

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

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

№ 2(8)'2023

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2023

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

No. 2(8)'2023

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Kharkiv
NTU "KhPI", 2023

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Технологии в машиностроении = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2023– № 2(8). – 150 с.–ISSN 2079-004X(Print), ISSN 2786-7587(Online).

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

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

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

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

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

Мова статей – українська, англійська.

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

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

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

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

Видавник кафедра технологій машинобудування та металорізальних верстатів НТУ «Харківський політехнічний інститут»

Publisher, Department of Machine Building Technology and Metal Cutting Machines, Kharkiv Polytechnic Institute, NTU

Редакційна колегія

Відповідальний редактор:

Пермяков О.О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Зам. відп. ред. Ключко О.О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ»

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

Члени редколегії:

Анділахай О.О., д-р техн. наук, проф., ПНТУ, Україна

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

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

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

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

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

Драган Перакович (Peraković, Dragan) -PhD, полный

профессор, Университет Загреб, Хорватия

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

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

Ларшин В.П., д-р техн. наук, проф., ОНПУ, Україна

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

Михел Балол (Балог, Михал), доцент, доктор философии,

Технический университет Кошице, Словакия

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

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

«ЕНЕРГОСТАЛЬ», Україна

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

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

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

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

Editorial staff

Associate editor:

Permiakov A.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Deputy resp. ed. Klochko O.O., prof. NTU "KhPI", Ukraine

Resp.secretary Naboka O.V., Ph.D. sciences, NTU "KhPI"

Editorial staff members:

Andilakhai O.O., professor, PNTU, Ukraine

Antonyuk V.S., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Vorontsov B.S., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Hasanov M.I., dr. tech. of science, prof., NTU "KhPI" Ukraine

Dobrotvorsky S.S., dr. tech. of science, prof., NTU "KhPI"

Ukraine

Dmitriev D.O., prof., KhNTU, Ukraine

Dragan Perakovich -PhD, full professor,

University of Zagreb, Croatia

Kalchenko V.V., professor, ChNTU, Ukraine

Kovalov V.D., professor, DDMA, Ukraine

Larshin V.P., prof., ONPU, Ukraine

Mironenko E.V., professor, DDMA, Ukraine

Michel Ballol, Associate Professor, Doctor of Philosophy,

Technical University of Kosice, Slovakia

Pasichnik V.A., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Stalinsky D.V., prof., DP UkrSTC

ENERGOSTAL, Ukraine

Stepanov M.S., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Stupnitsky V.V., prof., Lvivska Politeha, Ukraine

Fadecv V.A., professor, PAT "FED", Ukraine

Khavin G.L., professor, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 2 від 28 лютого 2023р., ISSN 2079-004X(Print), ISSN 2786-7587(Online).

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2023

ГАСАНОВ М.І., МИГУЩЕНКО Р.П., ШОЛКОВИЙ О.М., ФАДЕЕВ В.А., ЗАКОВОРОТНИЙ О.Ю., КЛОЧКО О.О., ФЕДОРЕНКО В.С.

УПРАВЛІННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ ПРОДУКЦІЇ АВІАЦІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Основні положення концепції інтеграційної технологічної підготовки авіаційного підприємства PLM-рішенням включають повний детальний опис, захищене зберігання та кероване використання всієї інформації про продукцію протягом усього життєвого циклу продукції з підтримкою цілісності та несуперечності інформації про продукцію та підтримкою та управлінням усіма бізнес-процесами, пов'язаними з ними даними поширення інформації у всьому підприємстві. До складу PLM-рішень на машинобудівного підприємства включені кошти з управління проектами, кошти календарного планування та управління вимогами з використанням засобів Workflow, які реально дозволяють автоматизувати бізнес-процеси в рамках усього підприємства.

Ключові слова: життєвий цикл, управління, авіаційне підприємство, інтеграція, PDM-системи, САПР, технологічна підготовка, авіаційні підприємства, PLM-рішення, інформація, бізнес-процеси, функціональність; гнучкість; масштабованість.

HASANOV M.I., MYGUSHCHENKO R.P., SHOLKOVYI O.M., FADEEV V.A., ZAKOVOROTNIY O.Y., KLOCHKO O.O., FEDORENKO V.S.

PRODUCT LIFE CYCLE MANAGEMENT OF AN AVIATION ENTERPRISE

The main provisions of the concept of integrated technological preparation of the aviation enterprise by the PLM solution include a full detailed description, secure storage and managed use of all product information throughout the entire product life cycle with support for the integrity and consistency of product information and support and management of all business processes related to with them data dissemination throughout the enterprise. PLM solutions for a machine-building enterprise include project management tools, calendar planning tools, and requirements management using workflow tools, which really allow you to automate business processes within the entire enterprise.

Keywords: life cycle, management, aviation enterprise, integration, RDM systems, CAD, technological preparation, aviation enterprises, PLM solutions, information, business processes, functionality; flexibility; scalability.

Abbreviations

CAD - Computer Aided Design – проектування виробів;

CAE - Computer Aided Engineering - інженерні розрахунки;

CAM - Computer Aided Manufacturing - розробка керуючих програм для верстатів з ЧПК;

CAPP – Computer Aided Production Planning – розробка технологічних процесів;

ERP – Enterprise Resource Planning – планування ресурсів авіаційного підприємства;

MES – Manufacturing Execution Systems – системи оперативного управління виробництвом авіаційного підприємства;

MPM - Manufacturing Process Management - моделювання та аналіз виробництва виробу;

PLM – Product Lifecycle Management – управління життєвим циклом продукції авіаційного підприємства;

PDM - Product Data Management - управління даними про продукцію;

PM - Project Management - управління проектами;

Workflow - управління документообігом та бізнес-процесами авіаційного підприємства

Вступ. Метою інжинірингу авіаційного підприємства є впровадження PLM-рішень для забезпечення реального управління інформацією про продукцію протягом усього її життєвого циклу і таким чином досягти зниження собівартості продукції, скоротити терміни випуску нової продукції, підвищити конкурентоспроможність підприємства, зробити його більш прозорим та керованим.

Основні положення PLM концепції. Положення концепції PLM включають: 1) повний детальний опис, захищене зберігання та кероване використання всієї інформації про продукцію протягом усього життєвого циклу продукції; 2) підтримка цілісності та несуперечності інформації про продукцію протягом усього її життєвого циклу; 3) підтримка та управління всіма бізнес-процесами та пов'язаними з ними даними для поширення інформації по всьому авіаційному підприємстві.

При впровадженні PLM - рішення на машинобудівному підприємстві першому плані виходять такі вимоги: функціональність; швидкодія; гнучкість; масштабованість; безпека. При цьому основним робочим інструментом для співробітників конструкторських та технологічних служб є засоби пошуку інформації, засоби візуалізації та формування звітних документів.

До структури PLM-рішень на авіаційному підприємстві включаються кошти з управління проектами, кошти календарного планування та управління вимогами. Для цього використані засоби Workflow, які реально дозволяють автоматизувати бізнес-процеси в рамках усього підприємства (рис. 1).

Мета дослідження. З метою реалізації організаційно-функціональної сумісності конструкторсько-технологічних підрозділів авіаційного підприємства розроблено ERP-системи [1, 4, 5, 6, 7]. Для цього реалізовано інтеграцію PDM-систем з САПР; інтеграція між ERP та PDM системами (рис. 2).

ERP-система реалізована як багаторівневої системи управління виробництвом з урахуванням MES-системи «Zenith». Вона координує роботу CAD, CAPP, CAM та CAE систем.

Для чого використовуються методи тактичного та стратегічного планування. Тактичне планування виробничого процесу виконується MPM-системою GPS, а стратегічне - MPM-системою OMEGA, рис. 1.

Аналіз основних досягнень та літератури. Система управління проектами (PM) забезпечує взаємодію MPM-системи GPS з CAD-системами (AutoCAD, T-Flex, SolidWorks, КОМПАС) і CAPP-

системами (T-Flex Технологія, Techcard, TechnologiCS, ТехноПро).

© М.І. Гасанов, Р.П. Мигущенко, О.М. Шолковий, В.А. Фадеев, О.Ю. Заковортний, О.О. Ключко, В.С. Федоренко, 2023

МРМ "GPS" забезпечує: прогнозування стану виробничого процесу; формування оптимальної структури технологічного процесу; моделювання відмов та затримок у системі обробки; нормування допоміжних операцій.

На виробничому рівні ERP-система вирішує такі завдання (рис. 3):

- формування оперативного внутрішньоцехового плану з урахуванням наявних заділів та верстатного парку;
- диспетчерський контроль виконання операцій;
- контроль за виконанням плану;
- розрахунок виробничого плану завантаження виробничих потужностей за різними критеріями (максимальний коефіцієнт завантаження обладнання, мінімальний час пролежування деталей тощо);
- перерахунок у реальному часі виробничого плану у разі позаштатних ситуацій, наприклад поломки верстата;
- планування матеріалів, необхідні виконання виробничої програми;
- управління рухом товарних потоків: постачанням, збутом, організацією роботи складів та транспортних служб, плануванням схем доставки товару та сировини;
- розрахунок та документування процесів закупівлі та продажу, створення супровідних документів для кожної партії деталей;
- розрахунок фактичної собівартості виготовлених виробів та основних засобів;
- засоби аналізу бізнесу, що дозволяють визначити прибуткові та збиткові напрями, динаміку стану справ у бізнес-процесах, ефективність роботи різних підрозділів;
- управління персоналом.

Ефективність авіаційного виробництва визначається тимчасовими, енергетичними та вартісними характеристиками. Їх вплив на хід організаційно-технологічного проектування виробничої системи, як правило, має комплексний характер, що в сучасних умовах призводить до необхідності підвищення рівня мобільності та гнучкості виробничих систем за збереження високої продуктивності та надійності. Цим вимогам повною мірою відповідають гнучкі виробничі системи (ГПС), побудовані на принципах агрегування модулів (ГПМ).

Методи проектування систем обробки авіаційного виробництва базуються на аналітичних моделях, що мають розвинений апарат оптимізації. У той самий час, методи проектування ДПС переважно побудовані на імітаційному моделюванні, що саме собою ще призводить до отримання оптимальних організаційно-технологічних рішень, а вимагає додаткового статистичного аналізу моделі.

Результати. Завдання визначення раціональних структур маршрутів обробки виробів вирішено як завдання управління ресурсами в умовах обмежень на вибір основного та допоміжного обладнання [2, 3, 5]:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{TN} &= \{ \mathbf{T}, \mathbf{P}, \mathbf{I}, \mathbf{O}, \mathbf{M}_0, \tau, \mathbf{PR} \}; \\ \mathbf{P} &= \{ \mathbf{p}_i \}, i = \overline{1, n}; \\ \mathbf{T} &= \{ \mathbf{t}_j \}, j = \overline{1, m}; \\ \mathbf{I} : \mathbf{T} \times \mathbf{P} &\rightarrow \{0,1\}; \\ \mathbf{O} : \mathbf{P} \times \mathbf{T} &\rightarrow \{0,1\}; \\ \mathbf{M}_0 : \mathbf{P} &\rightarrow \mathbf{Z}_0; \\ \tau : \mathbf{T} &\rightarrow \mathbf{R}_0; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де \mathbf{P} – кінцева множина позицій (станів ГПС); \mathbf{T} – кінцева безліч переходів (методів перетворення об'єктів обробки в ГПС); \mathbf{I} – функція слідування (результати застосування функції \mathbf{T} до об'єктів ГПС в стані \mathbf{P}); \mathbf{O} – функція передування (перелік умов – наявність станів \mathbf{P} необхідні застосування функції \mathbf{T}); \mathbf{M}_0 – початкове маркування, що задає початковий розподіл міток за позиціями мережі (стан ДПС до початку моделювання); \mathbf{Z}_0 – безліч невід'ємних чисел (значень характеристик елементів та структур ГПС до початку моделювання); τ – функція часів спрацьовування, яка зіставляє кожному переходу постійний час спрацьовування; \mathbf{R}_0 – безліч раціональних невід'ємних чисел (безліч значень характеристик елементів і структур ГПС одержуваних в ході імітаційного моделювання); \mathbf{PR} – відношення пріоритетності (порядку), що задається на множині переходів \mathbf{T} і визначає порядок споживання міток збудженими переходами в умовах конфлікту міток (критерії вибору оптимальних параметрів і структур ГПС для організаційно-технічних і технологічних умов, що сформувалися, на момент прийняття рішення).

Завдання оптимального розміщення технологічного обладнання на плануванні ділянки із заданою транспортною системою та місцями завантаження (розвантаження) обладнання вирішено як завдання максимізації завантаження основного технологічного обладнання на основі мінімізації сумарних транспортних переміщень між модулями. $L(X, Y, \Theta, \Lambda)$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \min [L(X, Y, \Theta, \Lambda)] = \sum_{i=1}^M \lambda_i s_i(x_i, y_i, \theta_i), \\ f_1(x_i, y_i, \theta_i, x_j, y_j, \theta_j) \geq 0, \quad i \neq j, \quad j = 1, \dots, M, \\ f_2(x_i, y_i, \theta_i) \geq 0, \quad i = 1, \dots, M, \\ f_3(x_j, y_j, \theta_j) \geq 0, \quad j = 1, \dots, M, \end{array} \right. \quad (2)$$

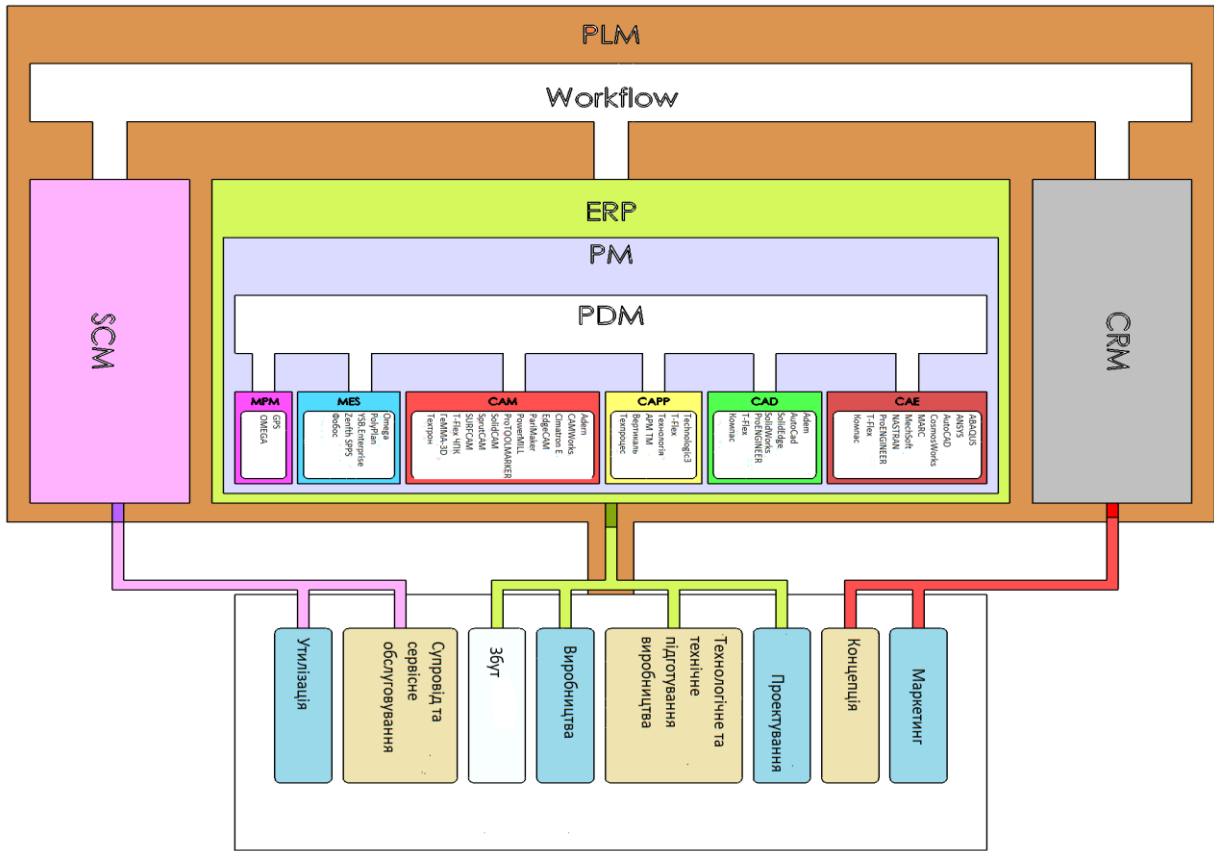


Рис. 1 – Схема формування життєвого циклу авіаційного підприємства з використанням PLM – систем

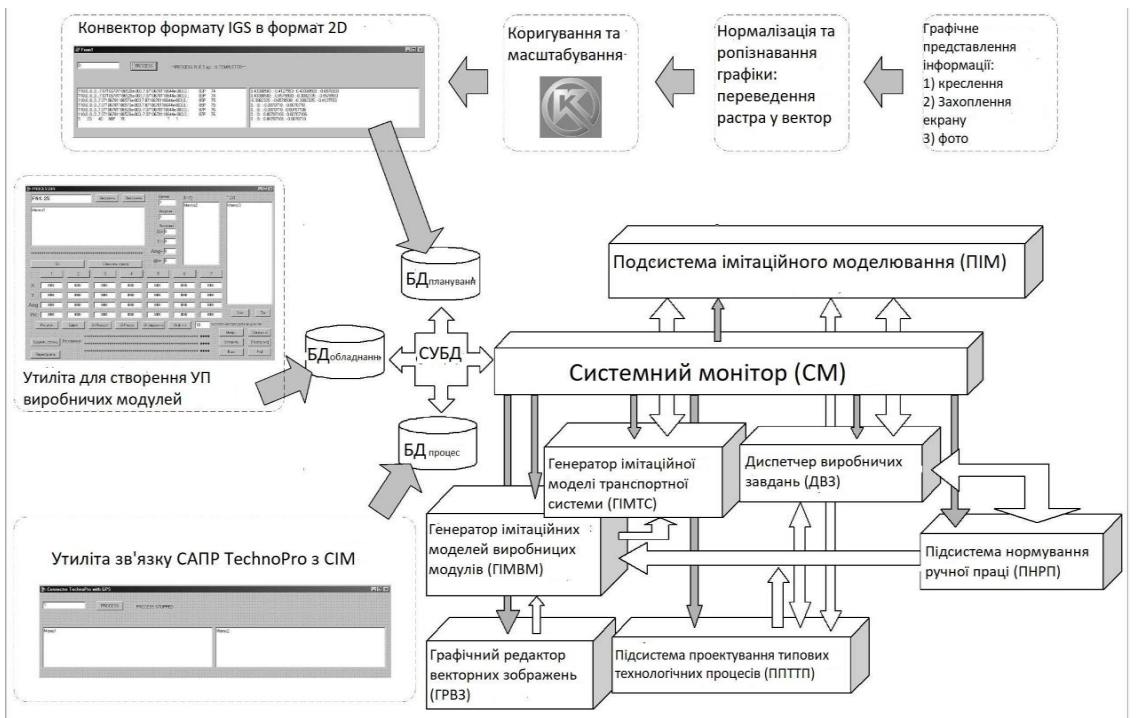


Рис. 2 – Функціональна схема ERP-системи авіаційного підприємства

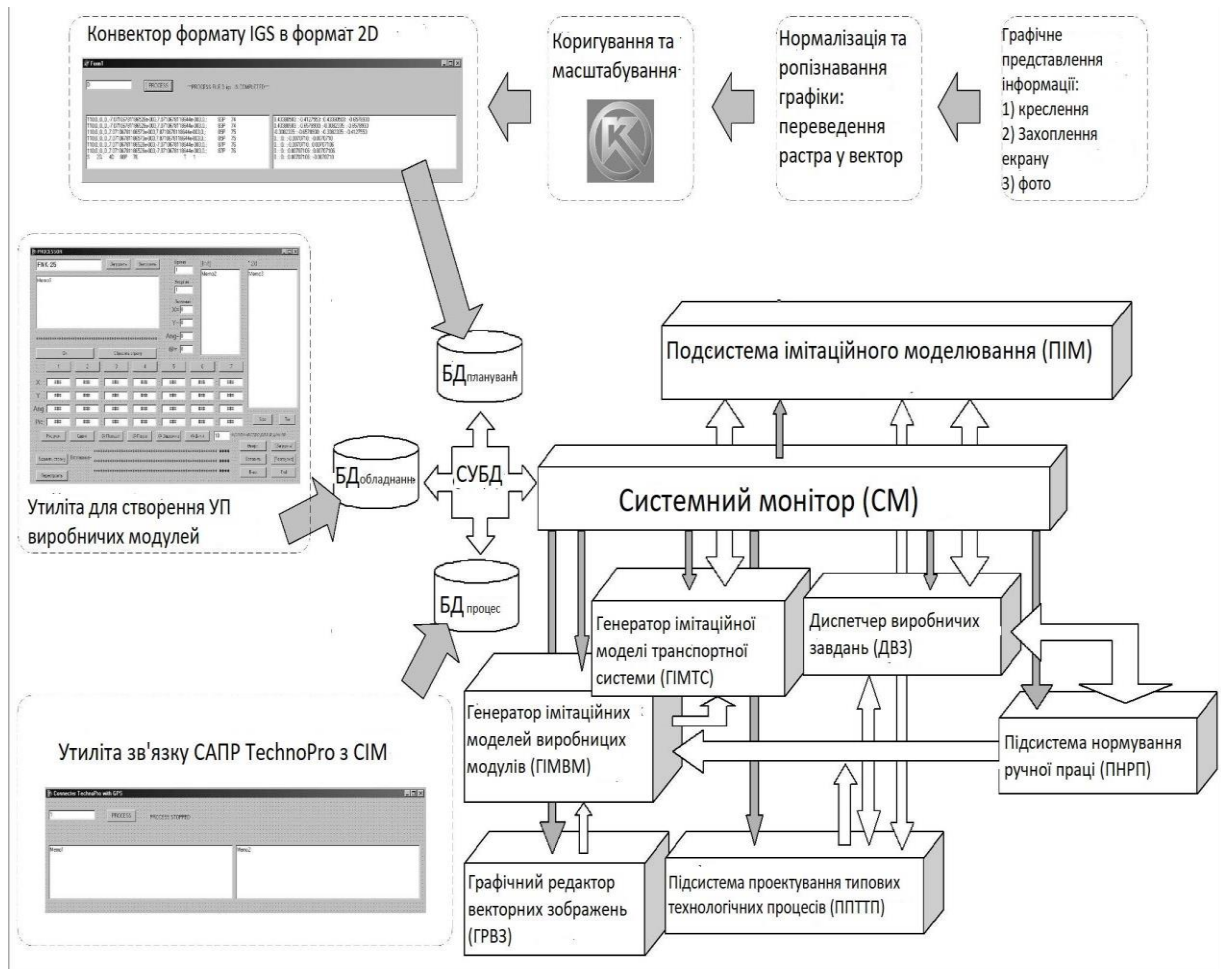


Рис. 3 – Фрагмент структури PLM – системи авіаційного підприємства

де M - кількість об'єктів (модулів), що розміщуються; $\square=(\square_1, \square, \square_M)$ - вектор інтенсивностей звернення модулів до транспорту; $X=(x_1, \square, X_M)$; $Y=(y_1, \square, y_M)$ - вектори координат точок прив'язування модулів; $\square=(\square_1, \square, \square_M)$ - вектор орієнтації модулів щодо транспортних ліній; $S=(s_1, \square, s_M)$ - вектор відстаней між модулями і складом.

Вирішення задач мінімізації конфігурації ГПС та оптимізації послідовності запуску виробів на обробку реалізовано шляхом аналізу діаграми роботи її обладнання та гістограми середнього завантаження модулів. В його основу покладено алгоритм довільної вибірки партій обробки за критерієм максимального завантаження основного обладнання. Отриманий у своїй протокол стану системи обробки є вихідним матеріалом для поточного планування.

До завдань енергозбереження належить завдання формування структури виробничої системи за енергетичними критеріями (рис. 4). Вона, у свою чергу, розбита на завдання мінімізації витрат енергії на виконання виробничого завдання та формування парку обладнання з мінімальною надмірністю енергетичних параметрів силових установок.

Як критерії оптимізації використані:

- Ефективна потужність приводів технологічного обладнання $(N(t))$, (3);

$$N(t) = N_{Гд}(t) + N_{под}(t), \quad (3)$$

де $N_{Гд}(t)$ - потужність приводу головного руху, $N_{под}(t)$ потужність приводу подачі;
 A_j - робота виконавчих механізмів верстата, (4);

$$A_j = \sum N_j(t) \cdot t, \quad (4)$$

де: j - номер вузла, що входить у виробничий модуль та виконує технологічну операцію; $N_j(t)$ - потужність приводу j -го вузла, що використовується для виконання елементарного руху; t - час роботи j -го вузла;
 $ККД_{ст}$ - коефіцієнт корисної дії виробничої системи (окремих верстатів, модулів ($ККД_{мод}$), ділянки ($ККД_{уч}$), цеху ($ККД_{ц}$), транспортної системи ($ККД_{тс}$)) (5)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{КПД}_{\text{СТ}} = \frac{\sum A_{\text{рез}}}{\sum A_{\text{СТ}}} \\ \text{КПД}_{\text{МОД}} = \frac{\sum A_{\text{рез}}}{\sum A_{\text{МОД}}} \\ \text{КПД}_{\text{УЧ}} = \frac{\sum A_{\text{рез}}}{\sum A_{\text{УЧ}}} \\ \text{КПД}_{\text{Ц}} = \frac{\sum A_{\text{рез}}}{\sum A_{\text{Ц}}} \\ \text{КПД}_{\text{ТС}} = \frac{\sum A_{\text{Ц}} - \sum A_{\text{ТМ}}}{\sum A_{\text{Ц}}} \end{array} \right. , \quad (5)$$

де $A_{\text{рез}}$ - корисна робота сил різання, витрачена приводами головного руху та подач верстата; $A_{\text{СТ}}$ - загальна робота, витрачена верстатом; $A_{\text{МОД}}$ - робота, витрачена всіма механізмами оброблювального модуля, що мають електричні приводи (верстатами, маніпуляторами, пристроями та ін.); $A_{\text{МОД}}$ - робота, витрачена всіма підрозділами, що входять у ділянку та мають як енергетичні установки електричні двигуни (модулі, транспортні пристрої, накопичувачі); $A_{\text{Ц}}$ - робота, витрачена всіма підрозділами, що входять до цеху; $A_{\text{ТС}}$ - робота, витрачена транспортним модулем на переміщення об'єкта обробки.

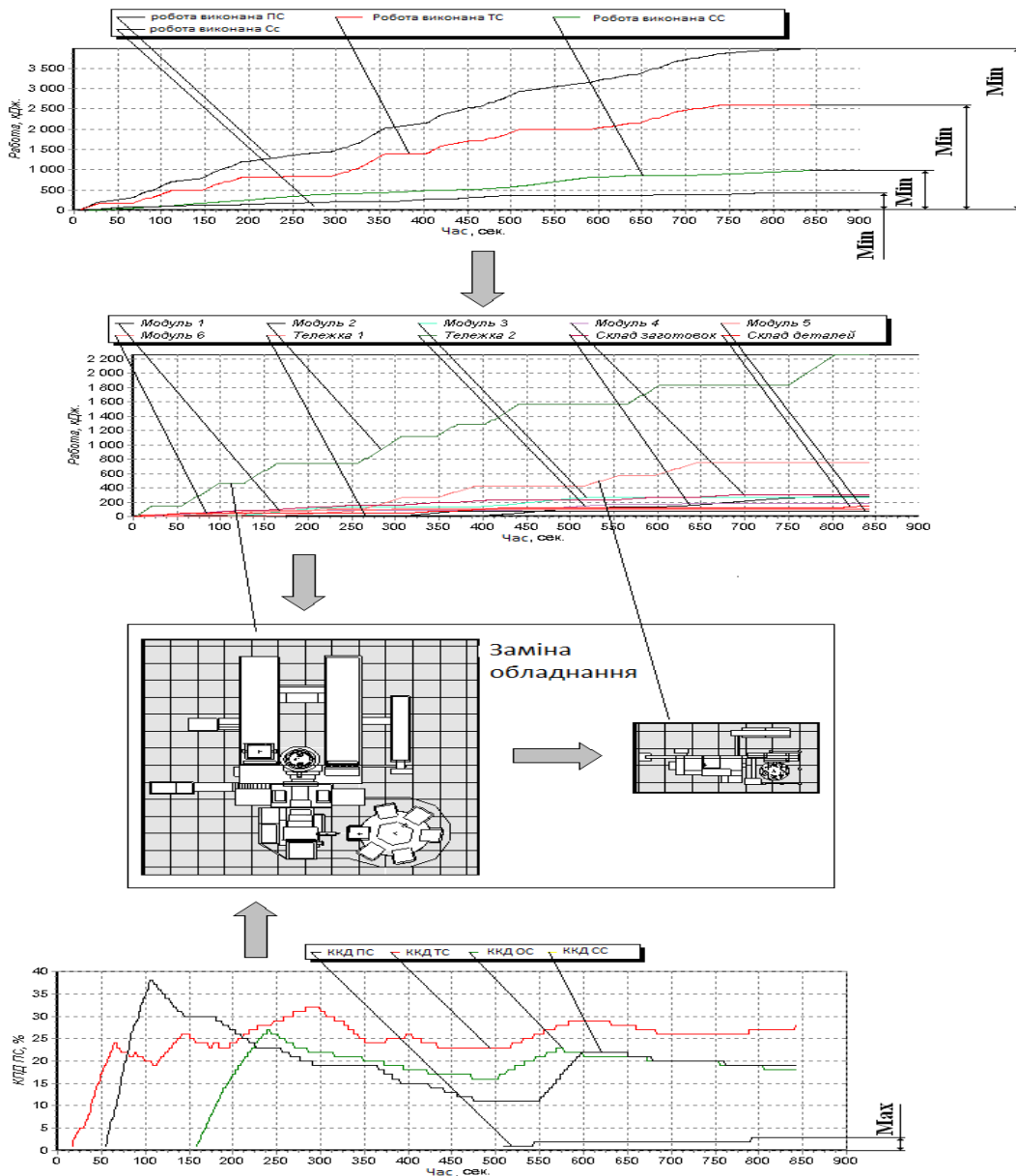


Рис. 4 – Послідовність заміни обладнання ДПС залежно від рівня її енергетичних показників

Вибір технологічного обладнання за критерієм мінімальної енергоємності системи обробки починається з аналізу обсягу робіт, виконаних різними системами ДПС (рис. 4). Ця інформація дозволяє

ISSN 2079–004X(Print), ISSN 2786–7587(Online). Вісник НТУ «ХП». 2023.№2 (8)

визначити стратегію зниження витрат енергії у технологічній системі (у наведеному прикладі найбільш енергоємним є транспортування заготовок між модулями) [2, 3, 8, 9, 10].

На наступному етапі визначається найбільш енергоємний модуль, що входить до обраної системи для оптимізації. При цьому можливі такі варіанти стратегії вибору:

- Вибір модуля за значенням виконаної роботи ($\max(A_j)$);
- вибір модуля за найбільш енергоємною силовою установкою ($\max(N(t))$);
- Вибір модуля за критерієм мінімальної ефективності використання енергії ($\min(\text{КПД}_{\text{мод}})$).

У аналізованому прикладі (рис. 4) найменшу енергетичну ефективність має обробна система ($\text{КПДОС}=18\%$). До її складу входить найбільш енергоємний модуль (Модуль 2 - IP800PM2Ф4, $A_2 = 2200$ кДж). Його заміна на менш енергоємне обладнання (наприклад, Модуль 1 – 1В340Ф30) може суттєво знизити енергетичні витрати у системі обробки. Для ухвалення остаточного рішення про його заміну необхідно додатково провести порівняльний функціональний аналіз основного та допоміжного обладнання взаємозамінних модулів

Висновки

1. Запропоновано та теоретично обґрунтовано систему об'єктивних критеріїв оцінки технологічних рішень, що характеризують об'єкт обробки, технологічний процес формування та формуювальне обладнання та дозволяють здійснювати синтез та аналіз технологічних систем механічної обробки в авіаційному виробництві з урахуванням технологічного прогнозування нових нанотехнологій.

2. Розроблено прикладні основи автоматизованих систем синтезу та аналізу структурно-параметричних характеристик технологічних систем механічної обробки, що базуються на алгоритмах комплексних та локальних САПР.

3. Створення принципів гарантованої технології механічної обробки, характерної при виготовленні високоточних деталей, базується на технологічному прогнозуванні, метою якого є визначення на перспективу змін структурно-параметричних характеристик технологічних процесів та обладнання та засобів оснащення, що реалізують їх, які формуються на основі аналізу структури та параметрів об'єкта обробки, і навіть адекватних змін витрат за виробництво.

4. Розроблена методика технологічного прогнозування розвитку дозволяє авіаційному підприємству ефективно підійти до вироблення перспективного плану розвитку, до складання щорічних бізнес-планів модернізації виробництва та комплектації сучасним металорізальним обладнанням, інструментом та вимірювальною технікою.

Список літератури

1. Равська Н.С., Парненко В.С., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Ключко О.О. Наукові основи визначення залежностей теорії різання в алгоритмах при реалізації нейронних мереж процесів формування // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2023. – № 1 (7) 2023. – С. 29–35. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2023.1(7).04.
2. Тимофеев, Ю.В. Сетевое многоуровневое представление организационно-технологических структур производственных систем / Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, Ю.Г. Гуцаленко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірка наукових праць. Тематичний випуск Технологія в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - No23. - С.194-213.
3. Тимофеев, Ю.В. Модернизация организационно-технологической структуры участка обработки детали «Стакан верхний» / Ю.В.Тимофеев, А.Н.Шелковой, А.А. Пермяков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Збірка наукових праць. - Краматорськ: ДДМА. – Вип.19. – 2004. – С.75-81.
4. Фадеев, В.А. Синтез технологических систем механической обработки / В.А.Фадеев // Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007. – 187 с.
5. Шелковий, О.М. Досвід застосування імітаційного моделювання при вирішенні задачі модернізації виробничих підрозділів авіаційної промисловості / О.М.Шелковий, В.А. Фадеев, Ю.Г. Гуцаленко, С.А. Костигов // Авиационно-космическая техника и технология: Научно-технический журнал. □ Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, „ХАИ”. □ Харьков, 2008. □ Вып. 7/54. □ С.181 □188.
6. Magomed Hasanov, Alexander Klochko, Vadim Horoshaylo, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev Duplex Scheme of the Technological Impact of the Provision of Operational Properties of a Hardened Large Module Gears // Int. J. of Integrated Engineering Vol. 14 No. 6 (2022) p. 55-62, <http://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie>. ISSN : 2229-838X e-ISSN : 2600-7916 (Skopus).
7. Равська Н.С., Корбут Є.В., Родін Р.П., Парненко В.С., Заковоротний О.Ю., Ключко О.О., Сапон С.П., dr. Rolahd Loroch. Імітаційне моделювання процесами спрощеним алгоритмом методу групового врахування аргументів. // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції 01 – 03 вересня 2022 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2022. – С. 180– 181. – ISBN 978-617-7889-20-4.
8. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
9. Особливості побудови алгоритмів метода групового врахування аргументів. Ключко О.О., Корбут Є.В., Равська Н.С., Родін Р.П., Парненко В.С. Збірник наукових праць XI Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент», 5–6 листопада 2021 року. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. – С. 137 –139.
10. Равська Н.С., Корбут Є.В., Івановський О.А., Родін Р.П., Парненко В.С., Заковоротний О.Ю., Ключко О.О., Сапон С.П., Loroch Rolahd Теорія евристичної самоорганізації в імітаційному моделюванні управління процесами. Проблеми інформатики та моделювання (ПІМ-2021). Тези двадцять першої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: НТУ "ХПІ", 2021. – С. 61 – 62.

Bibliography (transliterated):

1. Ravs'ka N.S., Pamenko V.S., Gasanov M.I., Zakovorotnij O.Yu., Klochko O.O. Naukovі osnovi viznachennya zalezhnostey teoriyi ri'zannya v algoritmah pri reali'zacii nei'ronnikh merezh procesiv formoutvorennya // Vi'snik Naczi'onal'nogo tekhnichnogo univ'sitetu «KhPI». Seriya: Tekhnologii'yi v mashinobuduvanni' = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk.pr. / Naczi. tekhn. un-t «Kharkiv. poli'tekhn. i'n-t». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2023. – # 1 (7) 2023. – S. 29–35. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2023.1(7).04.

2. Timofeev, Yu.V. Setevoe mnogourovnevnoe predstavlenie organizacionno-tekhnologicheskikh struktur proizvodstvennykh sistem / Yu.V. Timofeev, A.N. Shelkovej, Yu.G. Guzalenko // *Vi'snik Naczi'onal'nogo tekhnichnogo uni'versitetu "Kharki'vs'kij poli'tekhnichnij i'nstitut": Zbi'rka naukovikh prac' . Tematichnij vipusk Tekhnologiya v mashinobuduvanni` . - Kharki'v: NTU "KhPI", 2005. - No23. - S.194-213.*
3. Timofeev, Yu.V. Modernizatsiya organizacionno-tekhnologicheskoy struktury` uchastka obrabotki detali «Stakan verkhnij» / Yu.V. Timofeev, A.N. Shelkovej, A.A. Permyakov // *Nadi'jni'st` i'nstrumentu ta optimi'zacii'ya tekhnologichnikh sistem: Zbi'rka naukovikh prac' . - Kramators'k: DDMA. – Vip.19. – 2004. – S.75-81.*
4. Fadeev, V.A. Sintez tekhnologicheskikh sistem mekhanicheskoy obrabotki / V.A. Fadeev // *Khar'kov: NTU «KhPI». – 2007. - 187 s.*
5. Shelkovej, O.M. Dosvi'd zastosuvannya i'mi'taczi'jnogo modelyuvannya pri viri'shenni' zadachi` moderni'zaczi'yi virobnychikh pi'drozdi'li'v avi'aczi'jnoyi promislivosti` / O.M. Shelkovej, V.A. Fadyeyev, Yu.G. Guzalenko, Ye.A. Kostigov // *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya: Nauchno-tekhnicheskij zhurnal. □ Naczi'onal'ny'j a'e'rokosmicheskij universitet im. N.E. Zhukovskogo, „KhAI”. □ Khar'kov, 2008. □ Vy'p. 7/54. □ S.181 □ 188.*
6. Magomed Hasanov, Alexander Klochko, Vadim Horoshaylo, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev Duplex Scheme of the Technological Impact of the Provision of Operational Properties of a Hardened Large Module Gears // *Int. J. of Integrated Engineering Vol. 14 No. 6 (2022) p. 55-62, <http://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie>, ISSN : 2229-838X e-ISSN : 2600-7916 (Scopus).*
7. Ravs'ka N.S., Korbut Ye.V., Rodin R.P., Parnenko V.S., Zakovorotnij O.Yu., Klochko O.O., Sapon S.P., dr. Rolahd Loroeh. *Gamma'taczi'jne modelyuvannya procesami sproshhenim algoritmom metodu grupovogo vrakhuvannya argumenti'v. // Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materi'ali XX Mi'zhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferenczi'yi 01 – 03 veresnya 2022 roku / za zag. red. V. D. Koval'ova. – Kramators'k-Ternopi'l': DDMA, 2022. – S. 180– 181. – ISBN 978-617-7889-20-4.*
8. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
9. Osoblivosti pobudovi algoritmi'v metoda grupovogo vrakhuvannya argumenti'v. Klochko O.O., Korbut Ye.V., Ravs'ka N.S., Rodin R.P., Parnenko V.S. *Zbi'mik naukovikh prac' KhPI Vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferenczi'yi z mi'zhnarodnoyu uchastyu «Procesi mekhanichnoyi obrobki, verstati ta i'nstrument», 5–6 listopada 2021 roku. – Zhitomir : Derzhavnij uni'versitet «Zhitomir's'ka poli'tekhnika», 2021. – S. 137 –139.*
10. Ravs'ka N.S., Korbut Ye.V., Ivanov's'kij O.A., Rodin R.P., Parnenko V.S., Zakovorotnij O.Yu., Klochko O.O., Sapon S.P., Loroeh Rolahd *Teori'yi evristichnoyi samoorgani'zaczi'yi v i'mi'taczi'jnomy modelyuvanni` upravli'nnya procesami. Problemi i'nformatiki ta modelyuvannya (PI'M-2021). Tezi dvadcyat' pershoji mi'zhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferenczi'yi. – Kharki'v: NTU "KhPI", 2021. – S. 61 – 62.*

Поступила (received) 02.02.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Гасанов Магомедмін Ісамагомедович (Gasanov Magomedimin) – проректор по науково-педагогічній роботі, доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (096) 590-88-50; e-mail: magomedimin.gasanov@khi.edu.ua; ORCID: 0000-0002-2161-2386

Мигушченко Руслан Павлович (Mygushchenko Ruslan) – доктор технічних наук, професор, проректор по науково-педагогічній роботі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; e-mail: mrp1@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3287-9772

Шелковий Олександр Миколайович (Shelkovi Oлександр) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7414-4854>; e-mail: alnikshelk@gmail.com.

