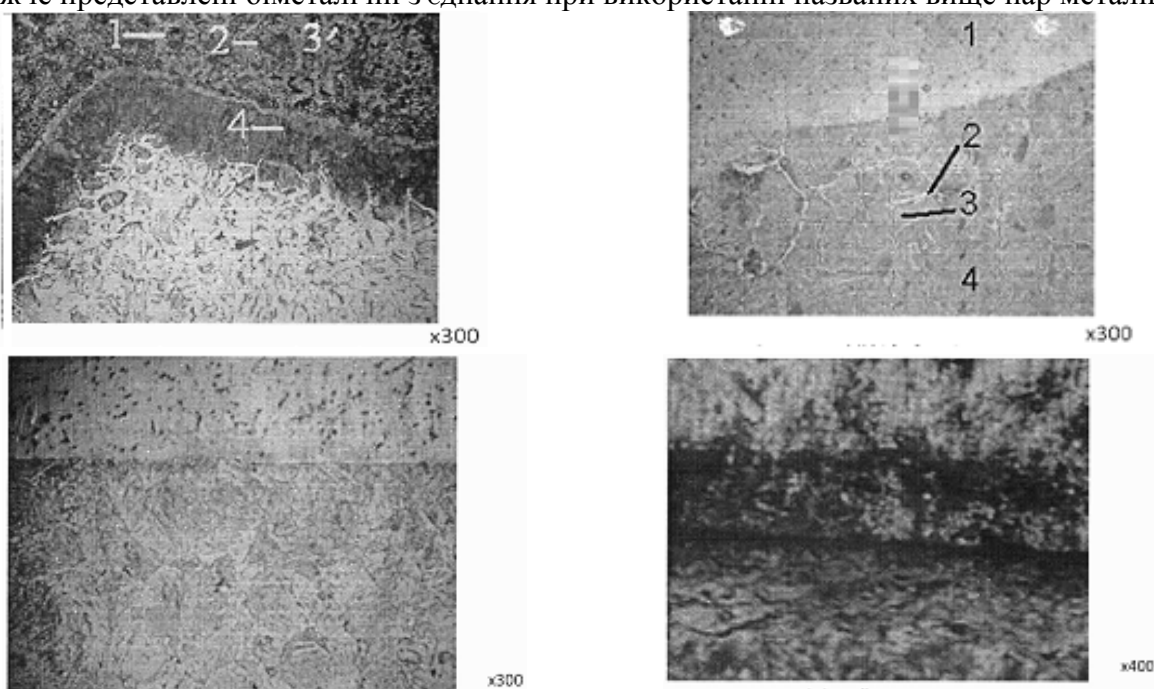


Рис. 1. Біметалічні з'єднання з використанням пари металів: «сталь Ст.3 – чугун СЧ30», «сталь Ст.3 – чугун ЧХ16», «сталь Ст.3 – бронза Бр05Ц5С5», «сталь Ст.3 – алюмінієвий сплав АК7»

Експерименти показали, що товщина і структура перехідних шарів між різними біметалічними парами забезпечують надійне їх з'єднання.

Таким чином, лазерно-ливарний метод отримання біметалічних матеріалів цілком реалізується технологічно і забезпечує надійне з'єднання між шарами матеріалів, які входять до складу різних біметалів, що дозволяє рекомендувати цей метод для подальшого доопрацювання і впровадження у виробництво.



УДК 621.73

Іскович-Лотоцький Р.Д., д.т.н., проф., Івашко Є.І., асп., Малінка Е.О., студент  
Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

## ПЕРСПЕКТИВИ ВІБРАЦІЙНОГО РОЗКОЧУВАННЯ КІЛЕЦЬ ПІДШИПНИКІВ

В якості вихідних заготовок для розкочування можуть бути використані кільцеві заготовки, що отримані в результаті попередніх операцій різання або обробки тиском. Це заготовки відрізані від гарячекатаних труб, виточені з труб та прутків; штамповки, що отримані об'ємною або листовою штамповкою, згинанням полоси з наступним зварюванням, литвом та ін. Детальний аналіз переваг та недоліків відомих способів отримання вихідних заготовок в залежності від типу виробництва проведено в роботах.

За схемою деформування розрізняють відкрите та закрите розкочування. За процесом деформування розрізняють гаряче та холодне розкочування.

Для гарячого розкочування більш ефективною є закрита схема розкочування кільцевих заготовок.

Холодне розкочування кілець підшипників забезпечує більш високу їх точність, ніж гаряче, через відсутність коливань температури. Завдяки цьому є можливість забезпечити таку точність кільця по зовнішньому діаметру, що дозволяє виключити наступну токарну обробку всього зовнішнього профіля і для отримання готового кільця буде достатньо однієї токарної операції по розточуванню внутрішнього профіля.

На процес пластичного деформування витрачається енергії значно менше ніж на виконання роботи по подоланню опору силам тертя на поверхні контакту інструмента з оброблюваним металом, поглинається та розсіюється металом, інструментом і навколишнім середовищем. Пластичне деформування в таких процесах проходить за умов довго-тривалого напруженого зв'язку між інструментом та оброблюваним металом, що визначає значні втрати робочого зусилля, потужності та ККД. Суттєво впливає на процес пластичного деформування швидкість його протікання. Якщо враховувати вищезгадані обставини, то є можливість пояснити доцільність застосування в осередку деформації вібраційного (пульсуючого, циклічного) навантаження. Таким чином, зниження напруг деформування автори пояснюють зміною умов тертя на поверхні контакту інструмента з оброблюваним металом (поверхневий фактор), зниженням опору метала деформації (об'ємний фактор), а також перерозподілом в часі навантаження осередку деформації (часовий фактор).

Широке використання та впровадження вібраційних маловідходних та безвідходних технологій обробки металів обмежувалося через відсутність спеціально розроблених та створених вібраційних приводів. Як відмічали самі автори досліджень процесів вібраційної обробки, лише в деяких випадках створювалися дослідні, напівпромислові та промислові зразки вібраційних приводів для вібропресів, вібромолотів, прокатних станів. Здебільшого для досліджень використовувалися віброприводи, що були в наявності і не завжди відповідали за своїми характеристиками вимогам проведення експерименту в широкому діапазоні зміни параметрів навантаження (частоти, робочого зусилля, енергії одного циклу, тощо).

### Список літератури

1. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гунн, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.
2. Анищенко А.С. Прогресивные технологические решения в обработке металлов давлением: Учебное пособие / Анищенко А.С. – Мариуполь: ПГТУ, 2013. – 180с.
3. Аксенов Л.Б. Теория, технология и оборудование обработки металлов давлением / Аксенов Л.Б. – Изд-во: СПбГТУ, 1997, 111 с.

УДК 621.9.02

Клименко С.А., д.т.н., проф., Клименко С.Ан., к.т.н., Копейкина М.Ю., к.т.н., с.н.с.,  
Манохин А.С., к.т.н.

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина

### ТЕОРЕТИЧНА ОЦІНКА ТЕМПЕРАТУРИ НА ПЛЯМАХ СПАЛАХУ НА ПЕРЕДНЬОЇ ПОВЕРХНІ ІНСТРУМЕНТУ З ПКНБ ІЗ ПОКРИТТЯМ ПРИ ТОЧІННІ ЗАГАРТОВАНОЇ СТАЛІ

Володіючи високими трибологічними властивостями в порівнянні із основою, покриття на контактних поверхнях інструменту дозволяє зменшити температуру різання і веде до перерозподілу напружень на контактних ділянках інструменту. Наявність шару покриття, яке володіє нижчим коефіцієнтом тертя, в порівнянні із інструментальною основою, та виконує роль твердої змазки в зоні різання обумовлює зміну як топографії контактних поверхонь, так і зміну величини температурних спалахів на пластичній та пружній ділянках контакту.

Експериментальне визначення температури спалахів в контактній зоні різання стосовно інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору (КНБ) в реальних умовах різання є вкрай складним завданням, зважаючи на малий розмір контактних ділянок, великі значення навантажень та швидкоплинність протікаючих в зоні різання явищ.

Для теоретичного визначення температури в контактній зоні пропонується використовувати спрощену схему контакту зі стружкою, відповідно до якої гребінці нерівностей є тільки на поверхні інструменту, а нижню поверхню стружки в початковий момент часу вважаємо абсолютно гладкою, так як характер її текстури формується після контакту із передньою поверхнею різального інструменту.

Для оцінки температури на локальних ділянках контакту скористаємось методикою, описаною в [1], з доповненнями описаними вище. З врахуванням розподілу сили та площі контакту на пружну та пластичну складові та з врахуванням того, що на ділянку пластичного контакту припадає 70 % прикладеної сили при площі контакту в 40 % [2]:

для пластичної ділянки контакту:

$$T_c = \frac{\sqrt{2} + 1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}} \cdot \frac{\mu \cdot 0,7 \cdot P \cdot v \cdot d}{0,8 \cdot A_r \cdot \lambda_2} \quad (1)$$

для пружної ділянки контакту:

$$T_c = \frac{\sqrt{2} + 1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}} \cdot \frac{\mu \cdot 0,3 \cdot P \cdot v \cdot d}{1,2 \cdot A_r \cdot \lambda_2}, \quad (2)$$

де  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\mu$  – коефіцієнти теплопровідності, теплоємності та тертя відповідно;  $\rho$  – густина; – коефіцієнт тертя;  $d$ ,  $A_r$  – діаметр плями та фактична площа контакту відповідно;  $b$  – активна довжина різальної кромки;  $P$  – навантаження на одиничний виступ;  $v_c$  – швидкість сходу стружки; індекс 2 відповідає матеріалу інструменту.

Знаючи рівень нормальних напружень ( $q_N$ ), довжину контакту ( $L$ ) та довжину активної частини різальної кромки ( $b$ ) можна знайти рівень дотичної сили за формулою:

$$N = L \cdot b \cdot q_N \quad (3)$$

Діаметр плями контакту визначається за формулою [1]:

$$d = 2\sqrt{2} \left( \frac{r \cdot R_{\max}}{v} \cdot \left[ \frac{N}{HB \cdot b} \right]^{\frac{1}{v}} \right)^{0,5} \quad (4)$$

Фактична площа контакту визначається виразом [1]:

$$A_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot R_{\max}}{v} \cdot \left( \frac{N_o}{HB \cdot b} \right)^{\frac{1}{v}} \quad (5)$$

де  $N_o$  – навантаження на одиничний виступ;  $v$ ,  $b$  – параметри опорної кривої;  $r$  – радіус заокруглення вершини мікронерівності на поверхні різального інструменту.

$$r = \sqrt{r_1 \cdot r_2} \quad (6)$$

де  $r_1$  і  $r_2$  – радіус заокруглення мікронерівності в поперечному і поздовжньому напрямках.

Навантаження на одиничний виступ можна знайти з рівняння [1]:

$$N_o = 2 \cdot \pi \cdot HB \cdot \sqrt{r_1 \cdot r_2} \quad (7)$$

де  $HB$  – твердість інструментального матеріалу по Брінеллю.

Швидкість сходу стружки:

$$v_c = v / \xi \quad (8)$$

де  $v$  – швидкість різання;  $\xi$  – усадка стружки.

Розрахунки проводилися для випадку чистового точіння загартованої сталі ШХ15 (60 HRC). Результати розрахунків представлено на рис. 1 в залежності від швидкості різання.

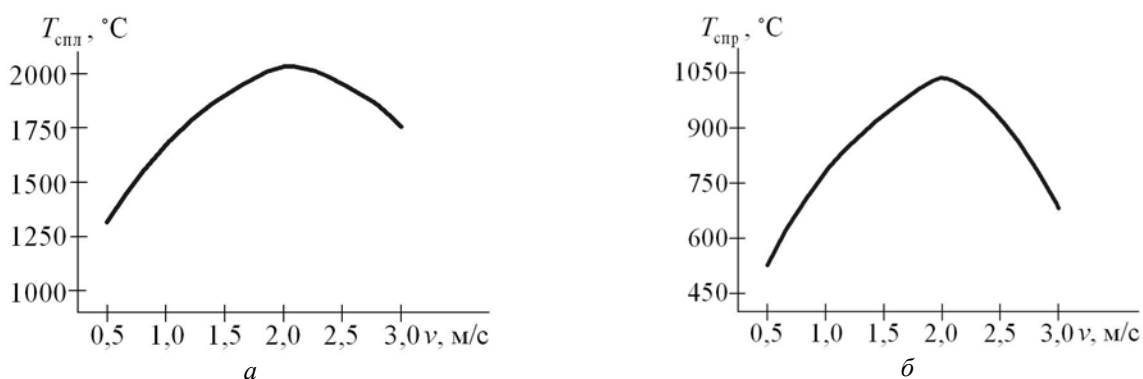


Рис. 1. Температура спалахів на пластичній (а) та на пружній ділянках контакту (б) в залежності від швидкості різання ( $S = 0,14$  мм/об;  $t = 0,2$  мм)

Результати розрахунків показали, що зміна величини температурних спалахів має екстремальний характер з максимумом  $2036$  °С на пластичній (рис. 1, а) та  $1044$  °С на пружній ділянках контакту (рис. 1, б). Наявність екстремуму пояснюється тим, що зі збільшенням швидкостей різання в діапазоні від  $0,5$  до  $2,0$  м/с висота мікронерівностей на робочих поверхнях інструменту зростає більш інтенсивно, чим знижується навантаження в зоні контакту. Подальше збільшення швидкості різання до  $3,0$  м/с приводить до незначного збільшення висоти мікронерівностей на робочих поверхнях інструменту при одночасному зниженні навантаження, внаслідок чого рівень температурних спалахів падає.

Така висока температура обумовлена тим, що фактична площа контакту стружки з передньою поверхнею інструменту на порядок менше номінальної, а також враховуючи те, що при різанні діють достатньо високі сили, навантаження на поверхні виступів мікронерівностей може досягати величини, достатньої для протікання глибокої пластичної деформації оброблюваного матеріалу, що супроводжується короткочасним виділенням значної кількості теплоти в мікрооб'ємах, утворюючи сітку теплових імпульсів.

## Список літератури

1. Крагельский И.В. Основы расчетов на трении и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
2. Клименко С.А. Підвищення стійкості інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору при точінні загартованих сталей застосуванням покриття: дис...канд. техн. наук. – К.: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2015. – 201 с.

УДК 621.91.01

Шевченко О.В., д.т.н., проф., Манзюк С.А., аспірант  
НТУУ "Київський політехнічний інститут" м. Київ, Україна

### ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ВИКОНАВЧИХ ПРИБОРІВ ПРИ ОБРОБЦІ НА ВЕРСТАТАХ

Проблема прецизійного позиціонування різноманітного інструменту досить актуальна в наші дні, коли в багатьох галузях науки і техніки активно впроваджуються нанотехнології: це автомобілебудування, прецизійне верстатобудування, оптична техніка. Нанометричний діапазон лінійного позиціонування та секундний діапазон кутових переміщень характерний для сучасних металорізальних верстатів, роботів, мікроманіпуляторів та ін. Вирішення даної проблеми за допомогою традиційних електромеханічних систем не дає очікуваного результату. Суттєвий вплив на пониження точності позиціонування здійснюють нелінійності кінематичних передач (люфти, сухе тертя, зони нечутливості і т.п.). Значний вплив на точність мікропереміщень здійснюють теплові та вібраційні збурення. Таким чином, можна зробити висновок про те, що традиційні електромеханічні виконавчі пристрої свої можливості в даному напрямку вичерпали і необхідний перехід на інший технологічний рівень з використанням нових конструктивних рішень.

Серед виконавчих пристроїв нового типу, що не мають вказаних недоліків, використовують магнітострикційні, п'єзоелектричні, електромагнітні та теплові перетворювачі. Найбільш поширеними серед них є п'єзоелектричні пристрої, що випереджають всі інші типи за такими показниками, як енергозбереження, мініатюризація та адаптивність до систем управління. Значна увага, що приділяється п'єзоматеріалам та елементам на їх основі, пояснюється рядом їх переваг, а саме: високою надійністю; малогабаритними показниками; стійкістю до впливу агресивного середовища; високою термостійкістю; можливістю використання без додаткових кінематичних зв'язків та ін.

Перспективним напрямком використання п'єзоелектричних приводів є точне настроювання верстатів (нанопозиціонування). Завдяки жорсткій структурі п'єзоприводи є високоефективним інструментом для швидкого та точного настроювання верстата. Рівень сигналу на п'єзопривід позиціонування різального інструменту може бути синхронізований з фазою обертання шпинделя, що дозволить компенсувати, наприклад, відхилення від круглості (огранку) та інші похибки обробки. Крім того, п'єзоприводи можуть бути використані для компенсації вібрації від джерел вимушених коливань. В п'єзодвигунах використовують зворотний п'єзоэффект, коли при збільшенні електричного поля змінюються лінійні розміри матеріалу. Для керування п'єзоелементами зазвичай необхідне інтенсивне електричне поле з напруженістю  $E_{max}=10^6$  В/м. Джерело напруги у 300-600 В розвиває таку напруженість в пластині товщиною 0,3 – 1 мм. Абсолютна зміна товщини пластини складе 0,05 – 0,3 мкм. Для збільшення діапазону позиціонування п'єзоелементи об'єднують у більш складні конструкції, які називають п'єзоелектричними актуаторами.

Одним з напрямків ефективного використання п'єзодвигунів для підвищення точності нано- та мікропозиціонування на верстатах є їх використання у якості приводу спеціального інструментального оснащення з пружними елементами. Створення пружного підвісу різця за допомогою пружних пластин, що виконують функцію пружних напрямних чи шарнірів, забезпечує можливість попереднього навантаження пакету п'єзоелементів за рахунок деформації пружних елементів оснащення, достатній рівень жорсткості положення інструменту при різанні і необхідний діапазон позиціонування. Таким чином, різцетримачі з пружними пластинами, оснащені п'єзоприводами, можуть ефективно використовуватись для нано- та мікропозиціонування різального інструменту.

УДК 539.20

Грабар І.Г., д.т.н., проф.

Житомирський національний агроекологічний університет, м. Житомир, Україна

### МАКРОСКОПІЧНА МОДЕЛЬ МІКРОВЗАЄМОДІЇ РІЗНОЙМЕННИХ АТОМІВ СПЛАВУ ТА ХОЛОДНИЙ ЯДЕРНИЙ СИНТЕЗ

В доповіді показано, що квантомеханічні моделі взаємодії різнойменних атомів в сплавах дозволяють отримати важливі мікроскопічні характеристики, однак не дають можливості оцінити механічні властивості сплавів на макрорівні, співставимі з експериментальними значеннями. Макроскопічні моделі значно продуктивніші в оцінці макроскопічних характеристик, залишаючи за кадром особливості мікровзаємодії. Відносно вдала спроба примирити дане протиріччя здійснена автором більше 10 років тому [1], де із синергетичної моделі руйнування отримана залежність енергії активації тривалого руйнування:

$$U_0 \cong kT_s \ln \frac{[1]}{\tau_0} \quad (1)$$

що гарно корелює з експериментальними значеннями, отриманими з рівняння Журкова [2-3], особливо для ОЦК і ГЦК металів та їх сплавів. (1) відкриває шлях до розв'язків цілого ряду нових задач. З (1) слідує, що основний параметр рівняння Журкова – енергія активації – лінійно залежить від температури плавлення сплаву, і для підвищення характеристик тривалої та короткочасної міцності легуванням необхідно максимально можливо підвищувати температуру плавлення сплаву. В той же час аналіз діаграм фазової рівноваги подвійних систем [5] показує, що в переважній більшості навіть невелика кількість атомів легуючих елементів суттєво зменшує температуру плавлення. Сплайн-апроксимація залежностей температури плавлення від концентрації домішок  $T_s(C_i)$  [5] та від зовнішнього тиску  $T_s(P)$  [4] дає можливість, з врахуванням (1), отримати кількісні значення параметрів взаємодії різнойменних атомів в сплаві. Показано, що атоми легуючих елементів (домішок) створюють надзвичайно великий внутрішній тиск в матриці основи, провокуючи всесторонній її розтяг. В доповіді запропоновано загальний розв'язок вказаної задачі, інтерес до якої значно зріс за останні кілька років на фоні вдалих експериментальних рішень задачі холодного ядерного синтезу (ХЯС) [7-9] та двохрічного стійкого падіння цін на нафту, що, на нашу думку, є взаємопов'язано. Але на даний час не створена навіть якісна теорія ХЯС [9].

З (1) в лінійному наближенні деформування потенційного рельєфу отримуємо залежність температури плавлення від зовнішньої напруги:

$$T_s(\sigma) \cong T_{s0} \left( 1 - \frac{\sigma}{E} \right), \quad (2)$$

Для випадку стискування ( $\sigma = -p$ ) температура плавлення повинна збільшуватися:

$$T_s(p) \cong T_{s0} \left( 1 + \frac{p}{E} \right) \quad (3)$$

що і підтверджують чисельні експериментальні дані [4]. В доповіді наведено числові оцінки значень тиску, що задовольняють експериментальним значенням зміни температури плавлення. Так, впровадження в кристалічну ґратку заліза лише 0,1% (в масових долях) водню еквівалентно – із (1)-(3) – навантаженню ґратки заліза всестороннім розтягом 2,4 ГПа. В той же час атоми заліза стискають примісні атоми водню напругами порядку 45 ГПа, що взагалі на кілька порядків перевищує реальні характеристики міцності для будь-яких сплавів заліза, але узгоджується з характеристиками теоретичної міцності [6]. Такі значення тиску на даний час – значно вище можливостей кращих випробувальних камер для досліджень

поведінки матерії в екстремальних умовах, що імітують умови в надрах планет та зірок, а також в технологічних камерах синтезу штучних матеріалів (діамантів, фулеронів) чи активній зоні ядерних установок. В даному випадку такі умови створені природою. При цьому не потрібні екстремальні температури, громіздкі камери, надпотужні приводи. Як вважає автор, такі кількісні значення тиску суттєво спрощують побудову моделі холодного ядерного синтезу [7-9].

Наприклад, для пояснення результатів дослідів А.Россі – при проникненні атомів водню в кристалічну ґратку нікелю в межах 1% масових долей наші оцінки дають значення тиску матриці на вказані атоми водню в діапазоні 400 ГПа !

В [9] показано, що стохастичні низькотемпературні ядерні процеси в нерівновісних твердих тілах, що стимулюються трансформацією пружної енергії в кристалічній ґратці при фазових переходах, механічних впливах, сорбції чи десорбції водню (дейтерію) достовірно зафіксований в цілому ряді фізичних та фізико-хімічних процесів за участю дейтерію.

### Висновки.

В доповіді наведено алгоритм розрахунку тиску чужорідних атомів на всебічний розтяг ґратки основного елемента та відповідно стискування цих чужорідних атомів ґраткою основного елемента. На прикладі системи Fe-H показано, що при впровадженні в кристалічну ґратку 0,1% атомів водню (в масових долях) це приводить до утворення гігантських розтягуючих напруг в ґратці заліза – більше 2 ГПа, а на атоми водню ґратка заліза створюватиме тиск біля 45 ГПа, що може слугувати поясненню процесу ХЯС (наприклад, в E-cat дослідях А. Россі)

### Список літератури

1. Грабар І.Г. Термоактиваційний аналіз і синергетика руйнування. – Житомир.:ЖІПІ. – 2002. – 312 с.
2. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука. 1974. 512 с. 17.
3. Журков С.Н. Проблема прочности твердых тел. Вестн. АН СССР, 1957, N11. 78 с.
4. Григорович В.К. Металлическая связь и структура металлов. М.: Наука. 1988. 296 с.
5. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник: В 3 т.: / Под общ. ред. Н.П. Лякишева.— М.: Машиностроение, 1996 – 2000. — 992 с. 1024 с. 448 с.
6. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: 1975. – 456 с.
7. <http://www.sifferkoll.se/sifferkoll/wp-content/uploads/2014/10/LuganoReportSubmit.pdf>
8. [http://www.whatisnuclear.com/physics/energy\\_density\\_of\\_nuclear.html](http://www.whatisnuclear.com/physics/energy_density_of_nuclear.html).
9. Ивасьшин Г.С. Научные открытия в микро- и нанотрибологии// Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. -4:24-7

### УДК 681.5: 620.1

Грабар<sup>1</sup> І.Г., д.т.н., професор, Dehtjar<sup>2</sup> Yuriy D. dr.habil.phys., professor,

Грабар<sup>3</sup> О.І., к.т.н., доцент

1- Житомирський національний агроекологічний університет, Україна

2- Ризький технічний університет, Riga Technical University, Latvia

3- Житомирський державний технологічний університет, Україна

### ПОРИСТІ БІОСУМІСНІ КЕРАМІКИ З ІНДУКОВАНИМ ПОВЕРХНЕВИМ ЗАРЯДОМ ТА КОНСТРУЮВАННЯ ВОДЯНИХ ФІЛЬТРІВ

В доповіді показано, що пористі матеріали, виготовлені з біосумісних керамік, можуть застосовуватись для покращення якості питної води, в тому числі – і як фільтри. Наведені приклади застосування наноструктурованої пористої кераміки з гідроксилапатиту для

очистки води від важких металів. Розроблена модель взаємодії пористої кераміки, на поверхні якої індуковані поверхневі заряди, з мікроорганізмами. Це дозволило запропонувати теоретичні передумови для конструювання мобільного фільтра для очистки води від патогенної мікрофлори.

Незважаючи на велику кількість пристроїв і технологій водопідготовки, є нагальна потреба в надійних, доступних за ціною, енергонезалежних, економних автономних систем комплексної очистки питної води від мікрофлори та важких металів. Як показує практика останніх десятиліть, дана проблема особливо актуальна в зонах стихійних лих (Суматра, Гаїті, Фукусіма та ін.), терористичних актів, військових конфліктів (Ірак, Сирія, Афганістан, схід України та ін.). В цих умовах не тільки порушується робота систем сталого забезпечення якісною питною водою, а й блокується енергопостачання, шляхи сполучення, а в багатьох випадках, як наприклад, при повенях – відбувається потрапляння каналізаційних стоків до джерел та криниць. А це, особливо в умовах літньої спеки, призводить до катастрофічно швидкого множення патогенної мікрофлори, наслідком чого є гігантські епідемії смертельних кишкових захворювань (Гаїті, Суматра) з величезними людськими втратами. В сезон дощів в густонаселених районах Китаю, Індії, Пакистану, Індонезії, регіоні Карпат повені стали, на жаль, повсякденним явищем.

В даних системах очистки води необхідно застосовувати фільтри з дуже високою ефективністю сорбції мікроорганізмів. Для цього робочий матеріал фільтра повинен мати максимально розвинену поверхню. Крім цього, сорбційні властивості поверхні мають бути адаптовані під конкретні мікроорганізми. Розвинену поверхню в матеріалах фільтрів можна забезпечити структурною перколяцією. Функціоналізацію поверхні для імобілізації мікроорганізмів, застосовуючи теорію адгезії Ландау, можливо забезпечити електричним зарядом. На даний момент в світі відсутні фільтри, в робочих матеріалах яких поєднана перколяція з необхідними механічними властивостями та ціленаправлені електричні заряди поверхні.

Кераміку з гідроксилапатиту отримували шляхом формування під тиском елементів фільтра необхідної геометрії з подальшим спіканням при високих температурах. Зразки виготовлялись у вигляді циліндрів заданих розмірів за схемою пресування в закритій матриці. Для тиску пресування від 15 до 350 МПа кінетика пресування порошкового гідроксилапатиту добре описується політропою виду [1-3]:

$$P \cdot V^{12} \approx C \quad (1)$$

(1) дозволяє аналітично визначити режими пресування для забезпечення необхідної пористості. Так, для зусиль пресування  $P \in [30...50] \text{ МПа}$ ,  $\theta \in [40...9] \%$ .

Кераміка, виготовлена за даною технологією, є напівпровідником з широкою забороненою зоною, (~4 eV), що дозволяє формування локальних енергетичних рівнів з тривалим часом релаксації (за допомогою поверхневого легування та генерації структурних дефектів) а також реструктуризацію поверхневих іонно-ковалентних зв'язків (за допомогою переключення водню (протона) поверхневого О-Н зв'язку та переорієнтації його з поверхні в об'єм кераміки) [5-7].

Електрична функціоналізація поверхні перколяційної кераміки проводилась наступним чином: для створення локальних енергетичних рівнів кераміка опромінювалась високоенергетичним випромінюванням електронів. Реструктуризація поверхневих О-Н зв'язків, переключення протонів досягалось при обробці кераміки в середовищі водню під високим тиском.

Контроль електричного заряду, досягнутого в ході електричної функціоналізації, проводився за допомогою методу ультрафіолетової фотоелектронної спектроскопії (визначенням фотоелектричної роботи виходу електрона) та Кельвін-зондової силової мікроскопії (різновид атомно-силової мікроскопії).

Апробація дослідного зразка фільтра проводилась на наступних модельних мікроорганізмах : непатогенні дріжджі *S.Cerevisiae* як модель грибкових мікроорганізмів, бактерії *Burkholderia cepacia* (*B.cepacia*) и *Escherichia coli* (*E.coli*). Бактерії *B.cepacia* широко розповсюджені і часто зустрічаються в природній воді та ґрунтах, , а бактерії *E.coli* є загальноприйнятим індикатором фекального забруднення води .

Для теоретичного контролю процесу об'єднання пор в кластери необхідних розмірів використовувалось наше співвідношення для кінцевомірних областей пористої перколяційно-фрактальної системи:

$$W(P) = \frac{1}{1 + \exp[L(P^* - P)]} \quad (2)$$

де поріг перколяції  $P^*$  знаходили з декартового наближення проф. Грабара [1] :

$$P^* = 1 - \ln \frac{D+1}{2} \quad (3)$$

де  $D$  – фрактальна розмірність.

### Список літератури

1. Грабар І.Г. Перколяційно-фрактальні моделі в сучасному матеріалознавстві. – Наукові нотатки ЛНТУ. Вип.49. –Луцьк. - 2015. – с.28-32
2. Грабар І.Г., Грабар О.І. Інноваційні моделі механіки перколяційно-фрактальних середовищ. - В кн.: Матеріали міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки». - Київ: НУБІП. - 2015
3. рабар І.Г., Грабар О.І., Гутніченко О.А., Кубрак Ю.О. Перколяційно-фрактальні матеріали.Наукова монографія – Житомир. – ЖДТУ. – 2007. – 354 с.
4. Грабар І.Г., Даник Ю.Г., Ковбасюк С.В. Математичне моделювання та оптимізація складних систем. – Житомир. – ЖВІ ім.С.П.Корольова. – 2015. – 680 с.
5. Computational study of Hydroxyapatite structures, properties and defects. J. Phys. D: Appl. Phys. 48 (2015) 195302 (20pp) doi:10.1088/0022-3727/48/19/195302, S Bystrov, J Coutinho, A V Bystrova, R C Pullar, Dekhtyar Yu. A Poronin, E Palcevskis, A Dindune, B Alkan, C Durucan, E V Paramonova.
6. Silica Nanoparticles as the Adjuvant for the Immunisation of Mice Using Hepatitis B Core Virus-Like Particles. PLOS ONE (2014) DOI:10.1371/journal.pone.0114006., 1-17., Dace Skrastina, Ivars Petrovskis, Ilva Lieknina, Janis Bogans, Regina Renhofa, Velta Ose, Andris Dishlers, Yuri Dekhtyar, Paul Pumpens.
7. Novel concepts of “niche-relief” and niche-voltage” for stem cells as a base of bone and hematopoietic tissues biomimetic engineering; I. Khlusov, M. Khlusova, E. Gostischev, Yu. Dekhtyar, Yu. Sharkeev, V. Pichugun, IFMBE Proceedings, 2012., 38., 99.-102.

УДК 621.375.826

Головко<sup>1</sup> Л.Ф., д.т.н., проф., Лутай<sup>1</sup> А.М., ст.викл., Мажейка<sup>2</sup> О.Й., к. т.н., проф.,  
Клюфінський<sup>1</sup> В.Б. студ.