Фадеев Валерій Андрійович (Fadeev Valeri) – доктор технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, тел.: +380 50 323 64 18, e-mail: fadeev@fed.com.ua, ORCID: 0000-0003-2535-9039

Закovorotnij Олександр Юрійович (Zakovorotnij Oлександр) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (097) 967-32-71; e-mail: Oleksandr.Zakovorotnyj@khi.edu.ua; ORCID: 0000-0003-4415-838X

Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oлександр) – доктор технічних наук, професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.: +38096-6359372, e-mail: ukrstantko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455

Федоренко Віталій Сергійович (Fedorenko Vitaly) – аспірант кафедри технології машинобудування та металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (095) 9159688–e-mail: 19fws98@gmail.com, ORCID 0009-0006-3781-6144

ЧЕРНОВОЛ М.І., ПЕРМЯКОВ О.А., НЕМИРОВСЬКИЙ Я.Б., ШЕПЕЛЕНКО І.В., ГОРБУЛИК В.І.

МЕТОДОЛОГІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ

Автори роботи, маючи кожен свій досвід наукової діяльності та накопичені знання в галузі відновлення деталей і технології машинобудування, поставили собі за мету їхнє узагальнення та з позицій системного підходу вироблення методології технологічного проектування процесу відновлення зношених деталей. Для етапів життєвого циклу виробів машинобудування, що розв'язують задачу подовження термінів їх служби шляхом ремонту та відновлення зношених деталей, розроблено загальну схему та структуру інформаційного забезпечення технологічного проектування з використанням методів підвищення якості поверхневого шару. Запропоновано схему уточнення життєвого циклу деталей шляхом їх відновлення. Процес формування показників якості зношених деталей представлено у вигляді системи, що дає змогу дати багаторівневу оцінку якості відновлення деталі.

Ключові слова: відновлення деталей, технологічний процес, життєвий цикл, системний підхід, якість відновлення, проектування.

CHERNOVOL M., PERMYAKOV O., NEMYROVSKIY Y., SHEPELENKO I., GORBULIK V. METHODOLOGY FOR TECHNOLOGICAL DESIGN OF THE PARTS RECOVERY PROCESS

The authors of the paper, each with their own experience of scientific activity and accumulated knowledge in the field of parts recovery and mechanical engineering technology, set out to generalise them and develop a methodology for technological design of the process of recovery of worn parts from the standpoint of a systematic approach. For the stages of the life cycle of mechanical engineering products that solve the problem of extending their service life by repairing and restoring worn parts, a general scheme and structure of information support for technological design using methods of improving the quality of the surface layer have been developed. A scheme for specifying the life cycle of parts by repairing and restoring them is proposed. The process of formation of quality indicators of worn parts is presented in the form of a system that allows to give a multilevel assessment of the quality of restoration of a part.

Keywords: parts recovery, technological process, life cycle, systematic approach, quality of recovery, design.

Вступ. На сьогодні у реноваційних галузях найрозвиненіших країн світу задіяно близько 30% технологічного обладнання та робочої сили. Такий обсяг залучених ресурсів в машинобудуванні пов'язаний з тим, що відновлення зношених деталей залишається дуже важливим резервом підвищення ефективності використання техніки, економії матеріальних, паливно-енергетичних і трудових ресурсів. Технічна та економічна доцільність відновлення деталей зумовлена можливістю повторного (дуже часто неодноразового) використання 65-75% деталей. Собівартість відновлення зношених деталей не перевищує 50% вартості нових, а витрати на матеріал в 15-20 разів нижчі, ніж під час виготовлення деталей.

Поряд з економією матеріальних, енергетичних, трудових і природних ресурсів ремонтне виробництво за рахунок зниження кількості деталей, що надходять на утилізацію, а також пов'язаних з ними технологічними відходами, значно скорочує забруднення навколишнього середовища. Використання таких екологічно чистих методів обробки, як електроконтактне приварювання стрічки, електроіскрові методи, нанотехнології (фінішна антифрикційна безабразивна обробка тощо) та ін., дає змогу вважати сферу відновлення деталей безальтернативною з точки зору екологічності та економічності.

Процес відновлення деталей – складне конструкторсько-технологічне завдання, під час розв'язання якого, крім геометричних розмірів, частково змінюються деякі характеристики деталі, закладені в ній конструктором: матеріал окремих ділянок, фізико-механічні властивості, шорсткість поверхні тощо. У зв'язку з цим особливої ваги набуває питання проектування технологічного процесу відновлення деталей, під час якого вирішуються питання якості відновлення деталей.

Оскільки проблема відновлення деталей має комплексний характер, для її вирішення можливе застосування системного підходу, який передбачає методологічну орієнтацію вивчення, засновану на розгляді об'єкта у вигляді системи.

Мета дослідження. На підставі системного підходу, аналізу та узагальнення інформації в галузі технології машинобудування та ремонтного виробництва розробити загальну методологію технологічного проектування відновлення зношених деталей.

Аналіз основних досягнень та літератури. Згідно з існуючим уявленням методологія – це вчення про структуру та логічну організацію, методи та засоби діяльності [1]. Виходячи з цього, було поставлено завдання представлення системи загальних принципів організації побудови технологічного проектування процесу відновлення зношених деталей з використанням способів підвищення якості робочого шару.

Життєвий цикл виробів машинобудування від спонукаючої ідеї створення до повної утилізації добре відомий (рис. 1), а кожен з етапів достатньою мірою досліджено й описано в науково-технічній літературі [2].

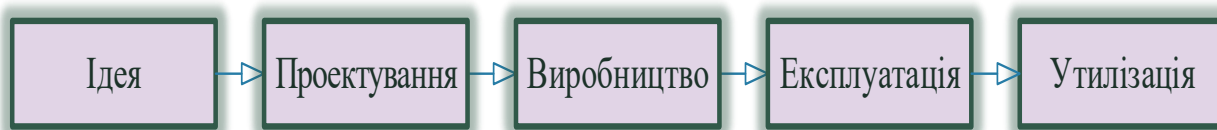


Рис.1 – Життєвий цикл виробу машинобудування

Таку загальну структуру можна уточнити і доповнити докладним описом окремих етапів і розв'язуваних на них завдань, дослідження яких дає нові знання і досвід, що потребують систематизації, узагальнення і вироблення рекомендацій щодо практичного використання. На рис. 2 запропоновано такий варіант уточнення структури життєвого циклу деталей для етапів, що вирішують завдання продовження термінів служби виробу шляхом відновлення зношених деталей.

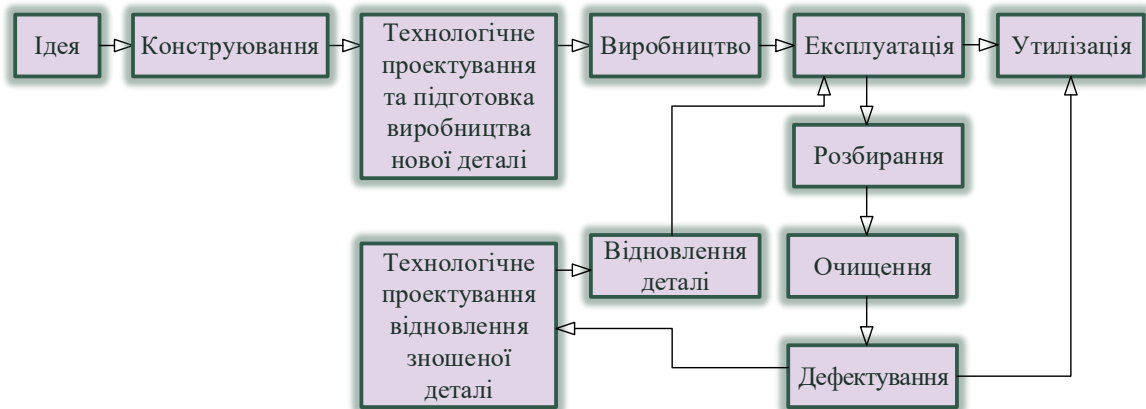


Рис.2 – Життєвий цикл виробу з уточненням етапів подовження термінів служби за рахунок відновлення зношених деталей

За тривалий період розвитку технології машинобудування як науки розроблено, впроваджено й описано загальні принципи та рекомендації, методологію й методики проектування технологічних процесів виготовлення та складання машин з урахуванням усього різноманіття типів виробництв (одиничне, серійне, масове), видів організації виробничих процесів (потокове, не поточе), галузевої особливості тощо. [4].

Розробленню маршрутних, операційних, групових, типових тощо технологічних процесів присвячено наукові праці відомих учених та існує безліч наукової та навчальної літератури [5, 6 та ін.]. У загальному випадку завдання, що вирішуються під час організації виробництва, а також послідовність їх виконання та основні елементи вихідної й базової інформації представлені на структурно-логічній схемі інформаційного забезпечення технологічного проектування процесу виробництва деталей машин (рис. 3).

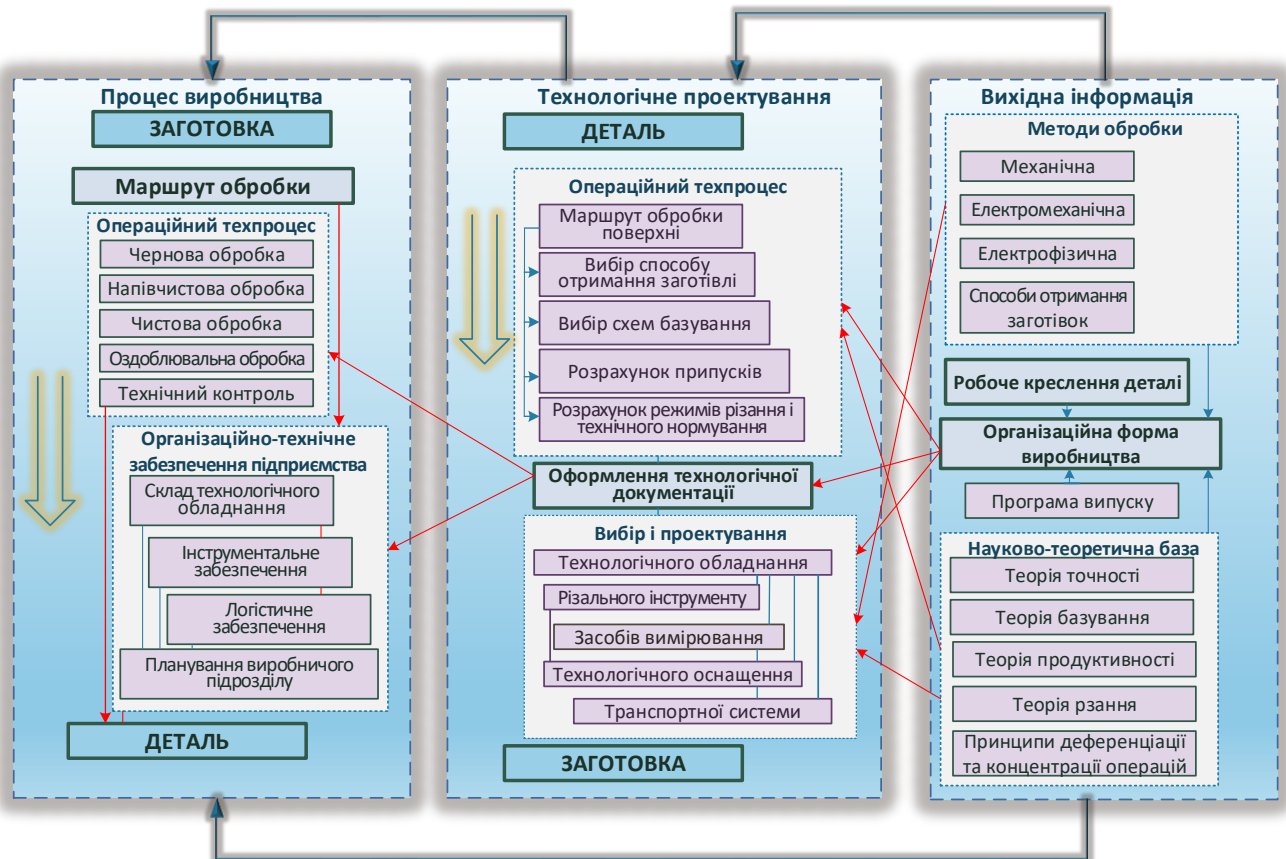


Рис. 3 – Послідовність технологічної підготовки виробництва під час виготовлення деталей

Під час аналізу процесу технологічного проектування і власне процесу виготовлення нової деталі

можна відзначити одну важливу особливість. У процесі виробництва заготовка (реальний об'єкт) відповідно до маршруту обробки послідовно проходить технологічні операції відповідно до принципу послідовного наближення до точності та якості оброблених поверхонь. У результаті зняття загального припуску формується остаточна деталь, яка повинна за формою, розмірами і фізико-механічними параметрами поверхонь відповідати робочому кресленню, яке і встановлюється на етапі технічного контролю. У процесі технологічного проектування послідовність інша. Вихідною інформацією є робоче креслення деталі (віртуальний об'єкт) і задана програма випуску. Під час технологічного проектування на основі комплексних знань про методи обробки, теорії точності, базування, продуктивності, різання тощо формується маршрут обробки.

На протязі розроблення операційного технологічного процесу визначаються схеми базування, розраховуються операційні припуски, режими різання, виконується технічне нормування. Тільки після визначення припусків і вибору з можливих варіантів способу отримання заготовки може бути отримано її робоче креслення (віртуальний об'єкт). Під час технологічного проектування обирають і проектують різальний інструмент, засоби технологічного оснащення та вимірювання, підбирають склад технологічного обладнання і транспортно-складських систем, оформляють необхідну технологічну документацію.

Результати. Експлуатація як етап життєвого циклу деталі припиняється після досягнення максимально допустимого зносу, що призводить до припинення роботи всього механізму. Для продовження життєвого циклу зношених деталей використовують технології їх відновлення [7]. Ці технології принципово відрізняються від технологій виготовлення нової деталі, хоча кінцевим продуктом виробництва і в тому, і в іншому випадку є одна й та сама готова деталь зі своїми службовими функціями.

Розглянемо технологічне проектування відновлення зношених деталей, яке починається з підготовчих операцій розбирання механізму або вузла після закінчення його роботи, очищення та дефектації зношених деталей (рис. 2). У процесі дефектації деталі сортують на такі групи [8]:

- придатні для експлуатації;
- ті, що потребують ремонту або відновлення;
- непридатні, що підлягають заміні.

Деталі першої групи не потребують ремонту, третьої – відбраковуються. Для деталей другої групи слід призначити технологічний процес відновлення.

З погляду можливості їх відновлення деталі слід розглядати як невідновлювані та відновлювані.

Невідновлюваними є поршневі кільця, фрикційні накладки гальм і зчеплення, прокладки, ущільнювальні кільця тощо. Такі деталі під час ремонту замінують.

Деякі деталі відновлюються один раз. При цьому придатність відновлюється на таку величину, що деталь служить у машині такий самий ресурс або термін, як і нова. Повторні ресурси або терміни служби інших змінних деталей після відновлення скорочуються. В інших випадках деталі можуть бути піддані багаторазовому відновленню. У цьому разі життєвий цикл виробу машинобудування підлягає уточненню (рис.4).

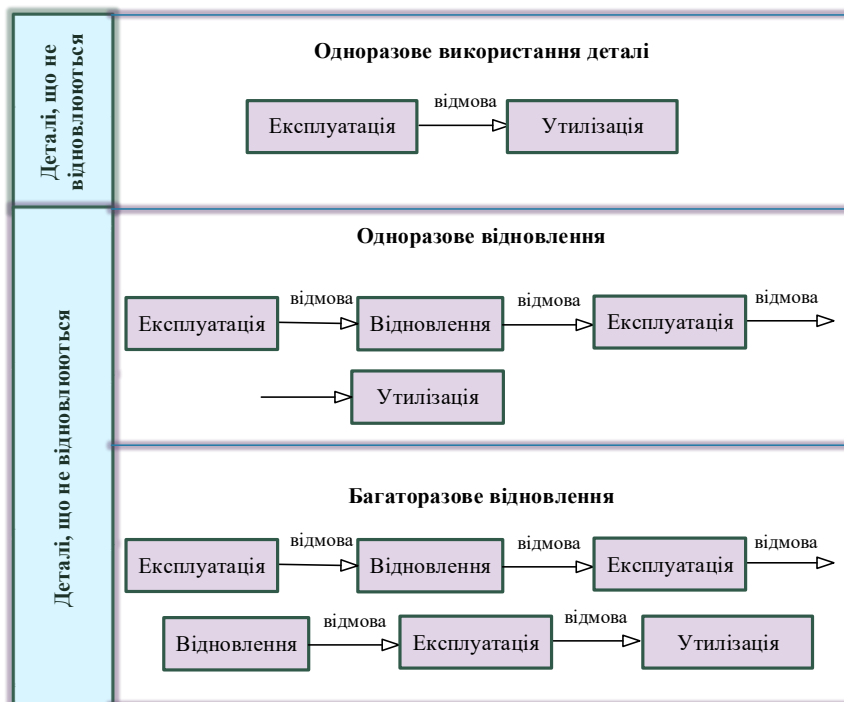


Рис. 4 – Продовження життєвого циклу виробу за рахунок відновлення деталі

У структурному відношенні технологічний процес відновлення деталі в загальному випадку можна розглядати як певним чином пов'язану сукупність способів усунення дефектів. Схему проектування технологічного процесу відновлення деталей, а також основні завдання, що вирішуються на окремих етапах, наведено на рис. 5.

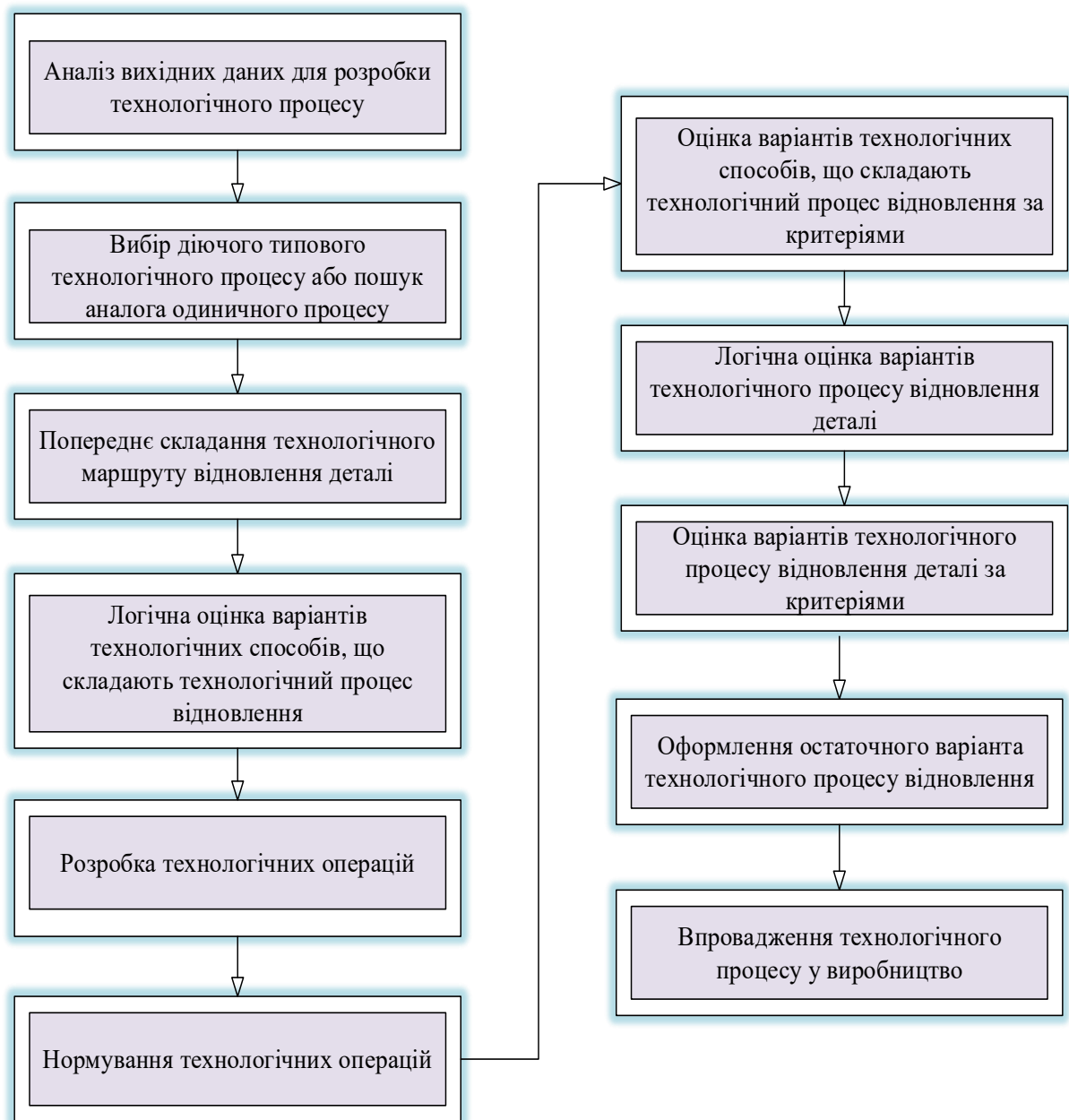


Рис. 5 – Основні етапи проектування технологічного процесу відновлення

Найвідповідальніші етапи проектування технологічного процесу відновлення деталей – вибір оптимального варіанта технологічного процесу. При цьому необхідний комплексний системний аналіз варіантів технологічного процесу, що включає розгляд технічної, організаційної та економічної доцільності їх застосування.

Питанню оцінки способів відновлення, а також розглянутим критеріям, що використовуються під час вибору раціонального способу відновлення, присвячено низку досліджень [9, 10 та ін.]. Оскільки ці питання не є предметом нашого дослідження більш детально зупинимося на послідовності технологічної підготовки ремонтного виробництва.

За аналогією зі схемою інформаційного забезпечення технологічного проектування і процесу виробництва деталей машин (рис. 3) запропоновано структурно-логічну схему інформаційного забезпечення технологічного проектування процесу відновлення зношених деталей (рис. 6). Як технологічний процес відновлення використано розроблену авторами [11] технологію відновлення цапф шестерень гідронасосів фінішною антифрикційною безабразивною обробкою (ФАБО). Порівняння двох схем (рис. 3 і 6) показує відмінність і спільні позиції під час організації технологічного процесу відновлення і процесу виготовлення нової деталі та є основою для побудови процесу відновлення зношених деталей.

Розроблення технології відновлення пов'язане з підвищенням якості поверхневого шару деталі та її експлуатаційних властивостей. Однак, на наш погляд, стосовно технологій відновлення деталей питання якості має охоплювати не тільки поверхневий шар деталі.

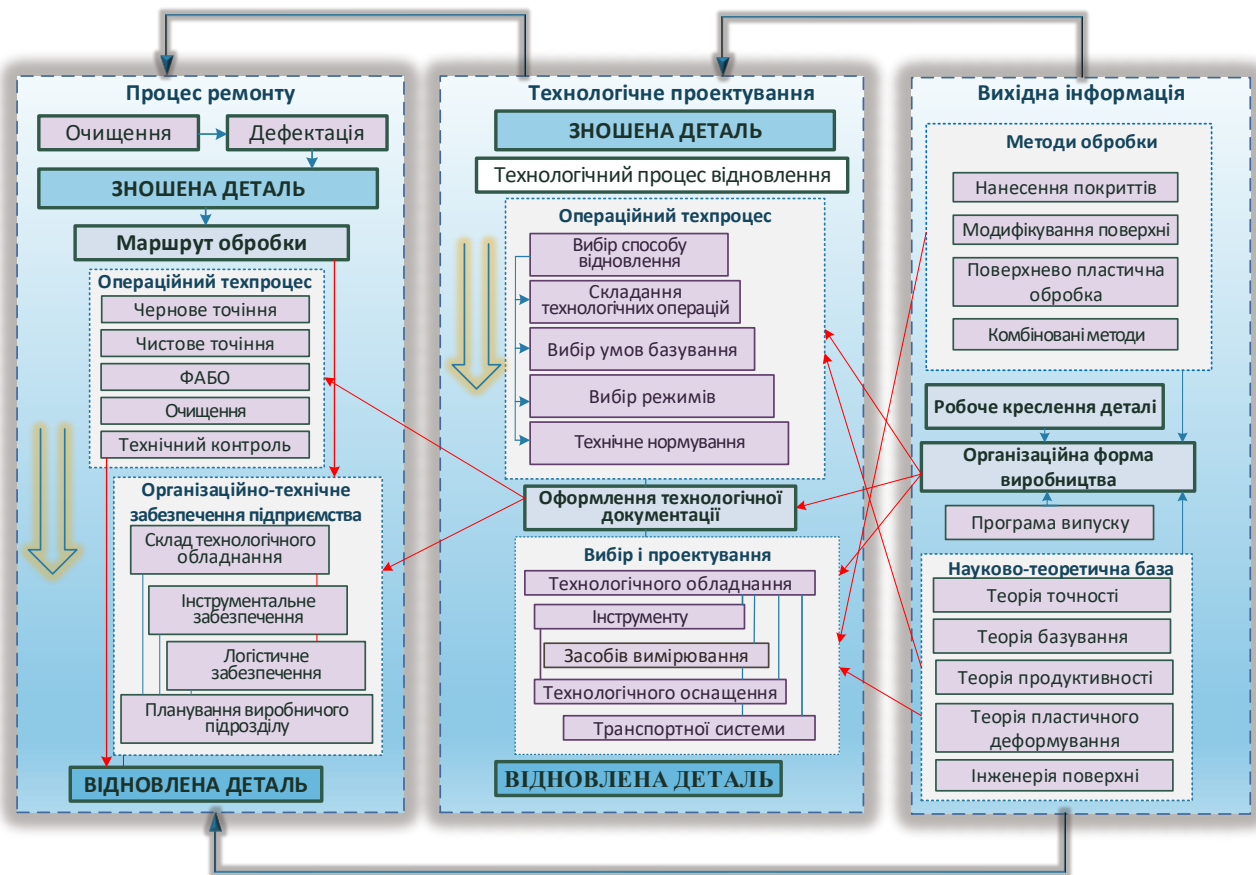


Рис. 6 – Послідовність технологічної підготовки ремонтного виробництва деталей

Для оцінки якості відновлених деталей автором [3] запропоновано використовувати повну номенклатуру показників (призначення, надійності, технологічності, економічності). Крім цього, можуть бути задіяні додаткова група показників (рівні відновлення, естетичності, безпеки). Нами запропоновано представлення процесу формування якості зношених деталей схемою, що відображає рівні оцінки окремих показників (рис. 7).

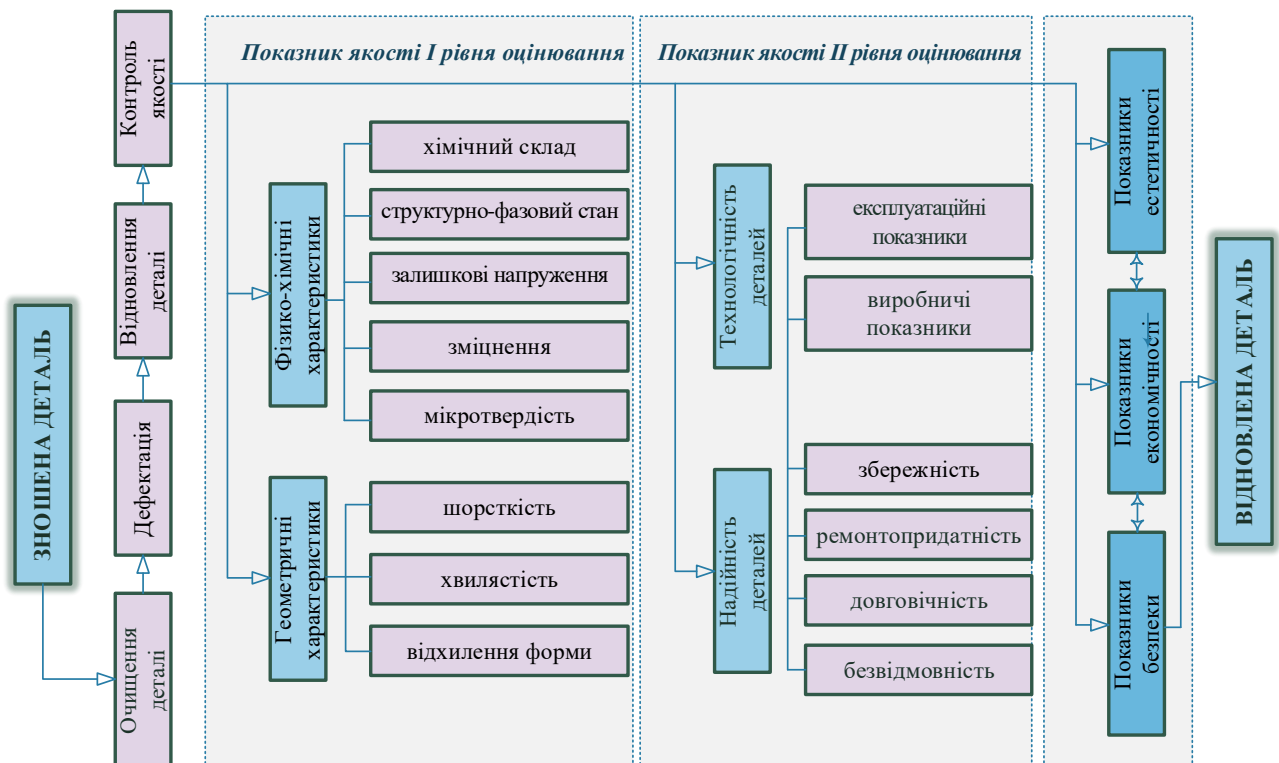


Рис. 7 – Система технологічного формування показників якості відновлених деталей

Таким чином, представлений підхід до проектування технологічного процесу відновлення деталей дає змогу дати комплексну оцінку якості відновлення деталей.

Висновки. Проведені теоретичні дослідження дозволили зробити наступні висновки:

1. Уточнено і доповнено структуру життєвого циклу виробу для етапів, що вирішують завдання продовження термінів служби за рахунок ремонту і відновлення зношених деталей:

2. Розроблено загальну схему та структуру інформаційного забезпечення технологічного проектування відновлення зношених деталей з використанням різних методів обробки, що забезпечують підвищення якості робочого шару.

3. Встановлено принципові відмінності між схемами технологічного процесу виготовлення і відновлення деталі. Під час виготовлення остаточна деталь за своїми технічними вимогами повинна відповідати її робочому кресленню. Розробка технології відновлення пов'язана з підвищенням якості поверхневого шару деталі та її експлуатаційних властивостей.

4. Запропоновано підхід до формування показників якості відновлених деталей, який дає змогу дослідити причинно-наслідкові зв'язки між параметрами технологічних процесів і показниками якості відновлюваних деталей, а також встановлювати шляхи підвищення якості відновлених деталей.

Список літератури:

1. Бірта Г. О. Методологія і організація наукових досліджень : навч. посіб. / Г.О. Бірта, Ю.Г. Бургу – К. : «Центр учбової літератури», 2014. – 142 с.
2. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія/ Є.А. Фролов, С.І. Кравченко, С.В. Попов, С.М. Гнітко. – Полтава, 2019. – 201 с.
3. Черновол М.И. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники: Учеб. пособие/ М.И. Черновол. – К.: УМК ВО, 1989. – 259 с.
4. Яковенко І.Е. Технологічні основи машинобудування: навч. посіб./ І.Е. Яковенко, О.А. Пермяков, А.В. Фесенко. – Харків: НТУ «ХП», 2022. – 421 с.
5. Петраков Ю.В. Технології виготовлення деталей складної форми. Частина 1: навч. посіб. / Ю.В. Петраков, С.В. Сохань, В.К. Фролов, В.М. Кореньков. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 288 с.
6. Фізико-математична теорія процесів обробки матеріалів і технології машинобудування / Під загальною редакцією Ф.В. Новікова й О.В. Якимова. У десяти томах. – Одеса: ОНПУ, 2005. – Т. 9. «Проектування технологічних процесів у машинобудуванні». – 584 с.
7. Стецько А. Є. Технологічне забезпечення ресурсу роботи виготовлених і відновлених деталей: монографія. – Львів: Видавнича компанія «АРС», 2013. – 240 с.
8. Шепеленко І.В., Магопєць М.С. Загальна структура технологічного процесу відновлення деталей машин// Молода наука – роботизація і нано-технології сучасного машинобудування: Збірник наукових праць міжнародної молодіжної науково-технічної конференції, 12 – 14 квітня 2023 р. – Краматорськ - Тернопіль: ДДМА, 2023. С.290 – 293.
9. Лузан С.А. Критерии выбора способа восстановления деталей машин и определение рационального маршрута технологии/ С.А. Лузан// *Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка*. 2017. Вип.183. – С.45–56.
10. Шепеленко І.В., Красота М.В. Сучасні технології реновації деталей автомобільного транспорту. Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту: *матеріали X міжнародної науково-технічної інтернет-конференції* (14-15 квітня 2022 р.), Вінниця: ВНТУ, 2022. С.325–328.
11. Shepelenko I.V. Improvement of finishing antifirction treatment without abrasive of the rubbing parts surfaces of agricultural machineries/ I.V. Shepelenko, V.V. Cherkun, A. Warouma // *International Journal of Agricultural Research, Innovation and Technology (IJARIT) Current Issue: Volume 4, Issue 1, June 2014*, pp. 98–101. <https://www.banglajol.info/index.php/IJARIT/issue/view/1247>.

Bibliography (transliterated):

1. Birta, H. O., Burhu Yu.H. (2014). Metodolohiia i orhanizatsiia naukovykh doslidzhen [Methodology and organisation of scientific research]. Kyiv. 142. [in Ukraine].
2. Frolov, Ye.A., Kravchenko, S.I., Popov, S.V., Hnitko, S.M. (2019). Tekhnolohichne zabezpechennia yakosti produktsii mashynobuduvannia [Technological support for the quality of engineering products]. Poltava. 201. [in Ukraine].
3. Chernovol, M.I. (1989). Vosstanovlenie i uprochnenie detalej selskohozyajstvennoj tehniky [Restoration and hardening of parts of agricultural machinery]. Kiev, *UMK VO*, 259. [in Russian].
4. Yakovenko, I.E., Permiakov, O.A., Fesenko A.V. (2022). Tekhnolohichni osnovy mashynobuduvannia [Technological fundamentals of mechanical engineering]. Kharkiv. 421. [in Ukraine].
5. Petrakov, Yu.V., Sokhan, S.V., Frolov, V.K., Korenkov, V.M. (2020). Tekhnolohii vyhotovlennia detalei skladnoi formy [Technologies for manufacturing parts with complex shapes]. Kyiv. 288. [in Ukraine].
6. Novikov, F.V., Yakymov, O.V. (2005). Fyzyko-matematychna teoriia protsesiv obrobky materialiv i tekhnolohii mashynobuduvannia [Physical and mathematical theory of material processing and mechanical engineering technologies]. Odessa. 584. [in Ukraine].
7. Stetsko, A. Ye. (2013). Tekhnolohichne zabezpechennia resursu roboty vyhotovlenykh i vidnovlenykh detalei [Technological support for the service life of manufactured and refurbished parts]. Lviv. 240. [in Ukraine].
8. Shepelenko, I.V., Mahopets M.S. (2023). Zahalna struktura tekhnolohichnoho protsesu vidnovlennia detalei mashyn [The general structure of the technological process of restoring machine parts]. *Moloda nauka – robotyzatsiia i nano-tekhnolohii suchasnoho mashynobuduvannia. Zbirnyk naukovykh prats mizhnarodnoi molodizhnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii*. Kramatorsk – Ternopil. 290 – 293. [in Ukraine].
9. Luzan, S.A. (2017). Kriterii vybora sposoba vosstanovleniya detalej mashin i opredelenie racionalnogo marshruta tehnologii [Criteria for selecting a machine part rebuilding method and defining a rational technology route]. *Visnik HNTUSG im. P.Vasilenka. Vip.183*. 45–56. [in Russian].
10. Shepelenko, I.V., Krasota, M.V. (2022). Suchasni tekhnolohii renovatsii detalei avtomobilnoho transportu [Modern technologies for the renovation of motor vehicle parts]. *Problemy i perspektivy rozvytku avtomobilnoho transport. Materialy X mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii*. Vynnytsia. VNTU. 325–328. [in Ukraine].
11. Shepelenko I.V. Improvement of finishing antifirction treatment without abrasive of the rubbing parts surfaces of agricultural machineries/ I.V. Shepelenko, V.V. Cherkun, A. Warouma // *International Journal of Agricultural Research, Innovation and Technology (IJARIT) Current Issue: Volume 4, Issue 1, June 2014*, pp. 98–101. <https://www.banglajol.info/index.php/IJARIT/issue/view/1247>.

Поступила (received) 02.02.2023

Черновол Михайло Іванович (Chernovol Mykhailo) – академік НААН України, доктор технічних наук, професор, професор кафедри "Експлуатація та ремонт машин" Центральноукраїнського національного технічного університету, м.Кропивницький; e-mail: mchernovol50@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-6833

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

Немировський Яків Борисович (Nemyrovskiy Yakiv) – доктор технічних наук, професор кафедри "Механічна інженерія" Державного університету «Житомирська політехніка», м.Житомир; e-mail: nemyrovskijakov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8005-8584.

Шепеленко Ігор Віталійович (Shepelenko Ihor) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри "Експлуатація та ремонт машин" Центральноукраїнського національного технічного університету, м.Кропивницький; e-mail: kntucpfzk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1251-1687

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

МИРОНЕНКО Є.В., КОВАЛЬОВ В.Д., ВАСИЛЬЧЕНКО Я.В., КЛИМЕНКО Г.П., МИРАНЦОВ С.Л.

СУЧАСНИЙ СТАН ЛЕЗОВОЇ ОБРОБКИ БЛОЧНО-MOДУЛЬНИМ ІНСТРУМЕНТОМ НА ВАЖКИХ ВЕРСТАТАХ ІЗ ЧПК

У статті розглянуто аналіз сучасного стану проблеми лезової обробки, розглянуті шляхи підвищення ефективності процесу обробки на важких та унікальних верстатах, системи збірної інструменту, надійність інструменту, зроблено оцінку методів забезпечення задовільного стружкоутворення та їх технологічних можливостей, розглянуті методи багатокритеріальної оптимізації, визначені напрямки наукового пошуку, сформульовано мету та завдання дослідження. Уперше опубліковано наукові основи створення систем блочно-модульного інструменту для важких верстатів, які містять: принципи створення систем блочно-модульного інструменту на основі кваліметричного оцінки станів процесу механічної обробки і можливих відмов технологічної системи, властивостей й критеріїв їхньої оптимізації, визначення вагомостей критеріїв; основи конструювання елементів блочно-модульного інструменту з урахуванням оцінки напружено-деформованого стану та жорсткості їх основних вузлів, створення математичної моделі процесу дробління стружки різальними елементами та його імовірнісної оцінки.

Ключові слова: лезова обробка, важкі токарні верстати, система збірної модульного інструменту, надійність, стружкоутворення, багатокритеріальна оптимізація.

MIRONENKO E.V., KOVALOV V.D., VASYLCHENKO YA.V., KLIMENKO G.P., MYRANTSOV S.L THE CURRENT STATE OF BLADE MACHINING WITH BLOCK-MODULAR TOOLS ON HEAVY-DUTY CNC MACHINES

The article analyzes the current state of the problem of blade machining, considers ways to improve the efficiency of the machining process on heavy unique machine tools, prefabricated tool systems, tool reliability, evaluates methods for ensuring satisfactory chip formation and their technological capabilities, considers methods of multicriteria optimization, identifies areas of scientific research, and formulates the purpose and objectives of the study. For the first time, the scientific principles of creating block-modular tooling systems for heavy machine tools were published, which include: principles of creating block-modular tooling systems based on qualimetric assessment of the states of the machining process, possible failures of the technological system, properties and criteria for their optimization, determination of the criteria weights; principles of designing block-modular tool elements taking into account the assessment of the stress-strain state and stiffness of the main components, creation of a mathematical model.

Keywords: blade machining, heavy-duty lathes, prefabricated modular tooling system, reliability, chip formation, multi-criteria optimization.

Вступ. В роботі проведений аналіз сучасного стану проблеми лезової обробки, розглянуті шляхи підвищення ефективності процесу обробки на важких та унікальних верстатах, системи збірної інструменту, надійність інструменту, зроблено оцінку методів забезпечення задовільного стружкоутворення та їхніх технологічних можливостей, розглянуті методи багатокритеріальної оптимізації, визначені напрямки наукового пошуку, сформульовано мету і завдання дослідження.

Ефективність процесу механічної обробки деталей на важких верстатах більшою мірою визначається надійністю та універсальністю різального інструменту, які залежать від безлічі випадкових факторів. До 70% операцій механічної обробки, які виконуються на важких токарних верстатах, пов'язані зі зняттям великих перерізів шару, що зрізаються.

Це пояснюється тим, що у важкому машинобудуванні найпоширеніше використовують заготовки, отримані методом лиття, кування, штампування, які характеризуються наявністю великих нерівномірних припусків, пор, раковин, тріщин, неметалевих включень та інших дефектів поверхневого шару. Тому на етапі отримання заготовок виникає необхідність застосування чорнової лезової обробки з метою видалення дефектного поверхневого шару. Трудомісткість обробки різанням таких заготовок дуже велика. Наприклад, для обробки заготовки довжиною (4000 ... 5000) мм й діаметром 1500 мм знадобиться 3 робочі зміни (приблизно 22 години).

Мета дослідження. Основною метою та основними кінцевими завданнями, які мають бути вирішені є дослідження сучасного стану проблеми лезової обробки, розгляд шляхів підвищення ефективності процесу обробки на важких токарних верстатах з ЧПК, вивчення систем збірної модульного інструменту, надійності систем, визначення оцінки й методів забезпечення задовільного стружкоутворення та їхніх технологічних можливостей.

Основна частина.

Особливості обробки на важких токарних верстатах. Після видалення дефектного шару з поковки, деталь піддається термообробці, а подальша лезова обробка проводиться на важких токарних верстатах. При цьому видаляється припуск до 30 мм, з метою кращого наближення форми заготовки до профілю деталі. В результаті перед кінцевими (чистовими) операціями вага деталі становить лише (60 ... 70) % від ваги початкової заготовки. Аналіз застосованих глибин різання [1] під час обробки на важких токарних верстатах показує значне розсіювання і залежність їх від розміру верстата (рис. 1).

У роботах авторів [2, 3] проведені дослідження умов обробки на важких токарних верстатах на підприємствах різних галузей промисловості за допомогою статистичного аналізу. Вивчалися середні значення параметрів, що характеризують умови обробки, їхні розподіли для кожного типорозміру верстата. Розглядали важкі токарні верстати, що випускаються Краматорським заводом важкого верстатобудування з найбільшим діаметром встановлюваного над станиною виробу $D_c = (1250... 4000)$ мм. Максимальні значення параметрів розподілу умовно приймали за такі, що дорівнюють максимальному значенню відповідного параметра, що зустрічається в інформаційному масиві банку даних. На рис. 2 наведені найбільші значення діаметрів заготовок, що обробляються на верстатах даного типорозміру.

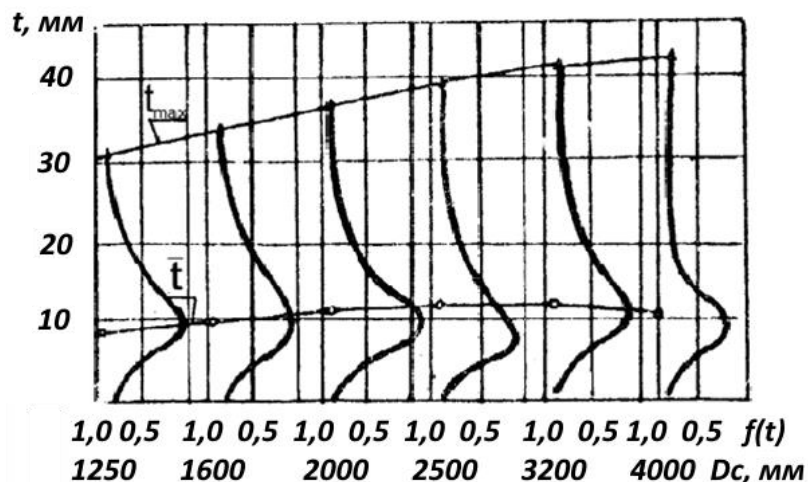


Рис. 1 – Розподіл глибин різання при обробці на важких токарних верстатах різних розмірів (D_c)

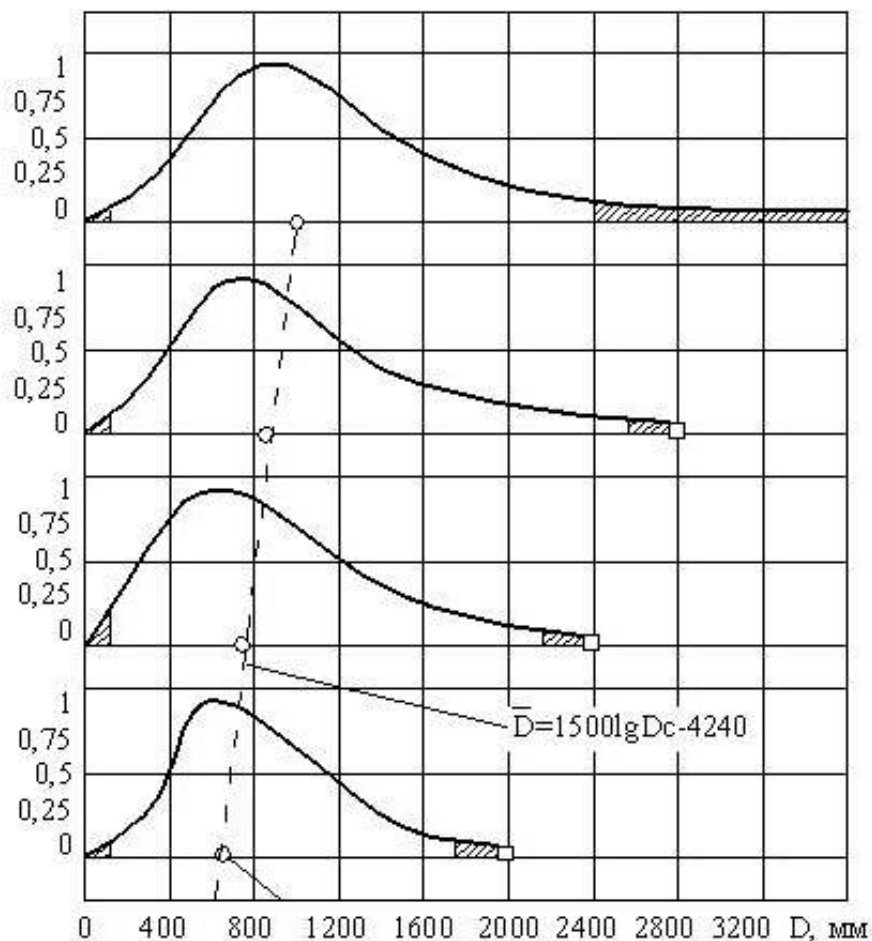


Рис. 2 – Розподіл діаметрів заготовок, що обробляються на важких токарних верстатах

Параметри умов обробки на важких верстатах характеризуються значним розсіюванням. Маса заготовок, що обробляються на цих верстатах, коливається від 0,5 до 250 тонн (рис. 3), діаметри заготовок від 500 до 3750 мм. Значне розсіювання параметрів умов обробки на верстатах різних типорозмірів, що характеризується коефіцієнтом варіації параметра, свідчить про те, що не завжди параметри деталі відповідають розміру верстата.

Це пояснюється тим, що через підвищену вартість обладнання на деяких підприємствах немає всієї розмірної гами важких верстатів.

Номенклатура марок матеріалів, що обробляються на важких верстатах, дуже широка. Встановлено, що 88 % становлять заготовки зі сталей, з них близько 60% легованих нікелем, ванадієм, хромом і молібденом (рис. 4).

Як показали дослідження, проведені в роботі [2, 3, 4], під час обробки валків холодного і гарячого прокату на важких токарних верстатах здебільшого застосовують дві марки твердого сплаву залежно від перерізу шару, що зрізається (рис. 5). На діаграмі можна виділити три зони: 1 - зона застосування Т5К10 для чорної обробки, 2 - зона застосування сплаву Т15К6 і 3 - перетинання зазначених зон – спільного застосування сплавів.

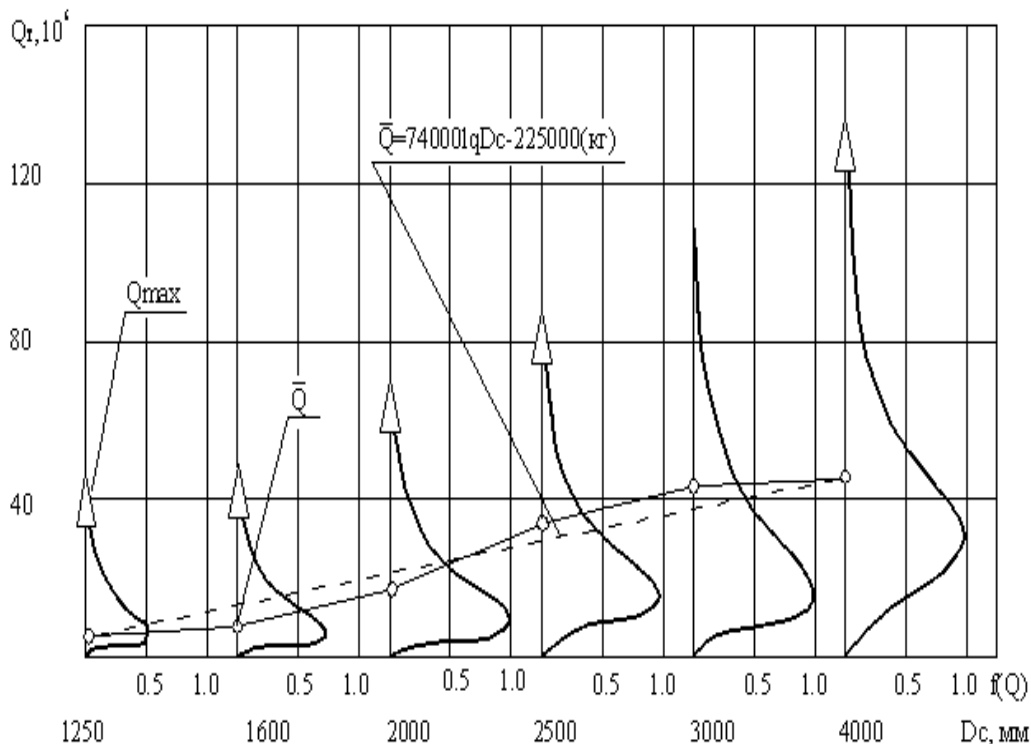


Рис. 3 – Розподіл маси заготовок, що обробляються на важких токарних верстатах

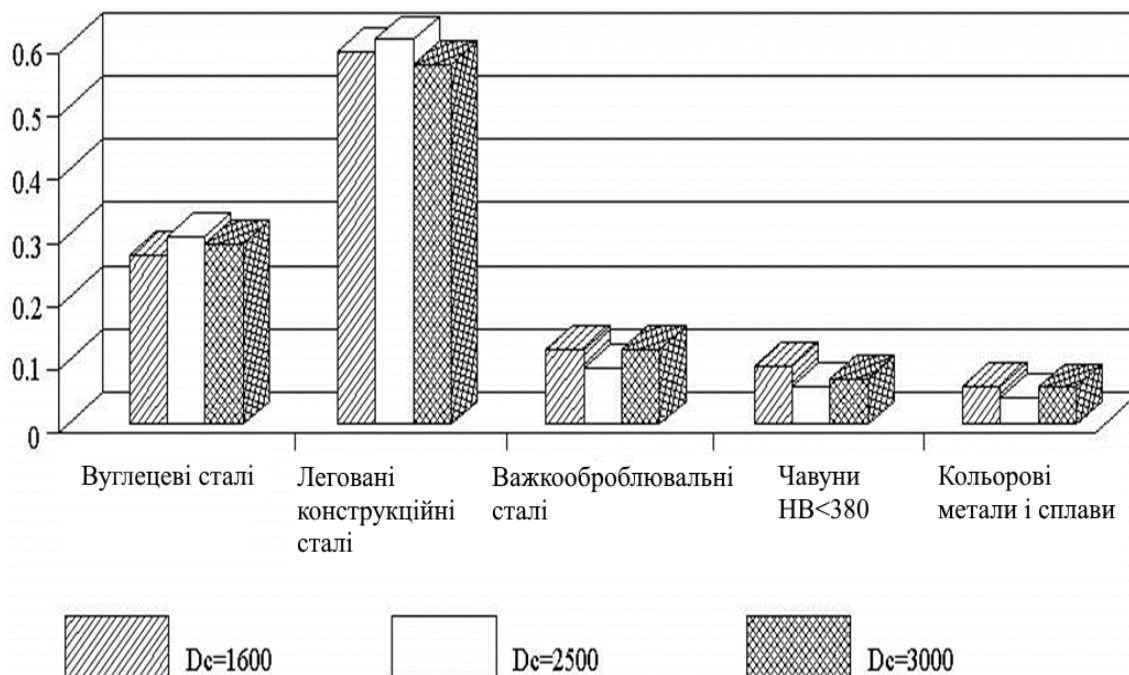


Рис. 4 – Діаграма розподілу матеріалу заготовок, що обробляються на важких токарних верстатах.

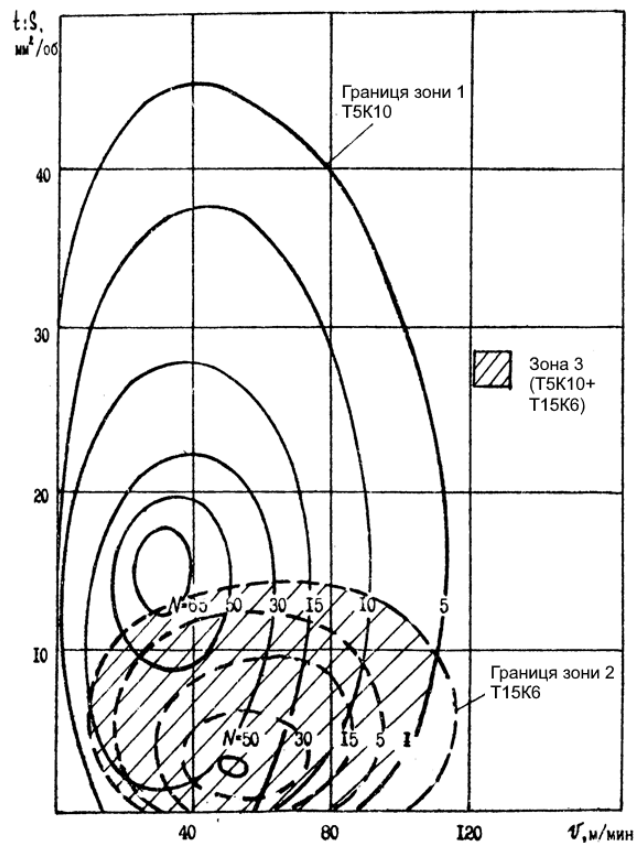


Рис. 5 – Области застосування марок твердого сплаву при обробці валків холодного і гарячого прокату на важких верстатах.

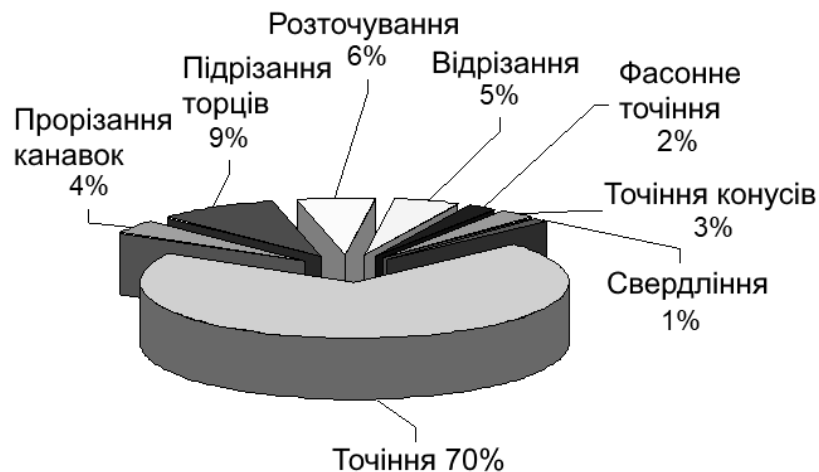


Рис. 6 – Розподіл технологічних переходів під час обробки на важких токарних верстатах.

На важких токарних верстатах виконуються найрізноманітніші операції (рис. 6). Близько 94% становлять операції, що виконуються різцями, причому поздовжнє точіння в середньому становить близько 70%. Умови експлуатації інструменту багато в чому визначаються його конструкцією. На підприємствах, що використовують важкі верстати, нині застосовують головним чином два типи різців: напайні з твердосплавною пластиною, розташованою вздовж передньої поверхні, і збірної конструкції з різальною вставкою, оснащеною пластиною твердого сплаву, розташованою вздовж задньої поверхні.

Стохастичний характер процесів обробки, велике розсіювання властивостей оброблюваних матеріалів та інших параметрів умов обробки призводить до необхідності ймовірнісного підходу до визначення конструктивних параметрів, який потребує розроблення стосовно різального інструменту, що особливо важливо для важких верстатів з ЧПК.

Спостереження за експлуатацією твердосплавних різців на важких токарних верстатах [4] показали, що

поряд зі зношуванням значну кількість має руйнування різальної частини у вигляді викришування і поломок. Наявність неусувних відмов різців (поломок) має великий вплив на ефективність обробки великих деталей.

Особливості розвитку машинобудування останніми роками змінили характер виробництва у важкому машинобудуванні у зв'язку з освоєнням нової гама важких токарних верстатів, оснащених пластинчастими супортами і ЧПК. Це вплинуло на умови експлуатації інструменту на цих верстатах [3, 5], а розробка і застосування високопродуктивного блочно-модульного інструменту з механічним закріпленням різальних пластин поставлені в основу раціонального використання цього обладнання.

Системи збірного інструменту і принципи їх компоновання. З метою підвищення універсальності інструменту й одночасного спрощення конструкції розроблені блочно-модульні системи інструменту для верстатів різних типів, які забезпечують великий ефект завдяки технології групового виготовлення інструменту.

Системи інструменту, як і будь-які матеріальні системи, являють собою безліч елементів, що перебувають у зв'язках один з одним та утворюють певну єдність. З погляду зовнішніх умов необхідними елементами систем є приєднувальні поверхні, призначені для встановлення і закріплення кріпильної частини різального інструменту в технологічному обладнанні.

Системою інструментів називають сукупність типорозмірних рядів систем базування і закріплення різального інструменту та систем базування і закріплення компоновок інструментів на верстатах, що забезпечує виконання технічних і економічних вимог ефективного використання в автоматизованому виробництві.

Усі застосовані раніше системи інструменту будувалися за схемою, яка наведена на рис. 1.7, заснованою на відомому принципі універсально-налагоджувальних пристосувань [6]. Інструмент, розроблений за цим принципом, отримав назву - блочно-модульного інструменту. З точки зору вибору системи інструменту важливим є виявлення впливу допоміжного інструменту на продуктивність праці та вартість обробки.



Рис. 7 - Принципова схема системи інструменту

Допоміжний інструмент - елемент системи інструменту, за допомогою якого різальний інструмент базується і закріплюється на верстатах з урахуванням низки умов макро- і мікрогеометрії. З його допомогою реалізується зв'язок між робочим органом верстата (шпиндель, супорт) і різальним інструментом.

Маслов А.Р. [7] запропонував під час проектування компоновання допоміжного інструменту для верстатів фрезерно-розточувальної групи враховувати: погіршеність встановлення, початковий зсув, переміщення в результаті пружних і контактних деформацій на якість оброблюваної поверхні (рис. 1.8.).

Під час оцінки величини пружних відтиснень, обробці сталі, використовуються емпіричні залежності для розрахунку радіальної сили різання P_1 :

$$\Delta_{np} = \frac{1}{j} C \left(\frac{\delta_b^5}{75} \right)^\alpha t^\beta, \quad (1)$$

де α і β – коефіцієнти, що залежать від матеріалу заготовки і різальної частини; C – коефіцієнт, що

враховує технологічні особливості і геометрію інструменту; j - жорсткість технологічної системи.

Розв'язання зазначеної задачі дає змогу аналізувати можливі варіанти технологічних умов обробки, для яких будується модель, призначена для розрахунку точності оброблюваної поверхні.

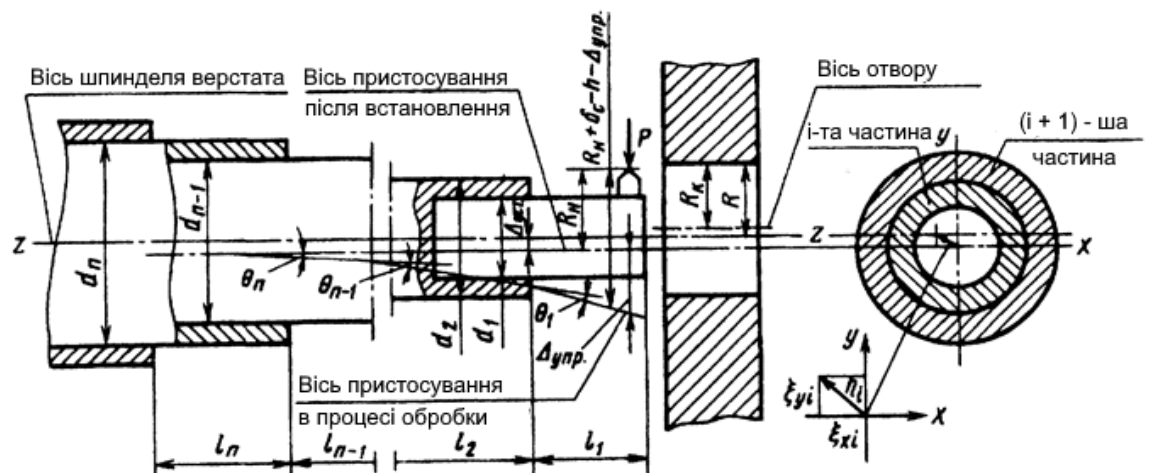


Рис. 8 - Схема утворення відхилень положення різальних кромки інструменту

На другому етапі аналізується розмірний ланцюг компоновки системи допоміжного інструменту (рис. 1.9) через порівняння величин відхилень, що допускаються, на присднувальні поверхні базисних агрегатів і змінних налагоджень:

$$\bar{e}_{\Sigma(x)} = \frac{1}{K_{\Sigma(x)}} \sqrt{e_{cp}^2 \sum_1^m A_i^2 K_i^2}, \quad (2)$$

де, e_{cp} - половина середнього допуску на ланки розмірного ланцюга; $K_{\Sigma(x)}$ - коефіцієнт відносного розсіювання величини замикаючої ланки.

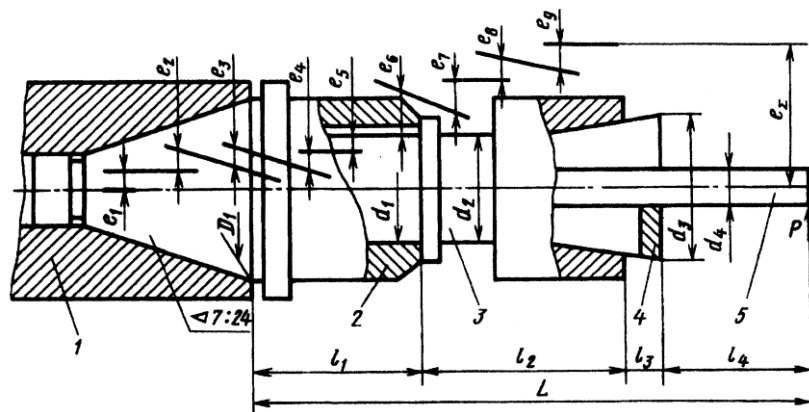


Рис. 9 – Розмірний ланцюг компоновки допоміжного інструменту

В якості $e_{\Sigma(x)}$ приймають половину припустимого биття присднувальних поверхонь допоміжного інструменту для конкретного виду різального інструменту. Аналіз розмірного ланцюга дає змогу створювати різні компоновки з урахуванням забезпечення вимог точності прецизійної обробки поверхонь корпусних деталей.

Інструмент, що збирається з уніфікованих вузлів і агрегатів, переналагоджують відповідно до зміни оброблюваних деталей простим компонованням уніфікованих взаємозамінних вузлів. Традиційний інструмент замінюється комплектами, складеними з уніфікованих агрегатів і вузлів, з їхнім частковим або повним розбиранням для подальшого складання в іншому поєднанні. Така конструкція дає змогу замовити не просто інструмент певного типу, а систему інструменту з необхідними змінними пристроями.

Система блочно-модульного інструменту є ефективним засобом задоволення вимог споживачів до комплексного оснащення верстатів з ЧПК, що дає змогу зменшити кількість індивідуальних замовлень.

Для складання інструменту різних типів використовують певну кількість деталей (модулів), які утворюють взаємопов'язаний механізм, що має достатню результуючу жорсткість і точність. Такий інструмент дає змогу створювати комбіновані інструменти, змінювати довжини і діаметри відповідно до

кожного конкретного завдання обробки. Складений інструмент має меншу жорсткість порівняно із суцільним інструментом, проте в низці випадків має більшу здатність до гасіння вібрацій.

Основним і найважливішим вузлом блочно-модульного інструменту є з'єднувальний елемент, який забезпечує не тільки взаємне з'єднання окремих частин інструменту, а й жорсткість, точність і повторюваність складання блоків. У розглянутій системі як з'єднувальним елементом є циліндричний стрижень із різьбою на кінці, що стикується з циліндричним отвором із різьбою. Базування також забезпечується за ретельно обробленими торцевими поверхнями.

Слід зазначити, що принцип "блоковості" певною мірою застосовано в системах допоміжного інструменту для верстатів з ЧПК із пристроями автоматичної зміни інструменту. На практиці такі системи можуть бути ретельно відпрацьовані для різного обладнання. Однією з найдосконаліших систем для токарних верстатів з ЧПК є, зокрема, система блочно-модульного інструменту концерну "Сандвік" (Sandvik, Швеція) (рис. 1.10). Усі різцеві модулі системи мають базові поверхні з циліндричним отвором і пазом у середині хвостовика (рис. 1.10, а). Під час встановлення модуля 1 у гніздо оправки 3 (зверху вниз) блок поверхнями виступу А базується в прямокутному гнізді оправки. При цьому в циліндричний отвір і паз модуля входить фігурний виступ тяги 2 (рис. 1.10, б). Під час зміщення тяги 2 під дією сили Q відбувається закріплення модуля в гнізді оправки 3 (рис. 1.10, в).

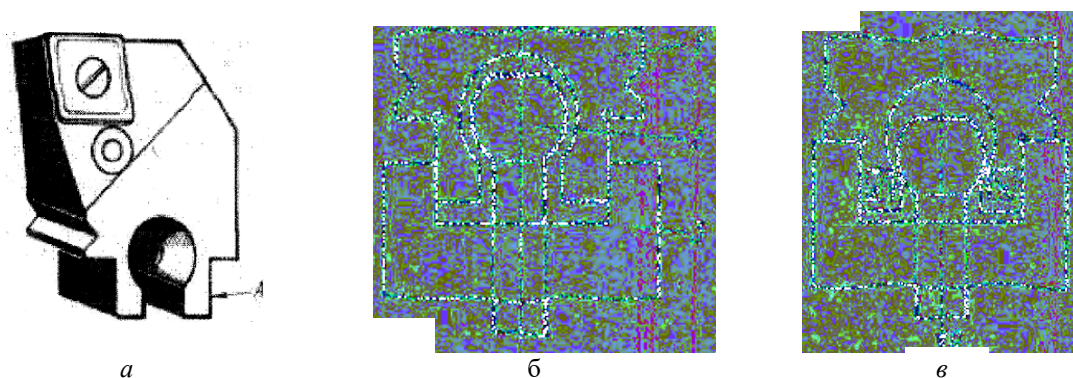
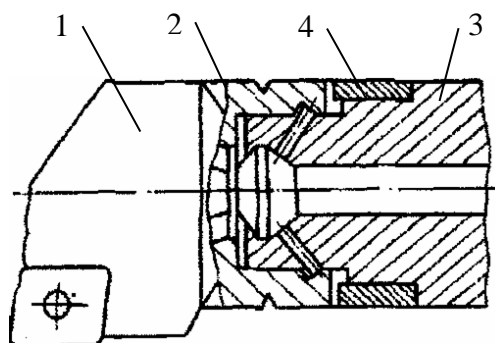


Рис. 10 – Різцевий модуль (а) і схема його кріплення на базовій оправці (б)

У зв'язку із появою верстатів з ЧПК, об'єднанням їх у ГВС, виникла потреба в системах модульного інструменту. У 80-х роках провідні зарубіжні фірми розробили нове покоління блочного інструменту з метою підвищення коефіцієнта використання токарних верстатів з ЧПК і обробних центрів у гнучких технологічних комплексах [8].

Фірмою "Hertel" розроблено оригінальну інструментальну систему "Hertel-FT", що складається з інструментальних модулів і тримачкової частини (рис. 11). Модуль з'єднується з державкою шляхом зачеплення двох плоских зубчастих коліс 3, одержуваних способом холодного видавлювання. В осьовому напрямку модуль затягується цангою 4, яка пелюстками складного профілю захоплює модуль 1. За допомогою тяги 5 цанга 4 переміщається всередину тримачкової частини 2, тягнучи за собою модуль 1. Перехід на цю систему збільшить вартість різального інструменту на (40 ... 60)%, бо модулі складніші й точніші за стандартні різці.



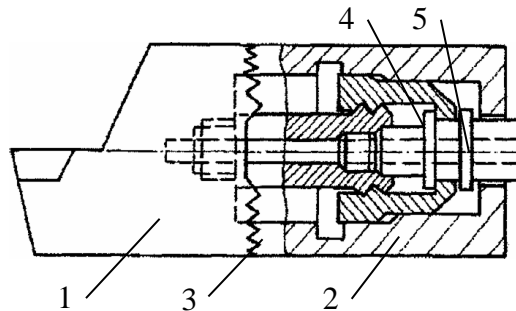
1 – модуль, 2 – циліндрична цапфа, 3 – тяга, 4 – штифт, 5 – кільцева виточка

Рис. 11 – Конструкції блочно-модульних різців "Hertel"

У системі "Multiflex" фірми "Widia-Krupp" (ФРН) змінні модулі мають циліндричні та торцеві базові поверхні (рис. 12). На кінці державки виконано циліндричну цапфу 2, яка входить в отвір корпусу змінного модуля 1. В отворі цапфи розміщена центральна тяга 3, що контактує з чотирма штифтами 4, розташованими похило до осі тяги. Під час переміщення тяги штифти взаємодіють із кільцевою виточкою 5 в отворі модуля і закріплюють її на цапфі державки, підтягуючи модуль в осьовому напрямку до упору в

торець.

Нині широко використовується система уніфікованого інструменту з циліндричним хвостовиком [8] для токарних верстатів із ЧПУ мод. 16K20T1Ф3, 1П756МФ3 тощо (рис. 13). У розглянутій системі всі різцетримачі базуються по циліндру хвостовика (з рифленнями по лисці), що забезпечує точну кутову установку інструменту, і штифтом. Такий інструмент кріпиться в револьверній голівці за допомогою клина, що також має рифлення, але зміщені щодо рифлень хвостовика. Різцетримачі призначені для кріплення різців з перерізом 16×16 до 40×40 мм.



1 – модуль, 2 – державка, 3 – плоске зубчасте колесо, 4 – цанга, 5 – тяга

Рис. 12 – Конструкції блочно-модульних різців "Widia-Krupp"

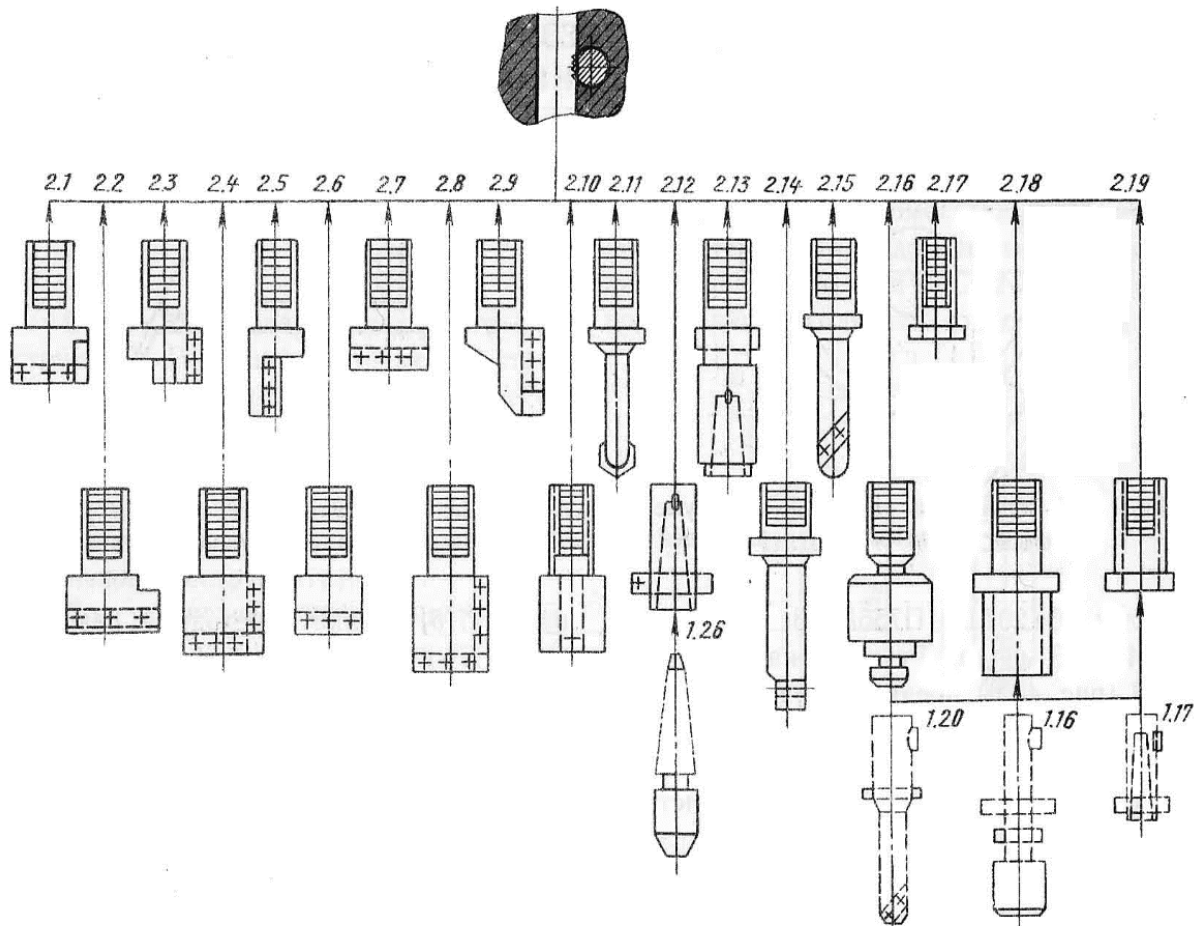


Рис. 13 – Система інструменту з циліндричним хвостовиком

Для верстатів із ЧПК моделей 1A734Ф3, 16K30Ф3 розроблено системи інструменту з базуванням призмою (рис. 14).