1 – НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

2 – Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград, Україна

### ЛАЗЕРНЕ ФОРМОУТВОРЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ З ЗІСТАРЕНИХ СПЛАВІВ АЛЮМІНІЮ

**Вступ.** Алюмінієвий сплав Д16 , що належать до сплавів системи Al – Cu – Mg (дуралюміні) після гартування та старіння має високий рівень питомої міцності і опору втомному руйнуванню. Завдяки цим якостям він широко використовуються у виробництві силових елементів в авіаційній і космічній техніці, а також для виготовлення деталей машин і приладів різного призначення. Досить велика кількість виробів з вказаного сплаву має форму тонкостінних листових конструкцій, що виготовляються з попередньо термічно зміцнених заготовок. У авіабудуванні це довгомірні панелі, обшивки фюзеляжу, крила.



Більшість виробів такого типу виготовляються в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва. Тому їх формоутворення традиційними методами значно здорожує виробництво. Так, наприклад, трудомісткість виготовлення оснастки інструментального штампу для обробці панелі розміром 1000 × 12000 мм складає приблизно 7500 нормо - годин [1]. Використання більш гнучкого та універсального метода дробу ударного формоутворення (ДУФ) значно зменшує трудовитрати на виготовлення подібних деталей [2-4]. Але ДУФ має ряд недоліків найбільш суттєвими з яких є зміна форми деталі при експлуатації в умовах тривалого нагрівання до температури  $\approx 100^{\circ}\text{C}$ , що є наслідком релаксації залишкових напружень, існування обмежень у виборі ефективних радіусів згинання в залежності від товщини полотна та необхідність виконання додаткової операції зачищення для зменшення шорсткості обробленої поверхні [3,4]. В останні роки інтенсивно досліджується та використовується у виробництві технологія лазерного формоутворення (ЛФ) просторових конструкцій з листових матеріалів [5- 7], яка має цілий ряд переваг в порівнянні з ДУФ. А саме – лазерна обробка дозволяє значно простіше автоматизувати технологію формоутворення, легко змінювати густину потужності лазерного випромінювання та швидкість переміщення променя, можливість його транспортування на значні відстані і підведення в важкодоступні місця, а також відсутність динамічного впливу на оброблювану поверхню. На відміну від ДУФ деталі, що виготовлені методом ЛФ не потребують додаткової обробки поверхні і практично не мають обмежень на радіус кривизни згинання оскільки лазерний промінь може бути сфокусований до десятих часток міліметра. Але при ЛФ конструкцій з попередньо термічно зміцнених сплавів треба враховувати можливі зміни у фазовому складі, структурі та субструктурі зони термічного впливу (ЗТВ), які достатньо добре досліджені в умовах пічного нагрівання.

**Мета роботи** – виявити причини зниження характеристик міцності у ЗТВ при ЛФ конструкцій з зістареного сплаву Д16, розробити технологічну схему ЛФ з охолодженням заготовки, дослідити структуру та механічні властивості ЗТВ, визначити області зміни параметрів ЛФ, в межах яких забезпечується існування у ЗТВ вихідної структури зістареного сплаву.

**Матеріал та методики досліджень.** Зразки розміром 100× 60 мм товщиною  $h=1,8\text{мм}$  вирізалися з листа сплаву Д16Т (склад: ваг. %: Al – 93,6, Cu – 3,97, Mg – 1,43, Mn – 0,625 ). Двохвимірне ЛФ здійснювали на  $\text{CO}_2$ - лазері при потужності випромінювання  $P = 1\text{кВт}$ , діаметрі фокальної плями  $d=4\text{мм}$ , швидкості руху променя  $V=6,0\text{м/хв}$ . Обробка проводилася за методикою, що наведена у роботі О.Д. Кагляка [7] та з охолодженням парами азоту. Температура пластини змінювалася регулятором напруги на нагрівальному елементі, що розташований у сосуді Дюару або за допомогою клапана на гарячому кінці вихрової трубки. Механічні випробування на розтяг проводили згідно з ДСТУ EN 10002-1:2006 на машині TIRAtest 2300. Зразки вирізувалися на електроіскровому верстаті по сліду лазерного променя, після чого зонам захвату надавали пласку форму і шліфували торцеві поверхні. Вимірювання мікротвердості ( $H_{\mu}$ ) проводили на приладі ПМТ- 3 при навантаженнях 10 – 100 г. Рентгеноструктурні дослідження здійснювалися на дифрактометрі Rigaku Ultima IV у  $\text{CuK}\alpha$  випромінюванні. Зйомку проводили у інтервалі кутів  $2\theta - 20 - 140^{\circ}$  з кроком  $0,02^{\circ}$  і часом накопичення 2с Величину залишкових напружень (ЗН) визначали  $\sin^2\psi$  - методом за дифракційним максимумом (422). Визначалася компонента ЗН, що орієнтована впродовж доріжки. Величину мікрдеформацій ( $\epsilon$ ) та середній розмір областей когерентного розсіювання  $L_{\text{окр}}$  визначали методом апроксимації. Для одержання коректних даних при рентгенівських зйомках поверхневий деформований шар на лазерній доріжці видалявся. Зйомки дифрактограм проводилися через 48 годин після обробці.

#### **Властивості та структура ЗТВ після ЛФ без охолодження зразка.**

Спостерігається певна циклічність у зміні  $H_{\mu}$  поверхні лазерної доріжки від кількості проходів (рис.1) При  $N_2=10$  помітне зростання величини.

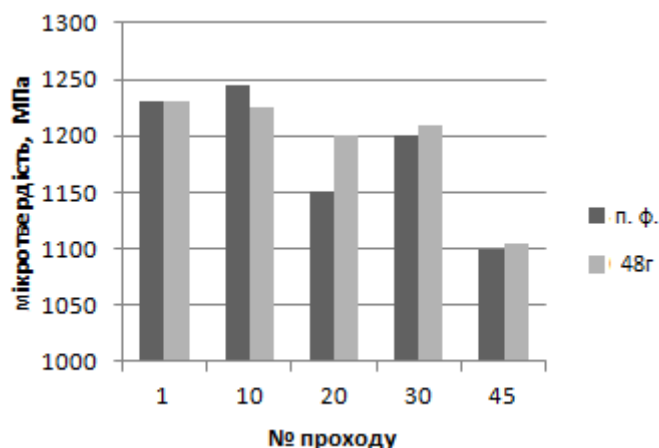


Рис.1. Залежність мікротвердості поверхні зразків від кількості проходів безпосередньо після ЛФ (п.ф.) та після 48 годинного природного старіння (48г)

вказаного параметра при вимірюванні безпосередньо після обробки на який практично не впливає процес старіння. При подвоєнні № мікротвердість значно зменшується, але старіння.

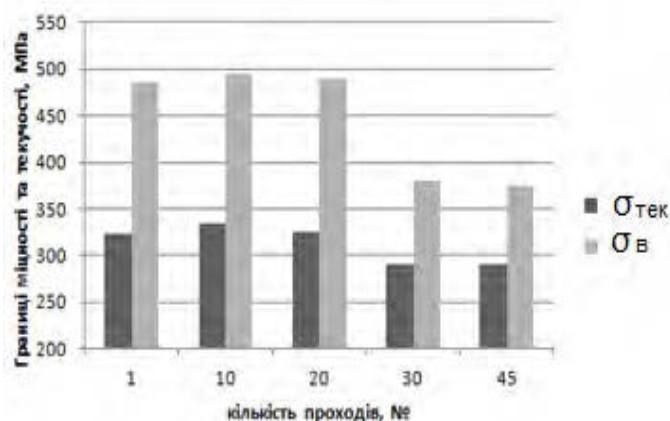


Рис.2. Залежності величини границь текучості та міцності від кількості проходів суттєво збільшує  $H_{ц}$ . При подальшому збільшенні № проходів зростає аналізований параметр ( $N_{п}=30$ ) з значним зменшенням при  $N_{п}=45$ . Підкреслимо, що при двох останніх значеннях кількості проходів ефект старіння незначний.

Залежності  $\sigma_{тек}$  та  $\sigma_{в}$  від  $N_{п}$  (рис.2) мають однаковий характер. А саме: при невеликій кількості проходів йде їх зростання, зниження при  $N_{п} \geq 10$  та незмінність при великих значеннях  $N_{п}$ . Співставлення з даними дослідження субструктури та вимірювання періоду решітки твердого розчину (табл.1) дозволяє стверджувати, що

Таблиця 1

**Результати дослідження субструктури та визначення величини залишкових напружень (ЛФ без охолодження)**

Кількість проходів	Розмір ОКР, нм	Величина мікрODEформації, відн. од., $10^{-3}$	Період ґратки твердого розчину, нм	Величина залишкових напружень, МПа
1	-	0,25	0,4053	+190
10	160	3,0	0,4050	+110
20	90	6,0	0,4048	-40
30	80	2,0	0,4050	у меж. пох.
45	100	2,5	0,4048	у меж. пох.

зростання характеристик міцності та величини  $H_{ц}$  при невеликих значеннях  $N_{п}$  пояснюється релаксацією тимчасових термічних напружень шляхом пластичної деформації ЗТВ на стадії

нагрівання термічного циклу. Пластична деформація супроводжується генерацією дислокацій, що підтверджується зростом величини  $\epsilon$  при  $N_{\text{окр}} \leq 20$ . Надалі ( $N_{\text{окр}} = 20 \dots 40$ ) значення  $\epsilon$  зменшуються, а величина  $L_{\text{окр}}$  дещо збільшується. Обидва факти означають, що превалюючими стають процеси динамічного повернення та рекристалізації у твердому розчині, які знеміцнюють сплав. Значення періоду кристалічної ґратки ( $a$ ) наближаються до величини  $a$  твердого розчину Cu та Mn у рівноважному стані. Тобто фазове старіння закінчилося і подальша обробка ( $N_{\text{окр}} \geq 45$ ) приводить до коагуляції  $T(Al_{20}Cu_2 Mn_3)$  - та  $\theta(Al_2Cu)$  – фаз.

Температури зразка (рис.3) при вказаних  $N_{\text{окр}}$  доходить до  $t = 250^\circ\text{C}$ , що достатньо для активації як динамічної рекристалізації та коагуляції.

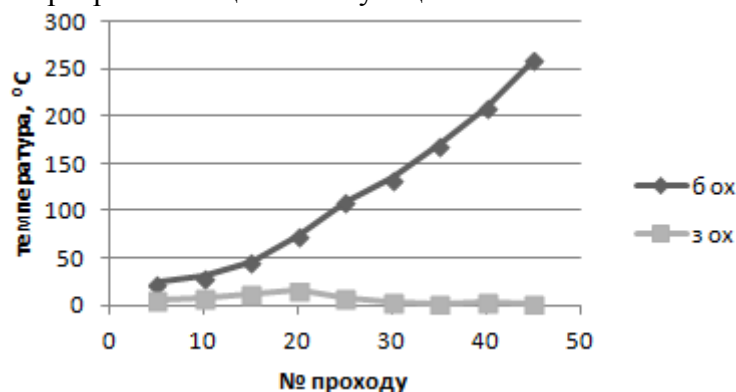


Рис.3. Залежності температури зразків від кількості проходів (б ох. – без охолодження, з ох. – з охолодженням)

### Висновки

В роботі запропоновано використовувати метод ЛФ при виготовленні крупногабаритних конструкцій виготовлених з зістареного сплаву Д16. Показано, що у конструкціях з невеликим кутом згину процес ЛФ може проводитися по традиційній схемі. Виявлено, що при формоутворенні деталей з кутами згину що перевищують  $\approx 30^\circ$  у ЗТВ проходять процеси динамічної рекристалізації твердого розчину та коагуляції інтерметалідів, які знеміцнюють сплав. Запропонована схема ЛФ з охолодженням заготовки, яка виключає згадані процеси та значно збільшує продуктивність процесу. Показано, що у ЗТВ реалізується напружений стан з від'ємними ЗН на поверхні лазерної доріжки, що повинно суттєво збільшити втомну міцність конструкції.

### Список літератури

1. Лупкин, Б. В. Формообразование дробью как метод обработки крупногабаритных деталей сложной кривизны в самолетостроении / Б. В. Лупкин, А. И. Лагутин // [Авиационно-космическая техника и технология](#). - 2006. - № 2. - С. 17–20.
2. Грошиков, А.И. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении / А.И. Грошиков, В.А. Малафеев. - М.: Машиностроение, 1976. - 439 с.
3. Малащенко, А.Ю. Эффективности технологического сочетания гибки-рокатки и дробеударного формообразования длинномерных обводообразующих деталей : дис. канд. тех. наук / А.Ю. Малащенко. - М., 2014. - 154 с.
4. Лупкин, Б. В. Применение дробеударной обработки в авиационной промышленности / Б. В. Лупкин, С. Д. Младинов, А. И. Лагутин, В. А. Никитенко // Сборник научных трудов «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии»-2007.-№ 36. –С.20-28
5. Watkins K.G. Laser Forming of Aerospace Alloys / K.G. Watkins, S.P. Edwardson // Aerospace Manufacturing Technologists Conference: Proceedings, 9 Seattle, Washington, USA 10-14 September 2001 // Washington, 2001 - p.12
6. Cheng, J. Microstructure Integrated Modeling of Multiscan Laser Forming / J. Cheng, Y. Yao // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2002. Vol. 124; pp. 379-387
7. Кагляк, О.Д. Формоутворення просторових металевих конструкцій локальним лазерним нагріванням : дис. канд. тех. наук / О.Д. Кагляк. - Київ 2012. - 149 с.

УДК 62.82

**Беседин В.Л., Тихенко В.Н., д.т.н., проф., Волков А.А.**

Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

**ОБЪЕМНАЯ СЕКТОРНО-ЛОПАСТНАЯ ГИДРОМАШИНА**

Гидравлические объемные машины используются в гидроприводах для преобразования механической энергии приводного двигателя в энергию потока жидкости. Объемной называется гидромашина, рабочий процесс которой основан на попеременном заполнении рабочей камеры жидкостью и вытеснении её из рабочей камеры [1]. Под рабочей камерой понимается ограниченное пространство внутри машины, периодически изменяющее свой объем и попеременно сообщаемое с местами входа и выхода рабочей жидкости. По принципу действия, точнее по характеру процесса вытеснения жидкости, объемные гидромашин разделяются на поршневые и роторные. Особенностью рабочего процесса роторных гидромашин является то, что при вращении роторов (вытеснителей) рабочие камеры переносятся из полости всасывания в полость нагнетания и обратно [2]. Перенос рабочих камер с жидкостью исключает необходимость иметь всасывающие и нагнетательные клапаны. В отличие от поршневых гидромашин они обладают обратимостью, т. е. способностью насосов работать в качестве гидродвигателей, а также большой быстроходностью. Максимально допустимые значения частоты вращения для роторных насосов  $n = (2 \div 5) \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$ , причем нижний предел соответствует большим насосам, а верхний – малым [1].

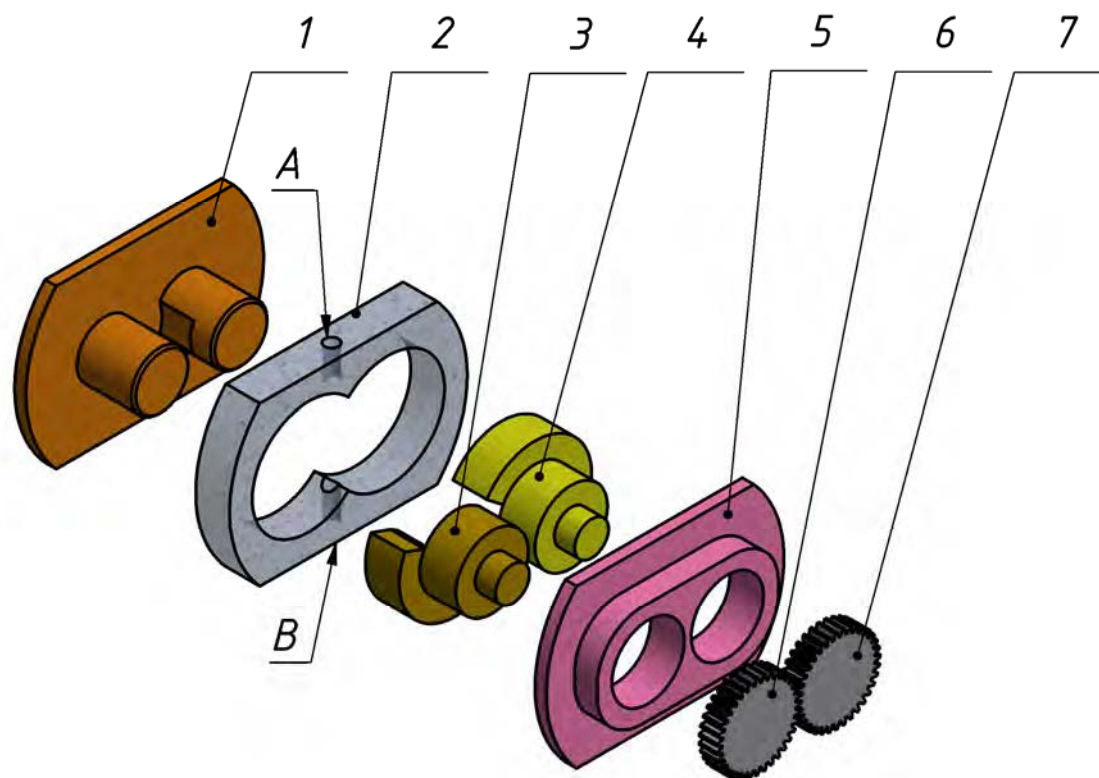
К гидромашинам предъявляют высокие требования, основными из которых являются: малая удельная масса и объем, приходящиеся на единицу мощности, высокий КПД, возможность регулирования и реверса подачи, а также высокая быстроходность и большая надежность. Несмотря на обилие типов и конструкций гидравлических машин в мире продолжают развиваться разработки, направленные на совершенствование конструкции известных гидромашин и разработку новых схемных решений.

В Одесском национальном политехническом университете проводились разработки новых конструкций гидромашин, в том числе, плунжерного типа [3]. Кроме того, разработана объемная секторно-лопастная гидромашина, упрощенная конструкция которой представлена на рис. 1.

Гидромашина состоит из фланца 1 с двумя полуосями, корпуса 2, в котором имеются две взаимнопересекающиеся по образующим цилиндрические расточки и два вертикальных отверстия А и Б, которые служат для подвода и нагнетания рабочей жидкости.

По центру расточек в корпусе вставлены два ротора 3 и 4, на которые насажены своими цилиндрическими частями (с возможностью вращения) два круговых сектора. На торцах цилиндрической части секторов, проходящих через крышку 5, установлены две шестерни 6 и 7, находящиеся во взаимном зацеплении, причем одна из шестерен соединена с валом приводного двигателя.

Каждый сектор, вращаясь на своем роторе, цилиндрической частью поверхности, скользит по радиусной поверхности другой полуоси, образуя замкнутый объем между цилиндрической частью сектора и стенкой вертикального сечения другого сектора. При одновременном вращении двух зубчатых колес, находящихся во взаимном зацеплении и сочлененных с двумя круговыми секторами, стенка вертикального сечения сектора, приближаясь к стенке цилиндрической части другого сектора, сокращает объем образовавшейся рабочей камеры и вытесняет рабочую жидкость через отверстие находящееся на линии пересечения двух расточек.



**Рис. 1. Упрощенная конструкция объемной секторно-лопастной гидромашины**

Одновременно по другую сторону сектора вторая стенка вертикального сечения, удаляясь от стенки цилиндрической части второго сектора, увеличивает объем образовавшейся рабочей камеры. При этом происходит поступление рабочей жидкости в образовавшуюся рабочую камеру через другое отверстие, находящееся на линии пересечения двух расточек с противоположной стороны корпуса. При последующем вращении приводного вала на  $180^\circ$  в другой части расточки наступает второй рабочий цикл, идентичный первому, и процесс повторяется. Таким образом роторы благодаря наличию секторов выполняют роль вытеснителей жидкости. Отсутствие поступательно движущихся элементов гидромашины позволяет применять приводной двигатель с высокой частотой вращения.

Предлагаемая конструкция гидравлической машины отличается компактностью, высокой производительностью и надежностью в работе. Такие гидромашинки могут найти применение в гидравлических приводах различных машин, а также для перекачки технологических жидкостей в химической и нефтегазовой отраслях, компрессорных установках холодильного оборудования.

#### **Список литературы:**

1. *Гидравлика*, гидромашинки и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов / Т. М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов и др. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
2. *Бирюков Б. Н.* Роторно-поршневые гидравлические машинки / Б. Н. Бирюков. – М.: Машиностроение, 1977. – 152 с.
3. *Беседин В.Л.* Плунжерный гидронасос плоской конфигурации // В.Л. Беседин, С.А. Зелинский, В.Н. Тихенко, А.А. Волков / Матеріали міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування», Вінницький нац. техн. ун-т, 2015. – с. 22-23.

УДК 621.833

Лищенко<sup>1</sup> Н. В. к.т.н., доц., Ковальчук<sup>2</sup> А.Н. к.т.н., Ларшин<sup>3</sup> В.П. д.т.н., проф.

1 - Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, Украина

2 - Харьковский машиностроительный завод "Свет шахтера", г. Харьков, Украина

3 - Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

### ОПТИМИЗАЦИЯ ЧИСЛА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИПУСКА ПО ВПАДИНАМ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА

Зубошлифование профильным кругом по методу копирования широко используется в промышленности при изготовлении зубчатых колес (ЗК) для авиационного и транспортного машиностроения [1].

Операцию профильного зубошлифования на станке с ЧПУ можно разделить на два вида работ [2]: измерение припуска на этапе наладки станка и зубошлифование на этапе обработки. Измерение выполняют профильным шлифовальным кругом или специальным измерительным щупом, например, при помощи измерительной системы компании Renishaw. В первом случае (шлифовальным кругом) измерения производят на заготовках ЗК с неудовлетворительным качеством поверхности (после закалки ЗК): чернота, неровности поверхности. Используется сигнал акустической эмиссии, возникающий в момент касания боковых сторон профиля круга и впадины ЗК. Интенсивность этого сигнала при попеременном касании правой и левой стороны профиля впадины ЗК должна быть одинаковой. Во втором случае (измерительным щупом) измерения производят по относительно чистой поверхности перед зубошлифованием (рис.1), а также после его окончания (контроль после обработки).

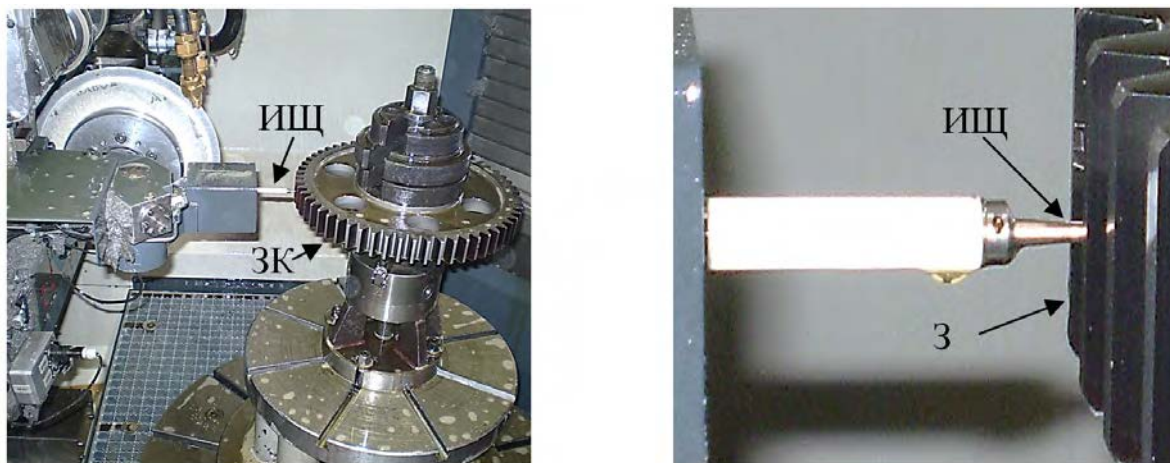


Рис.1. Общий вид (слева) и зона измерения (справа) припуска измерительным щупом компании Renishaw на станке HOFLER RAPID 1250: ИЩ – измерительный щуп; ЗК – зубчатое колесо

Однако в литературе нет сведений об особенностях автоматического цикла измерения и обработки ЗК на станках указанного типа, нет объективного анализа различных способов обмера зубьев перед зубошлифованием. Нет сведений о необходимом числе измерений припуска по впадинам ЗК, расположенным при различном угловом положении по внешней окружности ЗК. Это не позволяет выполнить оптимизацию цикла зубошлифования, включающего время наладки и обработки.

На примере ЗК с 40 впадинами выполнены исследования по восстановлению фактического распределения припуска по впадинам ЗК (линия 1 на рис.2) при различном

числе измерений припуска: по всем сорока впадинам ЗК (линия 2), по двадцати впадинам (линия 3), по восьми впадинам (линия 4) и по четырём впадинам (линия 5). Восстановление выполнено на основании частотного преобразования Фурье по дискретным отсчётам (samples) с равным угловым шагом. Число отсчётов (40, 20, 8 и 4) соответствует фактическому числу измерений припуска с постоянным угловым шагом между отсчётами ( $9^\circ$ ,  $18^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ ). В соответствии с теоремой В. А. Котельникова (Nyquist–Shannon sampling theorem) потенциально выявляемые частоты гармоник для указанного числа отсчётов составляют  $20f_0$ ,  $10f_0$ ,  $4f_0$  и  $2f_0$ , где  $f_0$  – частота основной гармоники с периодом  $2\pi$  (рис.2).

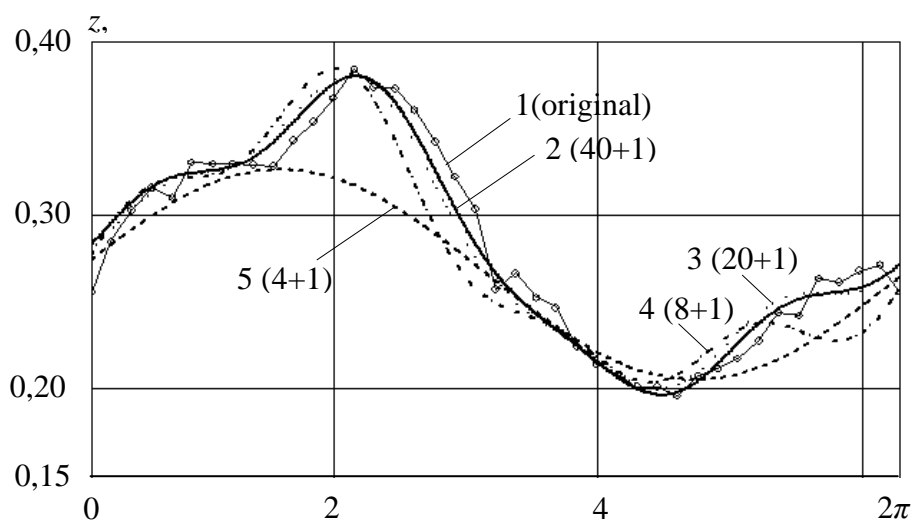


Рис. 2. Восстановление огибающей линии дискретного распределения припуска  $z$  по правой стороне впадин заготовки ЗК с числом впадин 40 (+1 означает дополнение до периода  $2\pi$ )

Особенностью частотного анализа дискретных сигналов, характеризующих ограниченный ( $2\pi$ ) участок исходного сигнала (аналог временного процесса на ограниченном участке времени), является необходимость многократного повторения дискретного исходного сигнала, т.к. периодические составляющие дискретного сигнала теоретически могут быть выявлены только для исходного «бесконечного» во времени периодического сигнала. Причём, с уменьшением числа отсчётов на периоде  $2\pi$  число необходимых повторов «вектора дискретных отсчётов» (40 отсчётов, 20 отсчётов, 8 отсчётов и 4 отсчёта) возрастает. Экспериментально установлено число необходимых расчётных повторов указанных векторов дискретных последовательностей: 3, 5, 10 и 20 повторов. При уменьшении числа расчётных повторов, по сравнению с указанными числами, идентификация амплитуд и фаз составляющих гармоник затрудняется.

Описанный способ восстановления величины припуска во впадинах, которые были пропущены при измерениях, позволяет существенно уменьшить число необходимых измерений для выявления припуска во всех впадинах ЗК (на правой и левой стороне каждой впадины). Показано, что общее время операции зубошлифования, состоящее из времени наладки (измерение припуска) и времени обработки имеет минимальное значение при оптимальном числе измерений припуска.

### Список литературы

1. Лиценко Н.В. Настройка станков при зубошлифовании по методу копирования / Н.В. Лиценко, А.Н. Ковальчук, В.П. Ларшин // Физические и компьютерные технологии. Труды 21-й Междунар. науч.-практ. конференции. – Д.: ЛИРА, 2015. – С.39-45.
2. Лиценко Н.В. Анализ распределения припуска по профилю впадины при зубошлифовании / Н.В. Лиценко, В.В. Нежебовский, В.П. Ларшин // Физические и компьютерные технологии. Труды 21-й Междунар. науч.-практ. конф. – Д.: ЛИРА, 2015. – С.45-48.

УДК 621.952

Оргиян А.А. д.т.н. проф., Баланюк А.В, аспирант., Албакуш Аимен, аспирант  
ОНПУ «Одесский национальный политехнический университет», г. Одесса, Украина.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ПЕРЕМЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОТДЕЛОЧНО-РАСТОЧНЫХ СТАНКОВ

Внешние воздействия на упругую систему станка при отсутствии резания являются источниками колебаний при холостом ходе, снижение уровня которых особенно важно для прецизионных отделочных станков. Достаточно низкий уровень колебаний при резании не может быть достигнут, если не обеспечен соответствующий уровень колебаний при холостом ходе станка. Исследования колебаний отделочно-расточных станков при холостом ходе и при резании выполнены при цеховых испытаниях [1].

Эксперименты проводились на отделочно-расточных станках моделей 2А715, 2706 и 2731. Измерялись колебания борштанг, корпусных деталей и электродвигателей при варьировании размеров борштанг и условий обработки. Распределению амплитуд  $a_{xx}$  изгибных колебаний борштанг в интервале 0,2...2 мкм соответствовало распределение амплитуд  $a_{рез}$  колебаний при резании в интервале 0,2...5 мкм. Соотношение между  $a_{рез}$  и  $a_{xx}$  зависит от размеров борштанг, состояния резцов, характеристик обрабатываемого материала и режима обработки.

Спектральный анализ колебаний борштанг, корпусных деталей и электродвигателей привел к выделению двух групп гармоник: низкочастотной (10...50 Гц) и высокочастотной (200...1000 Гц). Низкочастотные колебания развиваются преимущественно на частоте вращения ротора электродвигателя привода вращения. Низкочастотные колебания корпусных деталей развиваются в виде качательной формы на опорах станка и не проявляются в спектрах колебаний борштанг относительно технологических приспособлений. Наиболее интенсивная гармоника высокочастотных колебаний обнаруживается на собственной частоте изгибных колебаний борштанги. Источником высокочастотных колебаний борштанг являются, главным образом, возмущения в подшипниках опор шпинделя.

Связь колебаний неустойчивой формы, развивающейся при резании в системе шпиндель-борштанга, с колебаниями корпусных деталей оказывается весьма слабой (табл. 1): амплитуды колебаний корпусных деталей сохраняют значения, измеренные при холостом ходе, даже тогда, когда амплитуда колебаний борштанги при резании в 6-8 раз больше, чем при холостом ходе. Это позволяет рекомендовать оценку колебаний ОРС при холостом ходе по уровню колебаний борштанги в полосе частот, близких к собственной частоте шпинделя с борштангой.

Таблица 1

Сравнение колебаний узлов ОРС при холостом ходе и при резании

Место измерения колебаний	Колебания			
	При холостом ходе		При резании	
	амплитуда, мкм	частота, Гц	амплитуда, мкм	частота, Гц
Стол	0,1	250	0,1	250
Мостик	0,2	270	0,3	270
Головка	0,1	250	0,1	250
Борштанга	0,8	450	6,5	450



В экспериментах было получено распределение числа станков по интервалам значений амплитуды колебаний контрольной оправки и показано, что нормы точности ОРС класса В и требования к шероховатости обработанной поверхности  $R_a \leq 0,5 \text{ мкм}$  выполняется, если амплитуда колебаний контрольной оправки не превосходит 1 мкм.