Принципи закріплення інструменту прийняті такими самими, як для різцетримачів із циліндричним хвостовиком. Відмінною особливістю різцетримачів з призмою, що базує, є те, що в них можна встановлювати як праві, так і ліві різці. Різцетримачі забезпечують закріплення різців з перерізом державки 16×16 до 40×40 мм. ЕНІМСом (м. Москва) розроблено систему інструменту для багатоцільових верстатів

[8]. До кожної системи пропонується набір основних оправок із відповідним хвостовиком: або з конусністю 7:24, або з розмірами (за ІСО) 30, 40, 45, 50, 60 (рис. 15). Інструменти з конічним хвостовиком можна встановлювати безпосередньо в оправці або через перехідні втулки. Перехідні оправки, закріплені в базовій оправці, дають змогу регулювати виліт інструмента.

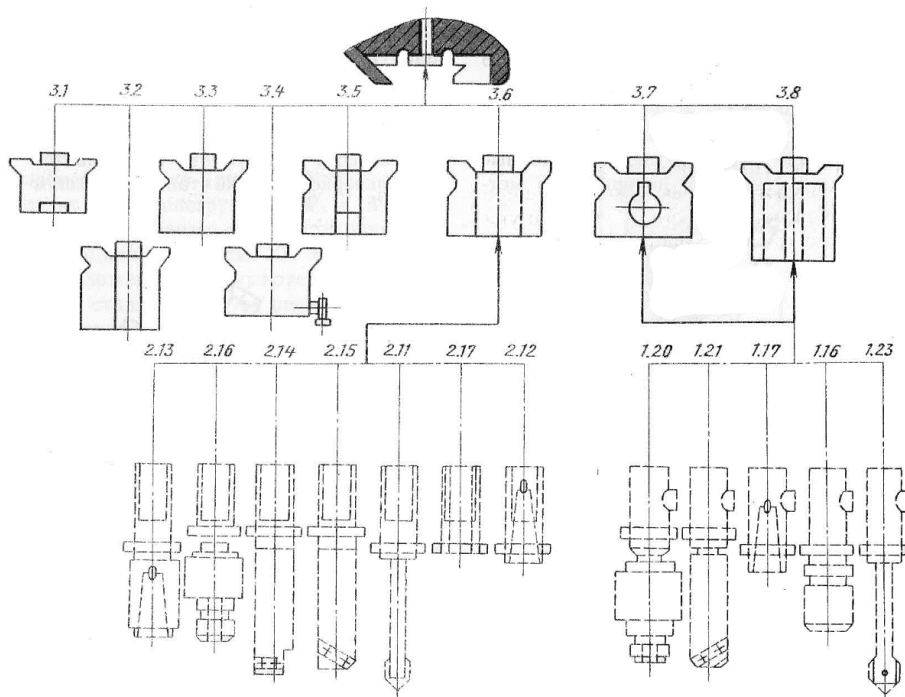


Рис. 15 – Система інструменту з базою-призмою, що базується

Ця система призначена для верстатів свердлильно-фрезерно-розточувальної групи. Вище перераховані системи кріплення інструментів до корпусу державки призначені для експлуатації на середніх токарних верстатах з ЧПУ для напівчистої і чистої обробки.

Використовуються також короткозатисні різцетримачі [8]. Різцетримач забезпечений циліндричною вкладкою з отворами, встановленими з можливістю повороту в отворі, виконаному в основі, а циліндричні гайки в отворі вкладки передають на неї протилежні моменти сил (рис. 1.16).

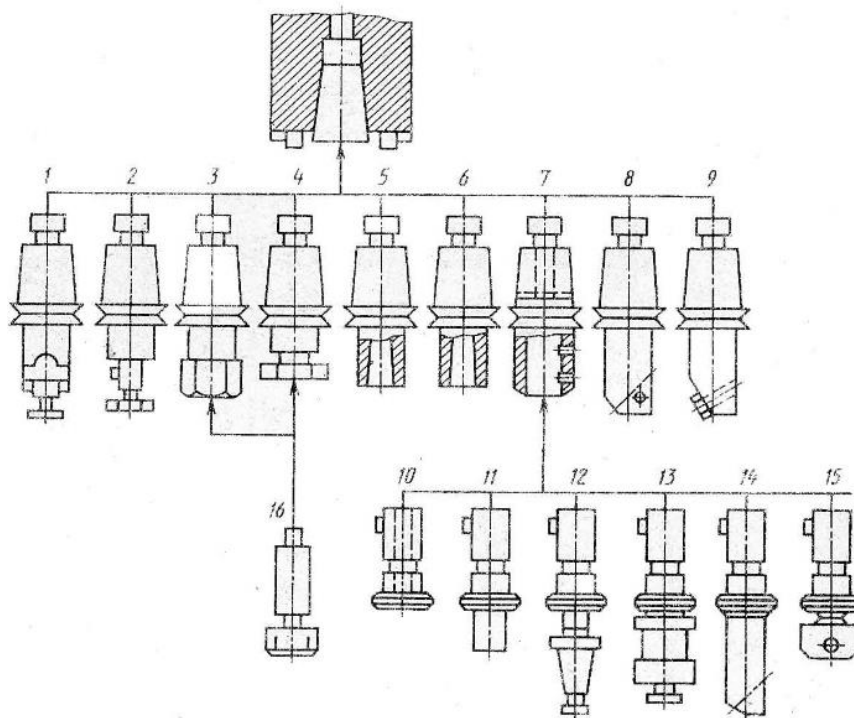


Рис. 16 – Система інструменту з конічним хвостовиком

Короткозатискні різцетримачі призначені тільки для верстатів із ЧПК, мають низьку універсальність і не можуть застосовуватися на верстатах із ручним керуванням.

У Донбаській державній машинобудівній академії (ДДМА) розроблено систему різців для важких токарних верстатів за участю автора [9, 10], основою якої є блок (рис. 17). Вибір блокової конструкції зумовлений необхідністю забезпечення швидкої зміни робочої частини (замінювати весь різець важко у зв'язку з його великою масою). Недоліком розробленої системи є samozаклинювальне з'єднання (ластівчин хвіст), розташоване горизонтально. Для зміни блоку необхідне велике зусилля для вибивання його з корпусу різця, що призводить до деформації корпусу і поломки кріпильних елементів твердосплавної пластини. Другим недоліком системи є низька універсальність, оскільки на одній державці можна кріпити тільки блоки лівого або правого виконання. Це обмежує сферу застосування цієї системи на важких верстатах.

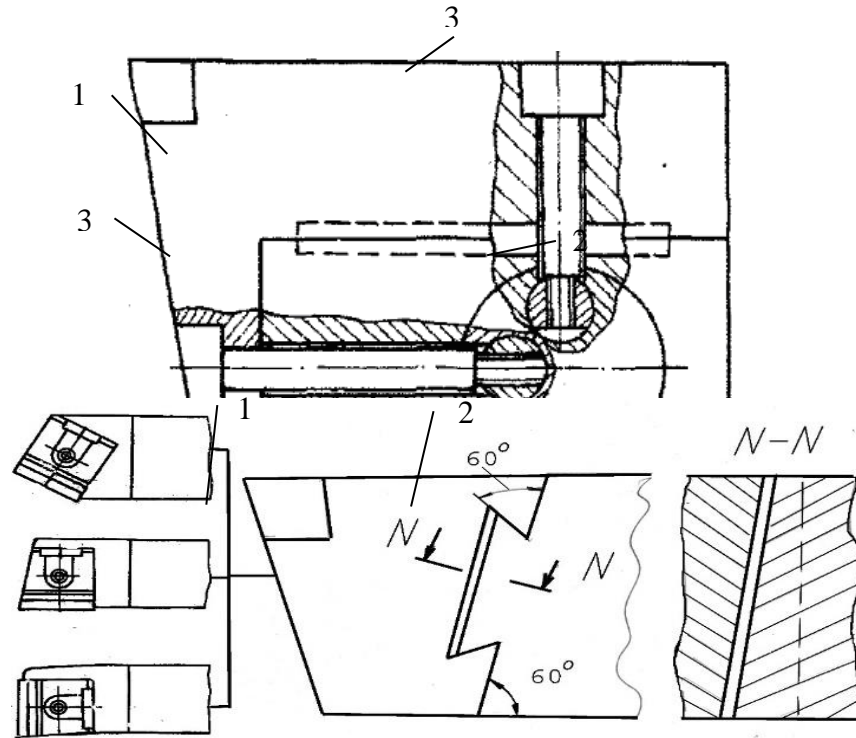


Рис. 17 – Система інструменту для важких токарних верстатів:
1 - блок, 2 – державка

Проведений аналіз наявних систем збірної модульної інструменту дає змогу дійти висновку, що не розроблено універсальних систем блочно-модульного інструменту для важких верстатів з ЧПК, здатних витримувати навантаження до 100 000 Н, які мають підвищену жорсткість і міцність.

На стадії розробки нових конструктивних варіантів модульних різців важливо визначити жорсткість і міцність розрахунковим шляхом. Дослідженню напружено-деформованого стану різального клина інструменту методом скінченних елементів присвячені роботи М.П. Мазура, В.А. Гречишнікова та інших дослідників [11, 12]. Автори як розрахункову схему застосовували різальний клин простої або складної форми, навантажений складовими сили різання. При цьому досліджували напруження, що виникають у безпосередній близькості від вершини клина. Для проведення аналізу різальний інструмент умовно розбивався на кінцеві елементи, точки, з'єднання яких, називаються вузловими точками.

У цьому разі будь-яка складна і фасонна форма різального інструменту може бути розбита на елементи з високим ступенем точності. Професор В.А. Остаф'єв у своїх роботах досліджував напружено-деформований стан різальної частини інструменту методом скінченних елементів і показав, що зміна навантажень призводить до зміни напруженого стану різального інструменту. Поява фаски зносу на задній грані, збільшення радіуса заокруглення призводить до різкого зростання контактних навантажень на задній грані та збільшення температурного поля різальної частини. Розрахунки напружень показують, що в цьому випадку максимальні напруження зосереджуються біля передньої грані біля різальної кромки.

Н.С. Равська, К.Н. Рудаков, О.М. Новіков [13] досліджували різальний зуб відрізної ланцюгової пилки, розв'язуючи при цьому тривимірну задачу теорії пружності. Як критерій міцності для твердосплавного зуба пилки використовувався критерій максимальних октаедричних напружень. Для дискретизації зуба відрізної пилки під час розрахунку напружено-деформованого стану автори використовували скінченні елементи у формі прямокутних паралелепіпедів. Автори встановили розподіл напружень та їхній напрямок за різних умов експлуатації.

У роботах [13, 14] методом скінченних елементів розраховано напруження в твердосплавній різальній пластині, яка кріпиться до державки різця. При цьому встановлено, що метод кріплення різальної пластини, ISSN 2079-004X(Print), ISSN 2786-7587(Online). Вісник НТУ «ХП». 2023.№2 (8)

а також її конструктивні параметри суттєво впливають на напружено-деформований стан різальної частини різця.

Таким чином, на основі аналізу методів дослідження міцності різальних елементів можна зробити висновок, що аналітичні дослідження напружено-деформованого стану були пов'язані переважно з різальними елементами різних видів інструменту, проте не досліджували стан складних блочно-модульних конструкцій інструменту.

Міцність різальної частини інструменту залежить від умов процесу різання, жорсткості системи верстат - пристосування - інструмент - деталь та інших чинників. Коливання інструмента спричиняються вібраціями, які виникають у процесі різання.

У роботах, виконаних у РУДН під керівництвом А.Д. Шустикова, експериментально доведено, що низькочастотні (верстатні) частоти впливають на стійкість твердосплавного збірному інструменту значно менше, ніж високочастотні (інструментальні) частоти коливань. Це дало змогу під час оцінювання жорсткості різального інструменту використовувати ті методики, які вже широко застосовують під час випробувань верстатів та інших об'єктів, - насамперед, амплітудно-частотні характеристики, баланс жорсткості конструкції. Динамічна податливість інструменту має найбільшу інформативну стабільність: що більша динамічна податливість вузла кріплення блоку до корпусу різця, то нижча жорсткість інструменту. У роботах показано, що динамічна податливість вузла кріплення пластини залежить від його статичної податливості. Так, для різців однієї конструкції збільшення статичної податливості вузла кріплення різальної пластини призводить, як правило, до збільшення і його динамічної податливості. На кафедрі технології машинобудування РУДН розроблено стенд для контролю якості збірних прохідних різців із перерізом державки від 10×10 до 40×40 мм. Принцип дії стенду ґрунтується на вимірюванні величини зсуву різальної пластини щодо державки різця під дією навантажувальної сили певної величини й орієнтації, що імітує силу різання. Цей стенд призначений для виробничого контролю різців однієї конструкції перерізом 20 x 20 мм і його не рекомендують застосовувати для отримання порівняльних оцінок жорсткості різних конструкцій різців, тому його не можна використовувати для оцінювання жорсткості збірного і блочно-модульного інструменту перерізом корпусу 80×80 мм і більше.

Дослідженню динамічних характеристик збірних інструментів для важких верстатів присвячені роботи [15, 16].

У теорії ухвалення рішень існує термін "принцип Парето", який полягає в тому, що як розв'язання багатокритеріальної задачі треба вибрати тільки той вектор x , який належить множині Парето. Принцип Парето не виділяє єдиного рішення, а лише звужує безліч альтернатив. Остаточний вибір залишається за особою, яка приймає рішення. Але побудова множини Парето полегшує процедуру вибору. З аналізу літератури можна зробити висновок, що одержувані в результаті багатокритеріальної оптимізації рішення не однозначні і потребують застосування методів математичного моделювання. Як узагальнений критерій найчастіше використовують адитивну згортку, яка не зовсім коректно враховує внесок окремого критерію в узагальнений критерій у разі зміни виробничої ситуації.

Висновки. Розкрито наукові засади та новий напрямок розв'язання науково-технічної проблеми підвищення ефективності процесу механічного оброблення на важких токарних верстатах шляхом створення систем блочно-модульного інструменту, які вирізняються високою працездатністю під час різання з великими перерізами зрізу.

Запропоновано реалізовану на практиці методологію створення блочно-модульного інструменту для важких верстатів на основі системного підходу, що передбачає комплексну кваліметричну оцінку рішень з використанням інтелектуальної системи багатокритеріальної оптимізації, яка дала змогу розробити гнучке інструментальне забезпечення, скоротити час відновлення технологічної системи та зменшити витрати твердого сплаву.

Описано класифікацію видів стружки, що охоплює діапазон параметрів зрізу: від зазвичай застосовуваних чистових до надвеликих чорнових. Розкрито методику математичного опису і розрахунку стружкозавиваючих канавок залежно від елементів режимів різання, з урахуванням довжини різальної кромки. Описано процес стружкозавивання під час зняття великих перерізів зрізу, що враховує напруження, які виникають під час взаємодії стружки з комбінованою формою передньої поверхні, що дало змогу прогнозувати радіус кривизни стружки, яка утворюється, і зони стабільного стружкодовдання.

Показано, що вибір набору критеріїв залежить від багатьох чинників, що зумовлюють конкретну виробничу ситуацію, виду модульного інструменту, задачі, що вирішується під час оптимізації.

Список літератури

1. Теория проектирования инструмента и его информационное обеспечение: маркетинг, квалиметрия, надежность и оптимизация. / Г.Л. Хаец, В.С. Гузенко, Л.Г. Хаец, Е.В. Мироненко.: Под общ. Ред. Г.Л. Хаец. - Краматорск: ДГМА, 1994.-370 с.
2. Клименко Г.П., Основы рациональной эксплуатации різального інструменту на важких верстатах. Афтореф. дис. доктора технічних наук. 05.03.01. НТУ України Київський політехнічний інститут. – 2002. – 32 с.
3. Мироненко Е.В. Применение резцов с твердосплавными режущими пластинами с износостойкими покрытиями при получистовой обработке валков прокатных станов / Е. В. Мироненко, В. С. Гузенко, В. В. Калининченко, В. В. Носков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ, 2015. – Вип. 37. – С. 40–47. – ISSN 2222-9000.
4. Експлуатація збірних різців / Г.П. Клименко, Є.В. Мироненко, В.С. Гузенко, Я.В. Васильченко, М.В. Шаповалов. – Краматорськ: ДДМА, 2015. – 83 с. ISBN 978-966-379-732-8.
5. Мироненко Є.В. Аналіз шляхів забезпечення енергоефективності процесів механічної обробки деталей у сучасному

машинобудуванні / С.В. Мироненко, В.В. Калініченко, Д.Є. Гузенко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – Вип 13. – С.159-172. – ISSN 2079-7499.

6. Гречишников В.А. Инструментальное обеспечение автоматизированного производства [Текст]: Учеб. для машиностр. спец. вузов. / В.А. Гречишников, А.Р. Маслов, Ю.М. Соломенцев и др. – М. Высш. шк. 2001. – 271 с.: ил.

7. Марслов А.Р. Приспособления для металлорежущего оборудования. Справочник [Текст] / А.Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1996. – 241 с. ил.

8. Гжиров Р.И. Инструментальные системы автоматизированного производства [Текст]: Учеб. пособ. / Р.И. Гжиров, В.А. Гречишников, В.Г. Лагошев – Санкт-Петербург: Политехника, 1993. – 399 с. ил.

9. Грабченко А.И. Системные принципы создания агрегатно-модульного инструмента и оптимизации рабочего процесса [Текст] / А.И. Грабченко, Е.В. Мироненко // Резание и инструмент в технологических системах. – Межд. научн. - техн. сборник. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2003. – Вып. 64. – С. 47 - 52.: ил.

10. Проектирование блочно-модульных инструментов для тяжелых токарных станков [Текст] / Е.В. Мироненко, А.Н. Кравцов; Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур). Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2015 - 299 с. ISBN 978-5-906703-01-9.

11. Гречишников В.А., Лукина С.В., Веселов А.Я. Исследование деформированного состояния сборного режущего элемента методом конечных элементов. //IV Международный конгресс «Конструкторско-технологическая информатика 2000», Москва, 2000: КТИ – 2000: Тр. конгр. Т1.М.2000. – С.158 – 160.

12. Мироненко Е.В. Аналитические исследования напряженно-деформированного состояния агрегатно-модульных конструкций резцов [Текст] / Е.В. Мироненко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. научн. трудов. – Краматорск – Киев: ДГМА, вып. № 13. 2003. - С. 47 - 51.: ил.

13. Равская Н.С., Рудаков К.Н., Новиков А.Н. Расчет объемного напряженно-деформированного состояния зуба отрезной пилы, армированного твердым сплавом. //Прогрессивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва. – Київ: Вища школа, 1998. – С.369 – 373.

14. Г.П. Клименко Исследование влияния усилий закрепления режущей пластины по цилиндрическому отверстию на динамические характеристики сборного резца / Г.П. Клименко, В.С. Гузенко, И.И. Полупан // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків.: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 4 (1113). – С.101-103. – ISSN 2079-004X.

15. Мироненко Е. В. Построение модели технологической системы тяжелого карусельного станка / Е. В. Мироненко, С. Л. Миранцов, Д. Г. Ковалёв // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Технології в машинобудуванні. – 2015. – № 42. – С. 172–182. – ISSN 2079-0023.

16. Myronenko Y. V., Mirantsov S. L., Polupan I. I., Huzenko V. S. Research of fluctuations of combined cutters while wheelset renewal process. In: Modern trends in material processing. Vol. 1: Scientific Monography. Edited by Predrag Dašić. Vrnjačka Banja: 2018. – 350 pp. – ISBN 978-86-6075-065-7.

References (transliterated):

1. Teoriya proyektirovaniya i instrument yego informatsionnogo obespecheniya: marketing, kvalimetriya, nadezhnost' i optimizatsiya. /G.L. Khayet, V.S. Guzenko, L.G. Khayet, Ye.V. Mironenko.: Pod obshch. red. G.L. Khayeta.- Kramatorsk: DGMA, 1994.-370 s.

2. Klimenko G.P., Osnovy ratsional'noy ekspluatatsii rizal'nogo instrumenta na vazhnykh verstatakh. Aftoref. dis. doktor tekhnicheskikh nauk. 05.03.01. NTU Ukrainiy Kiyevskiy politekhnicheskyy institut. – 2002. – 32 s.

3. Mironenko Ye.V. Primeneniye reztsov s tverdosplavnymi reztsami s iznosostoykimi pokrytiyami pri poluchistovoy obrabotke valkov prokatnykh stanov / Ye. V. Mironenko, V. S. Guzenko, V. V. Kalinichenko, V. V. Noskov // Nadiynnist' instrumentu i optimizatsiya tekhnologichnikh sistem : sbornik naukovikh prats'. – Kramatorsk, 2015. – Vip. 37. – S. 40–47. – ISSN 2222-9000.

4. Ekspluatatsiya zbirnikh riztsiv / G.P. Klimenko, È.V. Mironenko, V.S. Guzenko, YA.V. Vasil'chenko, M.V. Shapovalov. – Kramatorsk: DDMA, 2015. – 83 s. ISBN 978-966-379-732-8.

5. Mironenko È.V. Analiz shlyakhov zaberezheniya energoefektivnosti protsessov mekhanicheskoy obrabotki detaley u sukhogo mashinostroyeniya / È.V. Mironenko, V.V. Kalinichenko, D.È. Guzenko // Suchasni tekhnologii v mashinostroyenii: zb. nauk. prats'. – Khar'kov: NTU «KHPÍ». – 2018. – Vip 13. – S.159-172. – ISSN 2079-7499.

6. Grechishnikov V.A. Instrumental'noye obespecheniye bezopasnogo proizvodstva [Tekst]: Ucheb. dlya mashinost. spets. vuzov. / V.A. Grechishnikov, A.R. Maslov, YU.M. Solomentsev i dr. – M. Vyssh. shk. 2001. – 271 s.: il.

7. Marslov A.R. Prispobleniya dlya metallorazhushchego oborudovaniya. Spravochnik [Tekst] / A.D. Makarov. – M.: Mashinostroyeniye, 1996. – 241 s. il.

8. Gzhiron R.I. Instrumental'nyye sistemy bezopasnogo proizvodstva [Tekst]: Ucheb. posob. / R.I. Gzhiron, V.A. Grechishnikov, V.G. Lagoshev – Sankt-Peterburg: Politekhnik, 1993. – 399 s. il.

9. Grabchenko A.I. Sistemnyye obosnovaniya sozdaniya agregatno-modul'nogo instrumenta i tselesobraznogo rabocheho protsessa [Tekst] / A.I. Grabchenko, Ye.V. Mironenko // Rezaniye i instrument v tekhnologicheskikh protsessakh. – Mezhd. nauchn. - tekhn. sbornik. – Khar'kov: NTU «KHPÍ». 2003. – Vyp. 64. – S. 47 - 52.: il.

10. Proyektirovaniye blochno-modul'nykh instrumentov dlya peredachi tokarnykh stanok [Tekst] / Ye.V. Mironenko, A.N. Kravtsov; Donbasskaya gosudarstvennaya mashinostroyitel'naya akademiya; Zakrytoye aksionernoye ob-vo "ONIKS". Kramatorsk: DGMA; Irbit: ONIKS, 2015 - 299 s. ISBN 978-5-906703-01-9.

11. Grechishnikov V.A., Lukina S.V., Veselov A.YA. Issledovaniye deformirovannogo sostoyaniya sbornogo poiska elementa metodom konechnykh elementov. //IV Mezhdunarodnyy kongress «Konstruktorsko-tekhnologicheskaya informatika 2000», Moskva, 2000: KTI – 2000: Tr. kongr. T1.M.2000. – S.158 – 160.

12. Mironenko Ye.V. Analiticheskiye issledovaniya stress-deformirovannogo sostoyaniya agregatno-modul'nykh struktur reztsov [Tekst] / Ye. V. Mironenko // Nadezhnost' instrumenta i optimizatsiya tekhnologicheskikh sistem. Sb. nauchn. trudov. – Kramatorsk – Kiyev: DGMA, vyp. № 13. 2003. - S. 47 - 51.: il.

13. Ravskaya N.S., Rudakov K.N., Novikov A.N. Raschet ob'yema ostrogo-deformirovannogo sostoyaniya zuba otreznoy pily, armirovannogo tverdym splavom. //Progresivna tekhnika i tekhnologiya mashinostroyeniya, priladobuduvannya i svaryval'nogo proizvodstva. – Kiyev: Vishcha shkola, 1998. – S.369 – 373.

14. G.P. Klimenko Issledovaniye nablyudeniya sledstviya obnaruzheniya plastin po tsilindricheskoy otverstiyu na tolshchinu kharakteristik sbornogo reztsa / G.P. Klimenko, V.S. Guzenko, I.I. Polupan // Вісник Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPÍ». Zbirnik naukovikh prats'. Seriya: Tekhnologii v mashinostroyenii. – Khar'kov.: NTU «KHPÍ». – 2015. – № 4 (1113). – S.101-103. – ISSN 2079-004X.

15. Mironenko Ye. V. Postroyeniye modeli tekhnologicheskoy sistemy tyazhelogo karusel'nogo stanoka / Ye. V. Mironenko, S. L. Mirantsov, D. G. Kovalov // Visnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "KHPÍ". Seriya : Tekhnologii v mashinostroyenii. – 2015. – № 42. – S. 172–182. – ISSN 2079-0023.

16. Myronenko Y. V., Mirantsov S. L., Polupan I. I., Huzenko V. S. Research of fluctuations of combined cutters while wheelset renewal process. In: Modern trends in material processing. Vol. 1: Scientific Monography. Edited by Predrag Dašić. Vrnjačka Banja: 2018. – 350 pp. – ISBN 978-86-6075-065-7.

Поступила (received) 14.02.2023

Мироненко Євген Васильович (Мироненко Евгений Васильевич, Mironenko Evgeny Vasilyevich) – декан, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (050)-604-4967; e-mail: evgeny.mironenko@dgma.donetsk.ua;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5440-2900>

Ковальов Віктор Дмитрович (Ковалев Виктор Дмитриевич, Kovalev Victor Dmitrievich) – ректор, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (095)-398-9725; e-mail: kovalov.viktor@gmail.com;

Васильченко Яна Василівна (Васильченко Яна Васильевна, Vasilchenko Yana Vasilievna) – завід. кафедри, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (050)-814-7730; e-mail: vasilchenko.ua@gmail.com;

Клименко Галина Петрівна (Klimentko Galina) – доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (050)-219-8511; e-mail: galynaklymenko1@gmail.com

Миранцов Сергій Леонідович (Myrantsov Serhiy) – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології, Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, тел.: (050)-130-9661; e-mail: mirantsov@gmail.com;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1085-3467>

ЯКОВЕНКО І.Е., ПЕРМЯКОВ О.А., ДЕРГОУСОВ В.М., НАУМЕНКО О.А., ЯНГОЛЕНКО Я.А.

ДОСВІД СИНТЕЗУ БАГАТОІНСТРУМЕНТНИХ НАЛАДОК У ЗАСТОСУВАННІ ДО СУЧАСНИХ УМОВ

Проаналізовано тенденції випуску спеціального обладнання для масового виробництва та встановлено перспективи використання багатоінструментних блоків для такого обладнання. Розглянуто питання синтезу варіантів багатоінструментної обробки для деталей з великою кількістю сторін, що обробляються, і, відповідно, поверхонь обробки. Встановлено три групи факторів технологічного, геометричного та технічного характеру, які мають домінуючий вплив на сумісність обробки інструментами в одному інструментальному блоці. Встановлено їх допустимі значення та запропоновані матриці сумісності виконуваних технологічних операцій. На підставі проведених досліджень пропонується уточнення методика синтезу багатоінструментальних блоків спеціальних верстатів, компоновання яких базується на максимальному використанні уніфікованих модулів та агрегатів. Даний підхід не залежить від виконуваних технологічних операцій та того, які саме модулі можуть бути використані для конструкторської реалізації запропонованого компоновання інструментального блоку. Запропонована методика орієнтована на використання систем автоматизованого проектування в процесі створення верстатів з агрегатно-модульною компоновкою для масового виробництва заснована на широкому використанні бази знань технічних характеристик і технологічних можливостей модулів, що застосовуються, і дає можливість первинного налаштування системи синтезу під конкретні завдання, що вирішуються на підприємстві, шляхом встановлення допустимих граничних параметрів.

Ключові слова: механічна обробка, спеціальні верстати, інструментальний блок, синтез варіантів, агрегатно-модульний принцип, проектування.

YAKOVENKO I., PERMYAKOV O., DERGOUSOV V. NAUMENKO O., JANGOLENKO J. EXPERIENCE OF SYNTHESIS OF MULTITOOL SETTINGS IN APPLICATION TO MODERN CONDITIONS

The trends in the production of special equipment for mass production are analyzed and the prospects for the use of multi-tool blocks for such equipment are established. The questions of synthesis of variants of multi-tool machining for parts with a large number of machined sides and machining surfaces are considered. Three groups of factors of a technological, geometrical and technical nature are established, which have a dominant influence on the compatibility of machining with tools in one tool block. Their allowable values and the proposed matrix of compatibility of technological operations performed are established. Based on the research carried out, a refined method for the synthesis of multi-tool blocks of special machine tools is proposed, the layout of which is based on the maximum use of unified modules and assemblies. This approach does not depend on the technological operations performed and on which modules can be used for the design implementation of the proposed tool block layout. The proposed method is focused on the use of computer-aided design systems in the process of creating machine tools with an aggregate-modular layout for mass production. It is based on the wide use of the knowledge base of the technical characteristics and technological capabilities of the modules used and makes it possible to initially configure the synthesis system for specific tasks solved at the enterprise by establishing admissible boundary parameters.

Keywords: mechanical processing, special machines, tool block, synthesis of options, aggregate-modular principle, design.

Вступ. Сучасний розвиток економіки загалом і машинобудування, зокрема, ґрунтується на постійному зростанні вимог до дизайнерських, ергономічних, експлуатаційних характеристик на тлі постійного скорочення термінів експлуатації, в основному за рахунок морального старіння випущених моделей та появи на промисловому ринку нових конкурентних виробів. Цьому сприяє з одного боку бурхливий розвиток сучасних технологій у всіх галузях, а з іншого, все більш широке впровадження інформаційних технологій та штучного інтелекту у процес створення нових машин та виробів. Не можна не відзначити той факт, що всі компанії виробники товарної продукції прагнуть якнайшвидше досягти насичення ринку, поки конкуренти не вийшли на ринок з новими, прогресивнішими моделями виробів, тобто прогнозована тривалість життєвого циклу постійно скорочується.

Такий розвиток виробництва передбачає вирішення діалектичного протиріччя «продуктивність – технологічна гнучкість» у кожному конкретному випадку індивідуально. Цим пояснюється той факт, що поряд із постійним зростанням випуску універсального технологічного обладнання, яке базується в основному на принципах одноінструментної обробки та забезпечує високу гнучкість виробництва, досі випускається та широко використовується обладнання, що ґрунтується на принципах високої концентрації технологічного впливу, тобто багатоінструментної багатопозиційної обробки (хоча в значно менших обсягах і більш прогресивному компонованні, ніж в епоху «автоматизації масового виробництва» у 70-80-ті роки минулого століття).

Мета дослідження. Встановлення та аналіз факторів, що мають домінуючий вплив на процес синтезу структур багатоінструментальних блоків технологічних систем з використанням сучасних досягнень компютерної мехатроніки та CALS-технологій, а також управління технологічними параметрами обробки у процесі проектування спеціальних верстатів, що ґрунтуються на принципах агрегування та модульного компоновання.

Аналіз основних досягнень та літератури. Перехід від масового автоматизованого виробництва з широким використанням агрегатних верстатів та автоматичних ліній із жорстким зв'язком до більш сучасного гнучкого виробництва за рахунок технологічних систем, побудованих на основі універсальних та багатоцільових верстатів з ЧПУ, повністю не виключив інтерес машинобудівників до випуску агрегатних верстатів [1,2]. Інтерес до такого обладнання підкреслює той факт, що крім традиційних фірм, які мають досвід створення такого обладнання понад 40-50 років [3,4,5,6] на ринок виходять і молоді компанії, виробники технологічного обладнання даного типу для машинобудування (в основному для автомобільної, аерокосмічної, сантехнічної, фітінгової галузей виробництва) [7,8,9], які крім виробництва

металорізальних верстатів класичної одноінструментної обробки освоїли і випуск верстатів з високою концентрацією операцій за рахунок багатоінструментної обробки та позиційних транспортних систем [10,11]. Велика зацікавленість покупців такого обладнання пояснюється дуже високою продуктивністю пропонувананих систем (від 3 до 100 млн. сердечників циліндрів замків на рік, рис.1.) [6] та, незважаючи на високу вартість одиниці обладнання (більше 10000000 фунтів, рис.2.), високою економічною ефективністю (собівартість обробки однієї деталі знижується в 1,9 раза порівняно з варіантом обробки на багатоцільових верстатах з ЧПУ) [3].



Рис. 1 – Верстат багатоінструментної обробки Variomatic T3i для обробки сердечника циліндра



Рис. 2 – Багатошпиндельний токарний автомат INDEX MS32-6 фірми Kingsbury

Очевидно, що створення таких верстатів пов'язане не лише із забезпеченням високої продуктивності, а й гнучкості за рахунок використання сучасних досягнень мехатроніки та компонетики. Так, наприклад, всі верстати фірми Variomatic оснащені силовими модулями потужністю до 14 кВт і автономною системою керування, що в поєднанні з елементами механічної кулачкової системи керування поворотного столу дозволяє досить швидко і без особливих зусиль здійснити переналадження обладнання на випуск іншої деталі даного типу [6]. Очевидно, що мехатронні модулі та мехатронні вузли є найбільш перспективною базою для створення щодо гнучкого прогресивного високопродуктивного технологічного обладнання, одним із розглянутих вище принципів побудови якого є автономність виготовлення, складання та

налагодження уніфікованих модулів і, зрештою, всього верстата, скомпанованого на їх базі. Зараз практично всі виробники використовують цю концепцію при створенні верстатів багатоінструментної обробки агрегатно-модульного компонування, що має ряд переваг, пов'язаних саме з розглянутою вище оптимізацією та відпрацюванням конструкцій силових модулів, скороченням термінів процесу проектування і виробництва та ін.

Організація багатоінструментної обробки передбачає вирішення конкретного технологічного завдання, тому проектування технологічного компонування є основою для подальшого проектування конструкторського компонування. Питанням проектування багатоінструментної обробки займалися багато вчених та наукових шкіл [12,13,14,15]. Так в роботі [12] розглядалися питання проектування багатоінструментної обробки переважно одного типу виконуваного технологічного переходу – токарного. При цьому розглядалися фактори, що впливають на можливість об'єднання інструменту в один інструментальний блок, що обмежуються як технологічними, так і геометричними параметрами процесу обробки. Однак питання, пов'язані з об'єднанням інструментів, що виконують технологічні переходи різних типів в одну інструментальну налагодження, не розглядалися. У роботі [13] були розглянуті питання проектування інструментальних налагоджень при обробці різноманітним осьовим ріжучим інструментом для агрегатних верстатів з жорстким кінематичним зв'язком, при цьому питання, пов'язані з можливістю зміни параметрів процесу різання та забезпечення гнучкості обладнання не були порушені. Також були детально розглянуті та згруповані фактори, що впливають на перспективність використання технологічного компонування інструментального блоку та багатопозиційного верстата в цілому, які, проте, розглядають лише загальні компоновальні моменти та не враховують геометричні параметри інструменту та процесу обробки, а як критеріальну оцінку пропонувалося використовувати мінімальну вартість силових агрегатів, здатних реалізувати запропоновані варіанти об'єднання інструментів у блоки. В роботах [14,15] даний підхід до процесу проектування було розширено з урахуванням можливості як структурної оптимізації багатоінструментної обробки, так й параметричної до конкретно обраної структури.

У загальному випадку основною особливістю багатоінструментної обробки є наявність руху заготовки або інструментального блоку з постійною швидкістю щодо інших елементів системи верстат-пристрій-заготовка-інструмент (ВПЗІ).

Таким чином, процес проектування технологічного компонування при багатоінструментній обробці може бути зведений до класичної оптимізаційної «задачі про найменше покриття (розбиття)» технологічних переходів, вивчення яких необхідне і для забезпечення процесу обробки заготівлі при досягненні цілей оптимізації такого розбиття. Розробці алгоритму розв'язання задачі про найменше розбиття присвячено дуже багато робіт, від класичного розв'язання задач теорії графів [16] до побудови алгоритмів розв'язання конкретних прикладних задач [17,18,19].

Матеріали дослідження.

Концентрація операцій є одним з основних методів підвищення продуктивності у машинобудуванні. Особливо це характерно для обробки різних деталей, що мають кілька сторін обробки, кожна з яких містить кінцеву кількість однакових або різних співвісних поверхонь, які можуть бути оброблені або кінцевим різальним інструментом (найчастіше для корпусних деталей), або з використанням різців (тіа обертання), при цьому концентрація операцій при обробці площин здійснюється досить рідко. Тому при синтезі багатоінструментної обробки дуже важливо сформувавши інструментальні блоки таким чином, щоб забезпечували мінімальну технологічну собівартість обробки при виконанні необхідної якості обробки поверхонь виробу. Це стосується як формування структури, і параметрів інструментальних блоків.

Задача синтезу інструментальних блоків може бути сформульована у наступному вигляді. Нехай у кожного об'єкта є множина сторін обробки $\vec{S} = \{1, \dots, k\}$, причому кожна містить підмножину осей обробки $\vec{O}_j = \{1, \dots, j\}$, $\vec{O}_j \in \vec{S}$, на яких розташовано підмножина оброблюваних поверхонь $\vec{P}_{ji} = \{1, \dots, i\}$, $\vec{P}_{ji} \in \vec{O}_j$, де кожен елемент системи, що аєалізується (сторона-вісь-поверхня), представлено у вигляді вектора, оскільки цей елемент має характерний набір параметрів (розташування поверхонь, вимоги до точності розмірів, форми та взаємного розташування поверхонь, параметри якості поверхні тощо). Для реалізації процесу обробки поверхні необхідно виконати набір операцій $\vec{T} = \{1, \dots, l\}$ (елементарних технологічних переходів, коли розглядається обробка елементарним різальним інструментом $\vec{E} = \{1, \dots, l\}$, який одночасно виконує тільки один технологічний перехід). Причому кожна з цих операцій характеризується певним набором параметрів, що відображають кінематику формоутворення, геометричні характеристики інструменту, параметри процесу різання та ін.

Тоді для здійснення процесу обробки необхідно сформувавши сукупність множини компоувальних варіантів інструментальних блоків $\{\vec{N}_l\}$, $l \in L$, які можливо технічно реалізувати, та які відображені векторами проектних параметрів, таким чином, що $\bigcup_{l \in L} \vec{N}_l = \vec{E}$, (тобто, щоб виконувалася множина елементарних технологічних переходів, які відображені векторами $\vec{T} = \{1, \dots, l\}$ проектних параметрів, спрямованих на отримання параметрів об'єкта обробки \vec{P}_{ji}).

Загальна схема розв'язання задачі синтезу варіантів багатоінструментної обробки може бути представлена у вигляді графа (рис. 3).

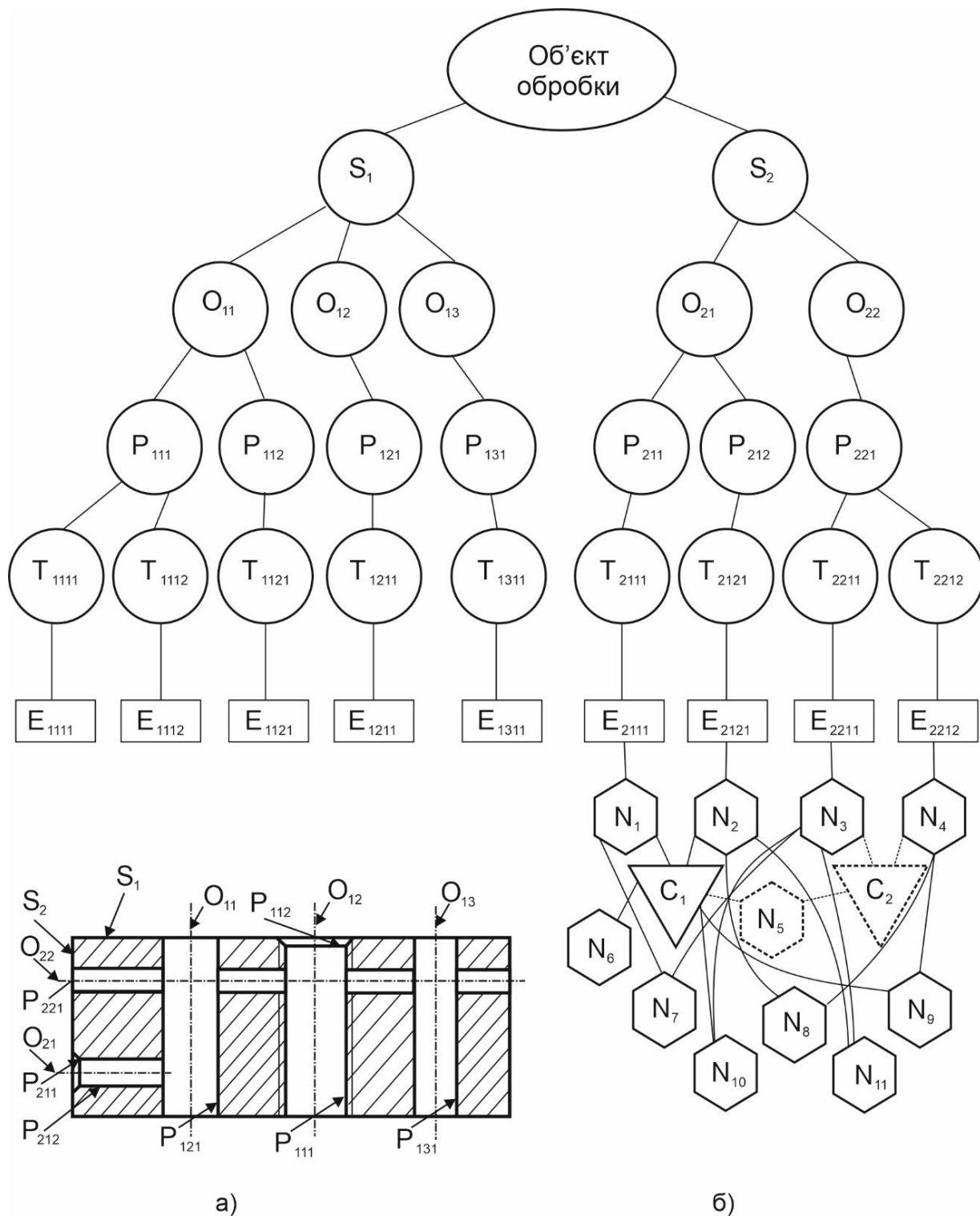


Рис. 3 – Приклад побудови графа формування варіантів багатоінструментальних налагоджень:
 а) – об'єкт обробки; б) – фрагмент графа

На малюнку 3 наведено приклад фрагмента побудови такого графа для уявної деталі, що містить дві сторони обробки, п'ять осей та сім різних поверхонь: фаски – P_{212} , P_{112} ; внутрішні циліндричні поверхні – P_{211} , P_{221} , P_{131} , P_{121} , (причому, досягнення шорсткості поверхні P_{221} можливе тільки за рахунок виконання двох переходів, свердління та розгортання – T_{2211} та T_{2212}); різьбова поверхня P_{111} . Для виконання обробки поверхонь P_{211} , P_{212} , P_{221} зі сторони S_2 достатньо виконання чотирьох технологічних операцій (свердлення поверхонь P_{212} , P_{221} , зенкування поверхні P_{211} та розгортання поверхні P_{221}).

Вузли графа, відповідають: оброблюваним поверхням - \bigcirc ; елементарним різальним інструментам - \square ; комбінованого інструменту - ∇ ; інструментальним налагодженням (одне або багатоінструментним) - \hexagon . Штриховою лінією показаний варіант використання комбінованого інструменту типу свердло-розгортка, який теоретично можливий, але практична реалізація якого в даний час не застосовується на виробництві, тому у подальшому такі варіанти розглядати не має сенсу.

У формальній постановці завдання записується у вигляді:

$$\vec{N} = \{\vec{n}_l \mid \vec{n}_l = f(\vec{p}_{kjl}, \vec{t}_l, \vec{e}_l); \vec{e}_l \in \vec{E}; \vec{t}_l \in \vec{T}; F_n(U, W, V) = 1; \forall l \in L; k \in K; j \in J; i \in I\}$$

де \vec{N} – множина проектних параметрів інструментальних блоків; \vec{P}_j – множина векторів параметрів об'єкта обробки (поверхонь), що мають спільну сторону обробки j ; $\vec{t}_l \in \vec{T}$ – множина технологічних операцій (переходів), які необхідні для забезпечення обробки множини поверхонь; $\vec{e}_l \in \vec{E}$ – множина елементарних різальних інструментів, здатних виконати набір технологічних переходів \vec{T} ; $F_n(U, W, V)$ – система обмежень, що враховує геометричну, технологічну та технічну можливість формування множини інструментальних блоків. Очевидно, що для одношпindelної обробки вектор проектних параметрів елементарного різучого інструменту \vec{e}_l тотожний вектору проектних параметрів \vec{n}_l .

Умовою того, що різучі інструменти можуть входити в один і той же інструментальний блок, є приналежність співвісних поверхонь, що одержуються при обробці кожним інструментом (у тому числі комбінованим), однієї узагальненої сторони обробки, іншими словами дотримується можливість забезпечити формоутворення поверхонь за рахунок одного варіанту взаємного переміщення інструментів та заготовки. При формуванні інструментальних блоків обов'язково дотримання умови неперетину виконуваних елементарних переходів кожним із інструментів блоку (тобто розглянута вище класична задача про найменше розбиття).

Очевидно, що кількість варіантів багатоінструментних блоків, які здатні реалізувати наведений як приклад, досить простий випадок обробки, різко зростає зі збільшенням кількості співвісних поверхонь. Однак, кількість таких варіантів значно скорочується, якщо враховувати обмежуючі фактори, що впливають на можливість реалізації того чи іншого варіанта багатоінструментного блоку.

Об'єднання кількох інструментів у інструментальний блок можливе лише у разі виконання системи обмежень, які можна поділити на три основні групи: геометричні, технологічні та технічні. Організаційні обмеження у даному випадку не розглядаються (рис.4.).

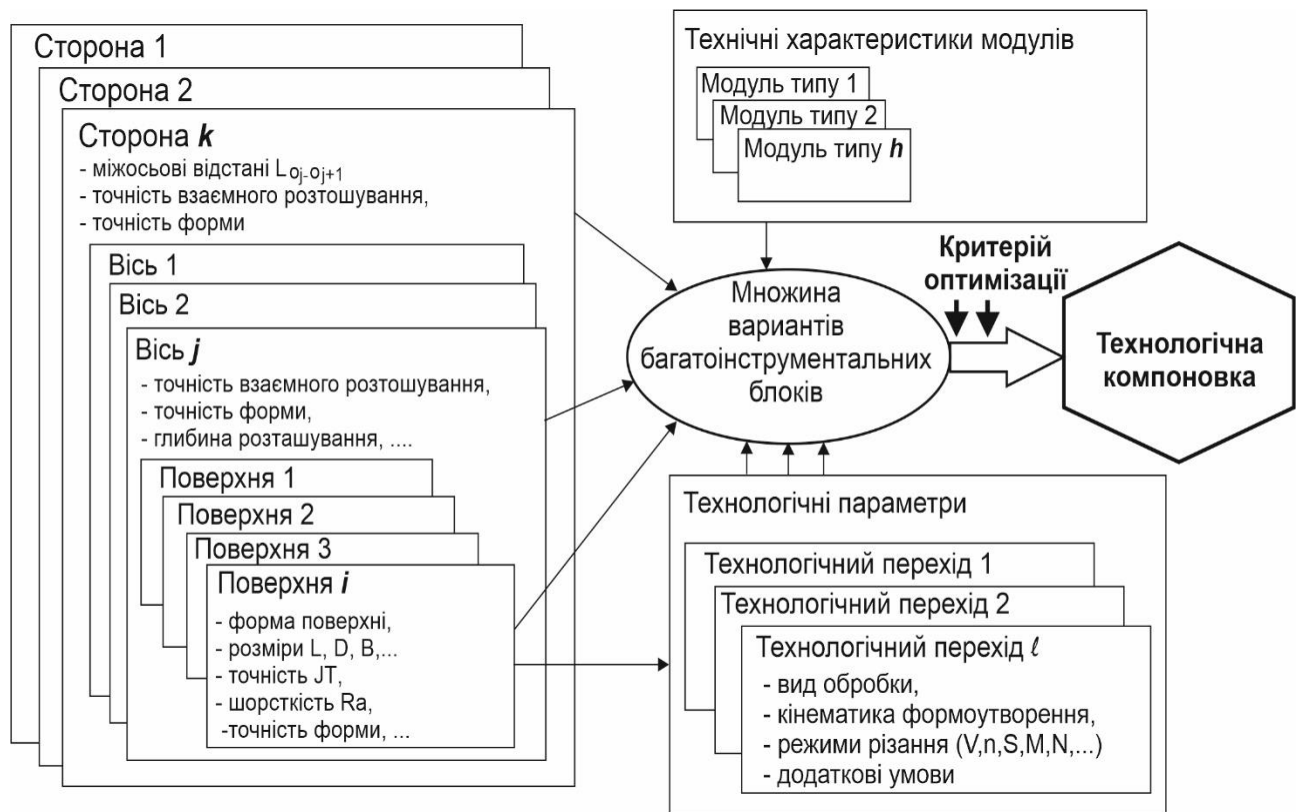


Рис. 4 – Чинники, що впливають на синтез варіантів багатоінструментної обробки

Для кожної групи обмежень необхідно виділити чинники, які визначають можливість об'єднання інструментів у блоки, та скласти для них матриці сумісності, де 1 - означає можливість об'єднання відповідних інструментів у блоці, 0 – відсутність такої можливості.

Розглянемо ці чинники докладніше.

Технологічні обмеження.

До технологічних обмежень відносяться фактори, які пов'язані, в першу чергу, безпосередньо з можливістю забезпечення кінематики формоутворення поверхні та вимог до шорсткості, розмірних параметрів і точності поверхні, що формується. Авторами було проведено аналіз теоретичної можливості виконання різних елементарних технологічних переходів загальним інструментальним блоком з урахуванням кінематики формоутворення, параметрів точності, що досягається в результаті обробки, енергетичними характеристиками процесу обробки та ін. Були також проаналізовані конструкції багатоінструментних налагодок провідних фірм виробників такого обладнання. На підставі цього аналізу була сформована матриця сумісності елементарних технологічних переходів при об'єднанні виконуючих їх елементарних ріжучих інструментів в інструментальний блок за умови належності поверхонь, що формуються, одній стороні обробки та з урахуванням різних варіантів організації обробки співвісних поверхонь: паралельної (найчастіше використовується), послідовної, паралельно-послідовної.

$$\varphi(\vec{t}_{j_i}, \vec{t}_{m}) = 1; \forall (\vec{t}_{j_i} \in \vec{T}_j; j_i \in J_k; m = j_i + 1; m \in J_k)\},$$

Фрагмент цієї матриці наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Сумісність технологічних операцій при об'єднанні елементарних різальних інструментів у блоки.

№пп	Технологічна операція	Свердління	Зенкерування	Зенкування	Цекування	Розгортання	Точіння	Розточування	...	Фрезерування
1	Свердління	1	1	1	1	1*	0	0	...	1**
2	Зенкерування	1	1	1	1	1*	0	0	...	0
3	Зенкування	1	1	1	1	0	0	0	...	0
4	Цекування	1	1	1	1	0	0	0	...	0
5	Розгортання	1*	1*	0	0	1	0	0	...	0
6	Точіння	0	0	0	0	0	1	0	...	0
7	Розточування	0	0	0	0	0	0	1	...	0
...
n	Фрезерування	1**	0	0	0	0	0	0	...	1***

Примітка: * – допускається поєднання у разі послідовної обробки; ** - допускається при формуванні комбінованого інструменту; *** - допускається при формуванні набору фрез.

Найбільш ефективним, з погляду кінематики руху інструментального блоку, є об'єднання у блоці однотипних елементарних ріжучих інструментів. При об'єднанні різнотипних інструментів додатково розглядаються обмеження точності оброблюваних поверхонь. Значення максимальної та мінімальної точності (квалітетів) поверхонь, оброблюваних *j*-им інструментальним блоком, не повинні відрізнятися більш ніж на два-три квалітета при паралельній обробці.

$$\max\{JT_{j_i}\} - \min\{JT_{j_i}\} \leq [G_{JT}]; \forall (JT_{j_i} \in \vec{p}_{j_i}; \vec{t}_{j_i} \in \vec{T}_j; j_i \in J_k)$$

де, JT_{j_i} квалітет *j*-ої поверхні, що отримується в результаті виконання обробки, \vec{p}_{j_i} - вектор параметрів *j*-ої поверхні, $[G_{JT}]$ - допустиме значення різниці квалітетів при обробці в інструментальному блоці (може бути обрано під час налаштування автоматизованого синтезу інструментальних блоків).

Можливість забезпечення якості кожної поверхні, що формується інструментальним блоком, вже враховано у матриці сумісності технологічних операцій.

Геометричні обмеження.

Основним геометричним обмеженням є умова належності поверхонь, що формуються, до одної сторони обробки, тобто можливість забезпечити кінематику формоутворення при відносному переміщенні заготовки та інструментального блоку.

Необхідно враховувати ще два обмеження, які значно впливають на жорсткість інструментального блоку і, відповідно, на точність процесу обробки поверхні.

Обмеження з вильоту інструменту обумовлено необхідністю регулювання довжини вильоту шпинделя або патрона та інструменту у певному діапазоні, що пояснюється необхідністю забезпечення жорсткості інструментів блоку в процесі обробки.

$$\max\{L_{bji} + L_{ji}\} - \min\{L_{bji} + L_{ji}\} > [G_L]; \quad \forall (L_{bji} \in \overline{p_{ji}}; L_{ji} \in \overline{p_{ji}}; j_i \in J_k),$$

де - L_{bji} відстань від елемента на деталі, що заважає переміщенню інструментального блоку в осьовому напрямку до початку процесу різання поверхні, мм; L_{ji} - довжина ji -ої поверхні, мм; $[G_L]$ - допустимий перепад довжин вильоту інструменту для інструментального блоку, що розглядається, мм.

Розкид діаметрів інструментів, що входять до інструментального блоку, не повинен перевищувати допустимого значення:

$$\frac{\max\{D_{ji}\}}{\min\{D_{ji}\}} \leq [G_D]; \quad \forall (D_{ji} \in \overline{p_{ji}}; j_i \in J_k),$$

де D_{ji} - діаметр ji -ої поверхні, мм; $[G_D]$ - допустиме значення перепаду діаметрів оброблюваних поверхонь.

Технічні обмеження.

Технічні обмеження пов'язані з можливістю конструкторської реалізації варіанта технологічного компоновання інструментального блоку наявним набором модулів або конструкцією оригінального вузла. До цих обмежень можна віднести можливість перемикання режимів різання в процесі обробки (з використанням мехатронних модулів це обмеження втратило актуальність); можливість забезпечити подачу ЗОТР у зону обробки у процесі різання; конструктивні особливості вузла та ін.

Так при формуванні інструментального блоку обробки осьовим різальним інструментом як таке обмеження виступає мінімально допустима міжцентрова відстань між осями шпинделів, що пояснюється вимогою забезпечення нормальної установки підшипників шпинделя і залежить від типу, конструкції та розмірів багатошпиндельного блоку.

$$\{XY_{ji}\} - \{XY_m\} \geq [G_{XY}]; \quad \forall (XY_{ji} \in \overline{p_{ji}}; j_i \in J_k; m = j_i + 1; m \in J_k),$$

де XY_{ji} - координата розташування ji -ої поверхні для отворів або координата початку ji -ої поверхні для іншого типу поверхонь; $[G_{XY}]$ - мінімально допустима міжосьова відстань між шпинделями або положенням інструменту в інструментальному блоці, мм

Технічні обмеження багато чому визначаються сферою застосування спеціального устаткування, залежить від використовуваних під час виготовлення технологічних модулів, конструкцій інструменту, специфіки виробництва та т.д. Ця система обмежень повинна налаштовуватися під конкретного виробника і не розглядається в даній роботі.

Результати. На підставі проведених досліджень автори пропонують уточнену методику синтезу багатоінструментальних блоків спеціальних верстатів, компоновання яких базується на максимальному використанні уніфікованих модулів та агрегатів. Даний підхід не залежить від виконуваних технологічних операцій та того, які саме модулі можуть бути використані для конструкторської реалізації пропонованого компоновання інструментального блоку.

Ця методика передбачає виходячи з параметрів, формованих у процесі обробки поверхонь і виробі загалом, призначення варіантів елементарної технології обробки кожної поверхні. Створений масив технологічних операцій (елементарних переходів) є основою побудови графа варіантів багатоінструментальних блоків. Вибір технічно реалізованих варіантів здійснюється з використанням алгоритму розв'язання задачі про найменше розбиття з накладенням у вигляді матриць системи обмежень технологічного характеру, геометрії поверхонь, що обробляються, і об'єкта обробки в цілому, а також технічні обмеження, пов'язані з особливістю виробництва обладнання певного призначення.

Запропонована методика синтезу багатоінструментальних блоків орієнтована використання систем автоматизованого проектування в процесі створення верстатів з агрегатно-модульною компоновкою для масового виробництва. Методика заснована на широкому використанні бази знань технічних характеристик та технологічних можливостей модулів, що застосовуються. Пропонований авторами підхід дає можливість первинного налаштування системи синтезу варіантів під конкретні завдання, які вирішуються на підприємстві, шляхом встановлення допустимих граничних параметрів $[G_{XY}]$, $[G_D]$, $[G_L]$, $[G_{JT}]$ та ін. Також можна коригувати розроблені матриці систем обмежень на підставі відстеження характеристик випущеного обладнання в період його життєвого циклу, статистичних та лабораторних досліджень.

Запропонована методика дозволяє як критерій вибору найбільш перспективного варіанта структур багатоінструментальної обробки використовувати різні оцінки сформованих і технічно реалізованих варіантів (мінімальна кількість інструментальних блоків, задана кількість інструментальних блоків за кількістю позицій транспортного пристрою, рівномірність розподілу інструментів за різними блоками та ін.). У класичній постановці вирішується завдання про мінімальне розбиття з використанням мінімальної кількості інструментальних блоків. Однак вибір цільової функції може бути змінений на етапі налаштування системи.

Висновки. На підставі аналізу тенденцій випуску спеціального обладнання агрегатно-модульної конструкції та наявності постійного попиту такого обладнання для масового виробництва встановлено необхідність розвитку питань, пов'язаних із багатоінструментною обробкою на базі використання сучасних досягнень компютерної мехатроніки та CALS-технологій.

На підставі аналізу існуючих конструкцій спеціальних верстатів агрегатно-модульної конструкції виділено та класифіковано три основні групи факторів, які мають домінуючий вплив на синтез структур інструментальних блоків: технологічні, геометричні та технічні. Встановлено математичні залежності та граничні значення факторів, що розглядаються, також розроблено матриці сумісності параметрів для кожного фактора з відповідної групи.

Проведені дослідження дозволили авторам запропонувати удосконалену та орієнтовану на автоматизоване проектування методику синтезу варіантів багатоінструментної обробки, що технічно реалізується, яка заснована на принципах теорії графів. У даній методиці синтез варіантів інструментальних блоків спирається на відомі алгоритми розв'язання задачі про найменше розбиття з урахуванням встановленої додаткової системи обмежень різного характеру, яка спирається на групи факторів, що були досліджені авторами. Це дозволяє скоротити кількість варіантів технологічних компоновок інструментальних блоків, що проглядаються в процесі синтезу, та, відповідно, спростити час та сам процес проектування технологічної компоновки верстата.

Підтвердження. Загальний підхід та запропонована модель процесу синтезу багатоінструментних блоків використовувалася на Харківському машинобудівному заводі «Світло Шахтаря» української корпорації CORUM Group у процесі обробки корпусних деталей вугільних комбайнів.

Список літератури:

1. Market Report 2021. // German Machine Tool Builders Association (VDW), Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt am Main. 2022. 84P.
2. Metal Cutting Machine Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Laser, Waterjet, Plasma, Flame), By Application (Automotive, Aerospace & Defense, Marine), By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027
3. Каталог фірми Kingsbury. [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://kingsburyuk.com/>
4. Каталог фірми Hydromat Inc., [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://hydromat.com/>
5. Каталог фірми Giuliani. [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://www.giulianimachines.com/>
6. Каталог фірми Variomatic Werkzeugmaschinen GmbH. [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://www.variomat.de/>
7. Каталог фірми Turmatic Systems Inc. [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://www.turmatic.com>
8. Каталог фірми K.R. Pfiffner GmbH. [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://www.pfiffner.com/>
9. Каталог фірми PICCHI. [Електронний ресурс] <https://www.picchimachines.it/>
10. Каталог фірми TTM Makine San. [Електронний ресурс] <https://www.cnctransfer.com/>
11. Каталог фірми WE-FUN. [Електронний ресурс] <http://www.we-fun.com/>
12. Гильман А.М., Егоров Г.В., Егоров Ю.Б., Ясаков Ю.В. Автоматизированное проектирование оптимальных наладок металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1984. – 168с. ил. 2.
13. Яковенко П.Э., Яковенко Е.И. Синтез структур многоинструментальных блоков при обработке концевым инструментом. // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». - Харьков:НТУ «ХПИ». - 2010. - Вып.40. - С.90-93.
14. Structural Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools / Yakovenko I., Permyakov A., Prihodko O., Basova Y., Ivanova M.. // In: Tonkonogiy V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – pp. 352-363. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_36
15. Parametric Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools. / Yakovenko I., Permyakov A., Naboka O., Prihodko O., Havryliuk Y. // In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – pp. 85-93 https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_9
16. КРИСТОФИДЕС Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М: Мир, 1978.
17. ЕРЕМЕЕВ А. В., ЗАОЗЕРСКАЯ Л. А., КОЛОКОЛОВ А. А. Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования//Дискретный анализ и исследование операций. Серия 2. 2000. Т. 7, № 2. С. 22-46.
18. Ferdous SM, Rahman MS (2015) An Integer Programming Formulation of the Minimum Common String Partition Problem. PLoS ONE 10(7): e0130266. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130266>
19. Bulteau L, Fertin G, Komusiewicz C, Rusu I. A Fixed-Parameter Algorithm for Minimum Common String Partition with Few Duplications. In: Darling A, Stoye J, editors. Algorithms in Bioinformatics. vol. 8126 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg; 2013. p. 244–258. Available from: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-40453-5_19.

Bibliography (transliterated):

1. Market Report 2021. // German Machine Tool Builders Association (VDW), Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt am Main. 2022. 84P.
2. Metal Cutting Machine Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Laser, Waterjet, Plasma, Flame), By Application (Automotive, Aerospace & Defense, Marine), By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027
3. Kataloh firmy Kingsbury. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu <https://kingsburyuk.com/>
4. Kataloh firmy Hydromat Inc., [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu <https://hydromat.com/>
5. Kataloh firmy Giuliani. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu <https://www.giulianimachines.com/>
6. Kataloh firmy Variomatic Werkzeugmaschinen GmbH. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu <https://www.variomat.de/>
7. Kataloh firmy Turmatic Systems Inc. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu <https://www.turmatic.com>
8. Kataloh firmy K.R. Pfiffner GmbH. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu <https://www.pfiffner.com/>
9. Kataloh firmy PICCHI. [Elektronnyy resurs] <https://www.picchimachines.it/>
10. Kataloh firmy TTM Makine San. [Elektronnyy resurs] <https://www.cnctransfer.com/>
11. Kataloh firmy WE-FUN. [Elektronnyy resurs] <http://www.we-fun.com/>
12. Hylman A.M., Ehorov H.V., Ehorov Yu.B., Yasakov Yu.V. Avtomatizyrovannoe proektyrovanye optymalnykh naladok metallorazhushchykh stankov. – M.: Mashynostroenye, 1984. – 168s. yl. 2.
13. Iakovenko P.E., Yakovenko E.Y. Syntez struktur mnohoynstrumentalnykh blokov pry obrabotke kontsevym ynstrumentom. // Vestnyk natsyonalnoho tekhnicheskoho unyversyteta «Kharkovskyy polytekhnycheskyy ynstitut». - Kharkov:NTU «KhPY». - 2010. - Vyr.40. - S.90-93.

14. Structural Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools / Yakovenko I., Permyakov A., Prihodko O., Basova Y., Ivanova M. // In: Tonkonogyi V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – pp. 352-363. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_36
15. Parametric Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools. / Yakovenko I., Permyakov A., Naboka O., Prihodko O., Havryliuk Y. // In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – pp. 85-93 https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_9
16. KRYSTOFYDES N. Teoriya hrafov. Alhorytmicheskyi podkhod. M: Myr, 1978.
17. EREMEEV A. V., ZAOZERSKAIa L. A., KOLOKOLOV A. A. Zadacha o pokrytyu mnozhestva: slozhnost, alhorytmy, eksperimentalnye yssledovaniya//Dyskretnyi analiz y yssledovanye operatsyi. Seryia 2. 2000. T. 7, № 2. S. 22-46.
18. Ferdous SM, Rahman MS (2015) An Integer Programming Formulation of the Minimum Common String Partition Problem. PLoS ONE 10(7): e0130266. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130266>
19. Bulteau L, Fertin G, Komusiewicz C, Rusu I. A Fixed-Parameter Algorithm for Minimum Common String Partition with Few Duplications. In: Darling A, Stoye J, editors. Algorithms in Bioinformatics. vol. 8126 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg; 2013. p. 244–258. Available from: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-40453-5_19.

Поступила (received) 16.01.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Яковенко Ігор Едуардович (Yakovenko Ihor) - кандидат технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: igor.dych59@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8344-996X

Пермяков Олександр Анатолійович (Permyakov Oleksandr) - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: perm_a@i.ua, ORCID: 0000-0002-9589-0194

Дергусов Вадим Миколайович (Dergousov Vadim) - аспірант кафедри кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; генеральний директор АТ «Харківський машинобудівний завод „Світло Шахтаря“» тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: dergousov.vadim@corum.com, ORCID: 0000-0002-0199-6589

Науменко Олександр Артемович (Naumenko Oleksandr) – кандидат технічних наук, професор кафедри механічної та електричної інженерії Інженерно-технологічного факультету Полтавського державного аграрного університету, тел. (067 576 55 68); e-mail: ol.naumenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-9936-3922

Янголенко Ярослав Андрійович (Jangolenko Jaroslav) – здобувач освіти другого магістерського рівня за спеціальністю «Галузеве машинобудування» Інженерно-технологічного факультету Полтавського державного аграрного університету, тел. (099 0938864); e-mail: mech@pdaa.edu.ua

ШЕЛКОВИЙ О. М., ФЕДЕНЮК Д. В., ЛЕТЮК В. М., МІРОНЕНКО С. О., ІШЧЕНКО М. Г.

АЛГОРИТМ ПОШУКУ В УМОВАХ СЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА ВАРІАНТІВ СТРУКТУРИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ МЕХАНООБРОБКИ НА ЗАДАНІЙ МНОЖИНІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті описано алгоритм формування множини варіантів структур технологічних процесів (ТП) обробки металів різанням на заданій множині технологічного обладнання та послідовності виконання операцій в умовах серійного виробництва. Варіанти технологічних процесів представлені у вигляді граф-дерева, що враховує послідовність виконання операцій та можливості використання для цього основного технологічного обладнання. Алгоритм генерації варіантів ТП призначений для формування у системі імітаційного моделювання виробничого процесу найбільш раціонального поєднання послідовності технологічних операцій та обладнання, на яких вони реалізуються. Як критерій відбору варіантів ТП використано сумарний час їх виконання. Алгоритм вбудовується у програмне забезпечення системи імітаційного моделювання виробничих систем GPS. Він реалізований серед пакету Mathcad 15, а як приклад розрахунків представлено формування організаційно-технологічної структури ділянки механічної обробки лопаток турбін парової турбіни в ВАТ «ТУРБОАТОМ».

Ключові слова: обробка металів різання, структура технологічного процесу, основне технологічне обладнання, сумарний час обробки, варіанти обробки, оптимізація структури технологічного процесу.

SHELKOV OI A. N., FEDENYUK D. V., LETYUK V. M., MIRONENKO S. A., ISHCHEKNO M. G.

SEARCH ALGORITHM UNDER THE CONDITIONS OF SERIAL PRODUCTION OF STRUCTURE OPTIONS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF MACHINING ON A GIVEN SET OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

The article describes the algorithm for the formation of a set of options for the structures of technological processes (TP) of metal cutting on a given set of technological equipment and the sequence of operations in mass production. Variants of technological processes are presented in the form of a graph-tree, taking into account the sequence of operations and the possibility of using the main technological equipment for this. The algorithm for generating TP options is designed to form the most rational combination of the sequence of technological operations and the equipment on which they are implemented in the system of simulation of the production process. As a criterion for selecting TP options, the total time for their implementation was used. The algorithm is built into the software of the simulation system for production systems "GPS". It is implemented in the environment of the Mathcad 15 package, and as an example of calculations, the formation of the organizational and technological structure of the section for machining turbine blades of steam turbines in PJSC "TURBOATOM" is presented.

Keywords: metal cutting, the structure of the technological process, the main technological equipment, the total processing time, processing options, optimization of the structure of the technological process.

1. Вступ. В умовах серійного виробництва коефіцієнт закріплення технологічних операцій (ТО) за металорізальним обладнанням (Кз) набагато більше одиниці і, залежно від номенклатури випуску виробів, досягає значень (10 ÷ 25) (приклад, рис. 1). Це спричиняє необхідність проектування структур технологічного процесу (ТП) залежно від виробничої ситуації, що виникає на ділянці металообробки, тобто. майже реальному часу роботи обладнання. При цьому необхідно враховувати обмеження, що накладаються на процес обробки як з боку технічної та організаційної підсистем виробничої системи, наприклад, одному верстаті не можна послідовно виконувати кілька технологічних операцій, так як це суперечить визначенню поняття «Технологічна операція» [6], а процес проектування структури ТП перетворюється на перебір варіантів його структур. За такого підходу «ручне проектування» варіантів можливих структур ТП практично неможливо, так як воно трудомістке і не дозволяє отримати найбільш раціональні результати і завжди лімітоване часом виконання планового завдання з проєктованого ТП та інших ТП, що знаходяться у виробничому процесі.

2. Аналіз літератури. Розглянемо технологічні, технічні та організаційні фактори цього процесу (рис. 2) [1 - 5, 7, 8 - 26, 31 - 33]:

- *Технологічні фактори* : зниження припусків та їх рівномірний розподіл поверхнею заготовок (1); багатоінструментальні налагодження з послідовним виконанням переходів (2); застосування комбінованого інструменту (3); багатоінструментальна (паралельна) обробка (4); багатопозиційне оброблення (5); застосування безперервної обробки (6);

- *Технічні фактори* : автоматизація робочого циклу обладнання (7); автоматизація циклу виготовлення деталей - транспортування, контроль тощо. (8); використання активних методів контролю (9); використання автоматизованого та автоматичного обладнання (10); автоматизація операцій установки-зняття, завантаження-розвантаження заготовок та деталей (11); автоматизація процесу забезпечення інструментом (12); автоматизація транспортно-складських операцій (13); скорочення участі людини у виробничому процесі (14); підвищення коефіцієнта змінності обладнання та збільшення річного фонду часу (15); оптимізація та стабілізація технологічних режимів та процесів (16); скорочення тривалості виробничого циклу (17); автоматизація організаційних та керуючих функцій (18); автоматизація управління верстатами, автоматизованою транспортно-накопичувальною системою (АТНС), автоматизованою системою інструментального забезпечення (АСІО) та ДПС загалом (19); скорочення чисельності управлінського апарату (20); підвищення рівня безперервності, пропорційності, ритмічності (21); автоматизація процесів підготовки виробництва (технологічної, конструкторської, організаційної) (22); скорочення чисельності ІТП (23); підвищення якості проєктування (24);

- *Організаційно-технічні та експлуатаційні фактори* : структурна оптимізація (концентрація, диференціація, інтеграція операцій), поточність обробки (25); використання групових налагоджень верстатів та групова технологія (26); формування (оптимізація) регламентів обслуговування устаткування (27); планово-економічні розрахунки (формування графіків запуску, оптимізація партійності тощо) (28).

© О. М. Шелковий, Д.В. Феденюк, В.М. Летюк, С.О. Міроненко, М.Г. Іщенко 2023

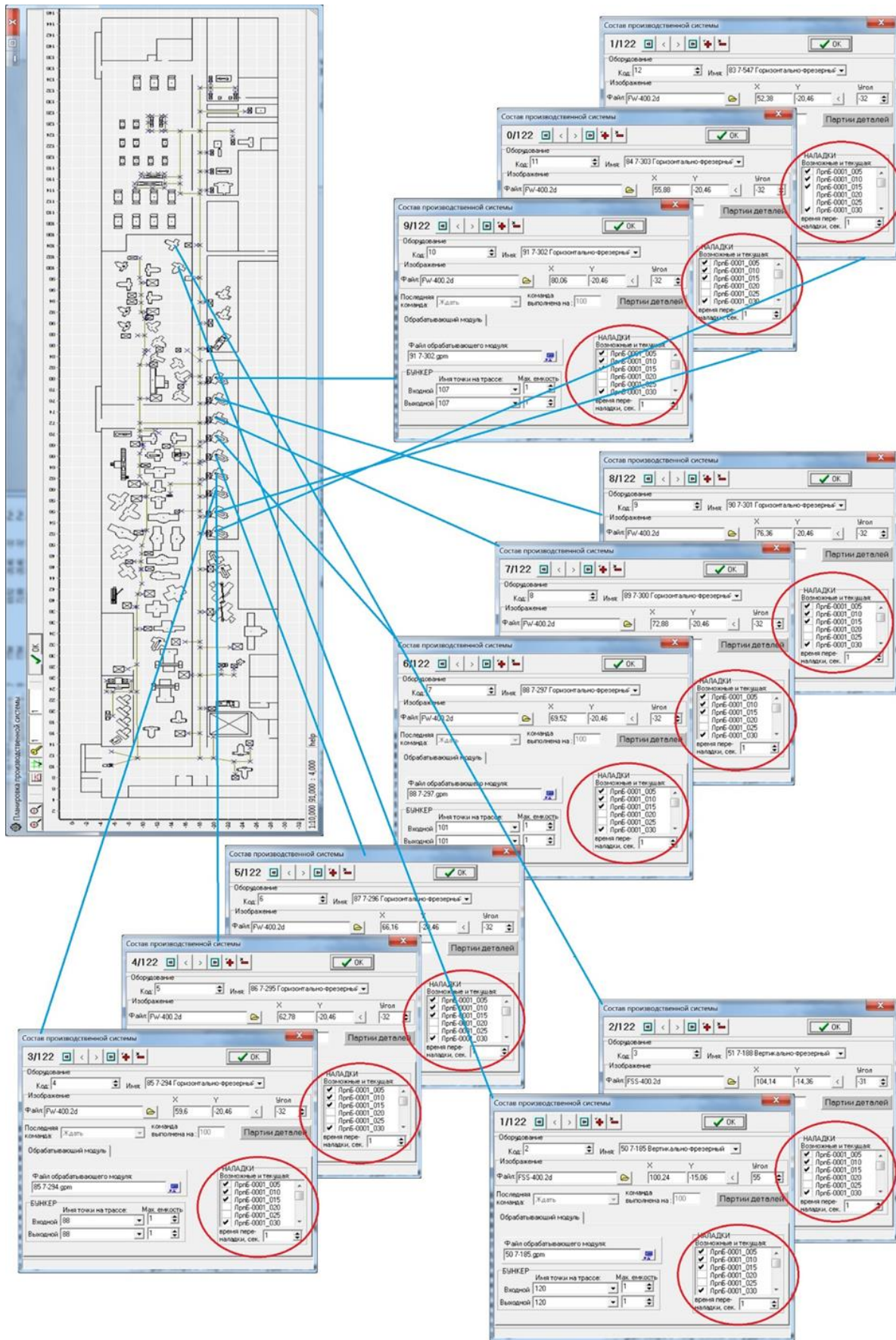


Рис. 1 – Приклад структури даних імітаційної моделі планування МСП ділянки обробки лопаток парової турбіни в ВАТ «ТУРБОАТОМ» [35, 36]

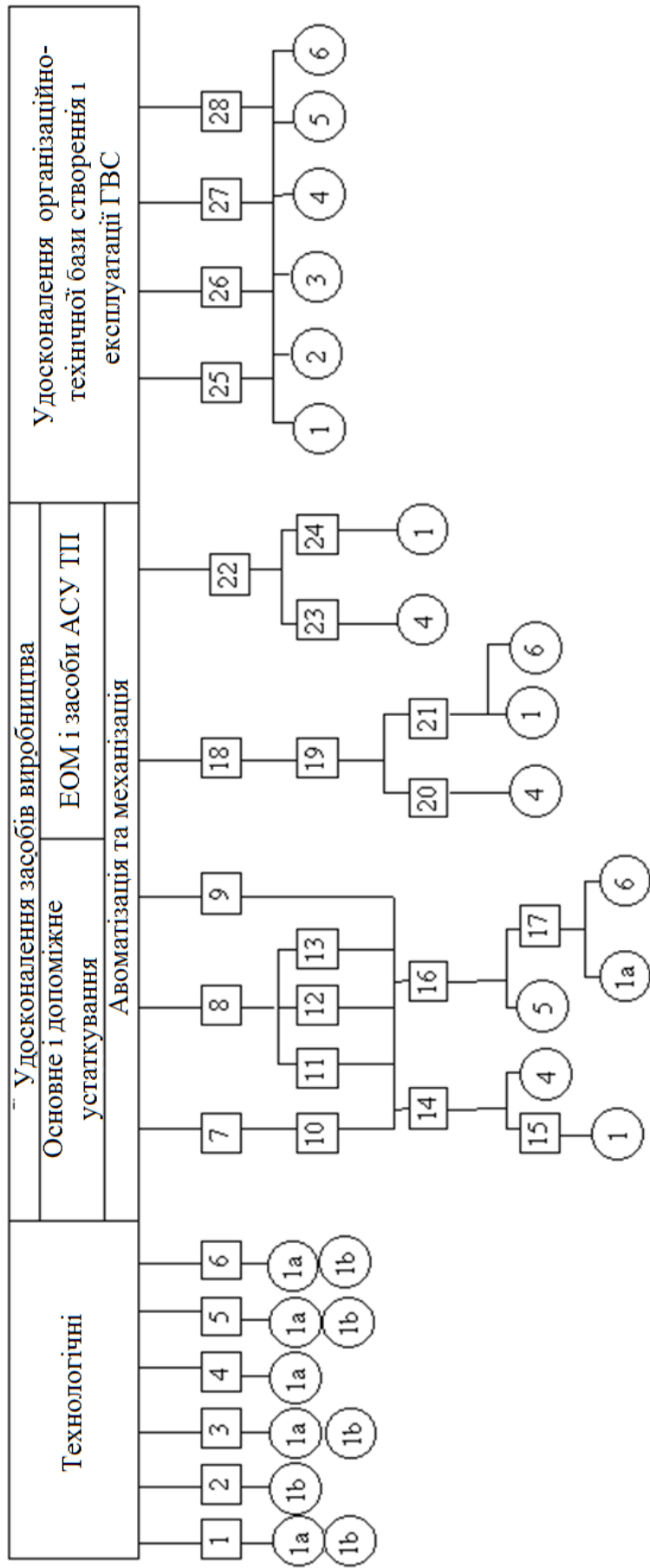


Рис.2 – Напрями підвищення ефективності ДПС технічними, технологічними та організаційними засобами: - фактори, що визначають зміну ефективності створення та експлуатації ДПС; - складові аналітичної оцінки ефективності ДПС

Вплив різних факторів, що визначають зміну ефективності створення та експлуатації виробничих систем, враховується через складові аналітичної оцінки ефективності ДПС (рис. 2): 1a – скорочення основного часу; 1b – скорочення допоміжного часу за рахунок скорочення внутрішньоциклових втрат та простоїв; 2 – зміна капітальних вкладень у устаткування; 3 – зменшення експлуатаційних витрат; 4 – скорочення чисельності працюючих; 5 – скорочення величини шлюбу; 6 – скорочення незавершеного виробництва.