Известна способность подшипниковых опор шпинделя создавать периодические возмущения, которые связывают с частотами  $f_{uu}$  вращения шариков вокруг собственных осей, а также с частотами прохождения шариков относительно наружного  $f_n$  и внутреннего  $f_g$  колец [2]:

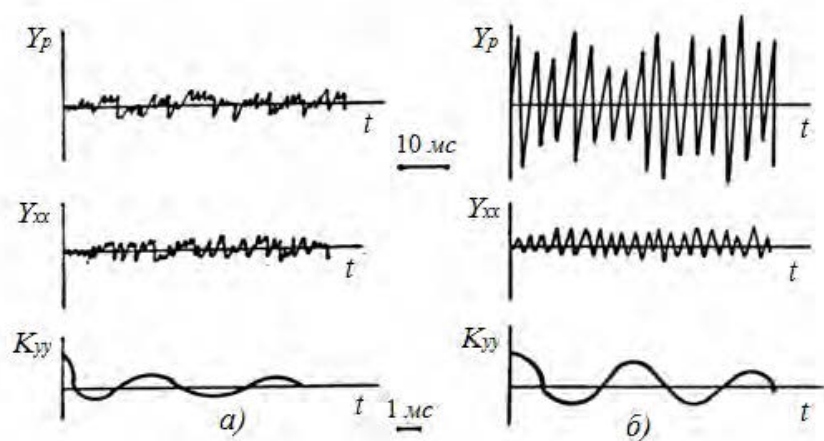
$$f_{uu} = 2 \cdot f \cdot d_c \cdot K_1 \cdot K_2 / d_{uu}, \quad f_n = f \cdot K_1 \cdot z, \quad f_g = f \cdot K_2 \cdot z, \quad K_1 = (d_c - d_{uu} \cos \beta) / 2d_c,$$

$$K_2 = (d - d_{uu} \cos \beta) / 2d_c$$

где  $f$  – частота вращения шпинделя;  $d_c$  – диаметр сепаратора;  $d_{uu}$  – диаметр шарика;  $\beta$  – угол контакта шарика с беговой дорожкой;  $z$  – число шариков.

Степень детерминированности колебаний шпинделя в значительной мере зависит от параметров упругой системы. Эта особенность динамических процессов обнаруживается при сравнении колебаний в условиях холостого вращения короткой ( $l = 50 \text{ мм}$ ) и длиной ( $l_1 = 150 \text{ мм}$ ) борштанг одинакового диаметра ( $d_1 = 25 \text{ мм}$ ). Для этих борштанг на рис.1 сопоставлены осциллограммы колебаний и соответствующие им автокорреляционные функции  $K_{yy}(t)$  процесса. С уменьшение длины борштанги процесс приближается по своим характеристикам к недетерминированному. Таким образом, предельные возможности шпиндельного узла по точности обработки жесткими короткими борштангами связаны со случайными колебаниями в системе.

С целью изучения характера возмущений, возникающих в опорах качения шпинделя, были проведены измерения среднего уровня и спектра колебаний контрольной оправки при изменении скорости вращения шпинделя.



**Рис. 1** Осциллограммы изгибных колебаний и соответствующие им автокорреляционные функции  $K_{yy}$ :  $Y_p$  - перемещение при резании;  $Y_{xx}$  - при холостом вращении; а- для короткой борштанги; б- для длинной борштанги

Результаты измерений радиальной жесткости шпиндельных узлов с диаметром шпинделя  $d = 55 \text{ мм}$ ,  $75 \text{ мм}$  и  $100 \text{ мм}$  показывают случайный характер среднего значения жесткости узла, ориентации эллипса жесткости и величин его полуосей, а также отклонений от эллипса в отдельных направлениях. Так, для шпиндельных узлов с  $d = 55 \text{ мм}$  среднее по

совокупности значение жесткости  $\bar{c} = 12,5 \text{ МН/м}$ , среднее квадратичное отклонение от которого  $\sigma_c = 0,3 \text{ МН/м}$ . Найдено также среднее значение разности максимальной и минимальной жесткости в зависимости от направления измерений  $\overline{\Delta c} = \overline{c_{\max} - c_{\min}} = 2,3 \text{ МН/м}$ , для которого  $\sigma_{\Delta c} = 0,23 \text{ МН/м}$ .

Зависимости характеристик колебаний от частоты вращения были получены при испытании двух групп шпиндельных узлов. Узлы первой группы были собраны на подшипниках 46111 класса точности 4, а второй- на подшипниках 46115 класса точности 2. Частота вращения изменялась от 1000 до 4000 *об/мин*. Средний уровень колебаний для узлов второй группы в два-три раза ниже, чем для первой.

Изменение уровня колебаний в зависимости от частоты вращения существенно не монотонно: в областях острых пиков уровень колебаний в несколько раз выше, чем при более высоких, но благоприятных значениях частоты вращения. С повышением качества подшипников немонотонность изменений уровня ослабляется. Для зон повышенного уровня колебаний характерно значительное расширение пределов случайных изменений измеряемого уровня. Выделение благоприятных зон значений частоты вращения можно рекомендовать при применении шпиндельных узлов на станках высших классов точности.

### Литература

1. *Линчевский П.А., Джугурян Т.П., Оргиян А.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках.* – Киев: Техника, 2001. – 300 с.
2. *Бейзельман Д. Д., Ципкин Б.В., Перель Л.Я. Подшипники качения: Справочник.* - М.: Машиностроение, 1968.- 564 с.

---

УДК 681.7.022; 681.7.03; 681.7.062

Блощин М.С. к.т.н., ас., Сапура І.М. студ, Задорожний В.О. студ,  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРО-ХІМІКО-ІМПУЛЬСНОГО ПОЛІРУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ МЕТАЛЕВИХ ДЗЕРКАЛ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ

Останнім часом велика увага приділяється для забезпечення необхідних параметрів макро- та мікрогеометрії поверхні, стану поверхневого шару елементів лазерних дзеркал, виготовлених з міді та алюмінію з оптичними властивостями поверхні. Це пов'язано з необхідністю вирішення важливих науково-технічних та практичних задач по технологічному забезпеченню поверхонь лазерних дзеркал високою відбивальною здатністю при довжині хвилі 10,6 мкм. Як відомо, стан поверхонь після механічної обробки характеризується структурними змінами, наявністю окислів, адсорбованих шарів газів, залишків речовин робочого середовища від попередньої обробки.

На даний момент до традиційних методів отримання високої відбиваючої здатності лазерних дзеркал з різних матеріалів (мідь, алюміній та його сплави, молібден та інші) відноситься обробка різанням, як лезова - точіння різцями з природних алмазів, так й обробка вільними абразивами - полірування (доводка) з застосуванням смоляних полірувальників та технологічних середовищ, що містять алмазні мікро - та нано-порошки.

Крім методів механічної обробки для забезпечення високої відбиваючої здатності можливо використати електрохімічне або хімічне полірування, що дозволить створювати поверхневі шари з заданими характеристиками та структурою.

В умовах сучасного рівня розвитку машинобудування однією з основних проблем, що вирішуються на етапі виготовлення деталей різного призначення, є забезпечення стабільно високої якості оброблених поверхонь. Якість, надійність і довговічність виробів істотно

залежать від ступеня досконалості застосовуваних при їх виробництві технологій фінішної обробки, що формують якість поверхні. Складність і різноманіття форм оброблюваних поверхонь ускладнюють створення універсальних способів фінішної обробки.

У вітчизняній і світовій практиці при виконанні оброблювано-зачисної обробки застосовується широкий арсенал методів механічної та фізико-технічної обробки: методи обробки лезовими інструментами, пов'язаним і вільним абразивами, методи поверхневого пластичного деформування, електрохімічні методи, в тому числі хімічне і електрохімічне (ЕХП) полірування, а також комбіновані методи, зокрема, методи, засновані на поєднанні механічного впливу абразивного матеріалу з хімічним або електрохімічним впливом робочого розчину. Однак відомі методи фінішної обробки, що дозволяють забезпечити шорсткість поверхні в широкому діапазоні значень (від Ra 1,60 мкм до Ra 0,012 мкм), мають ряд таких суттєвих недоліків, як многостадійність і велика трудомісткість обробки при підвищених вимогах до якості поверхні, складність обробки виробів складної конфігурації при високих вимогах до точності, формування в процесі обробки дефектного поверхневого шару, негативний вплив на фізико-механічні властивості поверхні та інші [1-2].

Одним з перспективних методів фінішної обробки поверхні металевих виробів є комбінований електро-хіміко-імпульсний полірування, що відрізняється від інших електрохімічних методів обробки стабільністю процесу, високою якістю, продуктивністю і низькою собівартістю обробки, можливістю повної автоматизації процесу і екологічною безпекою. В даний час застосовується лише електро-імпульсний полірування (ЕІП) для фінішної обробки переважно зовнішніх поверхонь виробів різного призначення, забезпечуючи зниження шорсткості до рівня Ra 0,32- 0,06 мкм, для видалення задирок і округлення гострих кромки, підготовки поверхні виробів під нанесення гальванічних і вакуумно-плазмових покриттів, видалення оксидних плівок, окалини невеликої товщини і дефектних вакуумно-плазмових покриттів, а також для очищення поверхні деталей від мінеральних і органічних забруднень.

Незважаючи на значний обсяг досліджень фізико-хімічних і технологічних аспектів процесу ЕІП, проведених вченими різних шкіл, і велику кількість наукових публікацій і патентів, широке впровадження методу в промислових масштабах для фінішної обробки виробів не знайшло.

На відміну від існуючого методу ЕІП пропонується комбінований спосіб електро-хіміко-імпульсного полірування виробів, що поєднує класичне електрохімічне полірування з перевагами імпульсної взаємодії, створюючи нову високоефективну технологію. На даний момент не існує серійного промислового технологічного обладнання. Це пов'язано з недостатньою вивченістю фізико-хімічних процесів, що протікають на оброблюваній поверхні і в парогазовій оболонці, механізмів та основних закономірностей електричної провідності парогазової оболонки, знімання металу, згладжування шорсткості поверхні і формування топографії, впливу технологічних режимів на точність і продуктивність обробки, якість, механічні властивості і експлуатаційні характеристики поверхні деталей.

Високоефективні технологічні процеси комбінованого електро-хіміко-імпульсного полірування забезпечують формування поверхні деталей із заданим комплексом механічних властивостей, точності, геометричних параметрів якості та експлуатаційних характеристик дозволить створити конкурентноздатну технологію отримання лазерних дзеркал належної якості, але з меншою вартістю.

### Список літератури

1. Бартл Д. Мудрох О. *Технология химической и электрохимической обработки поверхности металлов.* - М., 1961.
2. Гарбер М.И. *Декоративное шлифование и полирование.* - М., 1964.
3. Жакс П. *Электрохимическое и химическое полирование.* - М., 1959.
4. Масловский В.В. Дудко П.Д. *Полирование металлов и сплавов.* - М., 1974.
5. Пяндрина Т.Н. *Электрохимическая обработка металлов.* - М., 1961.

УДК 621.9

Филатов<sup>1</sup> А.Ю., к.т.н., Сидорко<sup>1</sup> В.И., д.т.н., доц., Ковалев<sup>2</sup> В.А., к.т.н., доц.<sup>1</sup> - Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев<sup>2</sup> - НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

## ШЕРОХОВАТОСТЬ ПЛОСКОСТЕЙ САПФИРА С РАЗЛИЧНОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ПРИ НАНОПОЛИРОВАНИИ

При механическом полировании плоскостей  $a \{1\bar{1}20\}$ ,  $m \{10\bar{1}0\}$ ,  $r \{10\bar{1}2\}$  и  $c \{0001\}$  сапфира образуются частицы шлама, состоящие из десятков элементарных фрагментов, с размерами 2,2–2,6 нм, и формируется поверхность с шероховатостью  $Ra = 9,0\text{--}16,0$  нм,  $Rq = 10,7\text{--}18,3$  нм,  $Rmax = 23,4\text{--}37,6$  нм. При химико-механическом полировании сапфира образуются частицы шлама, состоящие из одного или нескольких элементарных фрагментов.

При съеме обрабатываемого материала в процессе нанополитирования, который, по сути, является обратным по отношению к процессу роста кристаллов, могут образовываться как атомарно шероховатые, так и атомарно гладкие поверхности в соответствии с критерием

Джексона, согласно которому определяется фактор энтропии поверхности  $\alpha = \frac{zw}{k_B T}$  (где  $z$  –

общее количество возможных связей кластера с ближайшими соседями в кристалле,  $w$  – энергия взаимодействия между кластерами на зернах полировального порошка и на обрабатываемой поверхности,  $T$  – средняя температура в зоне контакта обрабатываемой детали и притира,  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана).

Обработанные поверхности, для которых  $\alpha > 5,3$ , являются атомарно гладкими, а поверхности, для которых  $\alpha < 2$ , являются атомарно шероховатыми. При полировании плоскостей  $m$ ,  $c$ ,  $a$  и  $r$  сапфира (полное число связей  $z = 4$ ) при  $T = 300$  К, расчетные значения фактора Джексона  $\alpha = (5,4; 9,0; 5,4; 7,4) > 5,3$ . Это означает, что при полировании плоскостей  $m$ ,  $c$ ,  $a$  и  $r$  сапфира возможно формирование атомарно гладких поверхностей.

При химико-механическом полировании сапфира при использовании коллоидных систем из наночастиц полировальных порошков обеспечивается возможность получения поверхности с «ангстремной» шероховатостью:  $Ra = 2,9\text{--}3,0$  ?,  $Rq = 2,3\text{--}3,6$ ?. Для определения минимально допустимых значений параметров шероховатости атомарно гладких поверхностей следует принять очевидное допущение, что  $\min\{Ra, Rq, Rmax\}$  соответствует минимальному количеству ступеней на плоскости – 1, а высота этой ступени в точности равна межплоскостному расстоянию, которое для плоскостей  $c$ ,  $m$ ,  $a$  и  $r$  сапфира составляет  $s = 2,165, 1,374, 2,379$  и  $3,479$  (?) соответственно. В связи с этим профиль такой

поверхности представляется функцией  $z(x) = \begin{cases} s, & x < L/2 \\ 0, & x \geq L/2 \end{cases}$  ( $L$  – базовая длина модельной

профилограммы), а параметры шероховатости составляют  $R_{a0} = s/2$ ,  $R_{q0} = s/\sqrt{2}$  и  $R_{max0} = s$  соответственно. Для минимально допустимых значений параметров шероховатости плоскостей  $m$ ,  $c$ ,  $a$  и  $r$  сапфира наблюдается линейная зависимость от величины межплоскостного расстояния и их уменьшение в ряду  $r > a > c > m$ . Достигаются следующие минимально допустимые параметры шероховатости:  $R_{a0} = 0,69\text{--}1,74$  ?,  $R_{q0} = 0,97\text{--}2,46$  ? и  $R_{max0} = 1,374\text{--}3,479$  ?, которые не противоречат физическому смыслу и находятся в соответствии с параметрами кристаллической решетки сапфира.

На основе применения критерия Джексона показано, что в процессе нанополитирования плоскостей сапфира с различной кристаллографической ориентацией ( $m$ ,  $c$ ,  $a$  и  $r$ ) возможно формирование атомарно гладких поверхностей с «ангстремной» шероховатостью, параметры которой зависят от межплоскостных расстояний.

**Kuznetsov Yu. M.<sup>1</sup>, Dmytriev D.O.<sup>2</sup>, Keba P.V<sup>1</sup>., Piven S.M.<sup>2</sup>**

1 – The National Technical University of Ukraine “Kyiv Politechnic Institute”

2 – The Kherson National Technical University

### **FRAME-CONFIGURATIONS CONCEPTION OF MACHINE-TOOLS WITH PARALLEL STRUCTURE MECHANISMS**

Extensive research of mechanisms of parallel structure ( MPS ) began in the 1960s from studies purely kinematic properties of structures with multiple closed circuits operating simultaneously, the basis of this was laid by I.I. Artobolevskiy, V. O. Astatin, V.A. Glazunov, A.Sh. Koliskor, A.I. Korendyaev, F. M. Dimentberg, E.I Vorobyov, K. Cappel, J. Denavit, V. Gough, C. Gosselin, J. Gwinnett, K.H. Hant, D. Stewart, K. Sugimoto, M. Nakagawa and the others[4]. In these studies, primarily resolved the theoretical questions such as the synthesis of wide class of spatial mechanisms, defining function that related of incoming and outgoing links positions and their special “dead” positions; definition of the kinematic relations surplus; analytical solutions for direct and inverse problems of kinematics; the definition of working space. Improved manipulation properties of MPS determined the next stage of their development - application in robotic systems. In this particular area the researches have been conducted by famous scientists as K.I. Zablonskiy, I.T. Monashko, B.M. Schekin, R. Clavel, L. Tsai, J.-P. Merlet, R. Stamper. MPS become using for operations control, welding, coordinate measuring, loading-unloading work.

Starting from the 1980s using of machine-tools with MPS greatly expanded. They began to be part of metal-working equipment to process complex geometry working-pieces. The first MPS machine-tools hexapods, were built on the basis of the classic Stewart platform. The study of MPS as a machine-tools dedicated by V.L. Afonin, D.A, V.V.Bushuev, Dmitriev, A.F. Kraynev, V.A. Krizhanovskiy, Yu.M. Kuznetsov, I.I. Pavlenko, P.V. Podzorov, Yu.V Poduraev, V.I. Sidorko, V.B. Strutinskiy, I.G. Holshev, I. Bonev, J S.Chen, U.Heisel, M.Honegger, R. Katz, L. Kubler, M.Valasek and the others[1,4].

Existing methods of MPS kinematic schemes synthesis do not unambiguously choose its kinematic scheme because the same output unit displacements can be performed by using different kinematic schemes. As MPS kinematic chains, that connect a base with output links, work in parallel, so each kinematic chain has own operational limit that depends on initial links location. In addition, there are many different types of connections .That is why synthesis of manufacturing equipment, built on the basis of mechatronic systems with MPS should be concorded with specific production tasks.

For developing usage of parallel structures in machine-tools, expanding to deepening areas of MPS employing in metal-working there are some requirements, namely [1, 2]:

1. Ensure high accuracy of processing and positioning the tool and the workpiece.
2. Provide increased rigidity of the moving links.
3. Multitasking of machine-tools new generation.
4. Ensure the necessary degree of freedom (DOF) of the end-effector (EE) to perform multifunctional tasks.
5. Increase the size of the machine-tools EE working space (WS).
6. Provide high-performance processing.
7. Make free access for loading (unloading) of details, for maintenance and for tool and equipment installation.

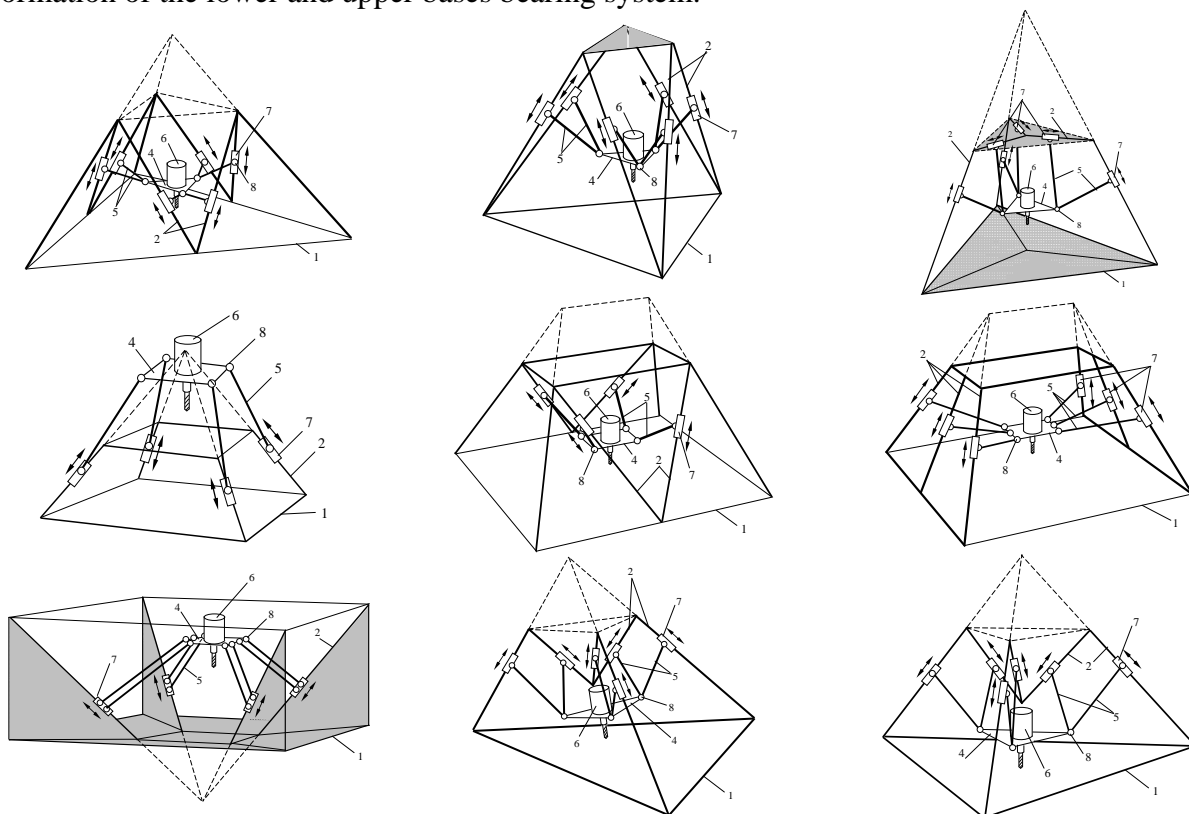
MPS machine-tools configurations expansion and their improvement possible through the use of shell and frame structures constructed as for specific technological requirements and as for standardized units and components. This is achieved by the fact that the axis of the main frame to which the sliders translation movement mechanisms are attached such as that their point of intersection in the machine-tool layout are arranged in such a way to form a spatial polyhedral frame. Also the number of rods and guides mounted on the edges of the frame can be increased to

the necessary number of drives, which allows to increase the functionality of the EE with the relative decline the layout mass-dimensional characteristics, increasing its stiffness and expansion of machine-tool technological capability.

At National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" produced a line of machine-tools to perform processing of complex geometry work-pieces. Machine-tools guide sliders at  $l$ -coordinates that form pyramidal frame and the work-piece in the XY plane, depending on the basic movements of EE in the workspace.

Machine-tools control system builds on the concept of P-CNC (Personal Computer-Numerical Control), which has one-software architecture in which all control tasks (geometry, logic, terminal) resolved solely through software without using additional hardware devices. For interacting between computer and machine-tools control electrical parts uses special controller, which the convert computer signal to the step motor analog signals [4]. The computer receives signals of machine-tools EE zero position sensors. The controller has three independent axes in three coordinates and works by STEP/DIR (step/direction) protocol with LPT computer port in real time. The controller receives information on the steps number and direction of rotation that has to execute by step motors.

At fig. 1 show examples of new configurations according to accepted conditions of the frames formation of the lower and upper bases bearing system.



**Fig. 1. Examples of forming a frame configurations set with depending on the functionality**

Principles of new technological equipment with MPS are systematized, based on the principles of multifunctionality, low metal-intensity, symmetry, hybridity, modularity, and software mathematical visual modelling. The basic group of MPS machine-tools layout frame configurations are exposed that correspond to frame layout rods combinations set and implemented in the form of existing test machine-tools. The concept of frame configurations allows to create new machine-tools with parallel kinematics with the required EE degree of freedom to perform multi-tasks by distributing technological movements between traditional structures and parallel modules.

**References**

1. *Kuznetsov Yu.M., Dmytriev D.O., Dinevych G.Yu.* Layouts of machine-tools with mechanisms of parallel structure / Monograph red. Yu. M. Kuznetsov. – Kherson. PE Vyshemirskiy V.S. 2009. – 456 p.
2. *Kuznetsov Yu.M.* Hybrid layout concept of machine-tools with parallel kinematic based on the modular principle / Yu.M. Kuznetsov, D.O. Dmytriev // Proceedings of international scientific conference "Technique, technology and systems Tekhsis 2009", Plovdiv, Technical University Sofia, P. 19-36.
3. *Dmytriev D.O.* Description configurations of machine-tools with the mechanisms of parallel structure /D.O. Dmytriev // Scientific journal "Technological Complexes". - №3. – 2011 - P.18
4. The development of the design theory of new machine-tools configurations based on system analysis and synthesis of mechanisms of parallel structure // Research report №2267-F, Research director. professor Yu.M. Kuznetsov, NTUU "KPI", Kyiv. – 2011. – 284 p.

**Кузнєцов Ю.Н.<sup>1</sup>, д.т.н., професор, Аль-Рефо Ибрагим Ф.С.<sup>2</sup>, к.т.н., доцент**

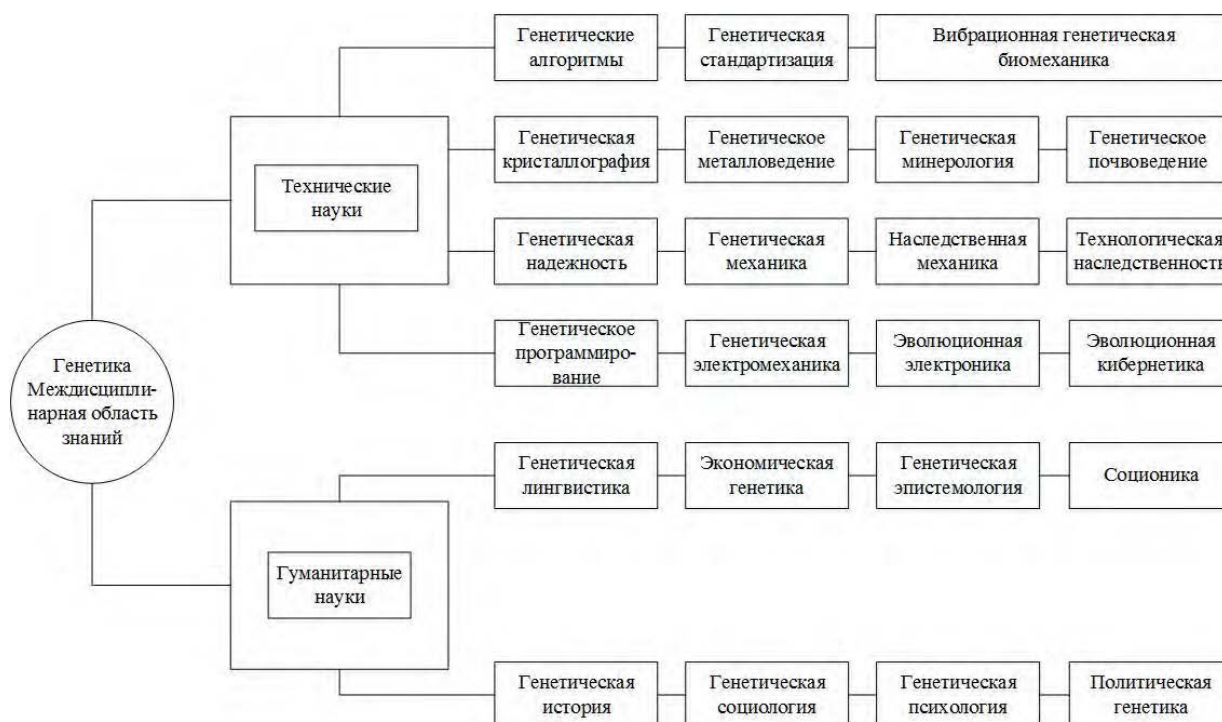
1 – НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

2 – Аль-Балга Технический университет, Иордания

**ГЕНЕТИЧЕСКИЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ КАРКАСНЫХ КОМПОНОВОК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА МОДУЛЬНОМ ПРИНЦИПЕ**

В расширяющемся разнообразии создаваемых природой и человеком объектов и систем наблюдаются общие принципы их структурной организации, которые проявляются в виде межсистемных аналогия и скрытых внутрисистемных гомологий [2, 9]. Такие свойства имеют место как в естественных (биологических, химических, электромагнитных и др.) системах [2, 8, 9], так и в системах естественно-антропогенного происхождения (числовых, вычислительных, лингвистических, технических и др.) [1, 3, 4].

Поэтому в последнее время наблюдается проникновение эволюционно-генетических идей в технические и гуманитарные науки (рис. 1) [6, 7, 9].



**Рис. 1. Расширение области применения генетических идей в различных науках и дисциплинах**

Цель настоящих исследований – формулирование нового генетико-морфологического подхода к моделированию, принципам создания и предвидению новых каркасных компоновок технологического оборудования на модульном принципе на примерах станков и промышленных роботов, в том числе с механизмами параллельной структуры (МПС).

В качестве примера реализации генетико-морфологического подхода приведена портально-параллелепипедная каркасная компоновка промышленного робота с МПС (рис. 2), описываемая морфологической формулой, как сочетание альтернатив признаков морфологической матрицы в цифровом виде [11]:

$$|1.4 - 2.1| - |3.8 - 4.1| - |5.3 - 6.1| - |7.2 - 8.1|$$

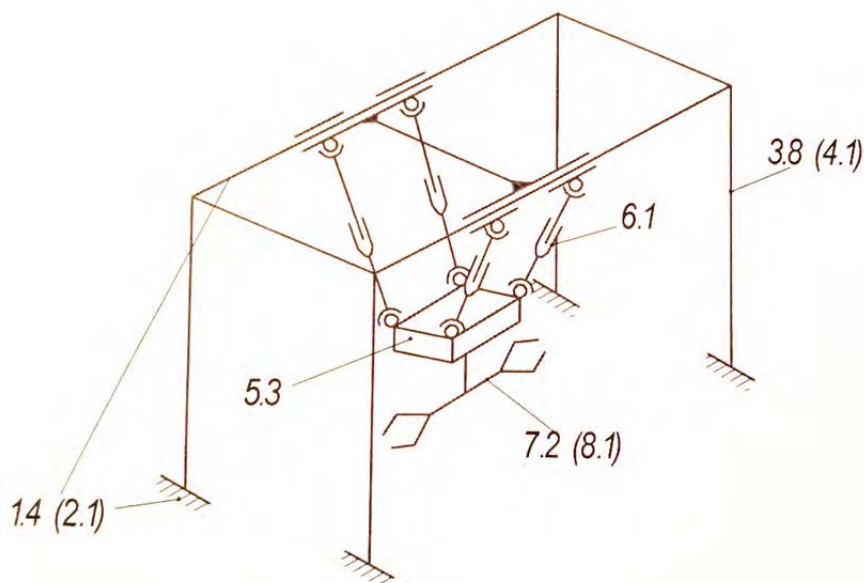


Рис. 2. Синтезированная компоновка промышленного робота с МПС

Данная компоновка была выбрана с использованием комплексного критерия качества на уровне структурно-схемного синтеза, учитывающего жесткость [10], металлоемкость, удобство обслуживания, точность позиционирования, степень унификации и число степеней свободы.

### Список литературы

1. Балашов Е.П. Эволюционный анализ систем. –М.: Радио и связь, 1985,-328с.
2. Вавилов Н.И. Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости.-Л.:Наука, 1987.-267с.
3. Брюхович Е.И. Будущие вычислительной техники <https://sitel.google.com/site/referat0903/home/buduseevycislitelnoj-tehniki>.
4. Брюхович Е.И. К вопросу об информации общества. //Математические машины и системы. – 1997, №2. – с.122 – 132.
5. Кузнецов Ю.Н., Шинкаренко В.Ф. Генетический подход-ключ к созданию сложных технических систем // Технологічні комплекси. - Луцьк, 2012, №1,2(5,6). - с. 15-29
6. Кузнецов Ю.Н. Эволюционный и генетический синтез технологического оборудования нового поколения // Резание и инструмент в технологических системах, НТУ «ХПИ» вып. 85, 2015. – с. 149 – 162.
7. Кузнецов Ю.М. Передача генетичної інформації в процесі еволюції металорізальних вестратів //Питання історії науки і техніки, №4, 2014. - с. 3 - 10.
8. Петухов С.В. Вибрационная генетическая биомеханика и наследуемые системы биологических резонансов // Медицина и высокие технологии, №2, 2015. – с. 16 – 28.
9. Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. - К.:Наукова думка, 2002. – 288 с.
10. Alrefo Ibrahim F.S. Stiffness factor formation under structural circuit synthesis of industrial robots wire-frame arrangements // Journal of the Technical University of Gabrovo, Vol. 53, 2016. – p.p. 17 - 21.
11. Alrefo Ibrahim F.S. Application of the method of morphological analysis for the synthesis of arrangements of industrial robots with mechanisms of parallel structure // Modern Mechanical Engineering, 2016. – p.p. 3-7.