3. Методи дослідження. Розглянемо алгоритм формування варіантів структур ТП на заданій множині металорізальних верстатів.

Метод аналізу продуктивності по типовій деталі практично не застосовується через труднощі достовірного підбору типового представника.

При розрахунку продуктивності за інтегральними характеристиками вважають, що на РМ опрацьовується певна номенклатура деталей з різними значеннями характеристик:

$$Q = \frac{1}{t_{cp1} \cdot S + t_{x1} + t_{x2} \cdot S + t_{Tz} + t_{oprz} + \frac{(t_1 + t_2 \cdot S)}{k}} \gamma, \quad (1)$$

де t_{cp1} - Середній час обробки одного виробу; S - середня кількість робочих ходів інструменту в процесі обробки; t_{x1} - середній час установки (зняття) деталі при несуміщених холостих переміщеннях; t_{x2} - середній час заміни інструментів.

Основним недоліком методу є використання усереднених величин, що дозволяє штучно вилучити з аналізу всі екстремальні режими функціонування обладнання. Однак залежність (1) зручна для формального аналізу закономірностей у побудові системи, урахування впливу зміни різних параметрів номенклатури та обробної системи на продуктивність.

Найбільш складним у визначенні продуктивності є аналіз ПС, коли обчислення Q у явній формі неможливе, тому що в ній здійснюється спільне виробництво деталей різного найменування. Це зумовлює поєднання реалізації кількох технологічних процесів у часі та просторі, т. е. кілька технологічних послідовностей, що відбуваються порядком проходження заготовок через різні робочі місця, перетинають одне одного при використанні одного й того ж обладнання. Внаслідок цього перетину утворюється черговість проходження різних заготовок (партій заготовок різного найменування) через кожне робоче місце. Отримані послідовності прийнято називати організаційними, їхнє призначення є актом управління виробництвом. Таким чином, продуктивність ПС слід оцінювати по виходу придатної продукції із системи та спільно з цим аналізувати ефективність використання обладнання по робочих місцях.

У цьому випадку велике значення набувають прості з організаційних причин, обумовлені тим, що перехід з одного робочого місця на інше може супроводжуватися або очікуванням партією заготовок, поки звільниться наступне робоче місце, або простоем верстата, що чекає на заготовку з попередньої позиції.

Отже, завдання формування структури ПС на основі розрахунку продуктивності зводиться до формування оптимальних технологічних та організаційних послідовностей за критерієм мінімальних витрат, що відповідає максимальному завантаженню обладнання або мінімальній кількості необхідного обладнання. Розрахунки у разі проводяться чисельними методами з допомогою аналітичного чи імітаційного моделювання. Оптимізація наводиться шляхом послідовних ітерацій. При отриманні даних вихідного (базового) варіанта розглядаються можливі варіанти перерозподілу обробки. До цих варіантів відносяться або генерація нових (коригування старих) маршрутів обробки, або генерація нових послідовностей обробки за можливої наявності системних обмежень (кількості та виду ОУ). Далі проводиться новий цикл обчислень, і так продовжується до отримання необхідного результату.

За наявності явного зв'язку між продуктивністю та технічними, технологічними та структурними параметрами ДПС може бути використаний відносний показник (ϕ_i), який є відношенням продуктивності поточного (Q_i) і базового (Q_6) варіантів:

$$\phi_i = \frac{Q_i}{Q_6}. \quad (2)$$

При цьому оцінку резервів підвищення продуктивності за складовими, а також вплив різних змін у ПС або її функціях на результат доцільно проводити за балансом продуктивності (рис 3).

З малюнка слід, основні резерви підвищення продуктивності полягають у скороченні частки безпосередньої участі людини у виробничому процесі, тобто. у комплексній автоматизації виробничого процесу. Тоді коефіцієнт підвищення продуктивності ДПС можна подати у вигляді:

$$\phi_i = \frac{Q_i}{Q_6} = \frac{t_{cp1} S + t_{x1} + t_{x2} S + t_{Tz} + t_{oprz} + t_{перз}}{\frac{t_{cp1} S}{\beta_1} + \frac{t_{x1}}{\beta_2} + \frac{t_{x2} S}{\beta_3} + \frac{t_{Tz}}{\beta_4} + \frac{t_{oprz}}{\beta_5} + \frac{t_{перз}}{\beta_6}} \cdot \frac{1}{\beta_7}. \quad (3)$$

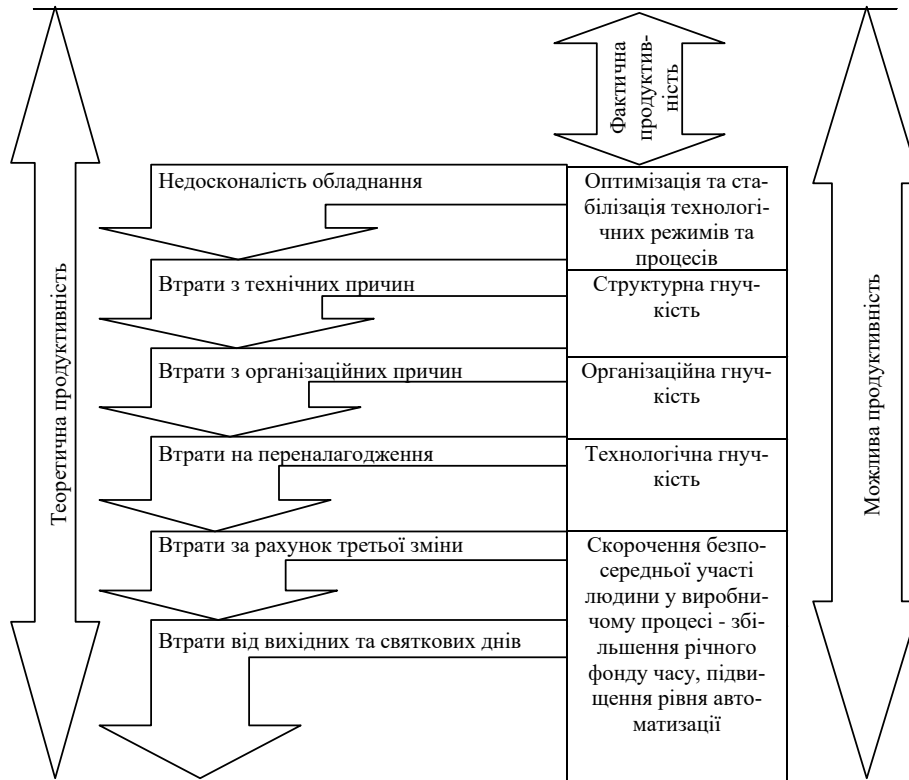


Рис. 3 – Формування балансу продуктивності ДПС [15]

Представимо у вигляді матриці (S) структуру ТП, що складається з ($N_{оп}$) операцій, що виконуються на $M_{ст}$ верстатах (4).

$$S = \left. \begin{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \text{ТП} \in j = 1, (\overline{N_{оп} = 4}), \\ \text{СТ} \in i = 1, (M_{ст} = 4). \end{matrix} \right\} \quad (4)$$

де i, j – номери ВП та верстатів (СТ), що беруть участь у формуванні ТП;

0 - на i -му верстаті не може виконуватися j -а ОП;

1 - на i -му верстаті може виконуватися j -а ОП.

Кожен із рядків матриці S (1) відповідає можливому варіанту виконання всього ТП варіанту на заданому верстаті. У нашому випадку жоден із верстатів не дозволяє повністю виконати обробку по заданому ТП.

1. Визначимо пари послідовно наступних один за одним операцій з номерами (n і $n+1$) (матриця S), які можуть бути виконані на двох різних верстатах : (st_m^n) і одним із верстатів ($st_f^{n+1}, st_k^{n+1}, st_l^{n+1} \dots$), запис (5) :

$$\begin{aligned} & 1 - \text{а операція} - 2 - \text{а операція} \\ & 1[2 \ 4]; 3[2 \ 4]; 4[2]. \\ & 2 - \text{а операція} - 3 - \text{а операція} \\ & 2[1 \ 3]; 4[1 \ 2 \ 3]. \\ & 3 - \text{а операція} - 4 - \text{а операція} \\ & 1[3 \ 4]; 2[1 \ 3 \ 4]; 3[1 \ 4]. \end{aligned} \quad (5)$$

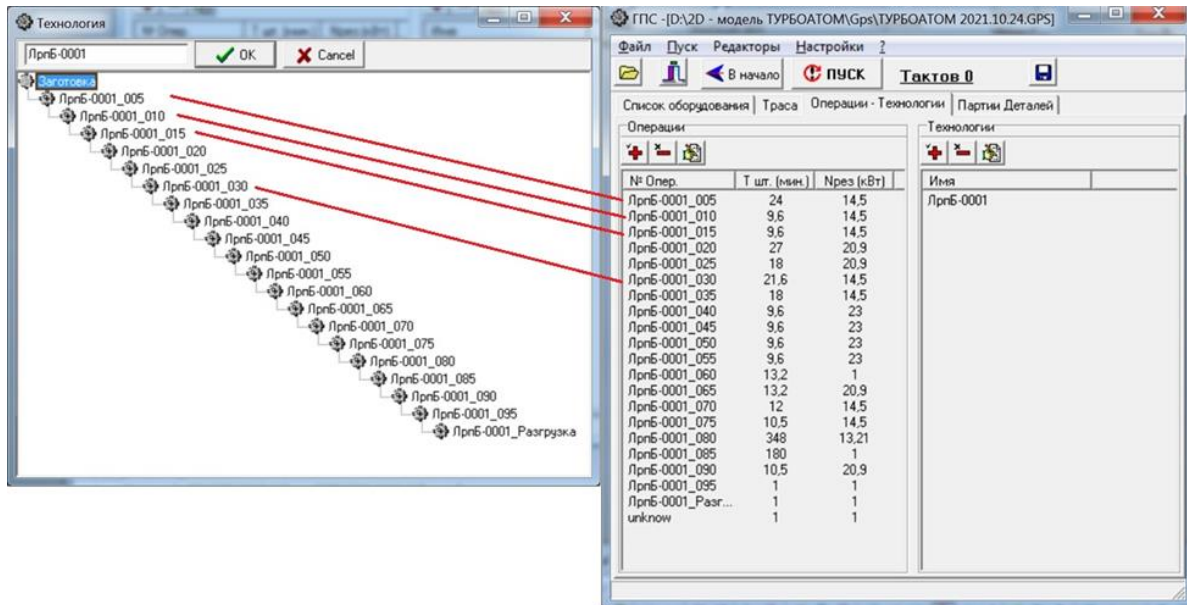


Рис. 4 – Приклад структури та параметрів ТП, який використовується при імітаційному моделюванні виробничого процесу МСП дільниці обробки лопаток парової турбіни в ВАТ «ТУРБОАТОМ»

Цим матрицям у загальному вигляді відповідає структура виду (6)

$$m[f, k, \dots, 1] \equiv st_m^n \rightarrow \begin{pmatrix} st_f^{n+1} \\ st_k^{n+1} \\ \vdots \\ st_1^{n+1} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Де \rightarrow знак перехід від виконання n – операції на m -му верстаті до виконання $n+1$ – номер наступного операції на одному з допустимих для її виконання верстатів.

2. Визначаємо зв'язки між матрицями (2) на основі затвердження (7)

$$\forall_{C_m}^{m=1, N_{cr}} \forall_{C_f}^{f=1, M_{cr}} \exists_{CT \in (st_m^n, st_f^{n+1})} (st_m^n, st_f^{n+1}) \Rightarrow (st_m^n \rightarrow st_f^{n+1}). \quad (7)$$

Формування зв'язків між операціями, що виконуються на верстатах (st_m^n, st_f^{n+1} ; st_m^n, st_f^{n+1} ; st_m^n, st_f^{n+1} ; ...), починається з 1-ї операції ТП і закінчується останньою відповідно до затвердження (7). Отримане рішення подано у вигляді графа (рис. 1), формульний запис якого представлений у вигляді (8)

$$1.1 \times (2.2 \times (3.1 \times (4.3 + 4.4)) + 3.3 \times (4.1 + 4.4)) + 2.4 \times (3.1 \times (4.3 + 4.4) + 3.2 \times (4.1 + 4.3 + 4.4) + 3.3 \times (4.1 + 4.4)) + \dots \\ \dots + 1.3 \times (2.2 \times (3.1 \times (4.3 + 4.4)) + 3.3 \times (4.1 + 4.4)) + 2.4 \times (3.1 \times (4.3 + 4.4) + 3.2 \times (4.1 + 4.3 + 4.4) + 3.3 \times (4.1 + 4.4)) + \dots \\ \dots + 1.4 \times 2.2 \times (3.1 \times (4.3 + 4.4) + 3.3 \times (4.1 + 4.4)). \quad (8)$$

де: $p.m$ – позначення номера операції (n) та номера верстата (m), де він може бути використаний; знак "x" - послідовність проходження операцій у технологічному процесі (рис. /); знак "+" - перехід на інший варіант використання верстатів (m) на операції з номером (n).

Варіант обробки виробу в даному прикладі описується записом (5) починаючи з номера **1.m** - перша операція та закінчується записом з номером **4.f**. – остання операція з цього ТП:

Наприклад:

$$\left. \begin{matrix} 1.1 \times 2.2 \times 3.1 \times 4.3 \\ 1.1 \times 2.2 \times 3.1 \times 4.4 \\ \vdots \\ 1.3 \times 2.2 \times 3.3 \times 4.4 \\ \vdots \\ 1.4 \times 2.2 \times 3.3 \times 4.4 \end{matrix} \right\}. \quad (9)$$

```

TP(Sto) := Kop ← rows(Sto)
Kst ← cols(Sto)
op ← 1
var ← 1
while op < Kop
  if op = 1
    Flvar,1 ← op
    Flvar,2 ← 0
    var1 ← 4
    for st ∈ 1,2..Kst
      if Sto1,st ≠ 0
        Flvar,var1 ← st
        zapvar1-3 ← st
        Kzap ← var1 - 3
        var1 ← var1 + 1
    Flvar,3 ← Kzap
    var ← var + 1
  for nzap ∈ 1,2..Flvar-1,3 otherwise
    break if zapnzap = 0
    Flvar,1 ← op
    Flvar,2 ← zapnzap
    var1 ← 4
    for st ∈ 1,2..Kst
      continue if Stoop,st = 0 ∨ zapnzap = st
      for i ∈ 1,2..Kst - 1
        continue if zapi = st ∨ zapi = 0
        zapvar1-3 ← st
    Flvar,var1 ← st
    Kzap ← var1 - 3
    var1 ← var1 + 1
    Flvar,3 ← Kzap
    var ← var + 1
  op ← op + 1
Fl

```

ORIGIN := 1

$$Sto := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Б. Програма формування граф-дерева
варіантів маршруту обробки

В. Результати
формування графу ТП

$$TP(Sto) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 & 1 & 3 & 4 \\ 2 & 1 & 2 & 2 & 3 & 0 \\ 2 & 3 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 2 & 4 & 2 & 2 & 3 & 0 \\ 3 & 2 & 3 & 1 & 3 & 4 \\ 3 & 3 & 2 & 1 & 4 & 0 \end{pmatrix}$$

А. Вхідні дані для
розрахунків (структура
та зміст

Рис. 5 – Вхідні дані, програма та результати формування варіантів ТП

Знак "+" із запису виключається, тобто. кожен із записів (6) є запис «безваріантної обробки по заданому ТП».

Даний алгоритм реалізований у вигляді програми формування структури ТП у середовищі пакета MathCad 14, яка представлена на рис. 5, б, а вхідні дані і результати розрахунків – на рис. 5, а та 5, в. Графічна інтерпретація результатів розрахунків наведена на рис. 6.

Наведений алгоритм реалізовано у вигляді підсистеми генерації варіантів ТП системи імітаційного моделювання роботи багатомоделісного серійного виробництва «GPS» [28 - 30].

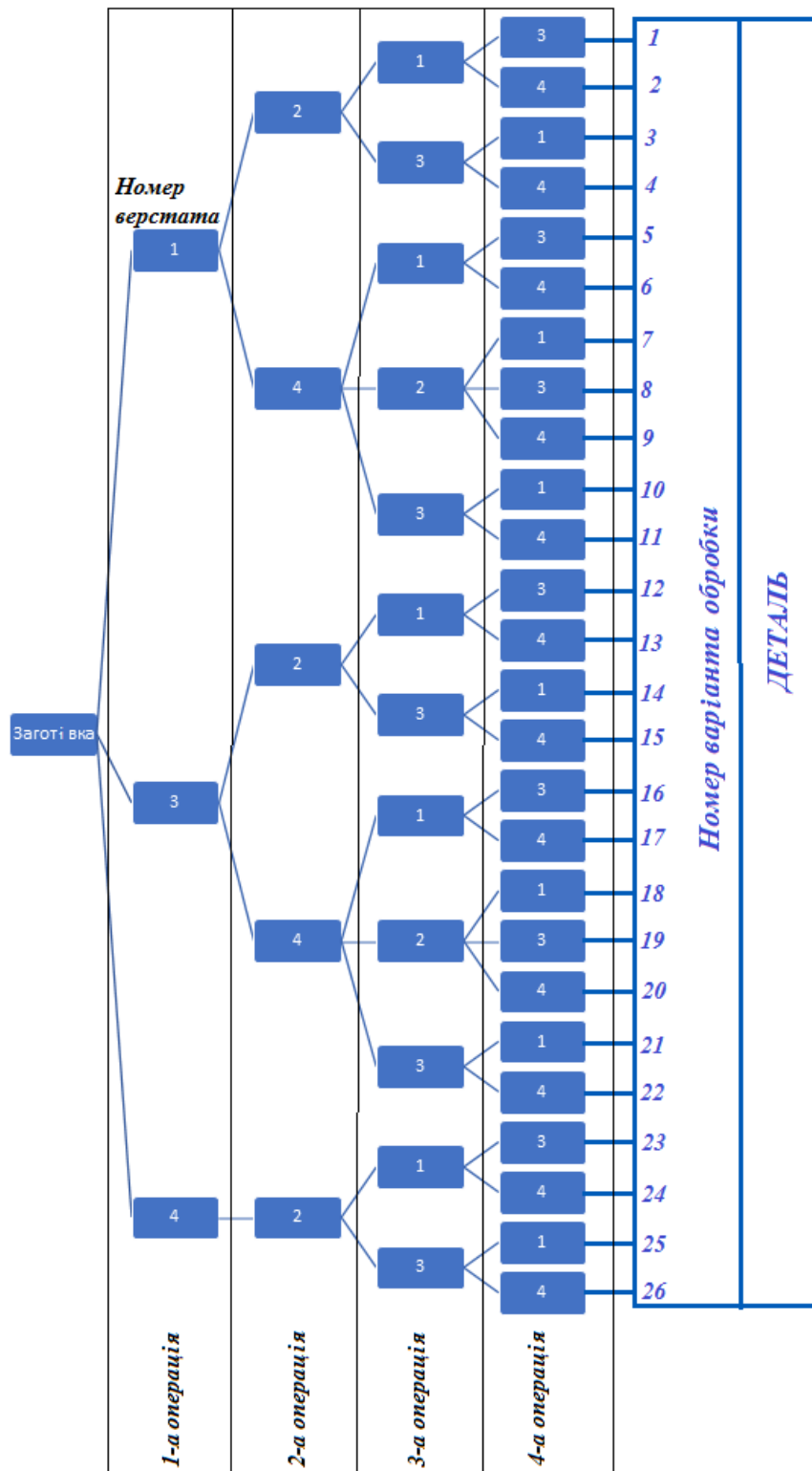


Рис. 6 - Граф-дерево варіантів ТП, згенерованих за пропозованим алгоритмом

4. Результати дослідження. Головною відмінністю ДПС від відомого устаткування є можливість швидкої автоматичної переналадження, тобто. гнучкість, можливість роботи протягом запланованого часу з мінімальною участю обслуговуючого персоналу, здатність оперативної зміни ходу технологічного процесу

при змінах вихідного стану виробничої системи, а також цілеспрямована автоматична робота модулів, агрегатів та пристроїв.

Разом з тим, процес створення організаційно-технічних та технологічних структур ВС, як і раніше, ділиться на два етапи: технологічну та організаційну підготовку виробництва. Це, при гнучкості проектування, що здається, призводить до жорстких схем організаційно-технологічних структур ВС, в яких варіювати процесами обробки можливо тільки на етапі технологічної підготовки виробництва, а її організаційне проектування орієнтується на задані технологічні схеми. Це суттєво зменшує виробничий потенціал ДПС та у багатьох випадках призводить до тривіального копіювання технологічних процесів з використанням ручної праці.

Проблеми підвищення ефективності експлуатації ГПС, які виникають при цьому, вже не можна вирішити тільки за рахунок підвищення ефективності використання основного часу технологічного обладнання, так як воно становить лише 6 - 20% від загального часу завантаження виробництва. При цьому частка допоміжного часу разом з іншими втратами знаходиться в діапазоні 50 - 60%. Тому основний наголос зроблено на автоматизації допоміжних операцій, забезпеченні автоматичного функціонування обладнання у вечірні та нічні зміни, різкому скороченні часу переналадження, переоснащення, зміни інструменту, автоматизації управління матеріальними та інформаційними потоками. Сьогодні стало очевидним, що для реалізації такого підходу необхідно створити методологічні засади організаційно-технологічного перепроєктування, що враховує швидку зміну умов виробництва виробів.

Тому створення наукових засад підвищення ефективності виробничої системи обробки металів різанням шляхом її перепроєктування з допомогою розробки раціональних структур технологічних процесів з урахуванням інтеграції автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва з автоматизованими системами управління є актуальною народно-господарською проблемою.

Аналіз тенденцій автоматизації основних та допоміжних операцій дозволяє зробити висновок про те, що останніми роками цей процес орієнтований на "інтелектуалізацію" систем управління ДВС, яка дозволяє реалізувати адаптивне управління основними та допоміжними операціями.

Враховуючи той факт, що в загальному обсязі витрат на створення ДПС витрати на обладнання займають не менше 50%, як і раніше, актуальним є повніше використання його функціональних ресурсів, до яких належать пропускна здатність, організаційна та технологічна гнучкість.

Вони визначають значну ресурсомісткість цього перспективного устаткування як у процесі створення, і у процесі експлуатації. Крім того, структурна складність ДВС визначає можливість прийняття не кращих рішень, помилок та прорахунків при традиційних методах роботи на всіх етапах їх проектування. Як інструмент, що певною мірою обмежує творців та користувачів ГПС від невиправданого витрачання людських, матеріальних та інших ресурсів, використовуються методи автоматизованого проектування.

Тому об'єктом дослідження є технічна, технологічна та організаційна структури ПС, в рамках якої, як предмет дослідження розглядаються закономірності формування та методи управління організаційно-технологічним компонуванням гнучкої виробничої системи обробки металів різанням на рівні ділянки та цеху з метою отримання виробів заданої якості у строки, обумовлені планом випуску.

Аналіз методів проектування організаційних та технологічних структур ДВС показав, що імітаційне моделювання дискретних систем у режимі реального часу є ефективним засобом їх оптимізації. Як базовий метод проектування обраний блочно-модульний метод, що інтегрує у собі переваги методів моделювання, орієнтованих процеси.

5. Висновки. Таким чином, метою роботи є підвищення ефективності виробничої системи обробки металів різанням шляхом розробки організаційно-технологічних основ її функціонування, що включає проектування багатоваріантної технології обробки та організаційної структури виробничої системи в умовах серійного виробництва.

Для цього вирішені такі завдання:

1. Обґрунтування принципів управління параметрами та структурою ВС на основі аналізу середньої пропускної спроможності та енергетичних витрат на виробничий процес;
2. Приписання механізму формування структури багатоваріантного технологічного процесу на основі аналізу імітаційної моделі ВС ЗМР.
3. Теоретичне обґрунтування можливості спрямованої зміни структур та параметрів технологічних процесів та організаційної структури ВС відповідно до заданих характеристик партій обробки та календарного плану випуску виробів.
4. Розробка методики перепроєктування організаційно-технологічного компонування виробничих систем різного рівня інтеграції.
5. Перевірка основних положень методології проектування багатоваріантних технологій в умовах серійного виробництва.

Список литературы

- Автоматизация проектирования технологии в машиностроении / Б.Е. Челищев, И.В. Бобров, А. Гонсалес-Сабатер и др. // Под ред. акад. Н.Г. Бруевича.- М.: Машиностроение, 1987.- 264с.
- Арнольд В. И. Дополнительные главы теории дифференциальных уравнений. — М.: Наука, 1978. — 304 с.
- Белянин П.Н., Лещенко В.А. Гибкие производственные системы. - М.: Машиностроение, 1984.- 360с.
- Гибкие производственные комплексы //Под ред. П.Н. Белянина, В.А. Лещенко. - М.: Машиностроение, 1984.- 384с.
- Гибкое автоматическое производство //В.О. Азбель, В.А. Егоров, А.Ю. Звоницкий и др.: Под общ. ред. С.А. Майорова. - Л.: Машиностроение, 1985.-

- Гнучкі виробничі системи: навчальний посібник для студентів напрямку 131- Інженерна механіка /Е. Яковенко, О.А. Пермяков, О.М. Шелковий – Харків: Діса плюс, 2019. – 246 с.
- Довбня Н.М., Кондратьев А.Н., Юревич Е.И. Роботизированные тех-нологические комплексы в ГПС. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1990. – 303с.
- Жданов Б.И. Концепція та інженерна методологія проектування віртуального техпроцесу механообробки в машинобудуванні : Автореф. дис.. канд. техн. наук (05.02.08 ; 05.13.05) / Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т". — К., 1997. — 25с.
- Имитационное моделирование производственных систем //Под общ. ред. А.А. Вавилова. - М.; Берлин: Машиностроение: Техника, 1983. - 416с.
- Котов В.Е. Сети Петри. - М.: Наука, 1984. - 158с.
- Лещинский Л.Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем. – М. Машиностроение, 1990. – 312с.
- Лобанов Л.А. Исследование влияния размерной структуры вариантов базирования деталей на количество технологических переходов. - Московский текстильный институт. - М., 1986.- 10с.
- Митрофанов С.П., Гульнов Ю.А., Куликов Д.Д. Применение ЭВМ в технологической подготовке серийного производства. - М.: Машино-строение, 1981.- 287с.
- Морев Димитър. Математични модели за описание на структура та технологичните процеси при автоматизираното им проектиране //Машиностроене.- 1985.- 34, № 11.- С.497-499.
- Организационно-технологическое проектирование ГПС /В.О. Азбель, А.Ю. Звоницкий, В.Н. Каминский и др.; Под общ. ред. С.П. Митрофанова. Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1986.-294с.
- Петров Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления. - 2-е изд. перераб. и доп. - Л.: Энергия, 1977. - 280с.
- Полужков М.В., Курников С.В. Построение системы автоматизируемого проектирования технологических процессов (АПТП) для ГАП //Материалы межотраслевой конференции "Прогресс 84". - М.: ВИМИ, 1985. - 186с.
- Потейко А.Д., Тимофеев Ю.В., Мазур Л.Е. Эффективность процессов механической обработки в массовом производстве. - К.: Техніка, 1980.- 157с.
- Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-и кн. Кн. 6. Техническая имитация интеллекта: Учеб. Пособие для вузов/В.М. Назаретов, Д.П. Ким; Под общ. ред. И.М. Макарова. - М.: Высш. шк., 1986.-144с.
- Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: Навч. Посіб-ник / За редакцією А.І. Грабченка. - Харків, ХДПУ, 1999р. - 436с.
- Системное проектирование интегрированных производственных комплексов //Под общ. ред. В.М. Пономарева. - Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1986. - 319 с.
- Слепцов А.И., Юрасов А.А. Автоматизация проектирования управляющих систем гибких автоматизированных производств //Под ред. Б.Н. Малиновского. - К.: Техніка, 1986. - 110с.
- Технологическая подготовка гибких производственных систем /С.П. Митрофанов, Д.Д. Куликов, О.Н. Миляев, Б.С. Падун; Под общ. Ред. С.П. Митрофанова. –Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 352с.
- Тилипалов В.Н., Веремев А.Н. Алгоритм качественной оценки синтезируемых вариантов маршрутных технологических процессов по критерию производительности. - Деп. рукопись в ВНИИТЭМР 17.03.86. - № 126-МШ86.- Могилевский машиностроительный институт. - Могилев, 1986.- 5с.
- Цветков В.Д. Система автоматизации проектирования технологических процессов. - М.: Машиностроение, 1972.- 240с.
- Цветков В.Д. Формализация построения маршрутов обработки корпусных деталей для ГАП //Автоматизация технологической подготовки производства. - Свердловск, 1986.- С.122-134.
- Шелковий О.М., Гасанов М.І., Заковоротній О.Ю., Главчева Ю.М., Летюк В.І., Феденюк Д.В. Модель формування допоміжних машинноручних технологічних операцій // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bul-letin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 2 (6) 2022. – С. 31–42. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).05
- Шелковий О.М., Скоркін А.О. Комп'ютерна програма "GPM-3D" //Свідчення про реєстрацію авторського права на твір № 47545 від 31.01.2013.
- Шелковий О.М., Феденюк Д.В. Постановка задачі підвищення ефективності систем механо-складального виробництва на основі тривимірного моделювання //Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірка наукових праць. Тематичний випуск Технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2010. - №24. - С. 95-111.
- Шелковой А., Ключко А., Набока Е. Имитационное моделирование в задачах механо-сборочного производства /Авторы: Шелковой А., Ключко А., Набока Е. □ Saarbrücken, Ger-many: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. - 528 с.
- Яковлев Е.И. Машинная имитация. - М.: Наука, 1975. - 158с.
- Ямпольский Л.С., Полищук М.Н. Оптимизация технологических процессов в гибких производственных системах К.: Тэхника, 1988. - 175с.
- Янг С. Системное управление организацией. - М.: Сов. Радио, 1972. - 456с.
- Adamszyk, P., Ernst, G.: Macro-Anwendung in EXAPT. Nutzung der Gruppentechnologie zur rationalen NC - Teileprogrammierung. tz für Metallbearbeitung 76 (1982) 8/12, S. 32-40.
- Dobrotvorskij, S., Basova, Y., Yepifanov, V., Letiuk, V., Dobrovolska, L., Shelkovyi, O. (2023). Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Ciobotă, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Net-works and Systems, vol 534. pp 57–69. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15944-2_6
- Sergey Dobrotvorskij, Yevhenia Basova, Vitalii Yepifanov, Valerii Letiuk, Ludmila Dobrovolska and Oleksandr Shelkovyi. Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Ciobotă D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham.

References (transliterated)

1. Avtomatizatsiya proyektirovaniya tekhnologii v mashinostroyenii / B.E. Chelishchev. IV. Bobrov. A. Gonsales-Sabater i dr. // Pod red. akad. N.G. Bruyevicha.- M.: Mashinostroyeniye. 1987.- 264s.
2. Arnold V. I. Dopolnitelnyye glavy teorii differentsialnykh uravneniy. —M.: Nauka. 1978. —304 s.
3. Belyanin P.N., Leshchenko V.A. Gibkiye proizvodstvennyye sistemy. - M.: Mashinostroyeniye. 1984.- 360s.
4. Gibkiye proizvodstvennyye komplekсы //Pod red. P.N. Belyanina. V.A. Leshchenko. -M.: Mashinostroyeniye. 1984.- 384s.
5. Gibkoye avtomaticheskoye proizvodstvo //V.O. Azbel. V.A. Egorov. A.Yu. Zvonitskiy i dr.; Pod obshch. red. S.A. Mayorova. - L.: Mashinostroyeniye. 1985.- 454s.
6. Gnuchki virobnychi sistemi: navchalnyi posibnik dlya studentiv napryamku 131- Inzhenerna mekhanika /E. Yakovenko. O.A. Pemyakov. O.M. Shelkoviy – Kharkiv: Disa plus. 2019. – 246 s.
7. Dovbnya N.M., Kondratyev A.N., Yurevich E.I. Robotizirovannyye tekhnologicheskiye komplekсы v GPS. – L.: Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye. 1990. – 303s.
8. Zhdanov B.I. Kontseptsiya ta inzhenerna metodologiya proyektuvannya virtualnogo tekhnoprotsesu mekhanooobrobki v mashinobuduvanni : Avto-ref. dis.. kand. tekhn. nauk (05.02.08 ; 05.13.05) / Natsionalnyi tekhnichnyi un-t Ukraini "Kiivskiy politekhnichnyi in-t". — K., 1997. — 25s.
9. Imitatsionnoye modelirovaniye proizvodstvennykh sistem //Pod obshch. red. A.A. Vavilova. - M.; Berlin: Mashinostroyeniye: Tekhnika. 1983. - 416s.
10. Kotov V.E. Seti Petri. - M.: Nauka. 1984. - 158s.
11. Lishchinskiy L.Yu. Strukturnyy i parametricheskyy sintez gibkikh proizvodstvennykh sistem. – M. Mashinostroyeniye. 1990. – 312s.
12. Lobanov L.A. Issledovaniye vliyaniya raznmemoj struktury variantov bazirovaniya detaley na kolichestvo tekhnologicheskikh perekhodov. - Moskovskiy tekstilnyy institut. - M. 1986.- 10s.
13. Mitrofanov S.P., Gulnov Yu.A., Kulikov D.D. Primeneniye EVM v tekhnologicheskoy podgotovke seriyngo proizvodstva. - M.: Mashino-stroyeniye. 1981.- 287s.
14. Morev Dimitr. Matematichni modeli za opisaniye na struktura ta tekhnologichnete protsesi pri avtomatiziranoto im proyektirane //Mashinostroyene.- 1985.- 34, № 11.- S.497-499.
15. Organizatsionno-tekhnologicheskoye proyektirovaniye GPS /V.O. Azbel. A.Yu. Zvonitskiy, V.N. Kaminskiy i dr.; Pod obshch. red. S.P. Mitrofa-nova. L.: Mashinostroyeniye. Leningr. Otd-niye. 1986.-294s.
16. Petrov Yu.P. Variatsionnyye metody teorii optimalnogo upravleniya. - 2-e izd. pererab. i dop. - L.: Energiya. 1977. - 280s.