УДК 621.941

Струтинський<sup>1</sup> В.Б., д.т.н., проф., Чуприна<sup>2</sup> В.М., к.т.н., доц., Гуржій<sup>3</sup> А.А., к.т.н.

1 – НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

2 – Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил України, м. Чернігів

3 – ТОВ "Едвансд Нетворк Консалтинг", м. Київ, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ ВИСОКОТОЧНОЇ ОБРОБКИ ОБ'ЄКТІВ МОБІЛЬНИМИ ВЕРСТАТАМИ-РОБОТАМИ

Розроблені верстати-роботи із паралельними кінематичними структурами є новим і перспективним металообробним обладнанням. Вони мають широкі функціональні можливості при мінімальній масі несучої системи верстата. Тому їх доцільно застосовувати для обробки небезпечних об'єктів. До небезпечних об'єктів відносяться трубопроводи під тиском, ємності із токсичними матеріалами, міни, снаряди, тощо. Обробка об'єктів мобільними верстатами-роботами здійснюється в польових умовах.

Специфікою обробки об'єктів мобільними верстатами-роботами є використання маложорсткого обладнання. Для забезпечення необхідної точності обробки верстат-робот оснащений додатковим маніпулятором, який закріплюється на оброблюваному об'єкті. Обробка програмується в системі координат пов'язаній з об'єктом, а переміщення інструмента забезпечується приводами маніпулятора. В процесі обробки виникають специфічні процеси, пов'язані із наявністю надлишкових кінематичних зв'язків між оброблюваним об'єктом і несучою системою верстата-робота.

Розроблена методологія прогнозування статичних характеристик і динамічних властивостей мобільного верстата-робота. Статичні характеристики верстата-робота визначаються взаємодією просторових пружних стрижневих систем верстата і маніпулятора. Характеристики визначені за допомогою введених матриць жорсткості верстата і маніпулятора. Проведено порівняння матриць жорсткості та визначено умови мінімізації негативного впливу несучої системи верстата на точність обробки мобільним верстатом-роботом.

Наявність двох стрижневих механізмів дуального типу породжує специфічні динамічні процеси при обробці об'єктів мобільними верстатами-роботами. Динамічні збурення які виникають в процесі різання приводять до виникнення складних просторових коливань в стрижневій системі верстата. Вони обумовлені виникненням сферичних рухів елементів динамічної системи і супроводжуються рухом інструмента по петлеподібним траєкторіям. Для зниження інтенсивності коливальних процесів у динамічній системі верстата запропоновано використати спеціальні демпфуючі пристрої. Проведено розрахунок і математичне моделювання динамічних характеристик стрижневих систем верстатів оснащених демпфуючими пристроями.

На основі проведених досліджень розроблені рекомендації по підвищенню точності обробки об'єктів мобільними верстатами-роботами.

Рекомендації включають вибір інструментів, організацію технологічного процесу обробки та режимів різання, а також засоби контролю якості оброблюваних поверхонь.

УДК 62-408.3

**Русанов<sup>1</sup> С.А., к.т.н., доц., Селіверстов<sup>1</sup> І.А., к.т.н., доц., Смирнов<sup>2</sup> І.В., д.т.н., проф.**

1 - Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна

2 – НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### **ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ВІБРОКИПІННЯ В ПРОЦЕСІ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО ПЛАКУВАННЯ ПОРОШКІВ**

Іонно-плазмове плакування порошків складається з двох базових технологічних операцій, а саме: підготовка порошку, зокрема їх очищення в тліючому розряді при рівномірному перемішуванні, та безпосередньо процес нанесення металевих плівок на частинки матеріалу. Вимоги до якості вихідного продукту диктують необхідність застосування низки заходів для забезпечення рівномірного нанесення плакуючої плівки на загальний об'єм порошку. Це може бути реалізовано декількома засобами, серед яких одним з найефективніших є вібраційне спонукання оброблюваного матеріалу в процесі напилення.

Відомо, що вібраційний рух формує багато явищ які й обумовлюють широкий спектр застосування. До таких явищ належать: ефект вібраційного переміщення або перемішування; зміна реологічних властивостей тіл стосовно до повільних рухів; різка зміна поведінки твердих або пружних тіл і систем тіл, зокрема механізмів, під дією вібрації. Зазначені явища вивчаються в рамках вібраційної механіки, і, частково, віброреології [1]. Така складна поведінка матеріалів під дією вібрації диктує необхідність прогнозування роботи обладнання в реальних умовах. Це стосується й процесів плакування у віброкиплячому шарі, де важливим є визначення границь переходу від віброзрідження до віброкипіння, розрахунки швидкостей циркуляції шару, вібротранспортування, параметрів відклику вібраційної платформи на зовнішні впливи тощо.

Моделювання деяких з перерахованих параметрів можливо засобами системи автоматизованого моделювання віброкиплячих та віброзріджених шарів «Виброслой» [2]. Зазначена система застосовується для прогнозування параметрів динаміки сипких середовищ у машинах і апаратах з наявністю шару сипкого матеріалу. Система базується на спеціальній віброреологічній моделі віброзбудженого сипкого середовища, яке є граничним випадком моделі двофазного середовища газ – тверді частинки [3-5]. Модель враховує характерні властивості віброшару, що дозволяють звести її до моделі напружено-деформованого стану суцільного середовища з особливою реологією. В умовах підведеної зовнішньої вібрації у вказаному середовищі поширюються нелінійні хвилі деформації з періодичними змінами щільного й розпушеного станів. Лагранжеве формулювання при описі рівнянь руху близьке до моделей сипких середовищ у рамках різномодульної теорії пружності [6], та завдяки цьому модель позбавлена недоліків, пов'язаних із чисельною дифузійною [7] на границях в ейлеровій постановці для двофазних середовищ при чисельній реалізації.

В задачах вібраційного спонукання порошку в процесі плазмового плакування відбувається вибір режимів зовнішньої вібрації які необхідні для отримання якісної і рівномірної оболонки на частинках порошку [8,9]. Проведені дослідження показують відповідність експериментальним даним як в області віброзрідження, так і в області віброкипіння, при цьому для розрахунків безперервного осередненого руху віброшару необхідний мінімум вхідних параметрів (таких як коефіцієнти внутрішнього тертя та тертя о несучу поверхню, параметри деформування матеріалу тощо).

Система дозволяє врахувати зазначену вище проблему взаємодії вібраційних шарів з несучими віброуючими поверхнями. Значні динамічні навантаження, ударні у випадку розвиненого віброкипіння, можуть вплинути на форму коливаний несучої поверхні, проявляючи при цьому ефект зворотнього зв'язку з віброуючим шаром. Це особливо актуально у зв'язку з тим, що в умовах обмеженого простору вакуумної камери установки

для іонно-плазмового плакування не є можливим встановити досить потужний і жорсткий привод для забезпечення заданих вібропараметрів, тому врахування параметрів жорсткості платформи та приводу є окремим технічним завданням. Динаміка шару з врахуванням відклику несучої поверхні в системі «Виброслой» наведена на рис. 1.

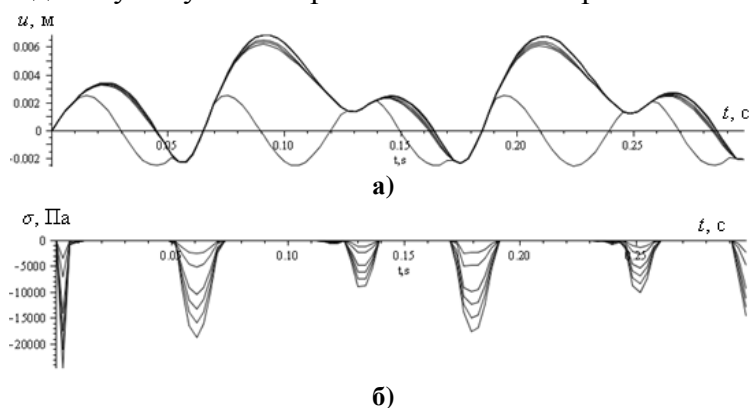


Рис. 1. Динаміка шару з врахуванням відклику несучої поверхні: а) – вертикальні переміщення шару та платформи, б) – відповідні нормальні напруги в шарі

З рис. 1 видно, що відклик поверхні значно впливає на подальшу поведінку шару, форма руху якого починає суттєво відрізнятися від форми «зрізаного синусу», при цьому знижуються за модулем пікові значення стискаючих напруг. Відклик поверхні в цьому випадку розраховується за рівнянням:

$$M\ddot{u} + [\Lambda]\dot{u} + [C]u = \sigma(t)n_n S_k + \dot{p},$$

де  $M$  – маса платформи,  $[\Lambda]$ ,  $[C]$  –

матриці коефіцієнтів демпфування та жорсткостей (для поздовжнього руху вони матимуть діагональний вигляд),  $\sigma(t)$  – тензор контактних напруг,  $n_n$  – нормаль до контактної поверхні,  $S_k$  – площа поверхні контакту,  $\dot{p}$  – потік імпульсу від сипкого матеріалу.

При певній жорсткості системи можна спостерігати небажану картину більш інтенсивного неконтрольованого підкидання аж до виліту частинок порошку за межі самого пристрою. При менших значеннях жорсткості система не в змозі реагувати на вхідний сигнал приводу, в результаті чого не відбувається процесу віброкипіння.

Таким чином, необхідно відзначити, що інтенсивність перемішування, а, в кінцевому рахунку, й швидкість конденсації металу на поверхні частинок порошку, взаємопов'язані і залежать як від часу перебування порошку в підвішеному стані під впливом плазмових потоків, так і від співвідношення жорсткості та параметрів вібрації самого вібропристрою. На основі експериментальних даних і в результаті комп'ютерного моделювання були отримані оптимальні параметри вібрації, що забезпечують отримання якісного матеріалу.

## Список літератури

1. Овчинников П.Ф. Виброреология. – Киев.: Наукова думка, 1983. – 272с.
2. Система автоматизованого моделювання гідродинаміки віброкиплячих шарів “Виброслой 1.0”. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №25051. / С.А.Русанов. – №24961: Заявл. 14.04.2008; Опубл. 24.07.2008
3. Русанов С., Луняка К., Михайлик В. Моделювання гідродинаміки віброкиплячих шарів // Вісник Тернопільського державного університету. - 2006. - № 3. - С. 188-195.
4. Русанов С.А., Луняка К.В., Ардашев В.А. Некоторые теоретические аспекты процесса виброкипания // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №6/5(30). – С.23-25.
5. S. A. Rusanov, K. V. Lunyaka, G. V. Nikitenko. Vibrorheological model of the vibrofluidized bed of dry substances // JOURNAL OF ENGINEERING PHYSICS AND THERMOPHYSICS, Volume 85, № 6 (2012), P. 1183–1188.
6. Садовский В. М. Реологические модели разномодульных и сыпучих сред // Дальневосточный математический журнал. – 2003. – Т. 4, № 2. – С. 252 - 263.
7. Бубенчиков М. А. Способ минимизации схемной диффузии в численной модели аэродинамики // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2011. – № 2. – С. 79-84.
8. Селиверстов И.А. Анализ процесса вакуумной металлизации порошковых материалов в виброкипящем слое / И.А.Селиверстов, С.А. Русанов, И.В. Смирнов, В.И.Копылов // Вестник національного технічного університету України „ Киевский политехнический институт” / Машиностроение. —2009. — № 57. — С 50 — 56.
9. Селиверстов И. А. Вакуумно-дуговое напыление меди на порошок релита WC-W2C / И. А. Селиверстов, С. А. Русанов, И. В. Смирнов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2011. — №1/8(49). — С.55–58.

УДК 62-85

**Новік<sup>1</sup> М.А. к.т.н., доц., Дідовець<sup>2</sup> В.Є. здобувач**

1 – НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

2 – Університет «Україна», м. Київ, Україна

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПНЕВМОГІДРАВЛІЧНОГО ЦИФРОВОГО ПРИВОДУ З ГІДРАВЛІЧНИМИ ОБ'ЄМНИМИ ДОЗАТОРАМИ**

Багатопозиційні приводи з цифровим керуванням, які здатні перетворювати інформацію двійкового коду в поступальне або обертове переміщення вихідної ланки знаходять широке застосування в якості виконавчих пристроїв промислових роботів, металорізальних та деревообробних верстатів. Такі приводи характеризуються високою швидкодією, точністю позиціонування вихідної ланки, повторюваністю виходу в задану позицію, нечутливістю до вібрації, магнітних і радіаційних полів. Але поряд зі значними перевагами над слідкуючими приводами вони мають і суттєві недоліки, які обмежують область їх застосування в системах автоматичного керування. До основних недоліків можуть бути віднесені: значний осьовий габаритний розмір виконавчого циліндра, в якому послідовно розміщені розрядні поршні з цифровим кроком [1], мала поперечна жорсткість послідовно розміщених розрядних циліндрів [2], втрати робочої рідини при роботі цифрових приводів з об'ємними гідравлічними дозаторами [3]. Такі конкретні недоліки даних цифрових приводів можуть бути усунені або значно зменшені додатковими елементами і конструктивними рішеннями. Але поряд з конкретними недоліками тієї чи іншої конструкції є і загальні недоліки, які притаманні всім конструктивним схемам пневматичних, гідравлічних, електричних і комбінованих цифрових приводів. До загальних недоліків таких приводів відносяться: складність забезпечення гальмування і унеможливлення виникнення незапрограмованих рухів вихідної ланки (штока) при опрацюванні комбінацій керуючих сигналів.

В роботі розглянуто пневмогідравлічний цифровий привод, при роботі якого унеможливаються незапрограмовані рухи і забезпечується гальмування вихідної ланки (штока) при опрацюванні будь-якої комбінації керуючих сигналів [4]. Приведена система диференціальних рівнянь, яка описує динаміку пневмогідравлічного цифрового приводу з гідравлічними об'ємними дозаторами, в структуру якого включені направляючі і гальмуючі пристрої.

Отримані конструктивні розробки і результати досліджень пневмогідравлічних цифрових приводів з направляючими і гальмуючими пристроями можуть бути використані спеціалістами при розробці та експлуатації пневмогідравлічних цифрових приводів з направляючими і гальмуючими пристроями.

**Список літератури**

1. Патент України №9720 МПК F15B 7/00 Комбінований цифровий привод / Новік М.А., Дідовець В.Є., Дурягін А.І.: заявник і патентовласник НТУУ «КПІ», опубл. 10.03.2015, Бюл. №5.
2. Патент Великобританії GB1401770 МПК F15B 7/00 NUMERAL CONTROL OF HYDRAULIC ACTUATOR.: publ. 30.07.1975.
3. Новік М.А. Пневмоелектричні багатопозиційні приводи з об'ємними дозаторами / М.А. Новік, В.Є. Дідовець// Промислова гідраліка і пневматика. – 2013. - №1(39). – с. 66-70.
4. Патент України №109195 МПК F15B 11/00 Пневмогідравлічний цифровий привод / Новік М.А., Дідовець В.Є., опубл. 27.07.2015, Бюл. №14.

УДК 621.9.048.7:621.9.048.6

Лесик<sup>1</sup> Д.А. асис., Джемелінський<sup>1</sup> В.В. к.т.н., проф., Мартінез<sup>2</sup> С. аспір., Ламікіз<sup>2</sup> А. д.т.н., проф., Мордюк<sup>3</sup> Б.М. д.т.н., Прокопенко<sup>3</sup> Г.І. д.т.н., Грінкевич<sup>4</sup> К.Е. к.т.н

1 – НТУУ «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

2 – Університет Країни Басків, Більбао, Іспанія

3 – Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАНУ, Київ, Україна

4 – Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАНУ, Київ, Україна

### ВПЛИВ КОМБІНОВАНОЇ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ЗМІЦНЮВАЛЬНО-ОЗДОБЛЮВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ НА ВЕЛИЧИНУ ЗНОШУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ Х12МФ

Поліпшення якості поверхневого шару деталей, зокрема які працюють в екстремальних умовах, шляхом розробки та застосування сучасних технологій поверхневої обробки, є однією із важливих задач в галузі машинобудування, від вирішення якої залежать як експлуатаційні властивості, так і конкурентоспроможність виготовленої продукції.

Лазерне поверхнєве зміцнення [1] є одним з ефективних методів підвищення фізико-механічних характеристик сталевих виробів, зокрема твердості поверхневого шару. Технологія лазерного термічного зміцнення полягає в передачі та поглинанні енергії високої концентрації в тонкому поверхневому шарі виробу. Ефективним методом зміцнення та оздоблювання поверхонь металевих матеріалів за рахунок деформаційного подрібнення розмірів зерен є ультразвукова ударна обробка [2].

Разом з тим, використання традиційних методів поверхневої обробки відповідальних деталей не завжди дозволяє отримати якісні параметри поверхневого шару, а саме: необхідну дисперсність структури, високу твердість, гарантовані залишкові напруження стиску, а також мінімальну шорсткість. Перспективними технологіями є комбіновані та гібридні методи поверхневої обробки з використанням висококонцентрованих джерел енергії. Поєднання лазерного високошвидкісного і локального нагрівання матеріалів з ультразвуковим деформаційним зміцненням може бути використане в різній технологічній послідовності, що може дати різні результати.

Метою даної роботи є дослідити вплив оптимальних режимів лазерної та ультразвукової обробки на величину зношування сталі Х12МФ.

Лазерну термообробку (ЛТО) проводили за допомогою спеціального комплексу з числовим програмним керуванням, 2D сканатора «Scanlab Hurryscan25», волоконного лазера «Rofin Sinar FL010» з максимальною вихідною потужністю 1 кВт та двоколірного пірометра «Impac Igar 12LO» [3,4]. Режими ЛТО: температура 1270 °С, швидкість переміщення зразка 40 (ЛТО1) та 90 (ЛТО2) мм/хв, швидкість сканування  $V_{ск} = 1000$  мм/с, ширина сканування 10 мм.

Ультразвукову ударну обробку (УЗУО) здійснювали на спеціальній установці з використанням ультразвукового генератора (потужністю 0.3 кВт та частотою 21.6 кГц), ультразвукової коливальної системи та ударного наконечника із сімома циліндричними бойками, який примусово обертався з частотою обертання  $n = 8.8$  об<sup>-1</sup> [2,3]. Режими УЗУО: статичне навантаження ультразвукової коливальної системи  $F_{сн} = 50$  Н, амплітуда ультразвукових коливань концентратора  $A = 18$  мкм та питома кількість ударів по поверхні зразка 400 уд/мм<sup>2</sup> при швидкості переміщення зразка  $S = 600$  мм/хв.

Трибологічні випробування на зношування оцінювали за допомогою оригінального автоматизованого трибологічного комплексу з модулем динамічного навантаження, який дозволяв проводити випробування зразків як в квазістатичних, так і в динамічних умовах навантаження [5]. Випробування зразків протягом 45 хв було проведено зворотно-поступальним ковзанням індентора вздовж доріжки 4 мм по поверхні плоских зразків з

частотою 1 Гц та постійною амплітудою динамічної складової навантаження  $F_c = 30$  Н (квазістатичний режим навантаження (СРН)) при швидкості ковзання 0.013 м/с. Динамічний режим навантаження (ДРН) при середньому значенні навантаження  $F_c \sim 30$  Н динамічну складову сили нормального навантаження задавали у вигляді цугу коливань з амплітудою  $\Delta F_c = 5$  Н та частотою 25 Гц.

Результати випробувань на зношування (рис. 1) показали, що при квазістатичному навантаженні на контр-тіло окремо проведені лазерна чи ультразвукова обробки практично не змінили величину зношування в порівнянні з вихідним станом. При випробуваннях з динамічним навантаженням на контр-тіло після лазерного гартування зношування поверхневого шару сталі Х12МФ зменшилося більше ніж в 3 рази, а після ультразвукової обробки – майже в 2 рази.

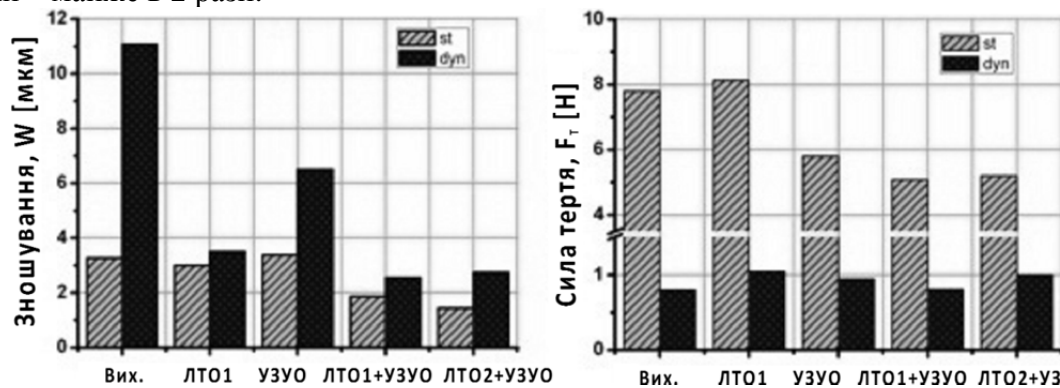


Рис. 1 – Величини зношування (а) і сили тертя (б) поверхні сталі Х12МФ у вихідному стані та після ЛТО, УЗУО та ЛТО+УЗУО зразків в квазістатичному (st) та динамічному (dyn) режимах випробувань

Після комбінованої обробки ЛТО+УЗУО поверхня має знижену шорсткість, а поверхневий шар – найвищу твердість і високий рівень напружень стиснення. Ці фактори призводять до зниження сили тертя і до зростання зносостійкості в порівнянні з окремо обробленими ЛТО та УЗУО поверхнями як при статичних, так і при динамічних умовах випробувань. Найбільш суттєво підвищилася зносостійкість сталі Х12МФ після комбінованої обробки ЛТО2+УЗУО за рахунок оптимальної швидкості переміщення зразка при ЛТО2, яка визначає умови швидкісного нагрівання та гартування, що сприяють збільшенню кількості та зменшенню розміру карбідних включень в структурі поверхневого шару. Дисперсні карбіди забезпечують підвищену стійкість структурного стану до релаксації, спричиненої циклічними навантаженнями при випробуваннях на зношування. Це дозволить підвищити експлуатаційні властивості сталевих деталей, а саме сприяти економному використанню мастильних матеріалів при зменшенні тертя та зростанні зносостійкості.

### Список літератури

1. *Kusinski J.* Laser modification of the materials surface layer – a rewire paper / J. Kusinski, S. Kac, A. Kopia, A. Radziszewska, M. Rozmus-Gornikowska, B. Major, L. Major, J. Marczak, A. Lisiecki // *Technical Sciences.* – 2012. – Vol. 60. – P. 710-728.
2. *Morduyk B.N.* Ultrasonic impact peening for the surface properties management / B.N.Morduyk, G.I.Prokopenko // *J.Sound and Vibr.* – 2007. – Vol. 308. – P. 855-866.
3. *Lesyk D.A.* Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel / D.A. Lesyk, S. Martinez, V.V. Dzhemelinskyy, A. Lamikiz, B.N. Morduyk, G.I. Prokopenko // *Surface and Coating Technology.* – 2015. – Vol. 278. – P. 108-120.
4. *Martinez S.* Laser hardening process with 2D scanning optics / S. Martinez, A. Lamikiz, I. Taberero, E. Ukar // *Physics Procedia.* – 2012. – Vol. 39. – P. 309-317.
5. *Morduyk B.N.* Wear assessment of composite surface layers in Al-6Mg alloy reinforced with AlCuFe quasicrystalline particles: Effects of particle size, microstructure and hardness / B.N. Morduyk, G.I. Prokopenko, Yu.V. Milman, M.O. Iefimov, K.E. Grinkevych, A.V. Sameljuk, I.V. Tkachenko // *Wear.* – 2014. – Vol. 319. – P. 84-95.

УДК 691.43.068.5

Корбут<sup>1</sup> Е.В., к.т.н., доц., Ляшенко<sup>2</sup> Б.А., д.т.н., проф., Подчерняева<sup>3</sup> И.А., д.т.н., проф.

1 – Национальный технический университет Украины «КПИ»

2 – Институт проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАНУ

3 – Институт проблем материаловедения им. И.Н.Францевича НАНУ

### ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТС

В настоящее время около 80 % режущего инструмента из вольфрамсодержащих твердых сплавов (ВТС), используемого в промышленности выпускают с защитными покрытиями для уменьшения коэффициента трения, увеличения трещиностойкости и стойкости к высокотемпературной коррозии. ВТС при больших тепловых нагрузках в зоне резания подвергаются высокотемпературному окислению. Высокая скорость испарения оксидов вольфрама значительно увеличивает износ инструмента, ограничивая рабочую температуру резания ( $\leq 800$  °С). В качестве материала защитных покрытий используют преимущественно карбонитриды титана, гафния, сложный нитрид (Ti, Al)N [1] и многослойные покрытия с комбинацией слоев HfC, HfN, Hf(C, N), AlN [2], обеспечивающих защиту от износа и высокотемпературной коррозии. Для традиционно используемых покрытий (Ti, Al)N достигаемый эффект объясняется как наличием износо-коррозионно стойкой составляющей нитрида титана, так и образованием в процессе трибоокисления на поверхности режущей кромки вторичных структур из твердых растворов  $Al_2O_3$ -TiO<sub>2</sub> и высокотемпературного коррозионностойкого β-тиалита ( $Al_2TiO_5$ ), которые прочно связаны с поверхностью покрытия и могут играть роль твердой смазки при трении скольжения на воздухе [3].

Защитные покрытия на ВТС в основном наносят с использованием различных вариантов метода газофазного осаждения (PVD, PCVD), их комбинаций [4], а также его комбинацией с другими методами, например, с термодиффузионным насыщением [5] и электроискровым легированием [6].

Конкурирующим способом нанесения износо-, коррозионностойких покрытий на ВТС может быть электроискровое легирование (ЭИЛ) [7], являющееся одним из приоритетных направлений развития химико-термической обработки металлов с использованием концентрированных потоков энергии. ЭИЛ отличается низкой температурой осаждения ( $< 70$  °С), простотой технологической операции (процесс осуществляется на воздухе, не требует сложного крупногабаритного оборудования, предварительной обработки поверхности и многостадийности), высокой прочностью сцепления покрытия с основой и малой потребляемой мощностью (0,2...0,7 кВт).

Композиционное электроискровое покрытие формируется при взаимодействии продуктов электроэрозии электрода (анода) в жидкопаровой и твердой фазах с материалом обрабатываемой детали (катода) в микрощельной расплава на рабочей поверхности.

Улучшение эксплуатационных характеристик электроискровых покрытий достигается различными способами, главными из которых являются выбор оптимальных составов материала легирующего электрода, режимов обработки, конструирование структуры покрытия (многослойная, глобулярная) и комбинация ЭИЛ с другими методами.

При обработке металлов резанием в зоне контакта реза с обрабатываемым материалом вследствие трения может развиваться температура до 1100 °С. Это приводит к окислению поверхности режущей кромки, уменьшению механической прочности материала режущего инструмента, увеличению его адгезии к обрабатываемому материалу и, соответственно, к снижению эффективности резания. Поэтому актуальной проблемой

является создание защитного покрытия с улучшенными триботехническими характеристиками.

Для обеспечения несущей способности режущего инструмента и стойкости к ударным нагрузкам применяют различного вида покрытия с градиентной, слоистой или матричной структурой, обеспечивающей снижение остаточных напряжений за счет чередования твердой и мягкой составляющих [1, 4, 5, 8]. Создание слоистых структур возможно в том числе с использованием метода ЭИЛ путем чередования электродов разного состава [13] либо комбинированием метода ЭИЛ с другими способами нанесения [6, 14, 15]. Особенностью ЭИЛ-покрытий является присущая им несплошность, изменяющаяся в интервале 40...10 % и обеспечивающая повышение износостойкости за счет дискретности структуры покрытия, ответственной за снижение остаточных напряжений [8]. Эффект дискретности покрытия усиливается при ЭИЛ композиционной керамикой (без металлического связующего) за счет формирования на начальном этапе обработки сфероидизированных глобул повышенной твердости по сравнению с поверхностью [9-12]. Наличие таких глобул, помимо снижения остаточных напряжений, уменьшает площадь трибоконтакта, что приводит к увеличению удельной нагрузки и, как результат, инициирует реакции трибоокисления, которые ответственны за формирование полиоксидных вторичных структур, играющих роль твердой смазки.

ВТС традиционно используют для электроискрового упрочнения металлических сплавов, в том числе инструментов из быстрорежущей сталей [16, 17]. Представляет интерес обратная задача – ЭИЛ собственно вольфрамсодержащих твердых сплавов. Перспективность этого направления впервые была показана в работах [13, 14] и подтверждается сравнением зависимостей интенсивности изнашивания ( $I$ ) и коэффициента трения ( $f$ ) от скорости скольжения ( $V$ ) для исходного сплава ВК8 (без покрытия) и после его ЭИЛ композиционной керамикой различных составов (рис. 1). ЭИЛ-покрытия наносили на лабораторной установке Элитнон-21 в режиме: частота импульса тока  $\sim 1200$  Гц, энергия в импульсе 0,008 Дж, время обработки 2 мин/см<sup>2</sup>. Композиционные керамические электроды были разработаны и изготовлены в ИПМ НАНУ. Использованы композиты на основе тугоплавких соединений титана: карбонитрида титана (КНТ14А), диборида титана (ТБНА20), системы TiN-AlN(TiNAlN) без связки и со связкой. Триботехнические параметры измеряли на воздухе в условиях трения скольжения без смазки по схеме “вал-вкладыш” по методике работы [18], контртелом служила закаленная сталь 65Г.

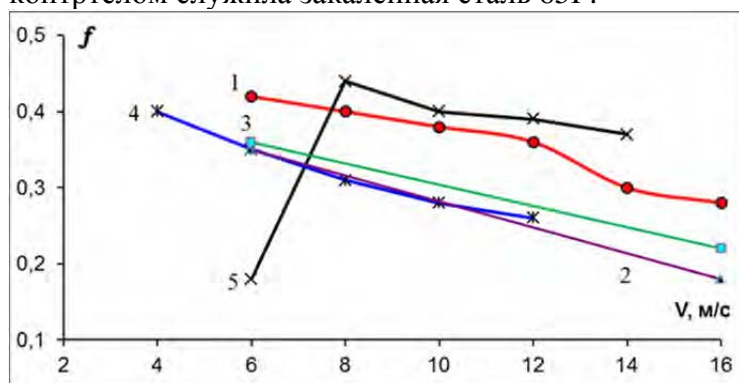


Рис. 1. Коэффициент трения ( $f$ ) сплава ВК8 без покрытия (1) и с ЭИЛ-покрытиями в зависимости от скорости скольжения ( $V$ ): TiNAlN c/c (2), TiNAlN б/c (3), ТБНА20 (4), КНТ14А (5).

в процессе изнашивания покрытий, выступающих в роли твердой смазки. Такая вторичная структура (трибопленка) образуется в зоне трибоконтакта в результате компактирования и спекания в процессе трения окисленных продуктов износа [19].

Существуют разные технологические приемы повышения износостойкости ЭИЛ-покрытий: их комбинация с различными методами обработки поверхности (лазерное

Из зависимостей рис. 5 следует, что при  $V = 12$  м/с интенсивности изнашивания сплава ВК8 с ЭИЛ-покрытиями на  $\sim 70$  %, а коэффициент трения на  $\sim 30$  % ниже по сравнению с исходным твердым сплавом без покрытия. При этом уменьшение величин  $I$  и  $f$  с ростом скорости скольжения свидетельствует об образовании на рабочей поверхности вторичных полиоксидных структур в



оплавление [12, 20, 21], магнитоабразивная обработка [6]), с другими способами нанесения покрытий (газофазным [6], электролитическим [20] осаждением), а также нанесение многослойных ЭИЛ-покрытий [10, 18].

Зависимости на рис. 5 с учетом результатов исследований последнего десятилетия приводят к выводу, что оптимизация составов легирующего электрода, режимов обработки, конструктивных схем покрытия в сочетании ЭИЛ с другими методами осаждения и обработки поверхности является эффективным путем повышения эксплуатационных свойств ВТС.

### Список литературы

1. *Tool coating AIDS titanium cutting / Metalwork, PROD.* –1991. – v.135. – № 12. – P.28;
2. *Пат. 254489.* Япония. N.Omori, K. Yamadata, T. Nomura et. al. – Оpubл. 18.04.91;
3. *Мосина Т.В., Панасюк А.Д., Юга А.И., Григорьев О.Н.* Фрикционные свойства композиционных материалов системы TiN-AlN / Порошковая металлургия. – 1999. –№9/10. – с. 104-108;
4. *Matthews A., Zeyland A.,* Developments in vapour deposited ceramic coatings for tribological applications / Key Eng. Mat. –2001. –v.206.-213. –p. 459-466;
5. *Фадеев В.С.,* Верхотуров А.Д., Паладин Н.М. и др. Разработка и создвние слоистых материалов инструментального подназначения с заданным градиентом свойств / Перспективные материалы. – 2004. –№5. –с.45-52;
6. *Степанова О.В.,* Подчерняева И.А., Тимофеева И.И. и др. Влияние комбинации газофазного осаждения с электроискровым легированием на износостойкость твердого сплава ВК8 / Порошковая металлургия. – 2006. – №7/8. – с. 49-55;
7. *Верхотуров А.Д.,* Подчерняева И.А., Егоров Ф.Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. – М.: Наука. – 1988. –223с.;
8. *Ляшенко Б.А.,* Мовшович А.Я., Долматов А.И. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Научное издание. Сер. Технологические системы. – 2001. – №4. – с. 17-25;
9. *Юречко Д.В.,* Подчерняева И.А., Панасюк А.Д., Григорьев О.Н. Физико-химическая модель формирования износостойких покрытий на алюминиевых сплавах при электроискровом массопереносе композиционной керамики / Порошковая металлургия. – 2006. – №1/2. – с. 51-58;
10. *Подчерняева И.А.,* Панашенко В.М., Панасюк А.Д. и др. Электроискровое упрочнение титанового сплава ВТЗ-1 безвольфрамовой композиционной керамикой / Порошковая металлургия. – 2007. –№9/10. – с. 36-44;
11. *Подчерняева И.А.,* Степанова О.В., Панасюк А.Д. и др. Особенности глобулярной структуры электроискровых покрытий на сплаве ВК8 / Порошковая металлургия. – 2008. – №5/6. – с. 77-84;
12. *Подчерняева И.А.,* Панасюк А.Д., Панашенко В.М. и др. Электроэрозийная стойкость и структурно-фазовые превращения при электроискровом и лазерном легировании титанового сплава композиционной керамикой на основе систем ZrB<sub>2</sub>-ZrSi<sub>2</sub> и TiN-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> / Порошковая металлургия. – 2008. – №1/2. – с. 151-161;
13. *Подчерняева И.А.,* Григорьев О.Н., Субботин В.И. и др. Износостойкие слоистые электроискровые покрытия на основе ZrB<sub>2</sub> / Порошковая металлургия. – 2004. – 7/8. – с. 77-81;
14. *Подчерняева И.А.,* Тепленко М.А., Костенко А.Д. и др. Влияние послойного электроискрового легирования на свойства композиционного электролитического покрытия системы Ni-B / порошковая металлургия. – 2004. – №1/2. – с. 42-46;
15. *Подчерняева И.А.,* Панасюк А.Д., Панашенко В.М. Закономерности абразивного изнашивания ZrB<sub>2</sub>-содержащих электроискровых комбинированных покрытий на титановом сплаве. Сообщение I / Порошковая металлургия. – 2009. – №5/6. – с. 88-100;
16. *Zamulaeva E.I.,* Levashov E.A., Kudryashov A.E., Vakaev P.V., Petrzhik M.I. Electrospark coatings deposited onto an Armco iron substrate with nano- and microstructured WC-Co electrodes: Deposition process, structure, and properties / Surface and Coating Technology. – 2008. – v.202. – №15. – P. 3715-3722;
17. *Soma Raju K.,* Faisal N.H., Srinivasa Rao D., Joshi S.V., Sundararajan G. Electro-spark coatings for enhanced performance of twist drills / Surface and Coatings Technology. – 2008. – v. 202. – №9. – P. 1636-1644;
18. *Мамыкин Е.Т.,* Юга А.И. Комплекс машин и методов для определения антифрикционных свойств в условиях трения скольжения / Порошковая металлургия, . – 1973. – №1. – с. 62-67;
19. *Kato H.,* Komai K. Tribofilm formation and mild wear by tribo-sintering of nanometer-sized oxide particles on rubbing steel surfaces / Wear. – 2007. – v. 262. – №1/2. – P. 36-41;
20. *Подчерняева И.А.,* Тепленко М.А., Костенко А.Д. и др. Влияние послойного электроискрового легирования на свойства композиционно электролитического покрытия системы Ni-B / Порошковая металлургия, . – 2004. – №1/2. – с. 42-46;

УДК 621.914.22

Равська Н.С., д.т.н., проф., Парненко В. С., асистент.  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕМАТИЧНОГО ПЕРЕДНЬОГО КУТА ЗУБА ДИСКОВОЇ ОБКАТНОЇ ФРЕЗИ ДЛЯ ОБРОБКИ БАГАТОЗУБИХ ВИРОБІВ З НЕРІВНОМІРНИМ КРОКОМ

Передній кут [1]  $\gamma$  це кут в січній площині між площиною, дотичною в досліджуваній точці різальної кромки до передньої поверхні і основною площиною, яка проводиться перпендикулярно швидкості різання.

У загальному випадку у вибраній системі координат положення площини різання в досліджуваній точці різальної кромки визначається вектором швидкості результуючого руху різання  $\vec{V}_e$  і вектором  $\vec{P}$  дотичним до різальної кромки в її досліджуваній точці (рис.1).

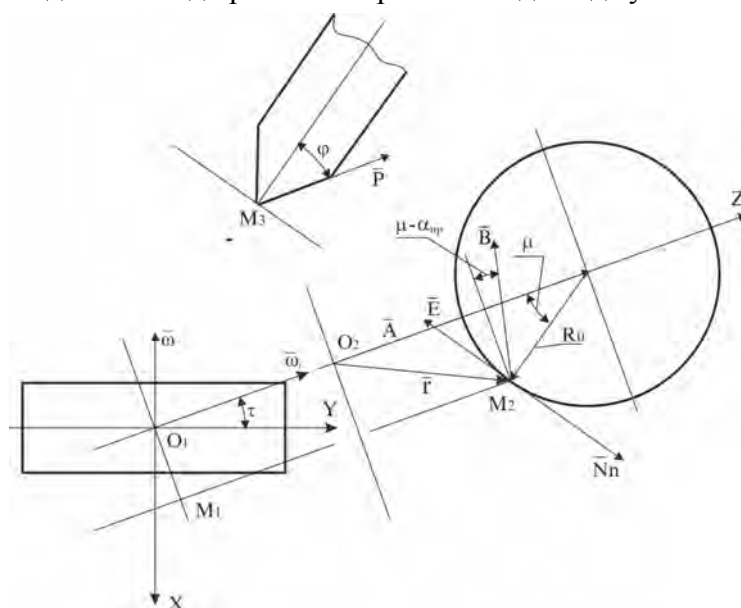


Рисунок. 1 Визначення кінематичного переднього кута

Положення передньої площини визначається вектором  $\vec{P}$  і вектором  $\vec{\Pi}$  [2], розташованими в передній площині. Вектор нормалі  $\vec{N}_p$  до площини різання буде векторним добутком векторів  $\vec{P}$  та  $\vec{V}_e$ . В системі XYZ вектори  $\vec{V}_e$ ,  $\vec{P}$  і  $\vec{\Pi}$  будуть дорівнювати:

$$\vec{P} = \vec{i} \cdot P_x + \vec{j} \cdot P_y + \vec{k} \cdot P_z; \vec{V}_e = \vec{i} \cdot V_x + \vec{j} \cdot V_y + \vec{k} \cdot V_z; \vec{\Pi} = \vec{i} \cdot \Pi_x + \vec{j} \cdot \Pi_y + \vec{k} \cdot \Pi_z$$

Вектор  $\vec{P}$  записується таким чином:

$$\vec{P} = \vec{i} \cdot (\operatorname{tg} \varphi \cdot \sin \tau + \sin \mu \cdot \cos \tau) + \vec{j} \cdot (\sin \mu \cdot \sin \tau - \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \tau) + \vec{k} \cdot \cos \mu$$

Вектор  $\vec{N}_p$  нормалі до площини різання буде:

$$\vec{N}_p = [\vec{P} \cdot \vec{V}_e] = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ P_x & P_y & P_z \\ V_x & V_y & V_z \end{vmatrix} = \vec{i} \cdot N_{px} + \vec{j} \cdot N_{py} + \vec{k} \cdot N_{pz}$$

Кут між нормаллю  $\vec{N}_p$  до площини різання і нормаллю до передньої площини буде рівний  $90 - \gamma_n$ , де  $\gamma_n$  – передній кут в нормальному до різальної кромки перетині.

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \frac{(\vec{N}_p \cdot \vec{N}_{II})}{\|[\vec{N}_p \times \vec{N}_{II}]\|}$$

Вектор нормалі  $\bar{N}_\Pi$  до передньої площини буде:

$$\bar{N}_\Pi = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ P_X & P_Y & P_Z \\ \Pi_X & \Pi_Y & \Pi_Z \end{vmatrix} = \bar{i} \cdot N_{\Pi X} + \bar{j} \cdot N_{\Pi Y} + \bar{k} \cdot N_{\Pi Z}$$

Оскільки розглядається випадок, коли передня площина проходить через вісь фрези, вектор до передньої площини можна записати таким чином:

$$\bar{N}_\Pi = -\bar{i} \cdot \cos \tau - \bar{j} \cdot \sin \tau + \bar{k} \cdot tg\mu$$

Скалярний добуток векторів  $\bar{N}_p$  і  $\bar{N}_\Pi$  буде дорівнювати:

$$(\bar{N}_p \cdot \bar{N}_\Pi) = -\cos \tau \cdot (P_Y \cdot V_Z - P_Z \cdot V_Y) + \sin \tau (P_X \cdot V_Z - P_Z \cdot V_X) + tg\mu (P_X \cdot V_Y - P_Y \cdot V_X)$$

Векторний добуток векторів  $\bar{N}_p$  і  $\bar{N}_\Pi$  буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} [\bar{N}_p \times \bar{N}_\Pi] = & \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ -\cos \tau & -\sin \tau & tg\mu \\ (P_Y \cdot V_Z - P_Z \cdot V_Y) & (P_Z \cdot V_X - P_X \cdot V_Z) & (P_X \cdot V_Y - P_Y \cdot V_X) \end{vmatrix} = \\ & -\bar{i} [\sin \tau \cdot (P_X \cdot V_Y - P_Y \cdot V_X) + tg\mu (P_Z \cdot V_X - P_X \cdot V_Z)] + \\ & \bar{j} [tg\mu \cdot (P_Y \cdot V_Z - P_Z \cdot V_Y) + \cos \tau \cdot (P_X \cdot V_Y - P_Y \cdot V_X)] + \\ & \bar{k} [\sin \tau (P_Y \cdot V_Z - P_Z \cdot V_Y) + \cos \tau (P_X \cdot V_Z - P_Z \cdot V_X)] \end{aligned}$$

Модуль векторного твору  $[\bar{N}_p \times \bar{N}_\Pi]$  буде:

$$\begin{aligned} [(\bar{N}_p \cdot \bar{N}_\Pi)]^2 = & [\sin \tau \cdot (P_X \cdot V_Y - P_Y \cdot V_X) + tg\mu (P_Z \cdot V_X - P_X \cdot V_Z)]^2 + \\ & [\cos \tau (P_X \cdot V_Y - P_Y \cdot V_X) + tg\mu (P_Y \cdot V_Z - P_Z \cdot V_Y)]^2 + \\ & [\sin \tau (P_Y \cdot V_Z - P_Z \cdot V_Y) + \cos \tau (P_X \cdot V_Z - P_Z \cdot V_X)]^2 = a^2 + b^2 + c^2 \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} a &= \sin \tau \cdot (P_X \cdot V_Y - P_Y \cdot V_X) + tg\mu \cdot (P_Z \cdot V_X - P_X \cdot V_Z); \\ b &= \cos \tau \cdot (P_X \cdot V_Y - P_Y \cdot V_X) + tg\mu \cdot (P_Y \cdot V_Z - P_Z \cdot V_Y); \\ c &= \sin \tau \cdot (P_Y \cdot V_Z - P_Z \cdot V_Y) + \cos \tau \cdot (P_X \cdot V_Z - P_Z \cdot V_X) \end{aligned}$$

Величини a, b та c рівні:

$$\begin{aligned} a &= tg\varphi \cdot \sin \tau \cdot [(l-1) \cdot \sin \tau - u]; b = tg\varphi \cdot \cos \tau \cdot [(l-1) \cdot \sin \tau - u]; c = -[\sin \tau (l-1) - u] \\ \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} &= \frac{\sin \tau \cdot (l-1)}{\cos \varphi} \end{aligned}$$

Прийнято:

$$u = \frac{\omega_i}{\omega} \text{ та } l = \frac{A}{R_0}$$

Тоді передній кут  $\gamma_n$  в нормальному до різальної кромки перетині буде рівний:

$$tg\gamma_n = \pm \frac{(l-1) \cdot \cos \tau \cdot \cos \varphi}{(l-1) \cdot \sin \tau - u}$$

### Список літератури:

1. Равська Н .С. Звіт про науково-дослідну роботу «Узагальнена теорія визначення геометричних параметрів різального інструменту» Виконаний по темі № 2914ф / Н .С. Равська, Л. І. Ковальова, О. А. Охріменко, В. В. Вовк //– К.: НТУУ КПІ -2008 -208с (рукопис).
2. Родін П.Р. Основы проектирования режущих инструментов. - К.: Вища школа, 1990. – 424 с.

УДК 621.891

Корбут Є.В., к.т.н, доцент, Гринзовський О.А., аспірант  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### ЕНДОПРОТЕЗУВАННЯ, ІНЖЕНЕРНИЙ АСПЕКТ

**Анотація:** з огляду на соціально-політичну ситуацію, яка склалася в Україні на сьогоднішній день, враховуючи підвищений травматизм та значне збільшення у дорослих і дітей ампутаційних дефектів кінцівок (при тому, що кількість уроджених дефектів також не зменшується), проблеми інвалідності та реабілітації інвалідів потребують в системі охорони здоров'я підвищеної уваги. Особливо гостро ці проблеми постають перед дітьми та молодими особами, які ще ростуть і, таким чином, потребують не одного протезування в період росту.

Показання для ендопротезування визначає лікар травматолог-ортопед у випадку, коли інші способи лікування хвороби Бехтерева, ревматоїдних артритів, диспластичних, дегенеративно-дистрофічних та посттравматичних артрозів, асептичних некрозів, внутрішньо суглобових переломів та несправжніх суглобів є неефективними.

Враховуючи досягнення науки і техніки у сучасній травматології та ортопедії, в медичній практиці зростає частота використання імплантатів та ендопротезів. Одним із головних чинників, що визначає довговічне та безпечне функціонування імплантату в організмі пацієнта, є якість конструкції, а саме це стосується контактуючих матеріалів пари тертя в шарнірі ендопротеза. Ендопротез є складовою цілої системи, до якої окрім імплантату входять живі структури організму (кістки, сухожилля, м'язи) та матеріали ендопротеза, надзвичайно важливого значення набувають показники рівнів і розподілення механічного напруження між компонентами системи, їх структура, фізичні, механічні та біологічні властивості, а також геометричні параметри та умови і процеси, які виникають на контактних поверхнях.

Оскільки ендопротезування - досить «молодий» напрямок медицини, виникає цілий ряд не тільки медичних, а й інженерних: (матеріалознавчих, конструкторських, технологічних), біомеханічних, біохімічних та інших супутніх проблем. Їх вирішення можливе тільки за наявності комплексного науково-обґрунтованого підходу, який враховує усі аспекти функціонування ендопротезу.

Існує велика кількість конструкцій ендопротезів, проте забезпечити досить довге і безпечне їх використання досить проблематично. Частково це пов'язане із неоптимальним вибором матеріалів та недоліками використаних технологій.

В Україні всі ці проблеми постають ще більш гостро, оскільки використовуються здебільшого імпортовані ендопротези, а вітчизняне їх виробництво розвивається дуже повільно. Тож вивчення питань вибору матеріалів для компонентів ендопротезу та їх біосумісності, розробка технологій їх виготовлення, пошук матеріалів, які б могли сприяти остеосинтезу та розкладатися не порушуючи системи організму, є надзвичайно актуальними у сучасних умовах на теренах України.

В кінці ХХ ст. вівся активний пошук біодеградуючих матеріалів (таких, що повністю метаболізуються і при цьому не спричиняють патологічної дії на оточуючі тканини і організм в цілому). Знайдено таких було близько 40, проте, вимоги до імплантатів, які використовуються в травматології і ортопедії, різко зменшують цей перелік. Серед використовуваних – магнієві сплави. Їх модуль пружності біля 45 ГПа, що найбільше відповідає механічним властивостям кістки. На сьогодні найчастіше використовуються на світовому ринку AZ91A, AZ91B, AZ91C, AZ91D, AZ91E, LAE442, а в експериментах – сплави цирконію і магнію (AZ91) та магнію і кальцію (LAE442) [4]. В результаті досліджень фахівців Запорізького державного медичного університету щодо токсичної дії на організм

сплавів на основі магнію, було експериментально встановлено, що продукти біокорозії магнієвого сплаву МЛ-10 не чинять токсичної дії на організм білих щурів. Порушень фізіологічних проявів не спостерігалось. Таким чином, можна зробити сприятливий прогноз стосовно використання цих сплавів у людини [3].

Ще одним біологічно інертним матеріалом, перспективним в якості кісткового імплантату, є кераміка на основі алюмінію. Цей матеріал хімічно високостабільний, механічно міцний, твердий та зносостійкий. Кераміка добре підходить для виготовлення великих виробів (як кульшовий чи колінний суглоби) та деталей з підвищеним руховим навантаженням. Проте, виготовлення керамічних частин ендопротезів потребує досить клопіткої праці: вибір вихідної сировини; вибір температурних режимів; сушка і попередня обробка напівфабрикату; випалювання, в результаті якого необхідно отримати кераміку з рівномірною структурою, мінімальними кристалами та високими фізико-механічними параметрами [8].

Нині у світі та, зокрема, в Україні переважно встановлюють ендопротези, шарнірна пара яких складається з металу і хірулену. Це так званий «золотий стандарт ендопротезування». Його успішно використовують з 1962 року і служить такий ендопротез понад 20 років [6]. В якості металу, який за своїми хімічними та технічними особливостями є найбільш прийнятним для використання при виготовленні ендопротезів є технічно чистий титан [5], але він має низькі механічні та триботехнічні характеристики і потребує підвищення якості пари тертя. Для цього використовуються різні методи, зокрема, іоноплазмове термоциклічне азотування (ШТА) та термодифузійне азотування (ТДА) [9]. В результаті експериментів, проведених в Інституті надтвердих матеріалів НАН України було доведено, що при зміцненні титанових зразків за технологією ТДА отримано кращі результати, ніж при технології ШТА [1].

Крім міцності, надзвичайно велике значення має біосумісність ендопротезу, яка залежить від корозійної стійкості і складу сплаву. З огляду літератури стає зрозуміло, що самими ефективними та безпечними для здоров'я людини легуючими елементами є Nb, Ta, Mo, Zr, Sn. Використання цих елементів підвищує міцність і знижує модуль пружності титанових сплавів та не чинить негативної дії на організм людини [2, 7].

### **Висновок:**

При ендопротезуванні необхідно враховувати технічні, механічні, експлуатаційні, біосумісні, бактерицидні та інші характеристики ендопротезів, які залежать від використаних матеріалів та способів їх обробки, які як правило, вимагають значних матеріальних та фінансових затрат.

Наявна інформація потребує систематизації, стандартизації нових методів і технологій виготовлення та використання імплантатів для подальшого оптимального вибору необхідного матеріалу у кожній конкретній ситуації ендопротезування чи використання імплантату.

### **Список літератури**

1. Бондар В.К., Шейкін С.С., Грушко О.В., Сергач Д.А. Роботоспроможність шарнірного зчленування ендопротезів з титановим та хіруленовим компонентами // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2013. - №4. – с. 50-55
2. Ворон М.М., Доний А.Н., Ворон К.С., Шпак Д.Е. Влияние легирующих элементов на механические свойства титановых сплавов для эндопротезирования // Механіка, енергетика, екологія – Севастополь, 2011., с. 143-145.
3. Головаха М.Л., Беленичев И.Ф., Черный В.Н., и др. Экспериментальная оценка общетоксического действия имплантатов из сплава на основе магния // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2014. - №3. – с. 10-49
4. Головаха М.Л., Беленичев И.Ф., Черный В.Н., Яцун Е.В. Особенности метаболизма лабораторных крыс при биодеградации имплантата из сплава на основе магния // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2013. - №3. – с. 43-46

5. *Иголкин А.И.* Титан в медицине / А.И.Иголкин // Титан (Научно-технический журнал). – 1993. - №1. – С.86-90.
6. *Пинчук Л.С.* Эндопротезирование суставов: технические и медико-биологические аспекты / Л.С.Пинчук, В.И.Николаев, Е.А.Цветкова. – Гомель: ИММС НАНБ, 2003. – 300 с.
7. *Применение* материалов на основе титана для изготовления медицинских имплантов / А.А.Ильин, С.В.Скворцова, А.М. Момонов, В.Н.Карпов // Металлы. - № 3. – 2002. – с. 97-104
8. *Тарасова С.В.* Корундовая керамика для головок эндопротезов тазобедренного сустава - дис. канд.тех.наук, М.: 2003
9. *Федірко В.М.* Азотування титану та його сплавів / В.М.Федірко, І.М.Погрелюк. – К.: Наук. думка. 1995. – 220 с.

УДК 621.891

**Лабунець В.Ф., к.т.н., проф., Загребельний В.В.,** аспірант  
Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

### **ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОГО ПОКРИТТЯ НА РІЗАЛЬНОМУ ІНСТРУМЕНТІ ЗІ СТАЛІ Р6М5**

У галузі машинобудування та матеріалообробки різання є основною операцією, від якості якої значною мірою залежить відповідність деталей високим стандартам якості, що постійно зростають в умовах науково-технічного прогресу та високої конкуренції на ринку. Від технологічних операцій різання (точіння, фрезерування, свердління та ін.), а саме якості отриманої поверхні та необхідності подальшої обробки деталі, швидкості процесу різання, витрат змащувально-охолоджувальної рідини та ресурсу інструменту залежить собівартість виготовленої продукції та, відповідно, її конкурентоспроможність.

На даний час для виготовлення деталей авіакосмічного призначення використовують композиційні матеріали (КМ), які успішно замінюють чорні й кольорові метали і не поступаються їм за фізико-механічними властивостями [1].

До числа найбільш перспективних конструкційних матеріалів, особливо в авіаційно-космічній техніці, відносяться полімерні композиційні матеріали (ПКМ), що обумовлено їх властивостями, а саме: 1) мала вага порівняно з металами; 2) хороша міцність, 3) висока зносостійкість у парі з металами; 4) електромагнітна прозорість; 5) стійкість до впливу вібрації; 6) радіаційна стійкість; 7) висока корозійна стійкість тощо [2].

Обробка різанням ПКМ має ряд особливостей, що відрізняє їх від аналогічної обробки металів, а також обробка композиту одного типу відрізняється від обробки композиту іншого типу. У зв'язку з цим проводиться пошук нових методів обробки, оптимізація діючих методів і розробка спеціальних інструментів з метою забезпечення заданої якості оброблених поверхонь [3].

При обробці ПКМ на робочих поверхнях інструментальних матеріалів залежно від параметрів обробки можуть розвиватися процеси адгезійного, втомного, абразивного, механічного та окисного зношування. Абразивний вид зношування спостерігається при обробці ПКМ, що містять тверді включення як наповнювач. Тверді частинки, що знаходяться у матричному матеріалі композиції, яка обробляється, при контакті з твердими складовими структури різального інструменту (РІ) виривають їх, і як результат, руйнується поверхневий шар РІ [4].

Нанесення зносостійкого покриття дозволяє отримати необхідні фізико-механічні та експлуатаційні властивості, які забезпечать ефективність роботи РІ. Використання зносостійких покриттів дозволить зміцнити поверхневий шар РІ, замінити дорогі інструментальні матеріали більш дешевими та збільшити його термін експлуатації.

Підвищення зносостійкості РІ при одночасному покращенні його експлуатаційних характеристик, можливо здійснити за рахунок застосування вже існуючих методів зміцнення, а також за рахунок їхнього удосконалення та створення нових методів [5]. Одним з перспективних шляхів зміцнення робочих поверхонь інструменту є технологія електроіскрового легування (ЕІЛ). ЕІЛ використовується для підвищення стійкості РІ з швидкорізальних сталей і формування покриття. Перевагою ЕІЛ є простота устаткування, зміцнення поверхні, яка найбільш піддається зношуванню, відсутність необхідності попередньої підготовки поверхні, а також можливість застосування різних електродів [6]. Найбільш розповсюдженими електродними матеріалами для нанесення покриттів методом ЕІЛ є тверді сплави на основі карбіду вольфраму марок ВК [7].

При виконанні експерименту наносили покриття з твердого сплаву ВК8 на свердло зі сталі Р6М5 і здійснювали свердлення полімерного композиційного матеріалу на основі склотканини та вуглепластику, а також проводили дослідження на абразивну стійкість зразків зі сталі Р6М5 з даним покриттям.

Експеримент на абразивну стійкість проводили на установці за схемою Брінеля-Хаворта в середовищі кварцового піску та карбіду бора, а свердління здійснювали на установці РСВ-16 при 469 об/хв. Деякі результати досліджень наведені на рис. 1. Доріжка тертя після випробувань представлена на рис. 2.

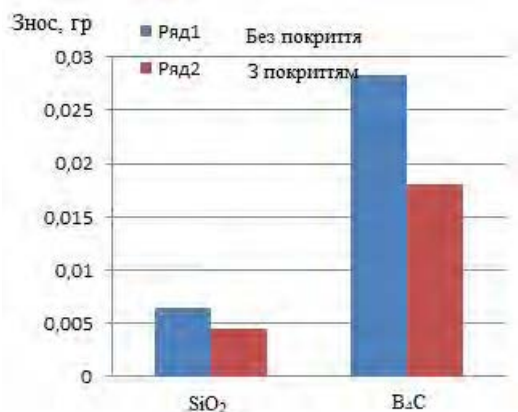


Рис.1. Стійкість до абразивного зносу зразків з покриттям



Рис.2. Доріжка тертя зразка після випробування на абразивний знос

Результати досліджень показали, що дане покриття збільшує абразивну стійкість в 1,5 рази, а стійкість свердла збільшилась у 2,5 рази.

### Список літератури

1. Доц М.В. Проектирование технологических операций обработки композиционных материалов на основе искусственных нейронных сетей / Доц М.В., Бондарь Е. Б., Марков А.М., Маркин В.Б. // Ползуновский вестник, 2012. – №1/1. – с.81-84.
2. Дерек Иренеуш. Применение полимерных трибологических материалов в авиации / Иренеуш Дерек, Лабунец В.Ф. // Проблемы тертя та зношування: наук. техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 58. – с.119-127.
3. Полімерні композиційні матеріали в ракетокосмічній техніці: Підручник / Є.О. Джур, Л.Д. Кучма, Т.А. Манько та ін. – К.: Вища освіта, 2003. – 399с.
4. Корбут Є. В. Вплив механічної обробки на якість поверхонь полімерних композиційних матеріалів / Є. В. Корбут, О. В. Андреев, І. Р. Дерек, О. В. Радько, В. Ф. Лабунец // Проблемы тертя та зношування. – К.: НАУ, 2013. – Вип.2 (61). – С. 96-100;
5. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. – М.: Машиностроение 1993.–336 с.;
6. Самсонов Г.В. Электроискровое легирование металлических поверхностей // Г.В. Самсонов, А.Д. Верхотуров, Г.А. Боровун, В.С. Сычев. – К.: Наук. думка, 1975.– 219 с.;
7. Марчук В.Є. Исследования износостойкости электроискровых покрытий в условиях фреттинг-изнашивания / В.Є. Марчук, О.І. Духота, Н.О. Науменко // Проблемы тертя та зношування. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С. 84-93.

УДК 531.391:518.5

Литвин О.В., к.т.н., доцент, Ящук І.Р., аспірант  
 НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ НА ТОЧНІСТЬ ЗАТИСКНИХ ЦАНГОВИХ ПАТРОНІВ

Затискні цангові патрони широко застосовуються для закріплення заготовок при обробці на токарних верстатах. Вимоги до підвищення точності обробки деталей безперервно зростають, і ця тенденція досить важлива для розвитку сучасного виробництва. Цангові патрони використовують для центрування і затиску пруткового матеріалу різного профілю і окремих заготовок.

На експлуатаційні характеристики затискного патрона впливають також параметри закріплення деталей. На практиці, при оснащенні токарних верстатів і верстатних систем використовуються уніфіковані затискні патрони, при проектуванні і розрахунку яких т.з. «базові» деталі залишаються незмінними, а зміни і доопрацювання зазнають лише деталі і елементи патрона, які взаємодіють із заготовкою. Тому, при одних і тих же габаритах патрону, їх гамма при незначних змінах 2-3 деталей, може надійно закріплювати заготовки різного діаметру (але в межах габаритів «базових» деталей).

На рис. 1 наведено конструкцію уніфікованого цангового патрона для закріплення штучних заготовок різного діаметру. Патрон призначений для затиску деталей в межах 70...150 мм вказаного типорозміру з допуском  $\pm 0,5$  мм. Деталі взаємозамінні. Патрон використовується ПАТ «Веркон» на верстатах мод. ПАБ 350 та ТАК 102, 103.

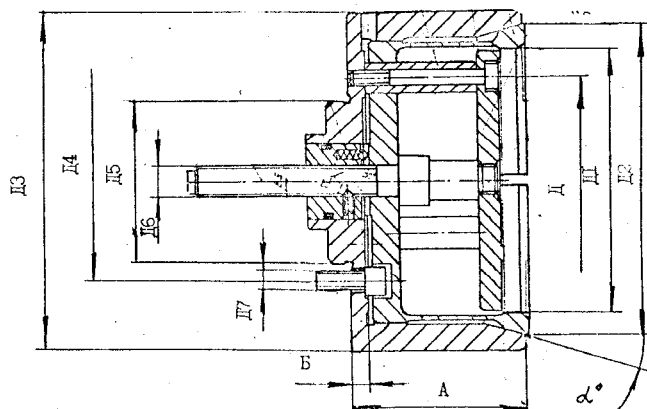


Рис. 1. Конструкція уніфікованого цангового патрона

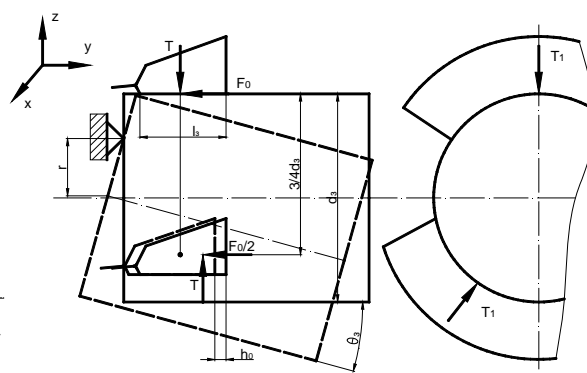


Рис.2. Реакції у площині затиску при навантаженні згинальним моментом

При консольному затиску деталі в цанговому патроні на неї діють сили процесу різання, що викликають осьові та радіальні сили, а також моменти кручення і поздовжній момент. Від згинального моменту, що діє в площині затиску, виникає осьові переміщення деталі, яке створює на пелюстках осьові сили зчеплення  $F_o$  і осьові сили зчеплення  $\frac{F_o}{2}$ , що призводять до виникнення відносного осьового зміщення  $h_o$  деталі. Сили реакції для крутного моменту в площині X при крутному моменті  $M_{kl}$  з ефективним плечем  $l_e$  осьових сил реакції на пелюстках:



$$\begin{bmatrix} F_{x1,Mk1} & F_{y1,Mk1} & F_{z1,Mk1} \\ F_{x2,Mk1} & F_{y2,Mk1} & F_{z2,Mk1} \\ F_{x3,Mk1} & F_{y3,Mk1} & F_{z3,Mk1} \end{bmatrix} = M_{k1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{l_e} \\ 0 & 0 & \frac{1}{-2l_e} \\ 0 & 0 & \frac{1}{-2l_e} \end{bmatrix}$$

В такий же спосіб знаходяться сили реакції при спроектованому на вісь У крутному моменті  $M_{k2}$ .