17. Poluektov M.V., Kumikov S.V. Postroyeniye sistem avtomatizirovannogo proyektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov (APT) dlya GAP //Materialy mezhotraslevoy konferentsii "Progress 84". -M.: VIMI. 1985. - 186s.
18. Poteyko A.D., Timofeyev Yu.V., Mazur L.E. Effektivnost protsessov mekhanicheskoy obrabotki v massovom proizvodstve. -K.: Tekhnika. 1980.- 157s.
19. Robototekhnika i gibkiye avtomatizirovannyye proizvodstva. V 9-i kn. Kn. 6. Tekhnicheskaya imitatsiya intelekta: Ucheb. Posobiye dlya vtu-zov/V.M. Nazaretov, D.P. Kim; Pod obshch. red. I.M. Makarova. - M.: Vyssh. shk. 1986.-144s.
20. Robochi protsesi visokikh tekhnologiy v mashinobuduvanni: Navch. Posib-nik / Za redaktsiyu A.I. Grabchenka. - Kharkiv, KhDPU. 1999r. - 436s.
21. Sistemnoye proyektirovaniye integrirovannykh proizvodstvennykh kom-pleksov /Pod obshch. red. V.M. Ponomareva. - L.: Mashinostroyeniye. Leningr. Otd-niye. 1986. - 319 s.
22. Sleptsov A.L., Yurasov A.A. Avtomatizatsiya proyektirovaniya upravlyayushchikh sistem gibkikh avtomatizirovannykh proizvodstv //Pod red. B.N. Malinovskogo. - K.: Tekhnika. 1986. - 110s.
23. Tekhnologicheskaya podgotovka gibkikh proizvodstvennykh sistem /S.P. Mitrofanov, D.D. Kulikov, O.N. Milyayev, B.S. Padun; Pod obshch. Red. S.P. Mitrofanova. -L.: Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye. 1987. - 352s.
24. Tilpalov V.N., Verneyev A.N. Algoritm kachestvennoy otsenki sinteziruyemykh variantov marshrutnykh tekhnologicheskikh protsessov po kri-teriyu proizvoditelnosti. - Dep. rukopis v VNIITEMR 17.03.86.- № 126-MSh86.- Mogilevskiy mashinostroitelnyy institut. - Mogilev. 1986.- 5s.
25. Tsvetkov V.D. Sistema avtomatizatsii proyektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov. - M.: Mashinostroyeniye. 1972.- 240s.
26. Tsvetkov V.D. Formalizatsiya postroyeniya marshrutov obrabotki korpusnykh detaley dlya GAP //Avtomatizatsiya tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva. - Sverdlovsk. 1986.- S.122-134.
27. Shelkoviy O.M., Gasanov M.L., Zakovorotniy O.Yu., Glavcheva Yu.M., Letyuk V.I., Fedenyuk D.V. Model formuvannya dopomizhnikh mashinoruchnykh tekhnologichnikh operatsiy // Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu «KhPI». Seriya: Tekhnologii v mashinobuduvanni = Bul-letin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk.pr. / Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-b». – Kharkiv : NTU «KhPI». 2022. – № 2 (6) 2022. – S. 31–42. – ISSN 2079-004Kh. DOI: 10.20998/2079-004X.2022.2(6).05
28. Shelkoviy O.M., Skorkin A.O. Kompyuterna programa "GPM-3D" //Svidostvo pro registratsiyu avtorskogo prava na tvir №47545 vid 31.01.2013.
29. Shelkoviy O.M., Fedenyuk D.V. Postanovka zadachi pidvishchennya efektyvnosti sistem mekhanoskladal'nogo virobnytstva na osnovi trivnimogo modelyuvannya //Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu "Kharkivskiy politekhnichnyy institut": Zbirka naukovikh prats. Tema-tichnyy vipusk Tekhnologii v mashinobuduvanni. - Kharkiv: NTU "KhPI". - 2010. - №24. - S.95-111.
30. Shelkovoy A., Klochko A., Naboka E. Imitatsionnoye modelirovaniye v zadachakh mekhanosborochnogo proizvodstva /Avtory: Shelkovoy A., Klochko A., Naboka E. ? Saarbr?cken, Ger-many: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2015. - 528s.
31. Yakovlev E.I. Mashinaya imitatsiya. - M.: Nauka. 1975. - 158s.
32. Yampolskiy L.S., Polishchuk M.N. Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh K.: Tekhnika. 1988. - 175s.
33. Yang S. Sistemnoye upravleniye organizatsiyey. - M.: Sov. Radio. 1972. - 456s.
34. Adamszyk, P., Ernst, G.: Macro-Anwendung in EXAPT. Nutzung der Gruppentechnologie zur rationalen NC - Teileprogrammierung. tz für Metallbearbeitung 76 (1982) 8/12, S. 32-40.
35. Dobrotvorskiy, S., Basova, Y., Yepifanov, V., Letiuk, V., Dobrovol'ska, L., Shelkoviy, O. (2023). Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Ciobață, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 534, pp 57–69. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15944-2_6
36. Sergey Dobrotvorskiy, Yevheniia Basova, Vitalii Yepifanov, Valerii Letiuk, Ludmila Dobrovol'ska and Oleksandr Shelkoviy. Natural Vibrations of a Turbine Blade During Milling. In: Ciobață D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2022. ICoRSE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham.

Поступила (received) 15.02.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шелковий Олександр Миколайович (Shelkoviy Oleksandr Mykolaiovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка; м. Харків, Україна; тел.: +380 50 945 28 93, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7414-4854>; e-mail: alnikshelk@gmail.com.

Феденюк Дмитро Віталійович (Dmytro Fedenyuk) – : зам. начальника цеху, Науково виробниче об'єднання "Павлоградський хімічний завод", Дніпропетровська обл. м. Павлоград, тел.: _066-720-39-28, e-mail: fedenyuk@gmail.com,

Летюк Валерій Іванович (Letiuk Valerii) – аспірант кафедри «Інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф. Семка» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», заступник начальника цеху в АТ "Українські енергетичні машини", м. Харків, тел. 0999512396, e-mail: spirit.nrg.13@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9600-2371

Мироненко Сергій Олександрович (Myronenko Serhii) – аспірант кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел. +380 95 135 55 40, e mail: serg1prime@gmail.com, ORCID: 0009-0005-8076-459X

Ищенко Михайло Григорович (Ishchenko Mykhailo) – кандидат технічних наук, АТ Укренергомашини, Начальник технологічного відділу - Головний технолог; м. Харків, Україна; тел.: +380999441270, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2251-5104>; e mail: ischenko-mg@ukrenergymachines.com.

НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСЬКИЙ В. І.

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПРИ ЛЕЗОВІЙ ОБРОБЦІ

У роботі запропоновано дві розрахункові схеми для визначення температури різання при механічній обробці. Перша розрахункова схема заснована на урахуванні безперервного рівномірного в часі зняття оброблюваного матеріалу, що досягається в умовах шліфування, коли зв'язка шліфувального круга безупинно контактує з оброблюваним матеріалом. Друга розрахункова схема заснована на тому, що процес стружкоутворення при різанні в умовах лезової обробки здійснюється шляхом періодичних зсувів елементарних об'ємів матеріалу вздовж умовної площини зсуву, яка розташована під певним кутом до напрямку руху оброблюваної деталі. Розрахунками встановлено, що при їх значному збільшенні температура різання може збільшуватися до 10 разів. Це має місце при шліфуванні в умовах безперервного контакту зв'язки шліфувального круга із оброблюваним матеріалом. При лезовій обробці кількість виникаючих в зоні різання зсувних елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу незначна, що дозволяє знизити температуру різання і підвищити якість та продуктивність обробки, привести у відповідність розрахункові та експериментальні значення температури різання. Це дозволяє з нових теоретичних позицій обґрунтувати ефективність переходу на фінішних операціях від процесу шліфування до сучасних методів лезової обробки.

Ключові слова: баланс тепла, точіння, температурний критерій, джерело тепла, інтенсивність тертя, якість та продуктивність обробки, умовне напруження різання

НОВИКОВ Ф. В., ПОЛЯНСКИЙ В. И.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

В работе предложены две расчетные схемы для определения температуры резания при механической обработке. Первая расчетная схема основана на учете непрерывного равномерного по времени съема обрабатываемого материала, достигаемого в условиях шлифования, когда связка шлифовального круга непрерывно контактирует с обрабатываемым материалом. Вторая расчетная схема основана на том, что процесс стружкообразования при резании в условиях лезвийной обработки осуществляется путем периодических сдвигов элементарных объемов материала вдоль условной плоскости сдвига, расположенной под определенным углом к направлению движения обрабатываемой детали. Расчетами установлено, что при их значительном увеличении температура резания может увеличиваться до 10 раз. Это имеет место при шлифовании в условиях непрерывного контакта связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом. При лезвийной обработке количество возникающих в зоне резания сдвиговых элементарных объемов обрабатываемого материала незначительно, что позволяет уменьшить температуру резания и повысить качество и производительность обработки, привести в соответствие расчетные и экспериментальные значения температуры резания. Это позволяет с новых теоретических позиций обосновать эффективность перехода на финишных операциях от процесса шлифования к современным методам лезвийной обработки.

Ключевые слова: баланс тепла, точение, температурный критерий, источник тепла, интенсивность трения, качество и производительность обработки, условное напряжение резания

NOVIKOV F. V., POLYANSKY V. I.

THEORETICAL DETERMINATION OF CUTTING TEMPERATURE DURING BLADE PROCESSING

The paper proposes two calculation schemes for determining the cutting temperature during mechanical processing. The first calculation scheme is based on taking into account the continuous uniform removal of the processed material over time, which is achieved in grinding conditions, when the connection of the grinding wheel is in continuous contact with the processed material. The second calculation scheme is based on the fact that the process of chip formation during cutting under the conditions of blade processing is carried out by periodic shifts of elementary volumes of the material along the conventional shear plane, which is located at a certain angle to the direction of movement of the processed part. Calculations have established that with their significant increase, the cutting temperature can increase up to 10 times. This occurs when grinding in conditions of continuous contact between the bond of the grinding wheel and the processed material. During blade processing, the number of shear elementary volumes of the processed material arising in the cutting zone is insignificant, which allows you to reduce the cutting temperature and increase the quality and productivity of processing, bring the calculated and experimental values of the cutting temperature into line. This makes it possible to justify the effectiveness of the transition from the grinding process to modern methods of blade processing in the finishing operations from new theoretical positions.

Key words: heat balance, turning, temperature criterion, heat source, friction intensity, processing quality and productivity, conventional cutting stress

Вступ. Застосування сучасних збірних ріжучих лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва відкрило широкі перспективи підвищення продуктивності та якості обробки деталей, виготовлених з матеріалів з підвищеними фізико-механічними властивостями. Тому в даний час підприємства України оснащуються сучасним технологічним обладнанням зі значними можливостями підвищення якості, точності й продуктивності механічної обробки. Однак, широке застосування сучасних збірних ріжучих твердосплавних лезових інструментів зі зносостійкими покриттями з метою їх ефективного практичного використання вимагає глибоких знань закономірностей, що відбуваються в процесі різання. В іншому випадку терміни окупності витрат на їх придбання можуть виявитися значними із-за високої собівартості обробки. Прикладом тому є досвід застосування на підприємствах України сучасних (проте достатньо коштовних) металорізальних інструментів закордонного виробництва. Як встановлено, внаслідок необґрунтованих умов їх використання собівартість обробки може в декілька разів перевищувати собівартість обробки вітчизняними інструментами, незважаючи на можливість збільшення продуктивності обробки. Тому для їх ефективного використання необхідно знати нові підходи до призначення оптимальних режимів різання, що дозволяють знизити теплову й силову напруженість процесу різання. Значною мірою це відноситься до зниження температури різання, яка визначає стійкість лезового інструменту, продуктивність і якість обробки. Тому у роботі вирішується актуальне науково-практичне завдання теоретичного визначення температури різання при лезовій обробці

та обґрунтування умов її зменшення.

Аналіз основних досягнень та літератури. В даний час у науково-технічній літературі опубліковано велику кількість теоретичних робіт, присвячених визначенню температури різання при механічній обробці матеріалів. У цих роботах [6, 8, 10, 13] наведено класичні рішення теплофізичних задач механічної обробки матеріалів, отримано аналітичні залежності для встановлення температури різання. Також визначено умови зменшення температури різання та обґрунтовано оптимальні параметри обробки за температурним критерієм на основі вирішення класичного диференціального рівняння теплопровідності матеріалів. Особливо це відноситься до процесів шліфування [9, 11, 12, 14], які застосовують на фінішних операціях механічної обробки, та на яких, як правило, утворюються температурні дефекти (припикання, мікротріщини тощо) на оброблюваних поверхнях деталей машин. При лезовій обробці, як показує практика, силова і теплова напруженості процесу різання нижчі, ніж при шліфуванні [13]. Тому дослідженню теплових процесів при лезовій обробці приділяється менше уваги порівняно із процесами шліфування. Виходячи із цього, важливо на основі єдиних теоретичних позицій визначити температуру різання при механічній обробці та порівняти її в умовах шліфування та лезової обробки. Це дозволить науково-обґрунтовано встановити основні напрями ефективного застосування процесів лезової обробки за температурним критерієм.

Мета дослідження, постановка проблеми. Метою дослідження є розроблення теоретичного підходу до визначення температури різання при лезовій обробці та на цій основі встановлення шляхів її зменшення й, відповідно, підвищення якості та продуктивності обробки деталей машин.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- аналітично на основі єдиних теоретичних позицій визначити температуру різання при механічній обробці та порівняти її в умовах шліфування та лезової обробки;
- встановити основні принципи відмінності формування температури різання при шліфуванні та лезовій обробці;
- провести експериментальне оцінювання отриманих теоретичних рішень;
- розробити практичні рекомендації щодо зменшення температури різання при лезовій обробці та підвищення якості й продуктивності обробки деталей машин.

Матеріали дослідження. Для визначення закономірностей формування температури різання при лезовій обробці слід скористатися розрахунковою схемою плоского шліфування з урахуванням руху теплового джерела уздовж адіабатичного стержня зі швидкістю V_{piz} (рис. 1) [5]. На основі цієї розрахункової схеми аналітично встановлено розподіл тепла, яке виникає при різанні та надходить в поверхневий шар оброблюваної деталі й стружок, що утворюються, та визначено температуру різання при шліфуванні:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{piz}^2 \cdot \tau}{\lambda}}, \quad (1)$$

де $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ – максимальна температура різання, град;

σ – умовне напруження різання, Н/м²;

c – питома теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(кг·К);

ρ – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м³;

λ – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/м·К;

τ – час перерізання адіабатичного стержня, с.

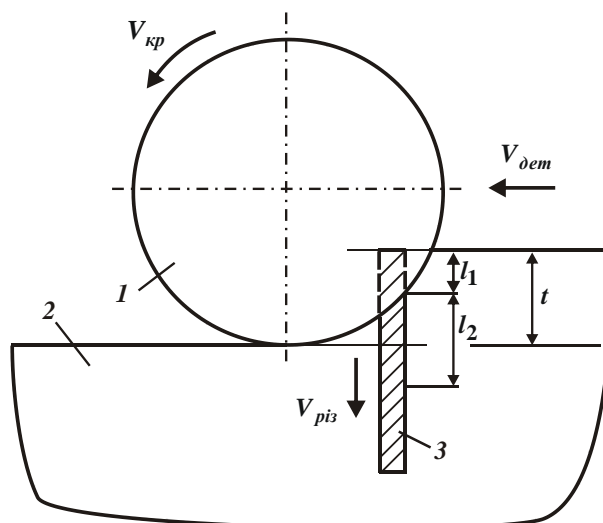


Рис. 1 – Розрахункова схема параметрів теплового процесу при плоскому шліфуванні: 1 – шліфувальний круг; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – адіабатичний стержень (l_1 – довжина зрізаної частини адіабатичного стержня; l_2 – глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі; V_{kp} , V_{dem} – відповідно, швидкості круга і деталі)

Щодо процесу різання лезовим інструментом (процесу точіння) швидкість $V_{різ}$, що входить у залежність (1), необхідно виразити через швидкість різання V (рис. 2,а) [3]:

$$V_{різ} = V \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (2)$$

де β – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу.

Тоді з урахуванням виразів $\tau = a_{зріз} / V_{різ}$ і $\sigma = \sigma_{см} / \operatorname{tg} \beta$ [3] залежність (1) набуде вигляду:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot Q_{num} \cdot \operatorname{tg} \beta}, \quad (3)$$

де $a_{зріз}$ – товщина зрізу, м;

$Q_{num} = V \cdot a_{зріз}$ – питома продуктивність обробки, м²/с;

$\sigma_{см}$ – межа міцності на стиск оброблюваного матеріалу, Н/м².

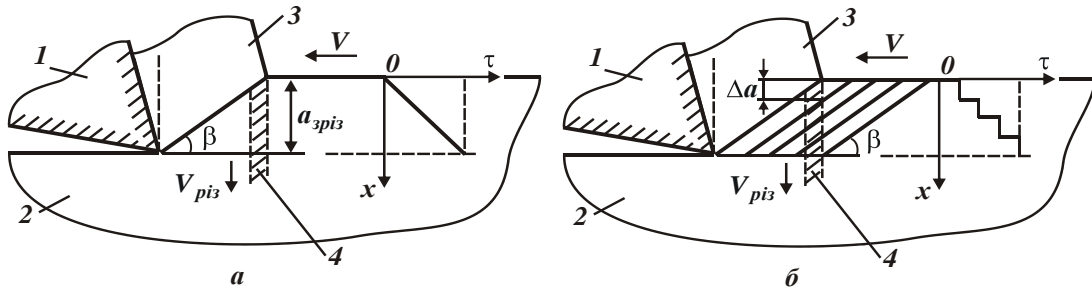


Рис. 2 – Розрахункові схеми температури різання при лезовій обробці з урахуванням рівномірного (а) та періодичного (б) переміщення в часі теплового джерела вздовж адіабатичного стержня: 1 – різець; 2 – оброблювальний матеріал; 3 – стружка; 4 – адіабатичний стержень

Залежність (3) справедлива за умови рівномірного в часі переміщення джерела тепла з постійною швидкістю вздовж адіабатичного стержня. У цьому випадку має місце безперервне рівномірне в часі зняття оброблюваного матеріалу, що досягається в умовах шліфування, коли зв'язка шліфувального круга безупинно контактує з оброблюваним матеріалом. Однак, в умовах лезової обробки процес стружкоутворення при різанні здійснюється шляхом періодичних зсувів елементарних об'ємів матеріалу вздовж умовної площини зсуву, яка розташована під кутом β до напрямку руху оброблюваної деталі (рис. 2,б). Тому переміщення джерела тепла вздовж адіабатичного стержня буде не безперервним, а періодичним (стрибкоподібним) з кроком $\Delta a = a_{зріз} / n$, де n – кількість елементарних об'ємів матеріалу, що утворюються за час переміщення оброблюваної деталі в межах зони різання довжиною $a_{зріз} / \operatorname{tg} \beta$ (кількість перерізів адіабатичного стержня). Тобто, на протязі часу $\tau = \Delta a / V_{різ}$ джерело тепла умовно залишається нерухомим, а потім стрибкоподібно переміщується на відстань Δa вздовж адіабатичного стержня і знову на протязі часу $\tau = \Delta a / V_{різ}$ залишається нерухомим. Цей процес повторюється n разів. Очевидно, закономірності формування температури різання в цьому випадку будуть відрізнятися від випадку з рівномірним в часі переміщенням джерела тепла вздовж адіабатичного стержня (рис. 2,а) у зв'язку із періодичним відокремленням елементарних об'ємів матеріалу від його основної маси. У результаті значно більша частина тепла, що виникає в момент відокремлення елементарного об'єму матеріалу (порівняно із шліфуванням), надходить в стружку, а не в залишену частину адіабатичного стержня (рис. 2,б). Це приводить до зниження температури різання θ при точінні, яка визначається на основі застосування аналітичних залежностей [3]:

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot V_{різ} \cdot l_2; \quad (4)$$

$$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho} \cdot \tau_n}, \quad (5)$$

де τ_n, τ_{n-1} – час нагрівання адіабатичного стержня при його перерізання на величини $n \cdot V_{різ} \cdot d\tau$ та $(n-1) \cdot V_{різ} \cdot d\tau$, с;

n – кількість перерізів адіабатичного стержня;

$d\tau = \tau / n$ – час відокремлення (у результаті перерізання) елементарних об'ємів матеріалу від його основної маси, с;

$\tau = a_{зріз} / V_{різ}$ – час обробки, с;

$a_{зріз} = S \cdot \sin \varphi$ – товщина зрізу, м;

S – подача, мм/об.;

φ – головний кут різця в плані.

Час нагрівання адіабатичного стержня при його перерізання τ_n визначається залежністю [3]:

$$\frac{\tau_n}{d\tau} = \left(\sqrt{1 + \frac{\tau_{n-1}}{d\tau}} - \alpha \right)^2, \quad (6)$$

де $\alpha = \frac{V_{різ} \cdot d\tau}{l_{20}} < 1$ – безрозмірна величина;

$l_{20} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot d\tau$ – глибина проникнення тепла в адіабатичний стержень за час $d\tau$, м.

Для вихідних даних: точіння деталі зі сталі 45 різцем із гексаніту-Р з $\varphi = 45^\circ$; $V = 100$ м/хв.; $S = 0,07$ мм/об.; $t = 0,2$ мм; $a = 8 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\beta \approx 20^0$ (за даними професора Коломійця В. В.) розрахунками встановлено: $\tau = 0,824 \cdot 10^{-4}$ с; $V_{різ} = 0,607$ м/с; $a_{зріз} = 0,05$ мм (табл. 1).

У табл. 1 наведено розраховані на основі залежностей (4) – (6) значення величин τ_n , l_2 і θ/θ_{max} в залежності від кількості перерізів адіабатичного стержня n , приймаючи для сталі 45 коефіцієнт температуропровідності $\lambda/(c \cdot \rho) = 8 \cdot 10^{-6}$ м²/с. На рис. 3 графічно наведено розрахункові значення відношення θ/θ_{max} в залежності від кількості перерізів адіабатичного стержня n .

Таблиця 1 – Розрахункові значення параметрів теплового процесу при точінні

n	$d\tau \cdot 10^{-4}$, с	α	$\tau_n \cdot 10^{-4}$, с	l_2 , мкм	θ/θ_{max}
1	0,824	1,377	–	–	–
2	0,412	0,9737	0,000285	0,675	0,1
3	0,275	0,795	0,0145	4,817	0,3658
4	0,206	0,6885	0,02961	6,883	0,522
5	0,165	0,6158	0,041	8,1	0,6158
6	0,137	0,562	0,05	8,944	0,6729
7	0,118	0,52	0,0562	9,483	0,7191
8	0,103	0,487	0,06206	9,965	0,7558
9	0,0916	0,459	0,06648	10,313	0,7823
10	0,0824	0,435	0,07027	10,6	0,8042
11	0,075	0,415	0,073	10,81	0,8205

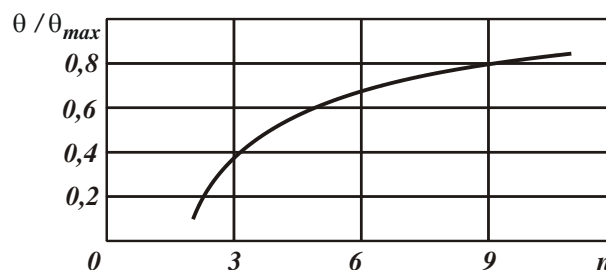


Рис. 3 – Залежність θ/θ_{max} від кількості перерізів адіабатичного стержня n

Із табл. 1 та рис. 3 випливає, що зі збільшенням кількості перерізів адіабатичного стержня n час τ_n збільшується (починаючи із $n = 2$) в широких межах, приймаючи значення, менші часу повного перерізання адіабатичного стержня $\tau = l/V$. Збільшення часу τ_n , відповідно, приводить до збільшення величин l_2 і θ/θ_{max} . Отже, чим більше кількість перерізів адіабатичного стержня n , тим більше відношення θ/θ_{max} й температура різання θ . В ідеалі (за умови $n \rightarrow \infty$) приходимо до рішення (3), отриманого при рівномірному перерізання адіабатичного стержня, що має місце при шліфуванні. У цьому випадку розрахункове значення відношення θ/θ_{max} , яке визначається залежністю (3), приймає найбільше значення, рівне $\theta/\theta_{max} = 0,99$. Власне, цим можна пояснити підвищені значення температури різання при шліфуванні порівняно із процесом точіння, коли руйнування оброблюваного матеріалу відбувається окремими частинами (елементами стружки). Хоча при шліфуванні ще має місце й інтенсивне тертя зв'язки шліфувального круга з оброблюваним матеріалом, що є додатковим осередком збільшення силової напруженості процесу різання, умовного напруження різання σ й, відповідно, температури різання θ , що визначається залежністю (4).

За умови $n = 1$ все тепло, що виділяється при різанні, залишається в зрізаній частині адіабатичного стержня (рис. 2,б) та надходить в стружку, що утворюється. Отже, при різанні лезовим інструментом необхідно прагнути до зменшення кількості перерізів адіабатичного стержня n (кількості зсувів

елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу в межах зони різання). У цьому випадку більше тепла, що виділяється в процесі різання, буде надходити в стружку, що утворюється, знижуючи тим самим температуру різання й підвищуючи якість та продуктивність обробки. Тому на операціях фінішної обробки матеріалів необхідно за можливістю використовувати процеси різання лезовими інструментами замість процесів шліфування з метою забезпечення високих показників якості та продуктивності обробки.

Таким чином, виходячи з табл. 1 та рис. 3, встановлено, що зі зменшенням кількості перерізів n адіабатичного стержня температура різання θ зменшується. За умови $n \rightarrow \infty$ приходимо до розрахункової схеми температури різання з рівномірним переміщенням в часі джерела тепла вздовж адіабатичного стержня (рис. 2,а). Однак це призводить до підвищених значень температури різання θ при лезовій обробці. Тому розрахунок температури різання при лезовій обробці необхідно виконувати за схемою різання з періодичним переміщенням в часі джерела тепла вздовж адіабатичного стержня (рис. 2,б). Це буде відповідати експериментальним даним, наведеним у роботі [4]. Так, при обробці деталі зі сталі 45 ($c \cdot \rho = 5 \cdot 10^6$ Дж/(м³·град.) = 5 Н/(мм²·град.)) експериментально встановлено $\sigma = 7 \cdot 10^3$ Н/мм². Тоді розрахункове значення максимальної температури різання $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho) = 1400$ °С. За умови $\theta / \theta_{max} = 0,522$ (для $n = 4$) отримано $\theta = 730,8$ °С. Експериментальне значення температури різання дорівнює $\theta = 700$ °С при швидкості різання $V = 100$ м/хв (за даними професора Коломійця В. В. [2]). Отже, має місце незначне розходження розрахункового та експериментального значень температури різання (в межах 10 %), рис. 4.

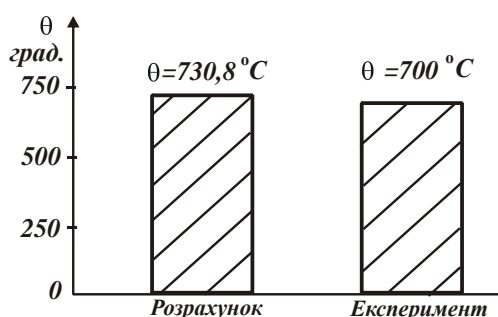


Рис.4 – Розрахункове та експериментальне значення температури різання при точінні деталі зі сталі 45

На рис. 5 наведено фото стружок, які утворюються в процесі точіння деталей зі сталі У10 та сталі Р6М5 за наведених вище умов обробки (отримані професором Коломійцем В. В. [2]). Як видно, мають місце періодичні зсуви елементарних об'ємів матеріалу вздовж умовної площини зсуву, яка розташована під кутом β до напрямку руху оброблюваної деталі (рис. 2,б). Це вказує на достовірність розробленої математичної моделі визначення температури різання при лезовій обробці з урахуванням періодичного переміщення в часі теплового джерела вздовж адіабатичного стержня (рис. 2,б).

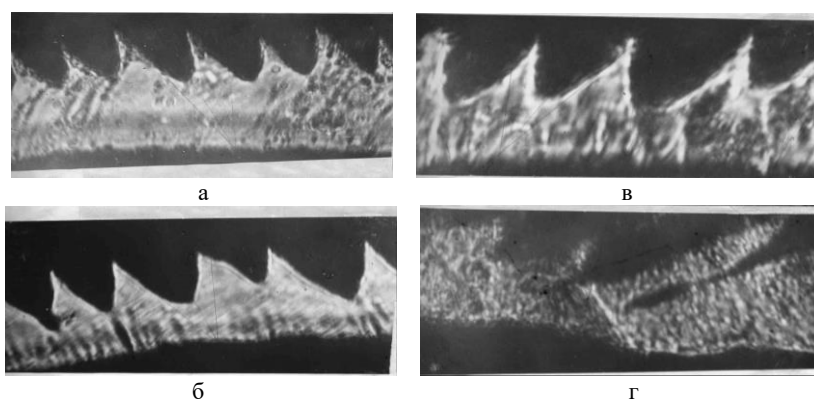


Рис. 5 – Типи стружок [2]: сталь У10 – $V = 70$ м/хв (а); сталь У10 – $V = 100$ м/хв (б); сталь Р6М5 – $V = 90$ м/хв (в); сталь Р6М5 – $V = 180$ м/хв (г)

Таким чином встановлено, що в реальних умовах лезової обробки слід розрахунок температури різання здійснювати із урахуванням дискретного характеру перерізання адіабатичного стержня в процесі різання, оскільки при безперервному характері перерізання адіабатичного стержня температура різання θ приймає підвищені значення, які мають місце в процесі шліфування (рис. 6).

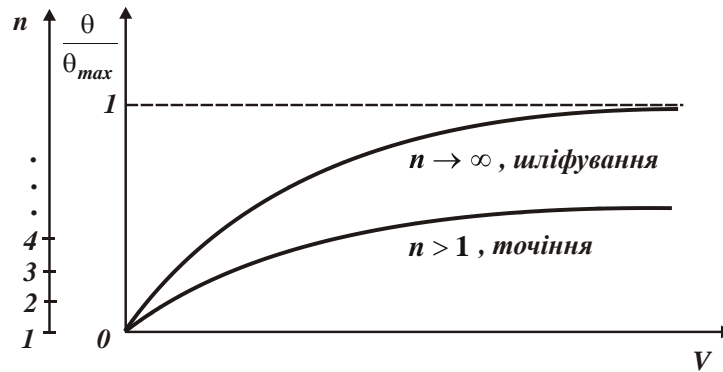


Рис. 6 – Залежність відношення θ/θ_{max} від швидкості різання V при точінні (або швидкості деталі V_{dem} при шліфуванні)

Основною умовою зменшення кількості перерізів адиабатичного стержня n (кількості зсувів елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу в межах зони різання) слід розглядати збільшення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β шляхом застосування більш досконалих різальних лезових інструментів, що характеризуються високою продуктивністю різання та забезпечують зниження інтенсивності тертя в зоні різання. Очевидно, чим більше товщина елементарного об'єму елемента оброблюваного матеріалу, що відділяється внаслідок його зсуву вздовж умовної площини зсуву, тим менше ступінь його деформації й, відповідно, менше умовне напруження різання σ , яке пов'язане з умовним кутом зсуву оброблюваного матеріалу β залежністю: $\sigma = \sigma_{cm} / tg\beta$. Як випливає з цієї залежності, зі зменшенням умовного напруження різання σ збільшується умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β . Це призводить до збільшення товщини елементарного об'єму елемента оброблюваного матеріалу, що відділяється, й зменшення кількості перерізів адиабатичного стержня n . У свою чергу, зменшення умовного напруження різання σ сприяє зменшенню максимальної температури різання $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ й, відповідно, поточного значення температури різання θ для заданих умов обробки. Цим показано більш складний зв'язок параметрів теплового процесу при різанні матеріалів.

Таким чином, аналітична залежність (1) для визначення температури різання справедлива за умови рівномірного в часі переміщення джерела тепла з постійною швидкістю V_{piz} вздовж адиабатичного стержня. У цьому випадку має місце безперервне рівномірне в часі зняття оброблюваного матеріалу, що досягається в умовах шліфування, коли зв'язка шліфувального круга безупинного контакту з оброблюваним матеріалом.

При шліфуванні справедливі аналітичні залежності [3]: $\tau = t / V_{piz}$; $V_{piz} = V_{dem} \cdot \sqrt{0,5 \cdot t / R_{kp}}$, де t – глибина шліфування, м; R_{kp} – радіус шліфувального круга, м. При точінні $\tau = a_{zriz} / V_{piz}$; $V_{piz} = V \cdot tg\beta$, де a_{zriz} – товщина зрізу, м; V – швидкість різання, м/с; β – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу. У результаті показник ступеня числа $e \approx 2,72$ в правій частині залежності (1) дорівнює: при шліфуванні – $(c \cdot \rho / \lambda) \cdot V_{dem} \cdot t \cdot \sqrt{0,5 \cdot t / R_{kp}}$; при точінні – $(c \cdot \rho / \lambda) \cdot a_{zriz} \cdot V \cdot tg\beta$.

Виконані розрахунки температури різання θ при шліфуванні на основі залежності (1) показали на достатньо високу ступінь її збіжності з експериментальними даними (розбіжність в межах 10 %). При точінні деталей зі сталі (як показано вище) має місце розбіжність розрахункових і експериментальних значень температури різання θ до 2 разів і більше, що знижує точність розрахунків. Причиною цього є періодичний (дискретний) характер перерізання різальним інструментом елементарних прямолінійних адиабатичних стержнів (рис. 2,б), який не враховується в розрахунках на основі залежності (1).

Процес шліфування здійснюється з відносно невеликою швидкістю деталі V_{dem} й, відповідно, невеликою швидкістю перерізання елементарного прямолінійного адиабатичного стержня шліфувальним кругом

(рис. 1). Тому формування температури різання θ відбувається фактично в умовах безперервного характеру перерізання шліфувальним кругом елементарних прямолінійних адиабатичних стержнів. Отже, розрахунок температури різання θ при шліфуванні на основі залежності (1) можна здійснювати без урахування періодичного (дискретного) характеру перерізання шліфувальним кругом елементарних прямолінійних адиабатичних стержнів.

При точінні, по-перше, швидкість різання V значно більше швидкості деталі V_{dem} при шліфуванні. По-друге, більше товщина зрізу й товщина елементарного об'єму матеріалу, який відділяється від основної маси матеріалу в результаті його зсувної деформації. У результаті значна частина тепла, яка виділяється при різанні, постійно відноситься стружкою, що утворюється. Це принципово змінює закономірності формування температури різання θ при точінні й, відповідно, призводить до її зменшення. Тому розрахунок температури різання при точінні на основі залежності (1) повинен відрізнятися від аналогічного розрахунку,

що виконується при шліфуванні. Для цього необхідно отримати розрахункові значення температури різання θ зменшувати в залежності від кількості перерізів адіабатичного стержня n , тобто в залежності від кількості елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання (табл. 1).

Виходячи з рис. 6, чим більше величина n , тим більше відношення θ/θ_{max} . Очевидно, при точінні величина n значно менше, ніж при шліфуванні. Отже, при точінні менше відношення θ/θ_{max} й температура різання θ . Це приводить у відповідність розрахункові та експериментальні значення температури різання θ . Із урахуванням цього рішення, отриманого на основі залежності (1), необхідно коригувати, множачи розрахункове значення θ на відношення θ/θ_{max} , що наведено в табл. 1, для заданої величини n .

При шліфуванні величина n приймає достатньо великі значення й, виходячи з табл. 1, відношення $\theta/\theta_{max} \rightarrow 1$. Тому залежність (1) не вимагає корегування. Цим і пояснюється те, що розрахунки температури різання θ при шліфуванні за залежністю (1) приводять до результатів, що відповідають експериментальним даним, а при точінні має місце розбіжність розрахункових та експериментальних значень температури різання θ .

Таким чином, у роботі обґрунтовано відмінні риси формування температури різання при точінні та шліфуванні. Отримані результати дозволяють уточнити розрахунки температури різання θ при точінні. Із наведеного рішення випливає важливий практичний висновок, який полягає в тому, що для зниження температури різання при точінні слід зменшувати величину n до мінімально можливого значення $n = 2$. Тоді, згідно табл. 1, відношення θ/θ_{max} й, відповідно, температуру різання θ можна зменшити до 10 разів. Це досягається, головним чином, за рахунок збільшення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу β шляхом зниження інтенсивності тертя в зоні різання [1] та підвищення ріжучої здатності інструменту.

Отже, урахування величини n є важливим чинником у формуванні температури різання при лезовій обробці. Це дозволяє науково обґрунтовано підійти до встановлення умов її зменшення й оцінювання можливостей ефективного переходу на фінішних операціях від процесу шліфування до сучасних методів лезової обробки із метою зниження температури різання й підвищення якості оброблених поверхонь [7]. Отримані теоретичні рішення також дозволяють із єдиних позицій проводити аналіз і кількісно оцінювати технологічні можливості різних методів механічної обробки з точки зору підвищення продуктивності обробки для заданої температури різання.

Висновки. 1. У роботі запропоновано дві розрахункові схеми для визначення температури різання при механічній обробці. Перша розрахункова схема заснована на урахуванні безперервного рівномірного в часі зняття оброблюваного матеріалу, що досягається в умовах шліфування, коли зв'язка шліфувального круга безупинного контакту з оброблюваним матеріалом. Друга розрахункова схема заснована на тому, що процес стружкоутворення при різанні (в умовах лезової обробки) здійснюється шляхом періодичних зсувів елементарних об'ємів матеріалу вздовж умовної площини зсуву, яка розташована під певним кутом до напрямку руху оброблюваної деталі. У цьому випадку переміщення джерела тепла вздовж адіабатичного стержня відбувається не безперервно, а періодично з певним кроком.

2. Встановлено, що при безперервному рівномірному в часі знятті оброблюваного матеріалу температура різання фактично досягає значень максимальної температури різання при відносно невеликих значеннях продуктивності обробки. Це приводить до розбіжності розрахункових і експериментальних значень температури різання. Так, при шліфуванні розбіжність розрахункових і експериментальних значень температури різання невелика – в межах 10 %, а при точінні вона збільшується до 2 разів і більше, що знижує точність розрахунків. Причиною цьому є періодичний (дискретний) характер перерізання ріжучим інструментом елементарних прямолінійних адіабатичних стержнів, який не ураховується в розрахунковій схемі. Тому для більш точного розрахунку температури різання при точінні слід ураховувати кількість перерізів адіабатичного стержня, тобто кількість елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання. Підведення тепла до елементарного прямолінійного адіабатичного стержня слід розглядати дискретно зі зміною в часі.

3. Розрахунками встановлено, що зі збільшенням кількості виникаючих зсувних елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу температура різання збільшується. При здійсненні точіння з мінімально можливою кількістю елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання, рівною 2, температура різання може бути зменшена до 10 разів щодо максимальної температури різання при шліфуванні. Урахування цієї закономірності дозволило привести у відповідність розрахункові та експериментальні значення температури різання при точінні.

4. Показано, що в реальних умовах різання необхідно прагнути до зменшення кількості виникаючих зсувних елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу з метою зменшення температури різання й підвищення якості та продуктивності обробки. Це досягається в умовах лезової обробки, оскільки при шліфуванні має місце фактично безперервний характер перерізання елементарних адіабатичних стержнів і температура різання приймає найбільші значення. Це пов'язано з тим, що зв'язка шліфувального круга фактично безупинного контакту з оброблюваним матеріалом. Отже, запропоноване в роботі рішення дозволяє з нових теоретичних позицій обґрунтувати ефективність переходу на фінішних операціях від процесу шліфування до сучасних методів лезової обробки з метою зменшення температури різання й

підвищення якості оброблюваних поверхонь.