Подальші дослідження пов'язані з експериментальним аналізом впливу параметрів технологічної системи на точність затискних цангових патронів.

### Список літератури

1. Кузнецов Ю.Н. Зажимные механизмы для высокопроизводительной и высокоточной обработки резанием: монография (в 2-х частях) / Ю.Н. Кузнецов, В.Н. Волошин, П.М. Неделчева, Ф.В. Эль-Дахай — К.: ООО «ГНОЗИС». — Ч. 1, 2009. — 270 с.; Ч. 2, 2010. — 466 с.
2. Кузнецов Ю.Н. Теория технических систем / Ю.Н. Кузнецов, Ю.К. Новоселов, И.В. Луцив. — Севастополь: СевНТУ, 2010. — 543 с.

УДК 001.89

Назаренко І.І., д.т.н., професор

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

### КОНЦЕПЦІЯ РЕФОРМУВАННЯ ІНЖЕНЕРНОЇ ОСВІТИ

В сучасному розвитку освіти прийняти вважати, що сформувалися три основні напрямки освітньої системи, сутність яких полягає у наступному. Це створення нових форм організації освітньої діяльності, ґрунтованих на прогнозуванні і швидкому реагуванні на виклики, це трансформація наявних інституцій, організаційних і освітніх практик відповідно до мінливих умов, технічне пристосування до нових умов існування й діяльності та імітація змін, теж наявних на всіх рівнях освітньої системи, але у зворотній пропорції: більше на вищих щаблях, менше - на рівні освітньої інституції, яка має безпосередній контакт зі споживачем освітніх послуг.

В свій час в Європі були запропоновані основні положення загальної зони європейської вищої освіти, які впливають із спільної заяви європейських міністрів освіти, що була задекларована 19.06.1999р. в м.Болонья (Італія).

Сутність цієї пропозиції полягає в наступних положеннях: введення двоциклового навчання, запровадження кредитної системи, контроль якості освіти, розширення мобільності, забезпечення працевлаштування випускників, забезпечення привабливості європейської системи освіти, навчання протягом усього життя.

В Україні модель ступеневої системи освіти передбачає поєднання здобуття освітніх та професійних кваліфікацій [1].

Разом з тим, не зупиняючись на цих напрямках в їх трансформації до відповідних інституцій освіти, зазначається, що основою є зміст освіти, поєднання в єдиній системі осмислених прогресивних програм навчання для отримання високоякісної сучасної професійної освіти. Потрібна системна реформа освіти, яка базується на ідеї формування наскрізної програми отримання високоякісної професійної освіти. Реалізується ідея всеосяжною трансформацією освітнього сектора шляхом об'єднання навчальних закладів 1-4 рівнів акредитації в єдиний навчальний комплекс з наскрізною програмою навчання.

Створення єдиного навчального комплексу дозволить значно підвищити рівень підготовки фахівців, вилучити із програм навчання дисципліни, які певним чином

повторюються в навчальних закладах, скоротити кошти на навчання, залучити доцентів і професорів до проведення семінарів в навчальних закладах 1 і 2 рівня акредитації за напрямками своїх наукових досліджень, що дасть можливість залучити до наукової роботи молоді, реалізувати ідею наскрізної програми практик.

### Список літератури

1. Назаренко І.І. Проблеми і задачі вищої технічної освіти. / І.І. Назаренко, В.М. Смірнов, А.Т. Свідерський – Теорія і практика будівництва, Київ.: КНУБА. №1, 2005. С. 10-15.
- 

УДК 62.192

Король В.І., аспірант, Ободенко В.В., аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

### ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПІДЙОМНИКІВ У РЕАЛЬНИХ РЕЖИМАХ ЇХ НАВАНТАЖЕННЯ

Сучасне будівництво важко уявити без застосування багатофункціональної спеціальної техніки, здатної підіймати різні вантажі і персонал на значну висоту.

Підйомники призначені для підймання та переміщення насипних або поштучних вантажів, опускання і підймання людей, обладнання, машин та матеріалів на обмежені відстані, як правило в одній або двох площинах [1]. Підйомники є машинами циклічної дії, які знайшли застосування у багатьох галузях народного господарства. Основним параметром підйомника є вантажопідйомність, тобто маса вантажу яка може бути піднята (зазначена у паспорті машини) [2]. Продуктивність машин циклічної дії, до якої належать підйомники, характеризується сумарною масою вантажів, що переміщуються або кількістю підйомів в одиницю часу.

Для виконання будь-яких будівельних робіт у сучасному будівництві, яке здійснюється швидкими темпами, використання підйомників є економічно вигідніше, ніж використання сходів та риштування, оскільки їх зведення займає багато часу.

У роботі проаналізовані телескопічні та гідравлічні підйомники, їхні конструкції, специфіка обслуговування та питання безпеки, наведена порівняльна характеристика застосування підйомників різних типів для різних будівельних цілей.

### Список літератури

1. Бондарев В.С. Підйомно-транспортні машини: Розрахунки підймальних і транспортувальних машин: Підручник / В.С. Бондарев, О.І. Дубинець, М.П. Колісник та ін. – К.: Вища шк., 2009. -734 с.;
  2. Назаренко І.І. Вантажопідймальна техніка (конструкції, ефективне використання, сервіс). / І.І. Назаренко, Ф.О. Німко. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – К.: Видавничий Дім «Слово», 2010. – 400 с.
-

УДК 621.86

Запривода А.В., аспірант, Ручинський М.М., к.т.н., доцент

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РУХУ ВІБРОПРИСТРОЮ В УМОВАХ ВЗАЄМОДІЇ ІЗ ОБРОБЛЮВАЛЬНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ

З розвитком монолітного будівництва широкого застосування набула потреба в формуванні горизонтальних поверхонь значних розмірів у плані. Технологією передбачено використання віброустановок для розподілення та ущільнення бетонних жорстких сумішей та спеціалізованих машин для загладжування поверхонь. Домінуюче значення у досягненні як продуктивності так і якості суміші належить процесу укладання та ущільнення суміші, що визначається вибраними параметрами вібрації і їх реальним забезпеченням[1]. В роботі поряд із корпускулярною теорією процесу ущільнення поверхневими вібропристроями застосовувалась континуальна модель. Можливість відривних коливань вібратора визначався значеннями активних і реактивних компонентів суміші, які, в свою чергу, залежать від реологічних та акустичних параметрів: щільності, пористості, швидкості звуку в суміші та його модуля пружності. Щільність бетонної суміші є величиною відомою. Здійснено визначення ступені впливу частоти коливань на швидкість розповсюдження та довжину хвиль. В першому випадку така залежність впливає на вибір моделі, а в другому – на режим роботи установки (резонансний або зарезонансний). В результаті досліджень виявлено, що із збільшенням частоти зростає і швидкість, що вступає в протиріччя з відомою формулою визначення довжини хвилі. Однак для ущільнення бетонних сумішей при формуванні горизонтальних поверхонь має місце незначні за величиною висоти стовпа суміші, частота, яка, як правило, є незмінною. Область зміни значень швидкостей розповсюдження хвиль по лінії зміни частоти коливань дає можливість вважати, що в межах сталих параметрів коливань необхідні параметри практично не змінюються.

Якщо розглянуті параметри визначають процес руху віброустановки, то енергетичні характеристики в значній мірі залежать від в'язкості конкретного складу бетонної суміші. Крім цього в'язкість, як проявлення процесу зсувних деформацій є визначальним параметром початкового процесу зміни стану бетонної суміші у напрямку її ущільнення. Виявлено, що в'язкість залежить від напруження зсуву або швидкості деформації, причому ця залежність є як лінійною так і нелінійною. В'язкість суміші характеризується коефіцієнтом в'язкості  $\eta$ , який визначає залежність між градієнтом швидкості  $dv/dx$  і дотичним напруженням  $\tau$  [2].

Проведені експериментальні дослідження підтвердили адекватність результатам теоретичних, що послужило здійснити розробку алгоритму розрахунку основних параметрів пристрою та створити його конструкцію, яка пройшла апробацію у реальних умовах формування горизонтальних поверхонь.

#### Список літератури

1. Назаренко І.І. *Машини для виробництва будівельних матеріалів: Підручник* / І.І. Назаренко. – Київ.: КНУБА, 1999.-488 с.;
2. Назаренко І.І. *Прикладні задачі теорії вібраційних систем: Навчальний посібник (2-е видання)* / І.І. Назаренко. – Київ.: Видавничий Дім «Слово», 2010. - 440 с..

УДК 693.61:69.059.25

Заліско І.І., к.т.н., Залізник В.А., аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна,

### МОДЕЛЮВАННЯ ПІДЙОМНОГО МЕХАНІЗМУ В УМОВАХ ЙОГО НАВАНТАЖЕННЯ

В сучасному висотному будівництві виникає потреба у застосуванні стрілових підйомників, які, як правило, створюються із багатьох телескопічних стріл. При навантаженні і підйому на значну висоту вантажу внаслідок цього та наявності елементів з'єднання і зазорів у стиках кожної секції можливі виникнення небажаних коливань[1].

З метою дослідження робочого процесу підйомника розглядається розрахункова схема телескопічної стріли у різних площинах дії бічного навантаження, яка враховує контактні сили і конструктивно-технологічні фактори у стику з'єднання опорних елементів з полками секцій стріли. При цьому приймається, що реакції в опорах секції визначаються моделюванням секції як консолі-балки від кожного складового навантаження. Динамічне переміщення верхньої секції визначається сумою переміщень в результаті вимушених і власних коливань секцій телескопічної стріли. Динамічна модель системи рухомих секцій стріли отримана на основі аналізу існуючих підходів із рівнянь Лагранжа та урахуванням діючих сил на підйомник[2]. Рівняння вирішені та отримані аналітичні залежності, які дали можливість встановити закономірності зміни переміщення верхніх точок на прикладі трьох і п'яти секцій стріли. Визначено, що із збільшенням вильоту стріли, амплітуда власних коливань секцій збільшується і на максимальному вильоті п'ятисекційної стріли становить 85-87% сумарного переміщення верхньої точки, якщо на кінці знаходиться вантаж. Здійснені дослідження стійкості, визначені власні частоти коливань телескопічної стріли та запропоновано алгоритм розрахунку підйомника в реальних умовах його навантаження.

Розроблена система включення гідروциліндрів підйому із плавним висуванням секцій телескопічної стріли підйомника, що пройшла успішне випробовування в реальних умовах навантаження.

#### Список літератури

1. Коваленко С.О. Аналіз чисельних результатів дослідження впливу різноманітних факторів на розв'язок задач оптимізації секції стріли автокрана/ С.О. Коваленко, І.І. Назаренко, А.Т. Свідерський // Техніка будівництва.– К.: КНУБА, 2009.-№23. – С. 70-78.
2. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара./Я.Г. Пановко // – М.: Машиностроение, 1976. - 320 с.

## УДК 621.9

**Назаренко І.І., д.т.н., професор, Болілий Б.Г., аспірант**

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВІБРОПРИСТРОЮ З ВЕРТИКАЛЬНИМ РОЗМІЩЕННЯМ РОБОЧОГО ОРГАНУ**

Вимоги до підвищення якості об'ємних елементів, які випускаються на заводах залізобетонних виробів потребують необхідність широкого впровадження прогресивних методів формовання, оскільки існуючі методи володіють низкою недоліків. Одним із методів підвищення ефективності є застосування робочих органів, які передають енергію безпосередньо до оброблювальної суміші. Таким методом являються віброустановки з вертикальним розташуванням робочого органу, що закріплені на внутрішній обечайці форми. Дослідженню руху віброустановок з вертикальним дебалансним валом присвячені роботи [1-4]. У них закон руху виведений при деяких наближеннях. Так, в роботі [4] - рівняння з урахуванням непружних опорів, але для конструкцій, в яких пружні елементи приєднані на рівні центру мас контейнера. В роботі [1] - для окремого випадку, коли верхній дебаланс розташований на рівні центру мас рухомої системи.

При створенні таких віброустановок необхідно виконати розрахунок віброустановки з метою вибору раціональних конструктивних параметрів, що забезпечують необхідний закон руху ущільнення бетонної суміші.

У даній роботі розроблена розрахункова схема на основі обґрунтованої математичної моделі; складені рівняння в комплексній формі, рішенням яких отримані аналітичні залежності для визначенні основних параметрів віброустановки, що дають можливість встановити закони руху віброустановки із урахуванням впливу бетонної суміші.

#### **Список літератури**

1. *Заика П.М. Вибрационные зерноочистительные машины. Теория и расчет.* / Заика П.М. М., 1967. 142 с.
2. *Назаренко І.І. Машины для производства строительных материалов: Підручник/І.І. Назаренко.* – Київ.: КНУБА, 1999.- 488 с.;
3. *Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем: Навчальний посібник (2-е видання)/І.І. Назаренко.* – Київ.: Видавничий Дім «Слово», 2010. - 440 с.
4. *Субач А. П. Идентификация модели загрузки тороидальной формы на АВМ.* — В кн.: Вопросы динамики и прочности. /Субач А.П., Биргелис О.К., Берзиньш Я.П. / Рига, 1977, вып. 34, с. 65-73.

УДК 621.3.011(075.08)

Назаренко І.І., д.т.н., професор, Дьяченко О.С., аспірант,  
Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ВІБРОПРИСТРОЮ З ПРОСТОРОВИМИ КОЛИВАННЯМИ

Вібраційні машини широко використовуються в різних галузях народного господарства. Особливо поширено цей принцип для ущільнення суміші при формуванні плоских залізобетонних виробів. Традиційно вібраційні машини працюють в гармонійному резонансному або зарезонансному режимі у вертикальній або горизонтальній площині. Їх робочі органи як правило реалізують лінійні коливання, а також нелінійні коливання із застосуванням поєднання ефекту удару і вібрації.

За частотою коливань ці машини реалізують частоту в межах 150-317 рад/с. Їх ефективність обумовлена ущільненням рухомих або пластичних сумішей. З точки зору енергетичних витрат ці машини витрачають значну кількість енергії на коливання робочих органів та на тертя в підшипникових вузлах віброзбудників. Подальший розвиток цього класу машин лежить у площині пошуку більш ефективних режимів і параметрів робочого процесу [1,2].

Стосовно режимів і параметрів більш ефективними є високочастотні коливання, однак за енергетичними показниками такі машини є нераціональними. В роботі висувається ідея передавати енергію безпосередньо на форму або спеціальний піддон формувальної установки, при цьому розташування збудників коливань здійснюється у вертикальних і горизонтальних площинах.

У якості збудників коливань пропонується застосувати пневматичні вібратори, які володіють простотою конструкції, достатньо-високою надійністю та мінімальною енергоємністю.

Для створення багатокомпонентної форми коливань робочого органу і суміші, формоутворення якої здійснюється спеціальними бортами на магнітах. В роботі розроблена розрахункова схема системи «віброустановка-бетонна суміш», складене рівняння руху та отримані аналітичні залежності для визначення основних параметрів. Для розробки алгоритму розрахунку та створення подібного класу машин необхідно отримати числові дані коефіцієнтів, які відображають пружні та дисипативні властивості складових загальної системи.

#### Список літератури

1. Назаренко І.І. *Машини для виробництва будівельних матеріалів*: Підручник / І.І. Назаренко. – Київ.: КНУБА, 1999.-488 с.;
2. Назаренко І.І. *Прикладні задачі теорії вібраційних систем*: Навчальний посібник (2-е видання) / І.І. Назаренко. – Київ.: Видавничий Дім «Слово», 2010. - 440 с.

УДК 621.785

Чернега<sup>1</sup> С. М. д.т.н., проф., Поляков<sup>1</sup> І. А. аспірант, Красовський<sup>2</sup> М.О. к.х.н.,  
Гриненко<sup>1</sup> К.М., к.т.н., доц.

1 - НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

2 - Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ, Україна

### ФОРМУВАННЯ БОРИДНИХ ШАРІВ НА ТВЕРДИХ СПЛАВАХ В УМОВАХ ДІЇ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Експлуатаційні характеристики сплавів визначаються структурою, фазовим складом, напруженим станом, в'язкістю руйнування, твердістю та зносостійкістю поверхневого робочого шару твердосплавного виробу. Одним із шляхів підвищення твердості та зносостійкості поверхневого шару твердого сплаву, є застосування хіміко-термічної обробки.

Для інтенсифікації дифузійного насичення твердих сплавів проводили борування в порошковому середовищі при температурі 1148К в умовах дії зовнішнього магнітного поля (ЗМП) за магнітної індукції 0,35-0,45 мТл та напруженості 0,44 кА/м – 0,56 кА/м).

Дослідження структури твердого сплаву Т5К10 з дифузійними боридними покриттями отриманими після борування та бороміднення в різних фізико – хімічних умовах показало, що після дифузійного борування без дії ЗМП протягом 4 годин на поверхні твердого сплаву Т5К10 формується дифузійний шар товщиною до 25 мкм (рис. 1, а), а протягом 6 годин – до 40 мкм (рис. 1, б). При застосуванні ЗМП на поверхні твердого сплаву Т5К10 формується дифузійний шар товщиною до 20 мкм за 2 години дифузійного насичення (рис. 1, в).

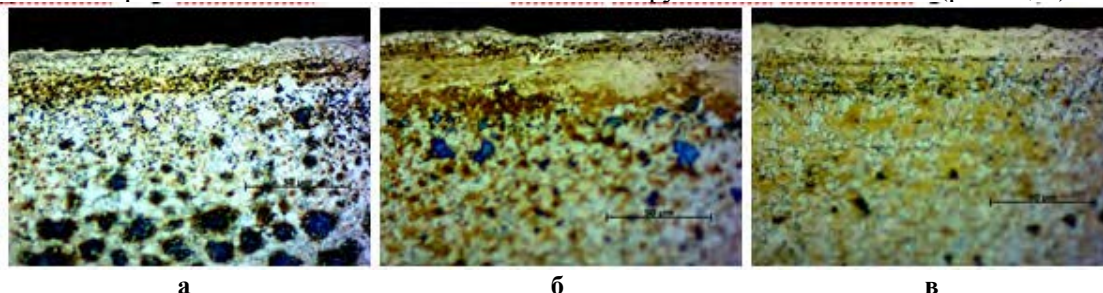


Рис. 1 – Мікроструктури боридних покриттів на твердих сплавах Т5К10 отриманих після борування без дії ЗМП (а, б) за тривалості насичення 4 (а) і 6 (б) годин та в умовах дії ЗМП (в) за тривалості насичення 2 години, х500 (теплове травлення)

При комплексному насиченні бором та міддю за 4 години дифузійного насичення без дії ЗМП на поверхні твердого сплаву Т5К10 спостерігається формування боридного шару товщина якого складає до 25 мкм (рис. 2, а), а за 6 годин – до 35 мкм (рис. 2, б), тоді як при боромідненні із одночасною дією ЗМП за 2 години формується дифузійний шар товщиною до 23 мкм (рис. 2, в).

При дослідженні рентгенофазовим аналізом поверхні твердого сплаву Т5К10 з дифузійними боридними покриттям встановлено, що при боруванні без застосування ЗМП в поверхневому шарі до 10 – 15 мкм формуються фази  $B_2CoW_2$ ,  $CoB$ ,  $TiB$ ,  $WB$ ,  $TiC$  та  $WC$  (рис. 3, а). При накладанні ЗМП спостерігається зміна фазового складу і на дифрактограмах знятих з поверхні твердого сплаву Т5К10 з дифузійними боридними покриттям, отриманих після борування в умовах дії ЗМП фіксується наявність фаз  $CoB$ ,  $Co_2B$ ,  $TiB$ ,  $WB$ ,  $W_2B$ ,  $TiC$  та  $WC$  (рис. 3, б). При дослідженні дифузійних боридних покриттів отриманих після комплексного насичення бором та міддю без дії ЗМП було встановлено наступний фазовий склад:  $B_2CoW_2$ ,  $CoB$ ,  $WB$ ,  $TiC$ ,  $WC$ ,  $Cu$  та  $Cu_{0,96}Ti_{0,04}$  (рис. 4, а).

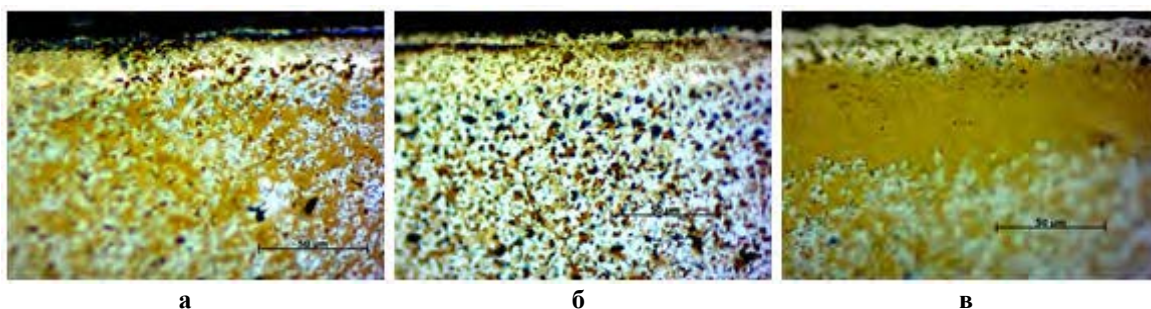


Рис. 2 – Мікроструктури боридних покриттів на твердих сплавах Т5К10 отриманих після комплексного насичення бором та міддю без дії ЗМП (а,б) за тривалості насичення 4 (а) і 6 (б) годин та в умовах дії ЗМП (в) за тривалості насичення 2 години, х500 (теплове травлення)

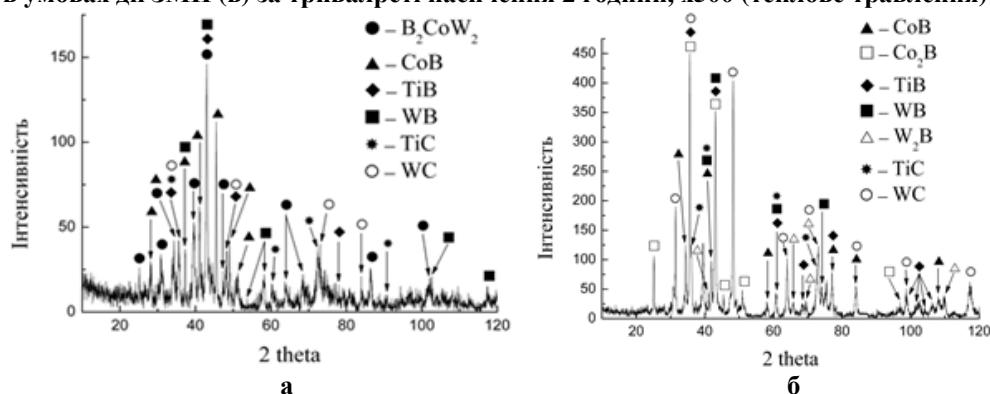


Рис. 3. Дифрактограми, зняті з поверхні твердого сплаву Т5К10 з боридними шарами, отриманими після: а – борування без дії ЗМП; б – борування в умовах дії ЗМП в  $\text{Cu K}\alpha$  монохроматичному випромінюванні

Після комплексного насичення бором та міддю в умовах дії ЗМП формуються дифузійні боридні покриття наступного фазового складу:  $\text{B}_2\text{CoW}_2$ ,  $\text{TiB}$ ,  $\text{WB}$ ,  $\text{Co}_2\text{C}$ ,  $\text{WC}$  та  $\text{Cu}_{0,96}\text{Ti}_{0,04}$  (рис. 4, б).

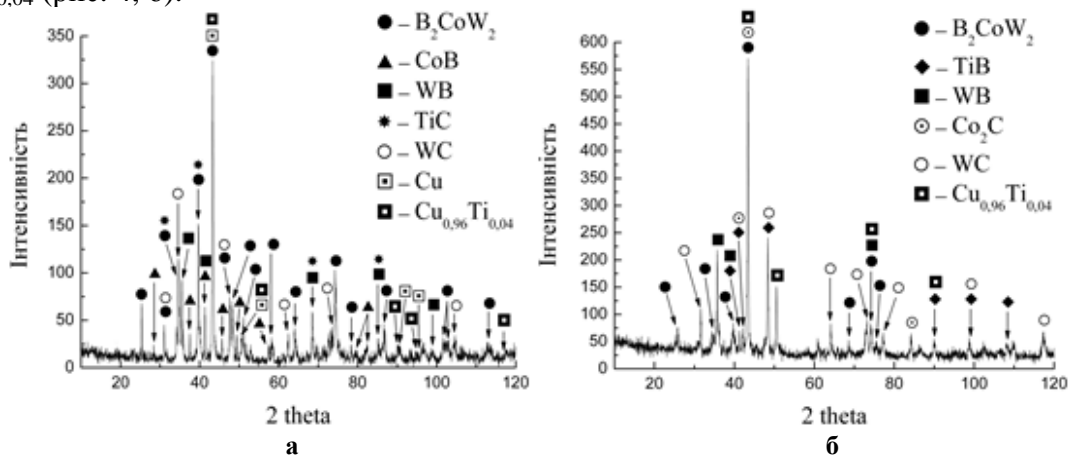


Рис. 4. Дифрактограми, зняті з поверхні твердого сплаву Т15К6 з боридними шарами, отриманими після комплексного насичення бором та міддю без дії ЗМП ( а) та в умовах дії ЗМП (б) в  $\text{Cu K}\alpha$  монохроматичному випромінюванні. Дифракційні максимуми  $\text{Cu}$  відповідають кристалографічним площинам: (111), (200), (311), (222); дифракційні максимуми  $\text{Cu}_{0,96}\text{Ti}_{0,04}$  відповідають кристалографічним площинам: (111), (200), (311), (222), (400)

Борування дозволяє сформувати боридні фази в поверхневій зоні твердого сплаву Т5К10 із мікротвердістю до 31 – 33 ГПа, а бороміднення 24 – 25 ГПа порівнянно із основним матеріалом 13 – 13,5 ГПа і за рахунок цього підвищити зносостійкість твердосплавного інструменту в 2 рази. Поява в поверхневому шарі, крім боридів, фази чистої міді, виконуючої роль твердого мастила, дозволяє підвищити зносостійкість ще більше – до 2,2 разів.



УДК 621.9.06

Кравець О.М., к.т.н. доц., Юрчишин О.Я., к.т.н. доц., Даців І.І., магістрант  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАВАНТАЖЕННЯ ВЕРСТАТА СИЛАМИ РІЗАННЯ СПЕЦІАЛЬНОГО ВИДУ

Область працездатності верстата обмежена максимально допустимою амплітудою змушених коливань. Простіше стан верстата визначати за сукупністю АЧХ при різних режимах роботи. Для порівняльної оцінки динамічної якості верстатів використовують інтегральні оцінки параметрів АФЧХ з урахуванням ймовірності використання різних зон робочого простору при експлуатації верстата.

Розробка математичної моделі верстата є надзвичайно складною і актуальною проблемою, вирішення якої дозволить значно підвищити техніко-економічні показники верстатів. У літературі майже немає розробок по даній проблемі. Практично немає достатньо надійних математичних моделей для аналізу стохастичних процесів у верстатах. Однією із причин цього є значна складність опису параметрів динамічної системи верстата та наявність багатьох факторів різної фізичної природи які визначають стохастичні коливальні процеси у верстаті. Розроблена математична модель враховує особливості коливальних процесів в шпindelній та супортній групі при наявності стохастичних входів.

Переміщення в динамічній системі верстата приведені до зони різання. З метою спрощення моделі розглянуто рух деталі та різця в площині OYZ. Для розглянутих на рис. 1 ступенів вільності запропонована розрахункова схема динамічної системи верстата.

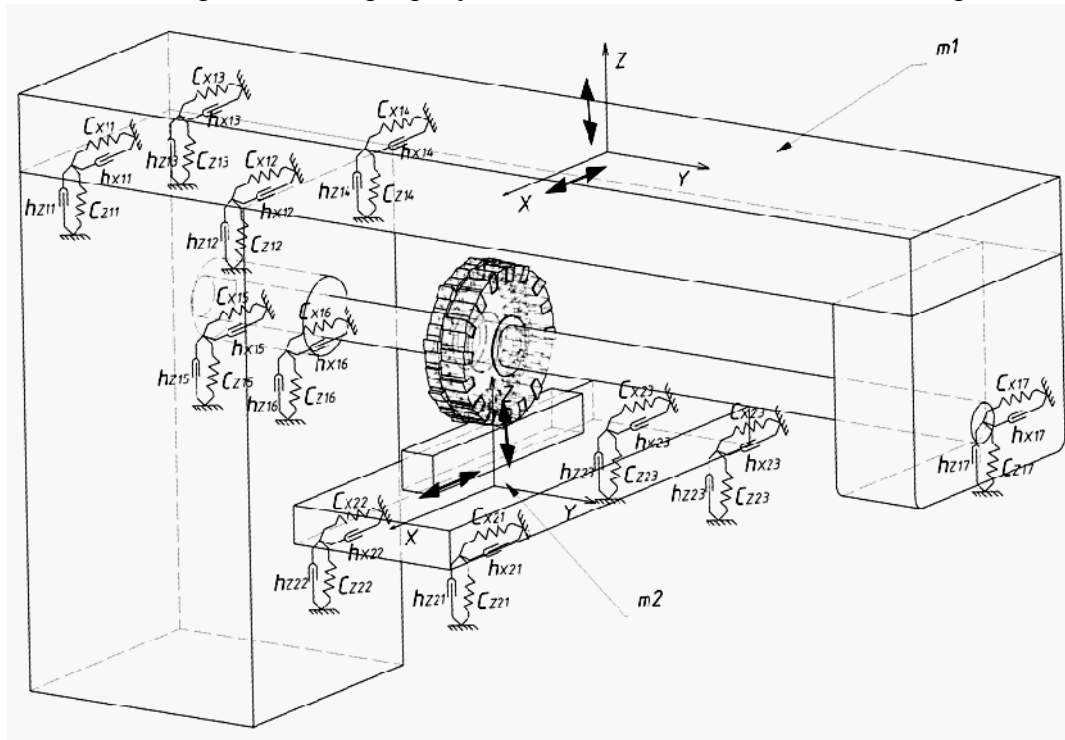


Рис. 1 - Розрахункова схема динамічної системи верстата

Динамічна система верстата розділена на чотири підсистеми: підсистема привода головного руху; підсистема шпindelній групи; процес різання та динамічна підсистема супорта (рис. 2).

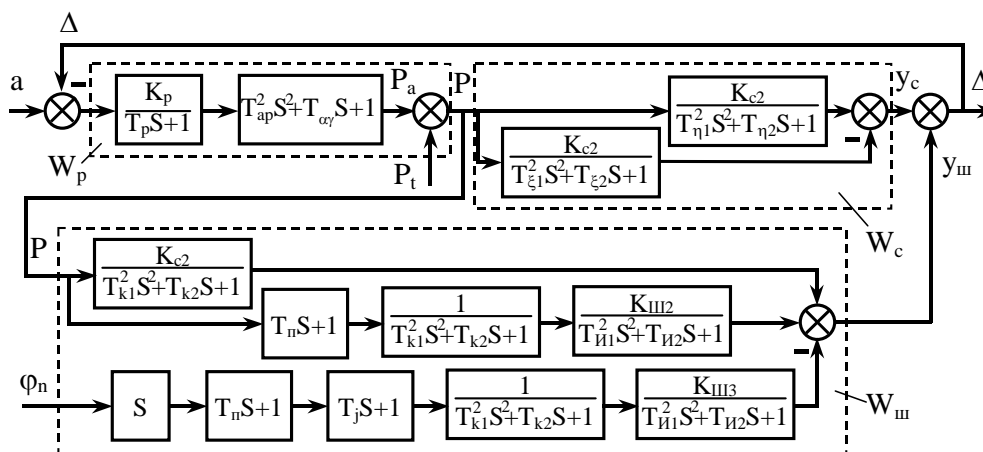


Рис. 2. Структурна математична модель підсистем, що включає підсистеми шпиндельної групи ( $W_{ш}$ ), супортної групи ( $W_c$ ) та процесу різання ( $W_p$ )

При розробці математичної моделі використані наявні в літературних джерелах класичні розробки математичних моделей окремих підсистем верстата. Зокрема моделі динамічної підсистеми супорта, процесу різання та підсистеми шпиндельної групи прийняті у вигляді структурних моделей згідно [1]. Дані моделі представлені у вигляді структурної схеми (рис. 1) відповідно до розробки [2].

Виходом даної математичної моделі є динамічна похибка обробки  $\Delta$  яка визначена у вигляді функціональної залежності від часу  $\Delta(t)$  та відповідного зображення по Лапласу  $\Delta(s)$ . Модель має два входи:  $a(t)$  - відповідає імітаційному навантаженню у вигляді випадкової зміни глибини різання;  $\varphi_n(t)$  являє собою динамічну складову кута повороту зубчатої передачі шпинделя. Для цих входів також визначені зображення по Лапласу  $a(s)$  і  $\varphi_n(s)$ . Останній вхід  $\varphi_n(s)$  є виходом математичної моделі динамічної підсистеми привода головного руху.

Описана модель реалізована у вигляді S – моделі пакету Matlab. На основі результатів імітаційного експерименту отримані дані які використані для навчання моделі у вигляді нейронної мережі.

При використанні математичної моделі у вигляді нейронної мережі, був проведений комплекс розрахункових експериментів за допомогою яких було визначено (теоретично) вплив технологічних факторів на характеристики процесу імітаційного навантаження. Для кожного виду навантаження були визначені тимчасові реалізації процесу обробки і на її основі розраховані кореляційна функція і визначено спектр потужності процесу обробки.

Розроблено методику обробки отриманої інформації. Оскільки коливання, що виникають при роботі верстата, можуть розглядатися як стаціонарні випадкові процеси, то можна визначити статистичні характеристики процесів, використовуючи апарат статистичної динаміки. При цьому дисперсія дає уявлення про потужність коливальних процесів і рівень коливань, спектр дозволяє оцінити розподіл енергії коливань по частотах, і визначити частотні характеристики пружної системи верстата.

## Список літератури

- 1 Вейц В.Л., Дондошанский В.К. Чиряев В.И. Вынужденные колебания в металлорежущих станках – М: Машгиз, 1959 –289 с.
- 2 Струтинский В.Б. Математична модель спектральних характеристик флуктуацій кутової швидкості шпинделя металорізального верстата. Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту, 1999, № 9, стор.10...19.

УДК 621.951.4

Лимаренко О.М., к.т.н., доц, Хамрай В.В., аспірант, Романов О.А., аспірант  
Одеський національний політехнічний університет, м.Одесса, Україна

### РОЗВИТОК СТУДЕНТСЬКИХ ІНЖЕНЕРНИХ ЗМАГАНЬ «ФОРМУЛА СТУДЕНТ SAE» В УКРАЇНІ

Проекти формула студент SAE замислювались, насамперед, як освітні проекти, які дозволяють усунути у студентів-випускників розрив між знаннями, отриманими при навчанні у вищому навчальному закладі і навичками, потрібними для їх майбутньої роботи. Участь у проекті дозволяє сформувати у студентів уяву не тільки про те, як правильно спроектувати і створити готовий виріб, але і як забезпечити його інформаційну підтримку, маркетинг, як пройти шлях від ідеї до конкурентноспроможного продукту. Саме тому для багатьох крупних компаній, які підтримують студентські команди, проект став справжньою кузницею кадрів, а колишніх учасників проекту, сьогодні можна зустріти інженерами в топ-командах Формули-1.

До офіційної серії Формули SAE зараз входять три Північноамериканських етапи, найбільший з яких – етап на гоночному кільці в Мічігані, в якому беруть участь до 120 команд і майже 2000 студентів, а також етапи в Англії, Німеччині, Італії, Австрії, Австралії, Бразилії і Японії. Крім того регулярно проводяться змагання, які не включені до офіційної серії, наприклад в Іспанії, Угорщині, Чехії, Канаді, Китаї.

До Європи Формула SAE прийшла через Великобританію, де у 1998 році були організовані перші Європейські змагання, в яких прийняло участь всього 4 команди, по 2 із США та Великобританії. Зараз в цьому етапі беруть участь близько 110 команд з усіх сторін світу. Він проводиться на всесвітньо відомій трасі Формули-1 в Сільверстоуні. Англійський етап підтримує Асоціація інженерів-механіків (ImechE).

Слід відмітити, що перша команда Німеччини з'явилась у 1999 році, але через 10 років їх кількість наблизилась до 100. Етап в Німеччині – один з найпрестижніших, проходить на легендарній трасі Хоккенхаймринг. Не дивлячись на те, що вперше він пройшов у 2006 році, уже тоді в ньому прийняло участь близько 40 команд вищих навчальних закладів світу. А в 2009 році після відкриття реєстрації через інтернет всі 78 місць заліку автомобілей з ДВС (більше не вміщують бокси на трасі) були зайняті вже через 8 секунд і близько 50 команд опинились у списку очікування. У зв'язку з цим зараз при реєстрації потрібно пройти тест на знання регламенту. Так що тепер змагання починаються ще до початку етапу. Спочатку, етап підтримувався німецькою Асоціацією автомобільних інженерів (VDI). У 2010 році етап включено до офіційної серії SAE (рис. 1). В цьому ж році паралельно із змаганнями автомобілей з двигунами внутрішнього згоряння, на етапі був організований і окремий залік для електромобілей, в якому прийняли участь відразу 30 команд «Формула-електрик».



Рис. 1. Етап змагань Формула-студент Англія 2015 (автодром Сільверстоун)

Піонером розвитку студентського руху «Формула студент» в Україні є Одеський національний політехнічний університет (ОНПУ), де у 2011 році була створена студентська інженерно-спортивна команда FS ONPU. Вже через рік вона пройшла реєстрацію на офіційний етап до Італії, але помилки в організації та підготовці супроводжувальних документів не дозволило одеським політехнікам виїхати на змагання.

В 2013 році команда FS ONPU дебютувала на змаганнях в Угорщині, де успішно пройшла статичні випробування із своїм першим автомобілем.

Отримавши безцінний досвід і оцінивши рівень європейських команд в 2014 році студентська команда представила на змаганнях в Угорщині оновлений автомобіль (рис. 2), який був непогано оцінений суддівською колегією і навіть посів 20 сходинку із 45 команд в статичному етапі змагань.



Рис. 2. Команда ОНПУ на змаганнях в Угорщині в 2014 році

Відзначимо, що кожна команда на змаганнях «Формула студент» проходить через строгий процес тестування. Змагання діляться на статичну і динамічну групи. При цьому, до динамічних тестів допускаються тільки команди, які пройшли обов'язкову технічну інспекцію.

До статичних тестів входять:

1. Презентація бізнес плану – студентська команда повинна розробити бізнес-план на виробництво, просування і реалізацію дрібної партії розроблених автомобілів. Необхідно презентувати розробку і переконати авторитетних суддів, які виступають в ролі інвесторів, у високому рівні

розробленого проекту.

2. Захист конструкції – команда повинна обгрунтувати колегії фахівців про використані в автомобілі конструкторські рішення. Тут студенти надають для оцінювання конструкторську і технічну документацію, розрахунки, дані з випробувань і тестувань.

3. Звіт про вартість виготовлення – команда повинна надати на перевірку фахівцям звіт про вартість виготовлення автомобіля дрібною партією.

До технічної інспекції входить: технічний огляд автомобілю; тест на похилому столі; тест на шум; тест на гальмування.

Найцікавіший етап змагань це безумовно динамічні тести, як включають в себе: змагання на прискорення автомобілю; змагання на маневреність; змагання на точність керування; гонка на витривалість; перевірка енергетичної ефективності автомобілю.

Влітку 2015 команда FS ONPU змагалась з провідними технічними вузами світу на етапі Формула SAE у Великобританії, на трасі Формули 1 в Сільверстоуні.

Відмітемо, що на деяких статичних етапах Одеські політехніки обійшли по балам представників Оксфорда, Кембриджа Саусгемптона та інших представників авторитетних технічних університетів Європи.



Рис. 3. Команда ОНПУ разом з найуспішнішим конструктором F1 Россом Брауном

Очевидно, що, підтримка викладачами і науковцями у вищих навчальних закладах України студентських змагань «Формула студент» сприяє розвитку інженерної думки, нестандартного підходу студентів до рішення технічних завдань, уміння знайти в реальних, складних умовах спонсорів і засоби на спорудження автомобіля, а також багатьох інших якостей, володіння якими робить фахівця привабливим для представників промисловості і комерційних фірм.



Рис. 4. Команда Формула студент ОНПУ в боксі автодрому Сільверстоун (Англія 2015)

Наприклад кожен рік до команди «Формула студент» приходять у середньому 10 нових студентів. В Україні близько 20 вищих навчальних закладів які спроможні організувати та надати наукову і матеріальну підтримку команді «Формула студент». Тоді у осяжному майбутньому наша держава отримає тисячі інженерів екстрокласу, що безумовно буде потужним імпульсом до розвитку промисловості України.

Натхнені прикладом студентів Одеського національного політехнічного університету в Україні до змагань формула студент приєдналися молоді інженери НТУУ (КПІ), Харківський національний автомобільно-дорожній університет, та студенти Луцького технічного університету.

Тобто можна зробити припущення, що найближчим часом Україна отримає каскад кваліфікованих і талановитих інженерів в автотранспортній галузі і сучасному інжинірингу взагалі.

#### Список літератури

1. *Formula SAE Rules*. SAE International. – 2012. – 131 p.

УДК 62-50:621.941

**Петраков Ю.В., д.т.н., проф.**

НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

**УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ ОБРОБЛЕННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК**

Будь-який процес різання є квазістаціонарним, відбувається в замкненій пружній технологічній обробляючій системі і потребує перманентного управління. Сучасні верстати з ЧПУ надають широкі можливості з управління процесом різання як за формоутворюючою траєкторією за всіма координатами, так і за робочими рухами подачі, швидкості різання тощо. Для автоматизації підготовки виробництва на верстатах з ЧПК і підготовки управляючих програм в сучасному машинобудуванні широко використовуються САМ системи. Такі системи вирішують завдання з геометричного проектування траєкторій формоутворюючих рухів, проте зовсім не ураховують квазістаціонарність процесу різання, наявність пружних деформацій, вібрацій тощо. В більшості випадків призначення режиму різання виконується технологом-програмістом на підставі рекомендацій фірм виробників інструменту або власного досвіду.

Проте відомо [1], що процес різання має проектуватись з урахуванням наступної послідовності: по-перше його треба стабілізувати, по-друге оптимізувати на певному стабільному рівні і по-третє – скорегувати траєкторію для забезпечення заданої точності.

Для вирішення таких задач використовуються методи управління, що поділяються за часом надходження інформації, яка використовується для формування управління.

Управління за апріорною інформацією передбачає управління за даними, які є в наявності до виконання оброблення на верстаті (креслення деталі, заготовки, матеріал, геометричні параметри інструменту, система координат верстату тощо). Управління має формуватись автоматично при комп'ютерному моделюванні процесу оброблення з визначенням головної характеристики процесу різання – аналога швидкості зрізування припуску (Material Removal Rate) і подальшим визначенням управління, що буде вирішувати задачу стабілізації, оптимізації, а якщо потрібно, то й корекції траєкторії.

Управління за поточною інформацією передбачає створення системи автоматичного управління (адаптивної системи), яка безпосередньо в процесі оброблення за сигналом зворотного зв'язку буде вирішувати задачу стабілізації процесу різання за визначеною характеристикою. Система отримує інформацію через роз'єм RS232 від стійки ЧПК, а управління здійснюється через апаратний модуль і енкодер ручної корекції автоматично за принципом зведення балансу.

Управління за апостеріорною інформацією в основному використовується для забезпечення необхідної точності оброблення за вимірюваннями або кожної попередньо обробленої деталі (при наявності партії деталей) або за вимірюваннями деталі після зрізування деякої частини припуску для корекції траєкторії на наступному (останньому) проході. Проектування скорегованої траєкторії здійснюється автоматично при комп'ютерному моделюванні з використанням даних вимірювань геометричних координат обробленої деталі без її зняття з верстату. Вимірювання виконуються за спеціальною програмою щупом з тензометричними датчиками типу Renishaw OMI 2T.

В доповіді представлений аналіз розвитку сучасних САМ систем в таких напрямках і порівняння досягнутих результатів з науковими роботами, що проводяться на кафедрі технології машинобудування НТУУ «КПІ».

**Список літератури**

1. *Петраков Ю.В.* Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПК. Монографія. Січкар, Київ-2011, 220с.

УДК 621.914

Цисар М.О., к.т.н., Псярнецька Т.О., Дєвицький О.А., к.т.н., Смоквина В.В., к.т.н.,  
Чепугов О.П., к.т.н.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ, м. Київ, Україна

### ТРИВИМІРНИЙ АНАЛІЗ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ЯК ЧАСТИНА ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

В сучасних умовах виробництва високої ефективності оброблення не повинна впливати на якість виготовлюваних поверхонь на фінішних операціях. Це може бути забезпечене використанням інструменту з високою різальною здатністю. Однак для ряду важкооброблюваних матеріалів, а саме: тверді сплави та композити на їх основі, кераміки, не вдається з мінімальною похибкою розрахувати оптимальні умови їх оброблення. Максимальну кількість корисної інформації про характер фінішного оброблення визначається за значеннями параметрів шорсткості рельєфу обробленої поверхні деталі. Для цього існує ряд методик, які базуються на застосуванні наявних на ринку України профілометрів-профілографів. Проте ці прилади мають свої недоліки. Це пов'язано з відсутністю можливості використання їх для подальшого прогнозування ефективних умов оброблення.

Саме метод 3D-візуалізації на мікрорівні є тим самим інструментом для прогнозування різальної здатності інструменту, що визначається за параметрами шорсткості обробленої поверхні. Візуалізована тривимірна топограма обробленої поверхні (3D-зображення) несе корисну інформацію про характер процесу оброблення, тому її подальше ґрунтовне дослідження та опрацювання дозволить прогнозувати найбільш ефективні та оптимальні умови оброблення. Тому розроблення конструкції високоточного приладу для візуалізації рельєфу поверхонь деталей з важкооброблюваних та композиційних матеріалів є актуальною науково-технічною задачею, оскільки даний прилад може знайти широке застосування для вимірювання параметрів шорсткості, мікрорельєфу обробленої поверхні деталі із подальшою її візуалізацією методом кубічних сплайнів.

В галузі машинобудування з метою прогнозування якості обробленої поверхні та різальної здатності інструменту безпосередньо в процесі оброблення широко поширені способи, що базуються на оцінці сигналу акустичної емісії та подальшому опрацювання зареєстрованого сигналу й визначенню по ньому значення шорсткості обробленої поверхні деталі. Зокрема, відомий спосіб визначення шорсткості поверхні деталі при обробленні на металорізальному верстаті [1], що базується на реєстрації сигналу акустичної емісії та визначення по ньому шорсткості поверхні деталі по відношенню площ спектрів зареєстрованого сигналу акустичної емісії та наперед визначеного еталонного сигналу акустичної емісії. В свою чергу, в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України розроблена методика кубічних сплайнів, що знайшла застосування в інженерії поверхні, отриманої шліфуванням інструментом з надтвердих матеріалів (НТМ) [2, 3].

#### Список літератури

1. Патент 2163182 России, G01 B7/34. Способ определения шероховатости поверхности детали при обработке на металлорежущем станке / С.Н. Дорофеев, А.С. Горшков, В.В. Летуновский, В.А. Моисеев, Ю.И. Гордеев.
2. Грабченко А.И. 3D – моделирование алмазно-абразивных инструментв и процессова шлифования: учеб. пособие / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 364с.
3. Петасюк Г.А. Построение численных математических моделей процессов алмазно-абразивной обработки с применением кубических сплайнов // Сверхтвердые материалы . – 1965. - №5. – С.30-35.

УДК 621.9.06

Ковальов В.А., к.т.н. доц.

НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### ФОРМУВАННЯ РЕЛЬЄФУ ПОВЕРХОНЬ КОНТАКТУВАННЯ ДЛЯ РОБОТИ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ЗМАЩУВАННЯ

На сьогоднішній день проблема довговічності підшипників ковзання, що працюють при високих контактних навантаженнях і швидкостях відносного переміщення спряжених поверхонь до 10 м/с в умовах обмеженого періодичного змащування пластичними мастильними матеріалами залишається актуальною.

Такі підшипники широко використовуються в тягачах, екскаваторах, вантажних автомобілях і умови їх експлуатації характеризуються високими знакозмінними динамічними навантаженнями, значним перепадом температур навколишнього середовища, підвищеною запиленістю.

Практикою експлуатації встановлено, що довговічність таких вузлів тертя недостатня. Часто на зношених поверхнях контактуючих деталей мають місце пошкодження у вигляді задирів, напливів, що викликані схватуванням з бронзовими втулками.

Основною причиною появи таких дефектів є труднощі переносу мастильного матеріалу в зону тертя при високих контактних напругах внаслідок чого швидкість зношування масляної роздільної плівки перевищує швидкість її відновлення, наступає так зване «плівкове голодування» і безпосередній контакт поверхонь тертя.

Одним із шляхів вирішення проблеми є формування регулярних макрорельєфів на високотвердих робочих поверхнях для забезпечення достатнього запасу і надійне перенесення мастильного матеріалу і надійного перенесення його в зону тертя.

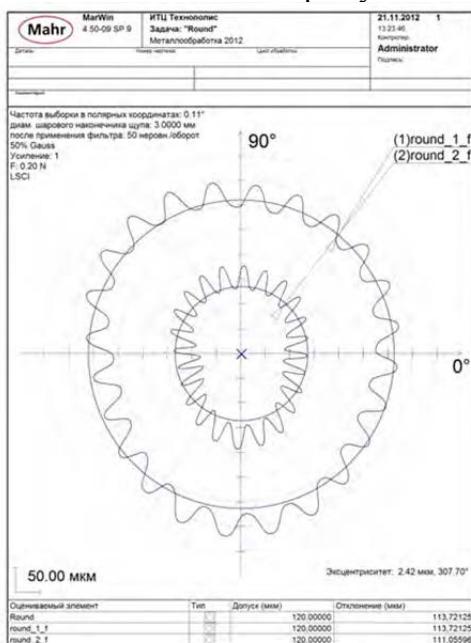


Рис.1. Круглограма макропрофільованої поверхні

На рис.1 представлена круглограма макропрофільованої поверхні загартованої сталеві втулки. Регулярний макрорельєф характеризується розташуванням ділянок безпосереднього контактування на поверхнях тертя відповідно до умов експлуатації вузла, що забезпечує стабільний перенос мастильного матеріалу в робочу зону та надійне відновлення масляних роздільних плівок. Відсутність умов виникнення зон безпосереднього контактування виключає можливість виникнення задирів і руйнування робочих поверхонь та підвищує довговічність важко навантажених підшипників ковзання в декілька разів.

### Список літератури

1. Келле В.В., Крагельский И.В., Гитис Н.В. Расчетная оценка условий «пленочного голодания» при адсорбционном и хемосорбционном механизме восстановления пленок // Проблемы трения и изнашивания. - К.: Техніка, 1981. Вып.21.-С.3-10.
2. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. – М. Наука, 1974.-111с.
3. Крейцер Р. Причины разрушения подшипников скольжения // Труды международной научн. конф. «Трение, износ и смазочные материалы». Ташкент, 1965.-12-17.



УДК 621.923.6

Усов А.В. д. т. н., проф.

Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ

Отличительной особенностью операции шлифования является выделение большого количества теплоты, основная часть которой воспринимается обрабатываемой деталью и вызывает на отдельных ее участках структурные изменения — прижоги. Эти дефекты способствуют уменьшению исходной твердости поверхности, образованию растягивающих остаточных напряжений, снижают контактную выносливость, усталостную прочность деталей.

Для большой группы металлов и сплавов не подверженных структурным превращениям в процессе механической обработки и особенно шлифования характерным видом брака являются дефекты типа трещин, существенно снижающие эксплуатационные свойства изделий [1,2,3,4,5].

Выделяют следующие типы трещин при обработке материалов, предрасположенных к такому виду дефектов:

- сетка поверхностных трещин, залегающих на относительно небольшую глубину /до 0,5 мм — 1,5 мм/;
- магистральные глубинные трещины / 1-10 мм/;
- подповерхностные замкнутые трещины;
- пограничные трещины, формирующиеся при обработке кусочно-однородных материалов / детали с покрытиями/.

Характер и интенсивность трещинообразования во многом определяется теплофизическими свойствами обрабатываемых материалов, их структурой, наследственностью предыдущих технологических операций, режимами механической обработки. При эксплуатации деталей, поверхностный слой которых содержит трещины, разрушение изделий происходит по местам их скопления.

Дефекты на обработанных поверхностях деталей резко снижают /иногда до 30 раз/ их эксплуатационные показатели и являются недопустимыми.

Поэтому задача определения технологических условий бездефектной обработки и управления качеством поверхностного слоя изделий из материалов, склонных к трещино- и сколообразованию является весьма актуальной. Это предопределяет необходимость изучения механизма формирования дефектов при механической обработке [6, 7, 8].

Качество поверхностного слоя формируется под действием термомеханических явлений, сопровождающих механическую обработку. Поэтому в качестве основного показателя физико-механического состояния обрабатываемых поверхностей используется теплонапряженность обработки. На основании разработанных моделей температурных полей изучаются закономерности образования дефектов типа прижогов и технологические возможности их устранения в зависимости от теплофизических свойств обрабатываемых материалов, режимов обработки, конструкции и характеристик применяемых инструментов.

Предрасположенность магнитных сплавов к трещинообразованию при механической обработке многие исследователи связывают с особенностями их магнитной и кристаллической структуры, предназначенной для получения высоких магнитных свойств. Отсутствие каких-либо количественных связей трещиностойкости магнитов с другими свойствами не позволяет однозначно пользоваться имеющимися рекомендациями по бездефектной обработке. Имеются исследования влияния структурных превращений в сталях на образование шлифовочных трещин, согласно которым наличие большого количества

аустенита, в подповерхностном слое деталей приводит к образованию растягивающих напряжений, которые реализуются в виде хрупких трещин.

Структурные превращения не могут быть “самостоятельной” причиной возникновения шлифовочных трещин, так как структурные напряжения, достигающие разрушающих значений, формируются на протяжении значительного промежутка времени. Шлифование характеризуется кратковременностью, большими скоростями нагрева и охлаждения, при которых структурные изменения незначительны, а термомеханические напряжения достигают предельных значений.

Механизм образования трещин в поверхностном слое деталей с покрытиями объясняют действием временных растягивающих температурных напряжений, превышающих предельные значения, а отслаивание покрытия от основного металла — действием остаточных напряжений в поверхностном слое. Рассматриваемые при этом модели напряженно-деформированного состояния деталей с покрытиями учитывают кусочную неоднородность /покрытие-матрица/ и полностью отсутствуют исследования влияния неоднородности самого покрытия на механизм дефектообразования.

Феноменологический подход в изучении причин трещинообразования материалов склонных к этому виду дефектов не позволяет вскрыть механизм зарождения и развития шлифовочных трещин [9].

Интенсивность появления трещин во многом определяется наличием различного рода неоднородностей, возникающих в поверхностном слое по ходу технологии изготовления детали. Особенно опасными с точки зрения зарождения трещин, являются такие наследственные дефекты, как флокены, остроконечные полости, инородные включения. Поэтому построение теории трещинообразования при шлифовании с использованием критериев механики разрушения, возможно лишь на основе углубленного изучения механизма зарождения трещин в вершинах концентраторов, которыми являются металлургические, структурные и технологические дефекты [10].

Для управления качеством детали при шлифовании необходимо изучить закономерности формирования термомеханического состояния поверхностного слоя с учетом его неоднородности. Высокопроизводительное бездефектное шлифование материалов, чувствительных к трещинообразованию, необходимо осуществлять с учетом наследственных дефектов на предельных режимах, при сохранении равновесного состояния, еще не вызывающих образование трещин.

При постановке задачи о повышении качества шлифования деталей возникает проблема оценки влияния неоднородностей, выбора режимов и характеристик инструмента, смазочно-охлаждающей среды использование которых исключает прижого- и трещинообразование на обрабатываемых поверхностях. Широкая номенклатура материалов, подверженных трещинообразованию, многообразие их свойств, размеры, ориентация, размещение и распределение наследственных дефектов способствовали тому, что имеющиеся в настоящее время рекомендации по устранению шлифовочных трещин при обработке поверхностей изделий не могут быть общепринятыми. В связи с этим разработаны предпосылки для оптимизации термомеханического состояния поверхностного слоя с учетом его дефектности, исключающие возникновение шлифовочных дефектов типа трещин и прижогов.

Решение указанных задач позволило не только изучить прямую технологическую задачу финишной обработки — обеспечение бездефектного шлифования материалов, предрасположенных к трещино- и прижогообразованию, но и перейти к технологии изготовления материалов “малочувствительных” к указанным дефектам за счет технологической наследственности, формирующей структуру, физико-механических свойств поверхностного слоя, начиная от способов получения заготовок и заканчивая чистовым алмазно-абразивным шлифованием.

### Список литературы

1. Якимов А.В. Теплофизика механической обработки [Текст] /А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов// К.; Одесса: Лыбидь, 1991.– 240 с.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов [Текст] / А.Н. Резников/ / М. "Машиностроение", 1981г.-279 с.
3. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности.[Текст] / В.А. Сипайлов //М., "Машиностроение", 1978 г.– 167 с.
4. Ящерицын П.И.Технологическая наследственность в машиностроении.[Текст] / П.И. Ящерицын, Э.В.Рыжов, В.И. Аверченков// Мн., "Наука и техника", 1977 г.– 256 С
5. Jacobus K., Devor R.E, Kapoor S.G. Machining-Induced residual stress: Experimentation and modeling //Transaction of the ASME: Journal of manufacturing science and engineering. 2000. Vol. 122,1. P. 20–31
6. Усов А.В. Возникновение трещин при алмазно-абразивной обработке сталей.[Текст]. /А.В. Усов, Г.Д. Григорьян// Ж. "Сверхтвердые материалы", № 6, К., Наукова думка, 1982 г.–С.43 - 55 .
7. Усов А.В. Причины появления дефектов при шлифовании магнито-твердых сплавов.[Текст]./А.В.Усов, Е.АКормилицына, Ф.М. Сальковский //Ж. Технология электротехнического производства, вып. 4, 1982 г.–С. I -3 .
8. Усов А.В. Анализ условий возникновения шлифовочных трещин и пути их устранения.[Текст]./ А.В. Усов, А.В.Якимов, Г.Д. Григорьян.// Ж. Вестник машиностроения № II, 1980 г.– С. 27 - 31 .
9. Подзей А.В., Шлифовочные дефекта и пути их устранения /А.В. Подзей, А.В. Якимов // Ж. "Вестник машиностроения", № 3, 1972 г.– 41 - 43 с.
10. Усов А.В. Повышение эффективности процесса бездефектного шлифования материалов и сплавов, предрасположенных к трещинообразованию / А.В. Усов // Дис. на соиск. уч. степ. д.т.н., К., 1991г-426 с.

---

УДК 681.513.2

Симонюк В.П., к.т.н., доц.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

### СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РУХУ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА ВІДПОВІДНО ЗМІНИ ПОРИ РОКУ

Основним визначником клімату нашої планети є сонячна енергія. Потік її досить істотно змінюється протягом року і залежно від широти місцевості обумовлює кліматичну зональність - різницю температур, вологості, тиску і вітру на Землі.

Географічно, Україна знаходиться у Центральній-Східній Європі. В Україні річне надходження сонячного випромінювання досить високе і додатне для розвитку систем теплопостачання з використанням сонячної енергії.

Сонячний колектор - установка для прямого перетворення енергії Сонця в теплову енергію. Принципи сонячного опалювання відомі з давнини - люди нагрівали воду за допомогою Сонця до того, як інші види палива стали пріоритетнішими. Річна кількість сонячної енергії майже в 15 000 разів перевищує потреби населення нашої планети, проте лише незначна її частина використовується на господарські потреби. Сонячні колектори, це пристосування, що безпосередньо використовують енергію Сонця. Вони були розроблені близько двохсот років тому.

Сонячний колектор (геліоколектор) – це пристрій, який призначений для поглинання сонячної енергії, яка переноситься видимим та ближнім інфрачервоним випромінюванням із подальшим її перетворенням в теплову енергію, придатну для використання.

Принцип роботи сонячних колекторів доволі простий. Будь-який сонячний колектор, незалежно від його типу чи конструкції, перетворює енергію Сонця в теплову енергію для обігріву, гарячого водопостачання, нагрівання басейну тощо. Втім, геліосистеми з використанням вискоелективних вакуумних сонячних трубок здатні працювати цілий рік на відміну від плоских геліоколекторів. Вакуумна тепла трубка виготовляється зі

спеціального зміцненого боросилікатного скла. Зовнішня труба такого колектора є прозорою, а внутрішня - покрита високоякісним селективним покриттям, яке забезпечує максимальне поглинання сонячного тепла при мінімальному рівні рефлексії (тобто, мінімальному рівні відбиття сонячних променів назад у атмосферу). Для уникнення теплових втрат між зовнішньою та внутрішньою трубками передбачено вакуум.

Сонячні водонагрівачі бувають двох типів: активного і пасивного. В сонячних водонагрівачах активного типу для циркуляції теплоносія через колектор використовується електричний насос. В системах пасивного типу в системі немає насоса.

Для пасивних водонагрівачів ґрунтується на природній циркуляції рідини в системі. На даний час, розроблені експериментальні зразки сонячних нагрівачів, в яких рідина перекачується насосом Стірлінга. Цей насос в свою чергу також отримує енергію від сонця.

В термосифонних (пасивних) системах рідина переміщується завдяки природній гравітації. Вона виникає через різницю щільності холодної і підігрітої рідини. Пасивні конвекційні системи дешевші від активних систем. При цьому вони не є дуже ефективними.

При розробці будь-яких сонячних колекторів чи їх комплексів, обов'язково повинна бути створена система слідкування за Сонцем. Ця система створює умови максимального використання сонячних променів і забезпечує рух колекторів за "рухом" Сонця протягом світлої пори доби.

Як відомо, Сонце протягом календарного року перебуває у чотирьох значущих точках, це зимове та літнє сонцестояння, які припадають на 21-22 грудня і 20-21 червня, а також рівнодення, яке припадає на 20-21 березня і 22-23 вересня.

Залежно від місця використання системи слідкування за Сонцем, необхідно враховувати пори року, час сходу та заходу Сонця, його відстань від небесного екватора. Ці параметри змінні в часі і потребують щоденного коректування нащо і повинна бути розрахована система слідкування за Сонцем до відповідної широти місцевості на Землі.

#### **Список літератури**

1. ДСТУ ISO 9459-1:2005 Теплопостачання сонячне. Системи водогрійні побутові. Частина 1. Визначення робочих характеристик методами випробування в закритих приміщеннях (ISO 9459-1:1993, IDT)
2. ДСТУ ISO 9806-2:2005 Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 2. Кваліфікаційні випробування (ISO 9806-2:1995, IDT)
3. ДСТУ ISO 9806-3:2005 Колектори сонячні. Методи випробування. Частина 3. Теплові характеристики (лише відчутне теплопередавання) та перепад тиску незаскленних сонячних колекторів для нагрівання рідини (ISO 9806-3:1995, IDT).

---

**УДК 681.7.022; 681.7.03; 681.7.062**

**Головко Л.Ф., д.т.н., проф., Блощин М.С. к.т.н., ас., Хорошуля М. В. студ, Сапура І.М. студ, Славінський А.Р. студ.**

НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

#### **ОСОБЛИВОСТІ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОЛІТУ ПРИ ЕЛЕКТРОЛІТНО-ПЛАЗМОВОМУ ПОЛІРУВАННІ ПОВЕРХОНЬ МЕТАЛЕВИХ ДЗЕРКАЛ ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ**

За допомогою електролітно-плазмового обробки ефективно вирішуються багато завдань фінішної обробки металевих виробів. Разом з тим залишається невирішеним ряд технологічних питань, які обмежують широке застосування електролітно-плазмового полірування в виробничих умовах [1]:

- обмеження розмірів оброблюваних виробів, яке пов'язане з обмеженими габаритами робочої ванни;

- величина електричного струму, яка може перевищувати допустимі межі;
- обробка довгомірних виробів (стрічки, труби, дріт і ін.);
- неможливо обробляти внутрішню поверхню пустотілого виробу або поверхню в глибоких отворах і порожнинах.

Для вирішення зазначених завдань є ефективним використання струменевих течій електроліту, які дають можливість суттєво розширити технологічний спектр електролітно-плазмового впливу і номенклатуру оброблюваних деталей. При цьому площа катода повинна бути в рази більшою за площу поверхні полірування, в іншому разі відбувається зривання процесу з імпульсного на дуговий, що унеможливує використання даного процесу для фінішного полірування дзеркальних поверхонь. Виходом з положення пропонується подача струменю електроліту вертикально вгору з обов'язковим профілюванням електроду – інструменту відповідно до оброблюваної поверхні за корегованою схемою (рис. 1).

На відміну від звичайної електрохімії, (крізь в'язкий шар) при електроплазмовому поліруванні використовують нейтральні не концентровані розчини солей. При цьому вода є джерелом гідроксогрупи та водню з відповідними наслідками.

При електрохімічній (ЕХО) та електролітно-плазмовій (ЕПО) обробці розміри робочої поверхні електрода-інструмента (ЕІ) завжди відрізняються від розмірів оброблюваної поверхні на величину міжелектродного зазору (МЕЗ). У першому наближенні при проектуванні ЕІ досить побудувати криву, еквідистантну обробленої поверхні й віддалену від її на величину МЕЗ. Однак, у зв'язку з тим, що величина МЕЗ непостійна в зоні обробки, для забезпечення необхідної точності деталі в більшості випадків необхідно робити коректування робочої поверхні катода або оптимізувати режими обробки.

При розрахунку форми ЕІ, як правило, приймають режим обробки стаціонарний, а початковий профіль інструмента (до коректування) еквідистантний профілю деталі. При проектуванні електродів виходять із концепції про ідеальний процес ЕПО й однорідності електричного поля. При ЕПО поверхня можна обробити різними електродами, тому при проектуванні ЕІ необхідно з безлічі електродів визначити оптимальний, що забезпечує максимальну продуктивність.

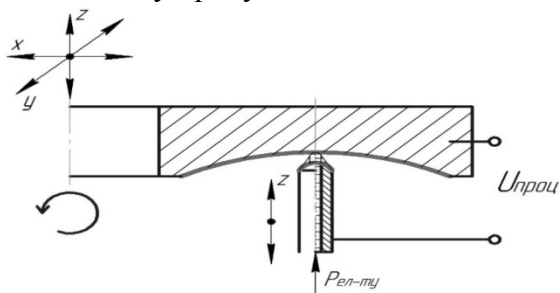


Рис. 1 Схема електролітно-плазмового полірування поверхонь дзеркальних систем лазерних пристроїв

Все різноманіття схем [2] ЕХО та ЕПО при проектуванні ЕІ можна розбити на дві групи: копіювально-прошивальну (профільований інструмент); протягання, прошивання, розрізування (непрофільований інструмент). Для першої групи характерно одноразове формування остаточно обробленої поверхні всієї робочої поверхні катода. Необхідна анодна поверхня повністю задана й може бути використана при проектуванні катода. Для другої групи остаточно оброблена поверхня

формується не всією поверхнею катода. У цьому випадку розміри й форма анодної поверхні задані не повністю, тому при проектуванні електрода їх потрібно або задавати, або визначити з додаткових умов. Часто заздалегідь задається форма ЕІ, а розміри його визначають у результаті розрахунку. Геометрія отвору подачі формує режим течії електроліту. На точність обробки буде впливати форма електроду, що проектується й виготовляється під відповідну геометрію профілю поверхні полірування. Оптимізація параметрів обробки дозволяє підвищити продуктивність полірування й зменшити тепловий вплив на поліровану поверхню, тим самим знижуючи можливі залишкові напруженості.

### Список літератури

1. Бартл Д., Мудрох О. *Технология химической и электрохимической обработки поверхности металлов.* - М., 1961.
2. Беккерт М., Клемм Х. *Справочник по металлографическому травлению.* Пер. с нем. / М. Беккер, Х. Клемм. - М.: Металлургия, 1979. - 336 с.

УДК 681.7.022; 681.7.03; 681.7.062

Головко Л.Ф., д.т.н., проф., Блощин М.С. к.т.н., ас., Хорошуля М.В. студ,  
Задорожний В.О. студ, Славінський А.Р. студ,  
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

### ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОЛІТНО-ПЛАЗМОВОГО ПОЛІРУВАННЯ

Метод електролітно-плазмового полірування заснований на плазмових та електрохімічних процесах, що виникають в тонкій парогазовій оболонці у поверхні поміщеного в розчин металевого електроду під дією високої напруги.

Основною перевагою методу електроімпульсного полірування є його екологічна безпека. Не застосовуються кислоти, луги та інші шкідливі речовини в небезпечних концентраціях. Тонкий шар металу, що видаляється з поверхні в процесі обробки перетворюється в гідроксид і може бути легко відділений і утилізований. Процес полірування ведеться в розчині неорганічних солей з малою концентрацією, рідини для промивання не містять важких металів та інших речовин з ваговою концентрацією, це дозволяє експлуатувати обладнання на виробництвах, лабораторіях, які не мають станцій очистки стічних вод. Простота процесу не вимагає високих вимог щодо кваліфікації обслуговуючого персоналу.

В порівнянні з механічним поліруванням переваги методу більш очевидні в разі полірування виробів складної форми. Якщо для полірування тіл обертання і плоских поверхонь процес механічного полірування може бути досить просто автоматизований, автоматизація і механізація полірування виробів складної форми викликає певні труднощі і вимагає великої кількості ручної праці, особливо для дзеркальних поверхонь після алмазного точіння.

При механічному поліруванні відбувається зрізання виступів поверхні. При цьому в мікробудовах можуть залишатись дефекти у вигляді неметалевих включень газових включень, що негативно впливає на якість дзеркальної поверхні. При застосуванні електролітно-плазмового полірування підвищується електрохімічна однорідність поверхні, зменшується шорсткість, як наслідок, зменшується контактуюча площа, видаляються сторонні включення.

Для полірування струмопровідних матеріалів активно розвивається метод електролітно-плазмового полірування, відомий також як метод електроімпульсного або електролітнонарядного полірування. Метод електролітно-плазмового полірування заснований на електророзрядних явищах в системі «метал-електроліт», при цьому обробляється деталь є анодом. Полірування металів відбувається в області напруги 200-350 В і щільності струму 0,2..0,5 А/см<sup>2</sup>. При напрузі понад 200 В навколо анода при переході від бульбашкового кипіння до плівкового утворюється стійка тонка (50-100 мкм) парогазова оболонка. Напруженість електричного поля у парогазовій оболонці досягає 10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup> В/см. У парогазовій оболонці протікає складний комплекс фізико-хімічних процесів (плівкове кипіння в електричному полі, теплоперенос, іонізація парів, рух електричних зарядів). Поблизу мікробудов напруженість електричного поля зростає, і на цих ділянках виникають мігруючі по поверхні мікроплазмові розряди, які забезпечують комплексні хімічний і фізичний вплив на матеріал поверхні виробу. У мікророзрядах виділяється значна енергія і спостерігається інтенсивний процес зниження висоти мікронерівностей поверхні, що призводить до її полірування.

До недоліків електролітно-плазмового полірування слід віднести підвищену в порівнянні з електрохімічним і механічним поліруванням енергоємність процесу. Також на якість полірування в тій чи іншій мірі впливає кристалічна структура металу і технологія попередньої обробки.

Чітко контролюючи параметри процесу обробки можливо реалізувати високоточне полірування дзеркальних поверхонь за рахунок оптимізації площі протікання процесу.

УДК 539.376

Погребняк А.Д. к.т.н., с.н.с.

Институт механики им. С.П.Тимошенко НАНУ, г. Киев, Украина

### ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДВУХОСНОМ КОМБИНИРОВАННОМ СИММЕТРИЧНОМ МНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Создание современных машиностроительных конструкций непрерывно связано с совершенствованием методов расчета на прочность. В первую очередь это относится к проблеме усталостного разрушения в связи с тем, что многие элементы конструкций в процессе эксплуатации подвержены комплексу различных видов комбинированного нагружения статическими и циклическими нагрузками. В таких условиях оказываются лопатки и диски газовых турбин, вращающиеся валы, элементы летательных аппаратов, двигателей внутреннего сгорания.

Решение задач усталости применительно к комбинированному нагружению осуществляется на основе критериев усталостного разрушения либо различного рода эмпирических зависимостей, описывающих диаграммы предельных напряжений. К сожалению, использование вышеуказанных подходов для решения практических задач не обеспечивает достаточно надежной оценки предельного состояния конструкционных материалов.

В работах [1-3] предложена модель предельного состояния для одноосного асимметричного нагружения, базирующаяся на использовании степенной трансцендентной функции, обладающая существенной гибкостью. Она позволяет описать практически все формы диаграмм предельных напряжений для большинства конструкционных материалов – выпуклые, вогнутые, линейные. Более того, оказалось возможным обобщение структуры модели на более сложные режимы нагружения.

Ниже решается задача оценки предельного состояния сложнлегированной стали, подверженной двухосному комбинированному симметричному нагружению циклическим кручением и циклическим растяжением-сжатием. Рассматривается случай стационарного режима нагружения при многоциклового усталости ( $n_R \geq 10^4$  циклов). При этом максимальные напряжения в цикле не превышают пределов текучести  $\sigma_Y$  и  $\tau_Y$ .

Зависимость между предельными амплитудами нормальных  $\sigma_a$  и касательных  $\tau_a$  напряжений двухосного комбинированного симметричного циклического нагружения задается, по аналогии с одноосным асимметричным циклическим нагружением, запишется в виде соотношений

$$\frac{\tau_a}{\tau_n(n_R)} - \left\{ \cos \left[ \frac{\pi}{2} \frac{\sigma_a}{\sigma_n(n_R)} \right] \right\}^\eta = 0 \rightarrow \frac{\sigma_a}{\sigma_n(n_R)} - \frac{2}{\pi} \arccos \left[ \frac{\tau_a}{\tau_n(n_R)} \right]^{\frac{1}{\eta}} = 0,$$

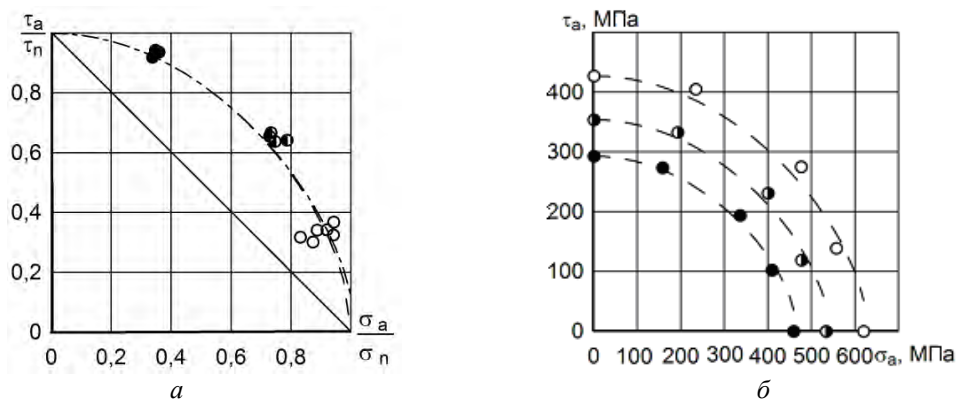
в которых граничные условия выполняются точно:  $\sigma_a = \sigma_n$  при  $\tau_a = 0$ ;  $\tau_a = \tau_n$  при  $\sigma_a = 0$ . Здесь  $\sigma_n(n_R)$  и  $\tau_n(n_R)$  – пределы ограниченной усталости при чистом изгибе и чистом кручении.

Раскладывая функции  $\cos$  и  $\arccos$  в ряд и ограничиваясь двумя или тремя членами ряда, можно получить приближенные оценки диаграмм предельных напряжений [3].

Вышеуказанные выражения содержат три группы материальных констант, подлежащих определению – предел ограниченной усталости при чистом растяжении-сжатии  $\sigma_n(n_R)$ , предел ограниченной усталости при чистом кручении  $\tau_n(n_R)$  и показатель степени  $\eta$ ,

отражающий чувствительность материала к двухосному комбинированному симметричному нагружению. Методика их определения подробно изложена в [3].

На рис. 1,а представлены результаты расчетов обобщенного предельного состояния



**Рис. 1 – Диаграммы предельного состояния стали JIS SNCM8:**  
**а – по параметру  $\nu = \tau_a / \sigma_a$  ; б – по параметру долговечности**

(линии) стали JIS SNCM8, под которым понимают предельное состояние, представляемое в виде зависимости между относительными значениями разрушающих амплитуд нормальных и касательных напряжений, инвариантной по отношению к числу циклов до разрушения по параметру  $\nu = \tau_a / \sigma_a$ .

Точки отражают соотношения  $\nu$  экспериментальных значений  $\sigma_a$  и  $\tau_a$ , равных 0,25 (○), 0,58 (◐) и 1,73 (●), заимствованных из [4].

Рис. 1,б отражает расчеты предельного состояния (линии) исследуемой стали по параметру долговечности  $n_R = 7 \cdot 10^4$  (○),  $10^6$  (◐),  $10^8$  (●) циклов. Расчеты выполнены с использованием значений параметров кривых усталости и показателя степени  $\eta = 0,54$ , определенного по данным дополнительного единичного эксперимента при асимметричном нагружении в условиях  $\sigma_a = \tau_a$ .

Анализ представленных результатов расчетов предельного состояния свидетельствует об удовлетворительном их согласовании с экспериментальными данными. Погрешность расчета предельных напряжений для данной стали не превышает 20%. Аналогичные расчеты предельного состояния выполнены для стали 20, стали StE 460 при комбинированном двухосном нагружении циклическим кручением и циклическим изгибом.

Таким образом, разработанный подход продемонстрировал эффективность оценки предельного состояния конструкционных материалов при двухосном комбинированном симметричном многоцикловом нагружении.

### Список литературы

1. Голуб В.П., Крижановский В.И. К оценке предельного состояния материалов при асимметричном многоцикловом нагружении // Пробл. прочности. – 1994. – № 4. – С. 3-15
2. Голуб В.П., Крижановский В.И. Об одном подходе к расчету сопротивления усталости в условиях концентрации напряжений при асимметричном многоцикловом нагружении // Пробл. прочности. – 1997. – № 6. – С. 41-52.
3. Голуб В.П., Крижановский В.И., Погребняк А.Д. Метод расчета усталостной прочности металлических и композитных материалов при асимметричном многоцикловом нагружении // Прикл. механика. – 2004. – Том 40, №11. – С. 106-115.
4. Tanaka K., Matsuoka S. The strength of JIS SNCM8 steel under combined alternating stresses // Advances in research on the strength and fracture of materials. – New-York: Pergamon Press, 1978. – Vol. 28. – P. 1161-1168.



УДК 621.01

Ткач І.І. асп., Кореньков В.М. к.т.н., доц.

НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

## СИНТЕЗ БАГАТОВАРІАНТНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Головний критерій ефективної роботи будь-якого підприємства - досягнення планових показників при мінімальних затратах. Останнім часом під ефективними технологіями управління виробництвом, насамперед, мають на увазі системи класу MES, що зв'язують воедино апаратний (збір даних), технологічний і бізнес рівні управління підприємством в єдиний інформаційний комплекс. Максимальний ефект від використання всіх цих підсистем можливо досягти лише за умови повної автоматизації її складових.

Однак, на сьогодні ми спостерігаємо картину, коли добре відомі комерційні MES рішення в основному орієнтовані на великі підприємства і, як правило, не можуть бути успішно використані малими і середніми підприємствами з причин: відсутності можливості оперативного адміністрування та внесення змін в налаштування систем (як результат – досить тривалий строк їх адаптації, якщо така взагалі можлива, до конкретної виробничої ситуації), що призводить до суттєвих втрат точності розрахунків у задачах планування; відсутність відносно недорогих апаратних засобів збору статистичних даних; відсутність формального представлення накопичених знань в умовах малих підприємств, на основі яких приймаються рішення в задачах планування.

Основною проблемою даної тематики являється розробка системи управління технологічними процесами підприємства. Для початку було поставлене наступне завдання: розробити систему збору даних, аналізу та відображення інформації про виробничі процеси в реальному часі направлену на забезпечення автоматизації виробництва, а також мінімізації загального виробничого циклу шляхом вирішення оптимізаційного планування.

Новизною даної тематики являється те, що ми хочемо використати методи машинного навчання в задачах структурного синтезу технологічного процесу, що дозволить скоротити термін технологічного підготовки за рахунок планування та виконання структурної оптимізації технологічного процесу

До стандартних видів машинного навчання відносять :

- регресію (regression): лінійна регресія, багатосарові перцептрони, RBF-нейромережі, методи опорних векторів для регресії.
- класифікація (classification): k найближчих сусідів, нейронні мережі, методи опорних векторів, дерева рішень.
- кластеризація (clusterization): k середніх, ієрархічна кластеризація, самоорганізуючі карти Кохонена, Гауссовські змішані моделі.
- навчання з підкріпленням (reinforcement learning): загальні, проблемно-незалежні моделі, моделі для зображень, звуку та тексту.
- еволюційні алгоритми (evolutionary algorithms).

При вирішенні даної проблеми було розроблено програмний комплекс на базі скриптів та забезпечення роботи програми в Web режимі по збору та зберіганню статистичних даних, які дають змогу моніторингу поточного стану верстатного обладнання, ріжучого інструменту, стану обробки деталей в режимі реального часу.

На сьогоднішній день проводиться розробка програмних засобів з аналізу статистичних даних на базі алгоритмів машинного навчання. В нашому випадку ми використовуємо методи дерева рішень на основі алгоритму CART (Classification and Regression Tree) - вирішення завдання класифікації і регресії, призначений для побудови бінарного (двійкового) дерева рішень; методу кластеризації (або кластерного аналізу) це задача розбиття множини об'єктів на групи (кластери), усередині кожної групи повинні виявитися «схожі» об'єкти, а об'єкти різної групи повинні бути якомога більш відмінні; задачі *job shop* (робочого цеху) для оптимізації виробничого циклу на підприємстві. Всі ці методи в цілому допоможуть розробити принципово новий програмний засіб спрямований на підбір оптимального технологічного процесу та швидкого переналаджування виробництва.

В результаті ми отримаємо систему, яка буде збирати статистичні дані проводити самонавчання та синтезувати типові рішення при розробці технологічних процесів на основі статистичних даних та проводити планування виробничого процесу без втручання людини.

УДК 621.787, 621.923

**Борис Р.С., к.т.н., доц., Вешневский П.С. ст., преп.**  
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев Украина

### **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБЧАСТИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫТЯЖКОЙ С УТОНЕНИЕМ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ**

В машиностроении на современном этапе находят широкое применение слоистые металлические композиции трубчатой формы (биметаллические трубчатые элементы – БТЭ). БТЭ, как правило используются для соединения трубопроводов из разнородных металлов в ответственных конструкциях аэрокосмической техники. Процессы пластического формоизменения двухслойных материалов на сегодня мало исследованы.

Традиционные методы (технологии) изготовления биметаллических деталей цилиндрической формы направлены на крупносерийное производство (металлургические технологии) [1, 2] или имеют высокую трудоемкость и специфику реализации (технологии с использованием энергии взрыва) [3]. Но в тоже время эти технологии экономически нецелесообразно использовать для изготовления единичных или малых серий БТЭ в условиях машиностроительных производств.

Таким образом, развитие теории пластического формоизменения двухслойных материалов приобретает высокую актуальность в машиностроительном производстве.

В данной работе авторами выполнено численное моделирование процесса совместной вытяжки с утонением двух разнородных металлов в нагретом состоянии в специализированных программных комплексах CAD/CAE ANSYS и DEFORM-2D. Анализ напряженно-деформированного состояния в CAD/CAE ANSYS показал, что на граничной поверхности слоев наблюдается разрыв нормальных напряжений  $\sigma_y$  и эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{эквив.}}$ , при этом радиальные напряжения  $\sigma_x$ , что перпендикулярны к граничной поверхности непрерывны и имеют отрицательный знак. Максимальная погрешность при сравнении численного расчета с теоретическим для идеальнопластического металла, не превышает 12,5%. Показано также, что учитывание сил трения уменьшает погрешность теоретического расчета относительно численного расчета до 8...9% [4].

Выполненные в работе расчеты в системе CAD/CAE DEFORM-2D совпадают с основными результатами, которые получены в CAD/CAE ANSYS. Погрешность расчета в данных системах по принятым моделям не превышает 5%, и позволило выполнить численный расчет напряженно-деформированного состояния биметаллической заготовки в зависимости от геометрических параметров инструмента. Поэтому учитывая большую скорость расчета, для дальнейших исследований была выбрана система CAD/CAE DEFORM-2D.

Было установлено, что на граничной поверхности действуют значительные радиальные напряжения, характер распределения которых показал, что постепенное их повышает пропорционально изменению степени обжатия. Максимальные радиальные напряжения  $\sigma_x$ , сжатия отвечают зоне близкой к выходу из матрицы, при этом их величина увеличивается при уменьшении угла  $\alpha$  и уменьшении коэффициента трения [5, 6]. Анализ распределения осевых скоростей деформаций и разницы осевых скоростей перемещения при вытяжке с утонением показал, что увеличение угла конусности матрицы приводит к значительному увеличению осевых скоростей деформаций и максимальных значений разницы осевых скоростей перемещения в очаге деформаций, что определяет большее удлинение слоя с меньшей границей текучести по отношению к слою с большей границей текучести в зависимости от степени обжатия. На выходе из матрицы разница осевых скоростей

перемещения равны нулю. Такой характер деформирования способствует взаимодействию слоев [7].

Анализ напряженно-деформированного состояния и кинематика взаимодействия слоев показали, что в очаге деформации создаются условия, которые способствуют диффузионному соединению слоев:

– максимальные сжимающие напряжения на граничной поверхности слоев, величина которых близка к границе текучести металла с меньшей границей текучести;

– разница осевых скоростей деформаций и деформаций слоев, а также наличие деформаций сдвига при взаимодействии слоев на граничной поверхности, которые обеспечивают разрушение оксидных пленок материалов и образование ювенильных поверхностей, что способствует взаимодействию слоев;

– уменьшение разницы перемещения слоев до нуля в зоне близкой к выходу из матрицы;

– наличие нагрева слоев до температур активации их взаимодействия.

Предложено использование дополнительного угла  $\beta$  для управления силовыми и кинематическими параметрами, а также напряженно-деформированным состоянием двухслойной заготовки при вытяжке с утонением с разным значением коэффициента трения. Анализ показал, что корректировка профиля заходной части конусной матрицы позволяет увеличить зону действия контактных напряжений на граничной поверхности разнородных материалов в очаге деформаций при сбережении их по величине и позволяет увеличить время контакта под нагрузкой слоев, что обеспечивает активизацию взаимодействия разнородных материалов на граничной поверхности [8, 9].

### Список литературы

1. *Тітов В. А. Обґрунтування підстав для створення машинобудівної технології виготовлення біметалевих трубчастих елементів витягуванням* / В.А. Тітов, Т.М. Лабур, Р. С. Борис // Технологические системы. – 2007. – № 1. – С. 33–39
2. *Тітов В. А. Напрямки розвитку способів виготовлення біметалевих трубчастих елементів з різнорідних матеріалів витягуванням* / В.А. Тітов, Р.С. Борис, М.С. Тривайло // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – Київ : НТУУ «КПІ», 2009. – № 56. – С. 154–159. – (Серія «Машинобудування»).
3. *Резниченко В. И. Экспериментальный промышленный комплекс сварки взрывом Государственного предприятия. Конструкторское бюро «Южное им. М.К. Янгеля»* / В.И. Резниченко, С.Н. Пахомов, С.Е. Мостипан // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 11/47. – С. 102–108.
4. *Тітов В.А. Розрахунок напружено-деформованого стану при витягуванні з потоншенням двошарового металу* / В.А. Тітов, Р. С. Борис // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С.45–52.
5. *Тітов В.А. Розрахунок напружено-деформованого стану витягування з потоншенням ідеальнопластичного двошарового металу* / Тітов В.А., Борис Р.С. // Обробка матеріалів тиском. – 2012. – №1 (30). – С. 45-52.
6. *Борис Р.С. Особливості врахування сил тертя при витягуванні з потоншенням двошарових заготовок* / Борис Р.С., Тітов В.А., Вишневский П.С. // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 2 (31). – С. 22-29.
7. *Тітов В.А. Обґрунтування та реалізація дослідного процесу виготовлення біметалевих трубчастих елементів* / В.А. Тітов, Р.С. Борис, П. С. Вишневський, О. О. Лук'яненко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – Київ : НТУУ «КПІ», 2010. – №59. – С. 13–18. – (Серія «Машинобудування»)
8. *Тітов В.А. Влияние особенностей конструкции рабочей поверхности матрицы оснастки на параметры процесса вытяжки с утонением биметаллических трубчатых элементов* / В.А. Тітов, Р.С. Борис, Е.И. Богодист // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 45. – С. 34–42.
9. *Тітов В.А. Особенности конструкций вытяжных матриц и их влияние на процесс вытяжки биметаллических трубчатых изделий* / Тітов В.А., Борис Р.С., Богодист Е.И. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. Россия, Москва – 2012. – №9.

## УДК 621.941

Творищук<sup>1</sup> И.М., асп., Оргиян<sup>2</sup> А.А., д.т.н., проф., Мацей<sup>3</sup> Р.А., к.т.н., доц.

1 - Одесский технический колледж, г. Одесса, Украина, 2 - ОНПУ «Одесский национальный политехнический университет», г. Одесса, Украина, 3 – ОГАСА «Одесская государственная академия строительства и архитектуры», г. Одесса, Украина

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ОТДЕЛОЧНО-РАСТОЧНЫХ СТАНКОВ ПРИ ПОДРЕЗКЕ СВОБОДНЫХ ПРЕРЫВИСТЫХ ТОРЦЕВ**

На специальных отделочно-расточных станках (ОРС) помимо операции собственно тонкого растачивания выполняется целый ряд других операций: наружное точение, подрезание торцов, фрезерование и др. Основным требованием этих операций является высокое качество обработанных поверхностей. Следует отметить, что часто торцы деталей имеют прерывистую поверхность (выступы- впадины, продольные отверстия по торцу, ось которых параллельна оси заготовки и др.). Получение точного торца с высокой чистотой поверхности обеспечивает метод радиальной подачи резца, однако значительную сложность представляет разработка и создание резцовой головки с механизмом радиальной подачи резца. Более производительным и простым является метод осевой подачи (подрезка широколезвийным резцом-ножом), возможности которого еще изучены недостаточно. В исследовании менялись материалы образцов: (сталь, чугун, бронза и алюминий); диаметры подрезаемых торцов от 60 до 150 мм, а также их ширина до 10 мм. Режим резания при обработке стали  $V = 50 \div 100 \text{ м/мин}$ ; для чугуна  $V = 80 - 200 \text{ м/мин}$ , при обработке бронзы  $V = 120 \div 270 \text{ м/мин}$ . Подача изменялась в пределах  $S = 0,02 - 0,03 \text{ мм/об}$ . Количество прерываний за оборот: 2, 4, 10, 15. Значение максимально допустимой ширины торца при резании существенно зависит от жесткости приспособления, в котором закреплена деталь (инструмент), а также от количества прерываний.

В работе выполнен расчет виброустойчивости при подрезке торцов широколезвийным резцом на основе общей методики динамических расчетов [1].

Прерывистость обрабатываемой поверхности приводит к периодическому повторению процессов врезания и выхода инструмента, нарушая стационарность замкнутой динамической системы станка и вызывая появление интенсивных внешних воздействий на процесс резания. Следует отметить, что основные закономерности колебаний не изменяются при переходе от растачивания невращающейся борштангой к растачиванию вращающейся, а также при изменении материала заготовки.

Для определения виброустойчивости ОРС на основе построения областей устойчивости, а также для оценки критических (минимальных) значений коэффициента возбуждения рассмотрим систему с одной степенью свободы, принимая статическую характеристику процесса резания. Условие параметрической устойчивости получим для однородного уравнения типа Хила [2]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + [c + \mu \cdot K_p \cdot \Phi(t)] y = 0, \quad (1)$$

где  $m$  – приведенная к резцу масса борштанги;

$b$  – коэффициент демпфирования;

$c$  – жесткость подсистемы;

$K_p$  – коэффициент резания;

$\mu$  – коэффициент трения стружки о переднюю грань резца;

$\Phi_1(t)$  – кусочно-постоянная функция специального вида:

$$\Phi_1(t) = \begin{cases} 1 \text{ при } iT_g \langle t \rangle (i+g)T_g \\ -1 \text{ при } (i+g)T_g \langle t \rangle (i+1)T_g \end{cases}$$

где  $T_g = \frac{2\pi}{\omega}$  – период возбуждения.

Применяя подстановку Эйлера

$$y(t) = U \exp^{(-bt/2m)} \quad (2)$$

в уравнении (1), а также используя метод сшивания с учетом условий периодичности, запишем условие устойчивости в виде:

$$|N| = \cos \left\{ \frac{2\pi}{\omega} P \left[ \sqrt{1+2v} + g(\sqrt{1+2v} - \sqrt{1-2v}) \right] \right\} - \frac{1 - \sqrt{1-(2v)^2}}{\sqrt{1-(2v)^2}} \sin \left[ \frac{2\pi}{\omega} gP\sqrt{1-2v} \right] \sin \left[ \frac{2\pi}{\omega} P(1-g)\sqrt{1+2v} \right] \langle ch \left( \delta \frac{P}{\omega} \right) \rangle, \quad (3)$$

где  $\frac{P}{\omega}$  - отношение собственной частоты системы к частоте параметрического возмущения;

$g$ - коэффициент, равный отношению интервала прерывания резания  $\Delta t$  к периоду возмущения  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ ;

$2v = \frac{K_p}{2c}$  – коэффициент возбуждения.

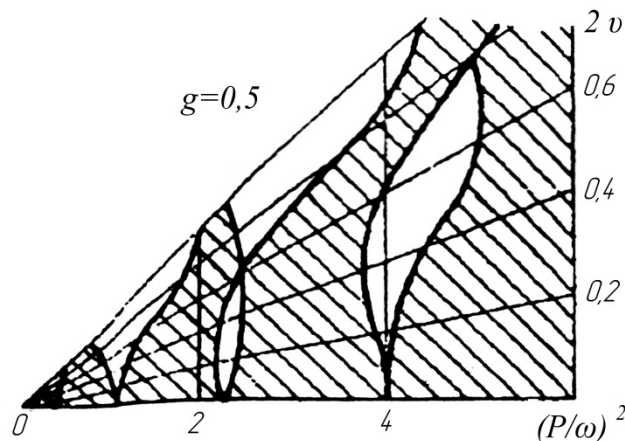


Рис. 1. График областей устойчивых и неустойчивых процессов

На рис. 1 приведен пример результатов расчетов в виде графиков областей устойчивых и неустойчивых процессов (заштрихованы области устойчивости).

Зная динамические параметры конкретной наладки ОРС, а именно  $P/\omega$ ,  $g$ ,  $K_p$  и  $c$ , можно определить положение рабочей точки на графике, характеризующее устойчивость процесса подрезки прерывистого торца.

### Список литературы

1. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
2. Линчевский П.А., Джугурян Т.П., Оргиян А.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках. – Киев: Техника, 2001. – 300 с.