Список літератури:

12. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 343 с.
13. Коломиец В. В. Точение закаленных сталей резаками из эльбора-Р. Том 3 "Резание материалов лезвийными инструментами", часть 2, глава 1 // *Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения* / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В десяти томах. Одесса: ОНПУ, 2003. С. 157–226.
14. Новиков Ф. В., Жовтобрюх В. А., Шкурупий В. Г. Оптимальные решения в технологии машиностроения : монография. Днепр: ЛИРА, 2018. 424 с.
15. Новиков Ф. В., Полянский В. И., Коломиец В. В. Математическая модель определения температуры резания при лезвийной обработке. *Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте*: материалы 20-го Междунар. научн.-техн. семинара (г. Тбилиси, 23–28 марта 2020 г.). Киев: АТМ України, 2020. С. 123–127.
16. Новиков Ф. В., Полянский В. И. Розроблення теоретичного підходу до визначення температури різання при шліфуванні та умов її зменшення // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Технології в машинобудуванні*. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. № 2 (6) 2022. С. 92–100.
17. Оборский Г. А., Дашченко А. Ф., Усов А. В., Дмитришин Д. В. Моделирование систем : монография. Одесса: Астропринт, 2013. 664 с.
18. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. Л. Хейфец и др.; под общей редакцией С. А. Клименко. Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. 353 с.
19. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
20. Сизый Ю. А., Сталинский Д. В. Динамика и теплофизика шлифования. Харьков: ГП УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. 448 с.
21. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
22. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 166 с.
23. Степанов М. С. Теплообмін при шліфуванні з застосуванням ЗОР. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харків, 2002. Вип. 19. С. 62–67.
24. Теплофизика механической обработки: учебник / О. В. Якимов, А. В. Усов, П. Т. Слободяник та ін. Одесса: Астропринт, 2000. 256 с.
25. Ящерицын П. И., Цокур А. К., Еременко М. Л. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей. Минск: Наука и техника, 1973. 184 с.

Bibliography (transliterated):

1. Bobrov V. F. Osnovy teorii rezaniya metallov. M.: Mashinostroyeniye, 1975. 343 s.
2. Kolomiyets V. V. Tocheniyе zakalennykh staley reztsami iz el'bora-R. Tom 3 "Rezaniye materialov lezviynymi instrumentami", chast' 2, glava 1 / *Fiziko-matematicheskaya teoriya protsessov obrabotki materialov i tekhnologii mashinostroyeniya* / pod obshch. red. F. V. Novikova i A. V. Yakimova. V desyati tomakh. Odessa: ONPU, 2003. S. 157–226.
3. Novikov F. V., Zhovtobryukh V. A., Shkurupiy V. G. Optimal'nyye resheniya v tekhnologii mashinostroyeniya : monografiya. Dnepr: LIRA, 2018. 424 s.
4. Novikov F. V., Polyanskiy V. I., Kolomiyets V. V. Matematicheskaya model' opredeleniya temperatury rezaniya pri lezviynoy obrabotke. *Sovremennyye voprosy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte*: materialy 20-go Mezhdunar. nauchn.-tekhn. seminar (g. Tbilisi, 23–28 marta 2020 g.). Kiyev: ATM Ukrainy, 2020. S. 123–127.
5. Novikov F. V., Polyans'kyy V. I. Rozroblennya teoretichnoho pidkhdohu do vyznachennya temperatury rizannya pry shlifuvanni ta umov yiyi zmeshennya / *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu "KHPI"*. Seriya: *Tekhnolohiyi v mashynobuduvanni*. Kharkiv: NTU "KHPI", 2022. № 2 (6) 2022. S. 92–100.
6. Oborskiy G. A., Dashchenko A. F., Usov A. V., Dmitrishin D. V. Modelirovaniye sistem : monografiya. Odessa: Astroprint, 2013. 664 s.
7. Obrabotka rezaniyem detaley s pokrytiyami / S. A. Klivenko, V. V. Kolomiyets, M. L. Kheyfets i dr.; pod obshchey redaktsiyey S. A. Klivenko. Kiyev: ISM im. V. N. Bakulya NAN Ukrainy, 2011. 353 s.
8. Reznikov A. N. Teplofizika protsessov mekhanicheskoy obrabotki materialov. M.: Mashinostroyeniye, 1981. 279 s.
9. Sizyy YU. A., Stalinskiy D. V. Dinamika i teplofizika shlifovaniya. Khar'kov: GP UkrNTTS "Energestal'", 2016. 448 s.
10. Silin S. S. Metod podobiya pri rezanii materialov. M.: Mashinostroyeniye, 1979. 152 s.
11. Sipaylov V. A. Teplovyye protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverkhnosti. M.: Mashinostroyeniye, 1978. 166 s.
12. Stepanov M. S. Teploobmin pry shlifuvanni z zastosuvannyam ZOR. *Visnyk NTU "KHPI"*. Kharkiv, 2002. Vyp. 19. S. 62–67.
13. Teplofizika mekhanichnoyi obrobky: pidruchnyk / O. V. Yakymov, A. V. Usov, P. T. Slobodyanyk ta in. Odessa: Astroprint, 2000. 256 s.
14. Yashcheritsyn P. I., Tsokur A. K., Yeremenko M. L. Teplovyye yavleniya pri shlifovanii i svoystva obrabotannykh poverkhnostey. Minsk: Nauka i tekhnika, 1973. 184 s.

Поступила (received) 05.01.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федір Васильович (Новиков Федор Васильевич, Novikov Fedir Vasilivych) – доктор технічних наук, професор кафедри "Технології і безпеки життєдіяльності" Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-067-68-90-342; e-mail: novikovfv@i.ua
ORCID: 0000-0001-6996-3356

Полянський Володимир Іванович (Полянский Владимир Иванович, Polyansky Vladimir Ivanovich) – доктор технічних наук, Генеральний директор, ТОВ "Імперія металів", м. Харків; тел.: +38-067-57-80-906; e-mail: tools@imperija.com, ORCID: 0000-0003-2841-9455

СТЕПАНОВ М.С., ПОЛОНСЬКИЙ Л.Г., ЛІТОВЧЕНКО П.І., ІВАНОВА М.С., КОРНІЄНКО В.О.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАБРУДНЕНОСТІ МОР МЕХАНІЧНИМИ ДОМІШКАМИ ПРИ ШЛІФУВАННІ ВАЛКІВ ПРОКАТНИХ СТАНІВ

Виконано аналітичні дослідження та запропоновано технологію і засоби очистки МОР, в яких використовуються різні фізичні принципи. Розроблено структуру і побудовано математичну модель установки з декількома очисниками при їх послідовно-паралельному з'єднанні. На основі математичної моделі створено аналітичні залежності для розрахунку основних параметрів очистки. Результати дослідження дозволяють прогнозувати потрібні значення параметрів якості шліфованих поверхонь і приймати оптимальні рішення щодо призначення раціональних параметрів режимів різання, заміни або правки шліфувального круга, очистки або заміни МОР.

Ключові слова: концентрація механічних домішок, коефіцієнт ступені очистки МОР, критерії очистки, дрібнозернисті фракції, швидкість накоплення, гравітаційний очисник, шламовий резервуар.

STEPANOV M.S., POLONSKIY L. G., LITOVCHENKO P.I., IVANOVA M.S., KORNIENKO V.A.
DETERMINATION OF CONTAMINATION OF COOLANT WITH MECHANICAL IMPURITIES DURING GRINDING OF ROLLS OF ROLLING MILLS

Analytical studies have been carried out and a technology and means of coolant cleaning using various physical principles have been proposed. The structure has been developed and a mathematical model of an installation with several cleaners in series-parallel connection has been developed. Based on the mathematical model, analytical dependencies were created to calculate all the main cleaning characteristics. The results of the study make it possible to predict the required values of the quality parameters of ground surfaces and make optimal decisions on the appointment of rational parameters for cutting modes, replacement or dressing of the grinding wheel, cleaning or replacement of coolant.

Keywords: concentration of mechanical impurities, coolant purification degree coefficient, purification criteria, fine-grained fractions, accumulation rate, gravity cleaner, sludge reservoir.

1. Вступ. Найбільшою мірою експлуатаційні властивості валків прокатних станів залежать від якості поверхонь, які визначаються сукупністю геометричних параметрів (шорсткістю і хвилястістю), фізико-хімічними і фізико-механічними властивостями металу поверхневого шару. Формування названих вище характеристик здійснюється на етапі шліфування із застосуванням МОР, котра у процесі обробки забруднюється механічними домішками – відходами матеріалу валка і абразиву шліфувального круга. Актуальність розглядуваної проблеми підтверджується значним об'ємом відновлювальних робіт – наприклад, протягом одного року експлуатації стану холодної прокатки виходять з ладу з різних причин до 400 робочих і до 15 опорних валків, відновлення яких здійснюється шліфуванням.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Негативний вплив механічних домішок, що містяться у МОР, на геометричні характеристики деталей, що обробляються, широко відомий [1]. Особливо сильно тверді частки, що вміщуються у МОР, впливають на параметр шорсткості R_{max} [2]. Діапазон зміни шорсткості досить значний. Наприклад, шорсткість поверхонь валків 4-х клітинного стану змінюється від $R_a 3,2$ (1-ша кліть) до $R_a 0,32$ (3-я кліть).

Наприклад, для забезпечення шорсткості обробленої поверхні $R_a 0,32$ слід мати на увазі, що концентрація механічних домішок у МОР (з врахуванням їх розмірів) повинна відповідати даним, приведеним на рис. 1 [1]. Дані отримані при швидкості шліфувального круга $V_K = 35$ м/с.

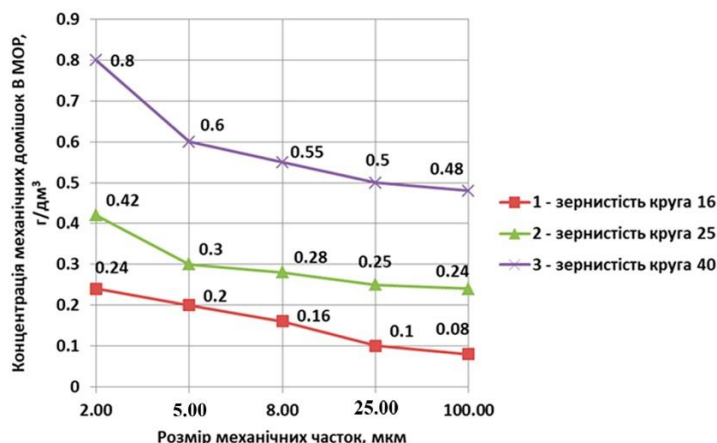


Рис. 1 – Параметри забрудненості МОР для забезпечення шорсткості шліфованої поверхні $R_a 0,2$

Встановлено [3], що механічні домішки, які містяться в МОР, що застосовується при шліфуванні, негативно впливають на якість поверхневого шару деталей і його фізико-механічні властивості. Це можна пояснити тим, що структура поверхневого шару, яка утворюється, є дефектною, має підвищену крихкість і високу концентрацію напружень й нижчу міцність у порівнянні з вихідним матеріалом після загартування.

При неухильному зростанні вимог до якості прокатних валків це наполегливо диктує необхідність ретельної очистки МОР, що застосовується на операції шліфування, для забезпечення необхідних функціональних і експлуатаційних якостей рідини [4].

Проведені дослідження [5] дозволили виявити і вивчити закономірності забруднення і очистки МОР через пористі середовища.

В деяких джерелах [6] стверджується, що можливість технологічного забезпечення якості поверхонь деталей з покриттями може бути реалізовано не тільки шляхом управління геометричними параметрами і фізико-механічними властивостями матеріалу, а й очисткою МОР від механічних домішок.

3. Мета дослідження. Побудова і дослідження математичних моделей систем очистки МОР при шліфуванні валків прокатних станів і прогнозування на цій основі параметрів якості шліфованих поверхонь.

4. Викладення основного матеріалу. Ефективність очистки МОР в певній установці, яку використовують як індивідуальну для вальцешліфувального верстата, за один прохід через установку можна оцінити наступними критеріями.

Коефіцієнт ступеня очистки МОР визначається за залежністю

$$\xi = \frac{C_{ex} - C_{вих}}{C_{ex}}, \quad (1)$$

де C_{ex} і $C_{вих}$ – масові концентрації механічних домішок на вході в установку і на виході з неї.

Сумарний (загальний) коефіцієнт ступеня очистки МОР установки, що складається з n послідовно з'єднаних очисників, визначається за формулою:

$$\xi_{\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_i \xi_i), \quad (2)$$

де ξ_i – коефіцієнт ступеня очистки i -того очисника установки; m_i – відносна кількість (доля) МОР, що проходить через i -й очисник за одиницю часу від загальної кількості рідини, що очищається установкою.

При паралельному з'єднанні n очисників загальний коефіцієнт очистки складає

$$\xi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n m_i \xi_i. \quad (3)$$

Сумарний коефіцієнт ступеня очистки МОР установки, що складається з n послідовно з'єднаних очисників і після них k паралельно ввімкнутих очисників, визначається за формулою:

$$\xi_{\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_i \xi_i) + \prod_{i=1}^n (1 - m_i \xi_i) \sum_{j=1}^k m_j \xi_j. \quad (4)$$

Сумарний коефіцієнт ступеня очистки МОР установки, що складається з n паралельно ввімкнутих на відгалуженні і після них k послідовно ввімкнутих очисників

$$\xi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n m_i \xi_i + 1 - \prod_{j=1}^k (1 - m_j \xi_j). \quad (5)$$

При проектуванні техніки очистки МОР слід враховувати також критерії очистки:

– d_{\min} мінімальну тонкість очистки (мінімальний розмір часток, що видаляються); – d_{50} – тонкість очистки (діаметр часток, 50% яких видаляються із МОР). Механічні домішки, що містяться у МОР є наслідками наступних процесів: – зйому металу з поверхні валка; – зносу шліфувального круга; – руйнування зв'язки і абразиву при відновленні робочої поверхні круга при його правці [7].

Враховуючи, що ці процеси здійснюються на різних етапах операції шліфування, вираз для визначення сумарної концентрації домішок можна записати у вигляді:

$$C_{ex}^{\Sigma} = \begin{cases} C_{ex}^M + C_{ex}^{a1}, & \text{нпу } t = t_{ув} \\ C_{ex}^a, & \text{нпу } t = t_{пр} \end{cases} \quad (6)$$

де C_{ex}^M – концентрація металевих домішок на вході в установку на етапі шліфування; C_{ex}^{a1} – концентрація абразивних домішок на вході в установку на етапі шліфування; C_{ex}^a – концентрація абразивних домішок на вході в установку на етапі правки круга.

Масову концентрацію металевих домішок в МОР можна визначити за формулою

$$C_{ex}^M = \frac{2D_e^2 t_{np} S_{ne}^{np} \rho_a}{Q_{MOP}^{np}}, \quad (7)$$

де D_e – діаметр валка, мм; t_{np} – глибина правки, мм; S_{ne}^{np} – швидкість повздовжнього переміщенняправлячого алмазного олівця, мм/с; ρ_a – густина абразиву, г/мм³; Q_{MOP}^{np} – витрата МОР при правці, мм³/с.

Експерименти по вивченню впливу матеріалу зерна круга на його знос при шліфуванні валків зі сталі 9Х2, 9ХМФ2 підтвердили співвідношення $C_{ex}^M = (30 \dots 50) \cdot C_{ex}^{a1}$ [10]. Звідки можна оцінити параметр C_{ex}^{a1} .

Масову концентрацію абразивних домішок в МОР при правці можна визначити по формулі

$$C_{ex}^a = \frac{2D_k^2 t_{np} S_{ne}^{np} \rho_a}{Q_{MOP}^{np}}, \quad (8)$$

де D_k – діаметр шліфувального круга, мм; t_{np} – глибина правки, мм; S_{ne}^{np} – швидкість повздовжнього переміщення при правці, мм/с; ρ_a – густина абразиву, г/мм³; Q_{MOP}^{np} – витрата МОР при правці, мм³/с.

Очистка МОР при шліфуванні валків прокатних станів має свою специфіку. В результаті великих зйомів (припуск, що знімається за одну перешліфовку досягає до 0,5 мм) концентрація механічних домішок різко зростає. Наприклад, бак з чотирма відсіками, розташований біля верстата для попередньої очистки МОР, що поступає після цього в централізовану систему, може бути заповнений за 1...1,5 робочих зміни на операціях обдирки валків. Об'єм МОР, що використовується в індивідуальній системі, складає 2...4 м³, а витрата – 200...250 м³.

Велику кількість абразивних часток в МОР пов'язано з тим, що правку шліфувального круга виконують до чотирьох разів за робочу зміну, а іноді – в інтервалі 30 хв.

Для очистки МОР використовують установки, що забезпечують різну її якість і які використовують очисники, в основу роботи яких покладені різні принципи (табл. 1).

Таблиця 1 – Варіанти схем індивідуальних установок для очистки МОР вальцешліфувальних верстатів

№№ з/п	Гідравлічна схема	Напрямок руху потоків	№№ з/п	Гідравлічна схема	Напрямок руху потоків
1		$B \rightarrow \text{ФТ} \rightarrow B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow H \rightarrow B$	2		$B \rightarrow \text{ШМ} \rightarrow B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow H \rightarrow B$
3		$B \rightarrow \text{Ц} \rightarrow B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow H \rightarrow B$	4		$B \rightarrow B_1 \rightarrow H_1 \rightarrow \text{ГЦ} \rightarrow B_2 \rightarrow H_2 \rightarrow B$
5		$B \rightarrow \text{ШМ} \rightarrow B_1 \rightarrow B_2 \rightarrow \text{ГЦ} \rightarrow B_3 \rightarrow H_3 \rightarrow B$	6		$B \rightarrow \text{ШМ} \rightarrow B_1 \rightarrow H \rightarrow \text{НПФ} \rightarrow B_3 \rightarrow H_3 \rightarrow B$

Скорочення і позначення, використані в таблиці і далі по тексті: В – верстат; ФТ – фільтр-транспортер; В₁, В₂, В₃, В₄, В₅ – відсіки відстійника; Н, Н₁, Н₂ – насоси; Ц – центрифуга; ГЦ – гідроциклон; НПФ – наливний патронний фільтр; ШМ, ШГ, ШФ – шламові баки магнітного сепаратора, гідроциклону і наливного фільтра, відповідно.

Раніш вже проводилося моделювання чистоти МОР, що використовується в процесі листової прокатки з ціллю забезпечення стабільності очистки МОР [8].

Ефективним засобом стабілізації чистоти МОР в процесі довготривалої експлуатації є застосування фільтрів тонкої очистки, наприклад, наливних патронних фільтрів, які забезпечують високу якість очистки для часток з розмірами 3...5 мкм і сприяють різкому зниженню інтенсивності накоплення часток тонкої

фракції [9].

Як об'єкт моделювання розглянуто систему очистки (рис. 2), яка складається з відстійника (гравітаційний очисник горизонтального типу) з перегородками, що утворюють п'ять гравітаційних очисників B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 зі ступенями очистки $\xi_{01}, \xi_{02}, \xi_{03}, \xi_{04}, \xi_{05}$. МОР з верстата з початковою концентрацією домішок C_{ex} попадає в магнітний сепаратор, який забезпечує ступінь очистки ξ_M , і концентрацією механічних домішок на виході C_1 . Надалі МОР насосом H_1 подається в гідроциклон, в якому МОР очищується зі ступенем очистки ξ_G , розділяючись на два потоки: очищений з концентрацією домішок C_3 і забруднений з концентрацією домішок C_4 .

Забруднений потік попадає в шламовий резервуар зі ступенем очистки ξ_{III} і забезпечує концентрацію домішок на виході C_5 рухається в гравітаційний очисник B_2 і очищується до концентрації домішок C_6 . Очищений потік спрямовується в резервуар гравітаційної очистки B_4 зі ступенем очистки ξ_{04} .

Потік МОР зі шламового резервуара з концентрацією домішок C_5 рухається в гравітаційний очисник B_2 і після очистки до концентрації домішок C_6 попадає в гравітаційний очисник B_3 .

Із очисника B_3 МОР з концентрацією домішок C_7 переміщується в очисник B_4 . В цьому очиснику може бути передбачено розташування других очисників, в тому числі, для видалення дрібнодисперсних фракцій.

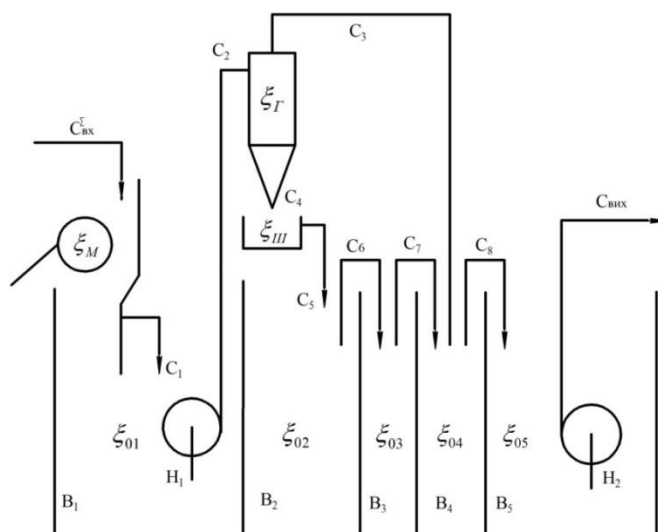


Рис. 2 – Розрахункова схема до визначення механічних домішок в МОР

Із очисника B_4 МОР з концентрацією домішок C_8 переміщується в очисник B_5 , звідки після відстоювання насосом H_2 подається в зону шліфування верстата з концентрацією домішок $C_{вих}$.

В схемі, що розглядається, МОР проходить декілька етапів очистки.

1-й етап – очищення у магнітному сепараторі. Для цього етапу ступінь очистки і концентрація механічних домішок на виході визначається за формулами:

$$\xi_M = \frac{C_{ex}^\Sigma - C_1}{C_{ex}^\Sigma}; \quad C_1 = C_{ex}^\Sigma (1 - \xi_M). \quad (9)$$

2-й етап – гравітаційне осадження у відсіку B_1 . Параметри очистки на цьому етапі:

$$\xi_{01} = \frac{C_1 - C_2}{C_1}; \quad C_2 = C_1 (1 - \xi_{01}) = (1 - \xi_M) C_{ex}^\Sigma = C_{ex}^\Sigma (1 - \xi_{01}) (1 - \xi_M). \quad (10)$$

3-й етап – відцентрова очистка в гідроциклоні. Параметри очистки на цьому етапі:

$$\xi_G = \frac{C_2 - C_3}{C_2}; \quad C_3 = C_2 (1 - \xi_G) = C_{ex}^\Sigma (1 - \xi_{01}) (1 - \xi_M) (1 - \xi_G). \quad (11)$$

4-й етап – згущення механічних домішок у гідроциклоні. Параметри очистки на цьому етапі:

$$C_4 = \xi_{\Gamma} C_2 = C_{\Sigma}^{\Sigma} (1 - \xi_{01}) (1 - \xi_M) (1 - \xi_{\Gamma}) \xi_M. \quad (12)$$

5-й етап – гравітаційне осадження продуктів очистки гідроциклоном у шламовому резервуарі. Параметри очистки на цьому етапі:

$$\xi_{II} = \frac{C_4 - C_5}{C_4}; \quad C_5 = C_4 (1 - \xi_{\Gamma}) = C_{\Sigma}^{\Sigma} (1 - \xi_{III}) = C_{\Sigma}^{\Sigma} (1 - \xi_{01}) (1 - \xi_M) (1 - \xi_{III}) \xi_{\Gamma}. \quad (13)$$

6-й етап – гравітаційне осадження у відсіку B_2 . Параметри очистки:

$$\xi_{02} = \frac{C_5 - C_6}{C_5}; \quad C_6 = C_5 (1 - \xi_{02}) = C_{\Sigma}^{\Sigma} (1 - \xi_{01}) = C_{\Sigma}^{\Sigma} (1 - \xi_{01}) (1 - \xi_M) (1 - \xi_{III}) \xi_{\Gamma} (1 - \xi_{02}) \quad (14)$$

7-й етап – гравітаційне осадження у відсіку B_3 . Параметри очистки:

$$\xi_{03} = \frac{C_6 - C_7}{C_6}; \quad C_7 = C_6 (1 - \xi_{03}) = C_{\Sigma}^{\Sigma} (1 - \xi_{01}) = C_{\Sigma}^{\Sigma} (1 - \xi_{01}) (1 - \xi_M) (1 - \xi_{III}) \xi_{\Gamma} (1 - \xi_{02}) (1 - \xi_{03}). \quad (15)$$

8-й етап – гравітаційне осадження у відсіку B_4 (два вхідних потоки забрудненої МОР). Параметри очистки:

$$\xi_{04} = \frac{0,5(C_7 + C_3) - C_8}{0,5(C_7 + C_3)};$$

$$C_8 = 0,5(C_7 + C_3)(1 - \xi_{04}) = 0,5C_{\Sigma}^{\Sigma} (1 - \xi_{01}) (1 - \xi_M) (1 - \xi_{04}) [\xi_{\Gamma} (1 - \xi_{III}) (1 - \xi_{02}) (1 - \xi_{03}) + (1 - \xi_{\Gamma})]. \quad (16)$$

9-й етап – гравітаційне осадження у відсіку B_5 . Параметри очистки:

$$\xi_{05} = \frac{C_8 - C_{вих}}{C_8};$$

$$C_{вих} = C_8 (1 - \xi_{05}) = 0,5C_{\Sigma}^{\Sigma} (1 - \xi_{01}) (1 - \xi_{04}) (1 - \xi_{05}) (1 - \xi_M) [\xi_{\Gamma} (1 - \xi_{III}) (1 - \xi_{02}) (1 - \xi_{03}) + (1 - \xi_{\Gamma})]. \quad (17)$$

Загальний коефіцієнт ступеня очистки всієї установки визначається за формулою:

$$\xi_{\Sigma} = 1 - \frac{C_{вих}}{C_{\Sigma}^{\Sigma}} = \left\{ 1 - \frac{0,5}{C_{\Sigma}^{\Sigma}} (1 - \xi_{01}) (1 - \xi_{04}) (1 - \xi_{05}) (1 - \xi_M) [\xi_{\Gamma} (1 - \xi_{III}) (1 - \xi_{02}) (1 - \xi_{03}) + (1 - \xi_{\Gamma})] \right\}. \quad (18)$$

На рис. 3 наведено результати виконаних перевірочних розрахунків, що показують порівняльні значення концентрації домішок у МОР після її очистки різними очисними пристроями.

Наведена діаграма ілюструє структуру і послідовність зміни концентрації механічних домішок в процесі послідовної очистки МОР при її проходженні через очисну установку.

При визначенні параметрів очистки з використанням математичної моделі процесу і сукупності наданих залежностей рекомендується використовувати дані, що наведено в табл. 2.

Аналіз діаграми дає можливість визначити долю дрібнозернистих часток, швидкість накоплення яких в МОР найбільш велика. Можна визначити також, на якому етапі необхідно встановлювати очисники дрібнодисперсних фракцій (намивний фільтр, центрифугу, вакуумний флотатор) для ефективного використання пристроїв.

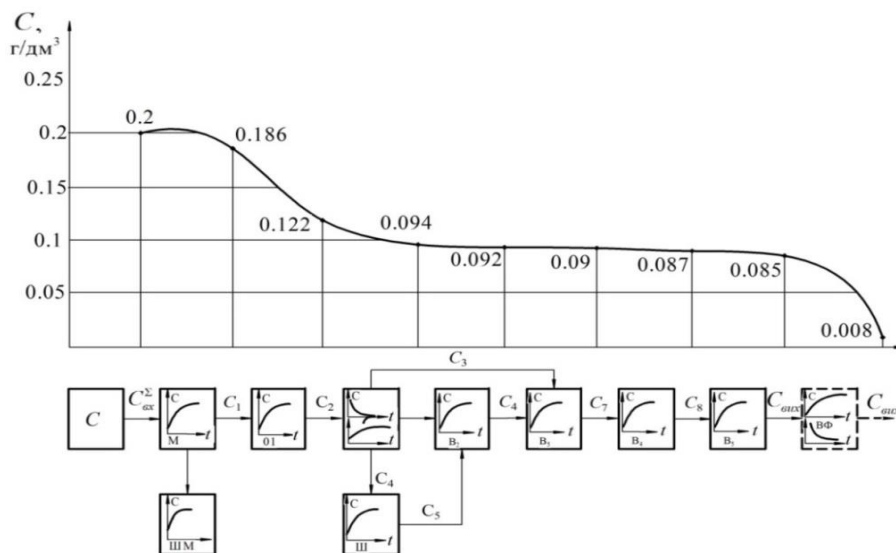


Рис. 3 – Діаграма зміни масової концентрації в МОР часток 5 мкм і менше в очисній установці

В даному випадку, очисник дрібнодисперсних фракцій тонкої очистки розташовано на останньому етапі очистки.

Таблиця 2 – Основні технічні характеристики пристроїв для очистки МОР у вальцешліфувальних верстатах

№ з/п	Вид очисника	Продуктивність, $\text{дм}^3/\text{хв}$	Ступінь очистки, %	Тонкість очистки, d_{50} , мкм	Концентрація домішок на вході, $\text{г}/\text{м}^3$
1.	Відстійник	5-300	70-90	20-75	будь-яка
2.	Магнітний сепаратор барабанний	5-300	70-90	20-75	будь-яка
3.	Фільтр-транспортёр	20-200*	75-98*	25	0,5
4.	Гідроциклон	20-100	80-92	5-15	0,5-5
5.	Центрифуга	до 150	98	3	<1
6.	Фільтр наливний	150 і більше	97-99	2-5	0,5
7.	Флотатор вакуумний	Залежить від площі	65-95**	2-5	0,2-0,3

* – залежить від фільтруючого полотна; ** – з використанням поверхнево активних речовин

Для більш детального аналізу ефективності очистки в установці слід визначити коефіцієнт ступеня очистки, що отримується в результаті вагового аналізу. Крім того, необхідно мати дані по коефіцієнту ступеня очистки для окремих діапазонів механічних часток (1...5 мкм; 5...10 мкм; 10...15 мкм; 15...25 мкм 25...50 мкм і так далі). Це дозволяє визначити динаміку накоплення домішок в процесі експлуатації МОР. Особливо важливим при цьому є діапазон дрібнозернистих домішок розмірами 1...5 мкм, оскільки швидкість накоплення їх в МОР особливо висока внаслідок недостатньо ефективної очистки більшості очисників від цих часток.

Висновки.

1. Розроблено структуру і побудовано математичну модель установки з декількома очисниками при їх послідовно-паралельному з'єднанні. На основі математичної моделі надано аналітичні залежності для розрахунку основних параметрів очистки. Розроблена модель є справедливою при одноразовому проходженні через елементи очисної установки.

2. Результати досліджень показують, що збільшення кількості гравітаційних очисників практично не впливає на коефіцієнт ступеня очистки дрібнодисперсних (розміром менше 5 мкм) домішок у МОР. При моделюванні слід враховувати, що коефіцієнт ступеня очистки залежить від концентрації забруднень, котра змінюється в часі.

3. Результати дослідження дозволяють прогнозувати потрібні значення параметрів якості шліфованих поверхонь і приймати оптимальні рішення щодо призначення раціональних параметрів режимів різання, заміни або правки шліфувального круга, очистки або заміни МОР.

4. Приведені результати рекомендуються для використання при проектуванні технологічних процесів виготовлення і відновлення валків прокатних станів, а також на спеціалізованих підприємствах по виробництву і регенерації МОР.

5. Перспективою розвитку даного напрямку дослідження є більш детальний аналіз ефективності

очистки для діапазонів механічних часток 1...5 мкм; 5...10 мкм; 10...15 мкм, що дозволить визначати і прогнозувати динаміку накоплення домішок в процесі експлуатації МОР.

Список літератури:

1. Худобин Л.В., Гульнов В.П. Влияние твердых примесей, содержащихся в СОЖ, на качество шлифованных деталей // Вестник машиностроения. – 1976. – №9. – С. 70-73.
2. Лавриненко В.И. и др. Влияние твердых частиц шлама на шероховатость поверхностей при шлифовании и оценка вероятности возникновения царапин на обработанной поверхности / Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте. Материалы 18-го Международного научно-технического семинара-2018. Брно-Киев // АТМ України. – 2018. – с. 140-146.
3. Худобин Л.В., Степанов М.С. Влияние загрязнения СОЖ на качество поверхностного слоя шлифованных деталей // Вестник машиностроения. – 1990. – №4. – С. 51-54.
4. Л.И. Соколов. Очистка эмульсионных сточных вод в машиностроении / Инфра-Инженерия: Москва-Вологда. – 2017. – 78 с.
5. Молчанов В.Д. Постановка и решение нестационарной граничной задачи фильтрации жидкостей в пористой среде / Машинобудовання. Механіка. – 2018. – С.53-58.
6. В.В. Бурнаш, Ю.С. Рыжов, Л.Г. Полонский. Смазочно-охлаждающие технологические среды при финишной обработке деталей с покрытиями / Міжвуз. збірн. «Наукові нотатки». Луцьк, 2022. – №73. – С. 15-20.
7. Stepanov M., Ivanova L., Litovchenko P., Ivanova M., Basova Y. (2020) Determination of Parameters of Cylindrical Grinding with Additional Intermediate Dressing. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – pp. 330-340.
8. Е.М. Булыжев, Л.В. Худобин. Ресурсосберегающее применение смазочно-охлаждающих жидкостей при металлообработке / Москва: Машиностроение. – 2004. – 352 с.
9. Е.М. Булыжев, Л.А. Штраус, В.В. Богданов. Повышение стабильности работы системы очистки СОЖ / Смазочно-охлаждающие жидкости в процессах абразивной обработки. Сб. науч. тр. // Ульяновск. – 1988. – С. 84-90.
10. Агасарян Г.Г. Абразивная обработка закаленных сталей тип 9Х (на примере обработки рабочих валков холодной покатки). – Ереван : Анастан. – 1971. – 128 с.

References (transliterated)

1. Khudobin L.V., Gul'nov V.P. Vliyaniye tverdykh primesey, sodержashchikhsya v SOZH, na kachestvo shlifovannykh detaley // Vestnik mashinostroyeniya. – 1976. – №9. – S. 70-73.
2. Lavrinenko V.I. i dr. Vliyaniye tverdykh chastits shlama na sherokhovatos' poverkhnostey pri shlifovanii i otsenka veroyatnosti vozniknoveniya tsarapin na obrabotannoy poverkhnosti / Sovremennyye voprosy proizvodstva i remonta v promyshlennosti i na transporte. Materialy 18-go Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminar-2018. Brno-Kiyev // ATM Ukrainy. – 2018. – s. 140-146.
3. Khudobin L.V., Stepanov M.S. Vliyaniye zagryazneniya SOZH na kachestvo poverkhnostnogo sloya shlifovannykh detaley // Vestnik mashinostroyeniya. – 1990. – №4. – S. 51-54.
4. L.I. Sokolov. Ochistka emul'sionnykh stochnykh vod v mashinostroyenii / Infra-Inzheneriya: Moskva-Vologda. – 2017. – 78 s.
5. Molchanov V.D. Postanovka i resheniye nestatsionarnoy granichnoy zadachi fil'tratsii zhidkostey v poristoy srede / Mashinobuduvannya. Mekhanika. – 2018. – S.53-58.
6. V.V. Burnash, YU.É. Ryzhov, L.G. Polonskiy. Smazochno-okhlazhdayushchiye tekhnologicheskiye sredy pri finishnoy obrabotke detaley s pokrytiyami / Mizhvuz. zbirn. «Naukovі notatki». Luts'k, 2022. – №73. – S. 15-20.
7. Stepanov M., Ivanova L., Litovchenko P., Ivanova M., Basova Y. (2020) Determination of Parameters of Cylindrical Grinding with Additional Intermediate Dressing. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – pp. 330-340.
8. Ye.M. Bulyzhev, L.V. Khudobin. Resursosberegayushcheye primeneniye smazochno-okhlazhdayushchikh gidkostey pri metallobrabotke / Moskva: Mashinostroyeniye. – 2004. – 352 s.
9. Ye.M. Bulyzhev, L.A. Shtraus, V.V. Bogdanov. Povysheniye stabil'nosti raboty sistemy ochistki SOZH / Smazochno-okhlazhdayushchiye zhidkosti v prtsessakh abrazivnoy obrabotki. Sb. nauch. tr. // Ulyanovsk. – 1988. – S. 84-90.
10. Agasaryan G.G. Abrazivnaya obrabotka zakalennikh staley tip 9KH (na primere obrabotki robochikh valkov kholodnoy pokatki). – Yerevan: Anastan. – 1971. – 128 s.

Поступила (received) 20.02.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Полонський Леонід Григорович, (Leonid Polonsky) доктор технічних наук, професор, професор кафедри механічної інженерії Державного університету "Житомирська політехніка", М. Житомир, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4347-9088>; тел.: 979273246; e-mail: polonskiy1952@gmail.com.

Літовченко Петро Іванович (Petro Litovchenko) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4483-597X>, тел. 063-141-65-97, e-mail: pilitovchenko1950@gmail.com.

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

Корнієнко Володимир Олександрович (Volodymyr Korniienko) – студент гр. МІТ-М222в Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4141-2972>; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: korney130893@gmail.com.

ХАВІН В.Л., КИРКАЧ Б.М., КИРКАЧ О.Б., ХАВІНА І.П.

СТАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ШПИНДЕЛЬНОГО ВАЛУ МОБІЛЬНОГО РОЗТОЧУВАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ

Проведено аналіз спеціальних вимог та критеріїв, що висуваються до мобільних верстатів. На базі відомих підходів до статичних розрахунків шпindelних вузлів запропоновані розрахункові схеми та математична модель для статичного аналізу шпindelного валу на нелінійних опорах. У запропонованому підході використовується модель балки Тимошенко. Рішення диференційного рівняння згинутої осі балки здійснюється методом початкових параметрів у матричній формі. Нелінійна система рівнянь формується автоматично для конкретної розрахункової схеми. Для її рішення застосовується метод простих послідовних ітерацій. Особливістю роботи є врахування нелінійної залежності деформації підшипників від діючих на них навантажень. У якості прикладу проведено статичний аналіз шпindelного валу мобільної розточувальної машини ХТ7809-0524, призначеної для розточування отворів великого діаметру. Для декількох варіантів розрахункових схем проведена оцінка згинальної жорсткості, розрахунок прогинів та кутів повороту у робочому режимі. Побудовані графіки розподілу переміщень перерізів шпindelного валу вздовж його осі. З'ясовано що лінійна жорсткість шпindelного валу розточувальної машини ХТ7809-0524 нижче нормативної, прийнятої у верстатобудуванні. Приведено графіки розподілу внутрішніх зусиль у перерізах шпindelного валу, зроблено оцінку його міцності. Встановлено, що рівень максимальних напружень на робочому режимі є прийнятним і достатнім для забезпечення необхідного запасу міцності валу.

Ключові слова: шпindelний вал, нелінійна жорсткість опор, статичний аналіз, мобільна розточувальна машина.

KHAVIN V., KYRKACH B., KYRKACH O., KHAVINA I. STATIC DEFORMATION ANALYSIS OF A MOBILE CUTTING MACHINE

A study of the special requirements and criteria to portable cutting machines was carried out. Based on the existing approaches to the deformation analysis of spindle units the calculation schemes and mathematical model for the static analysis of the problem were developed. The implemented approach makes use of the Timoshenko beam model. The resulting differential equation of the bent beam axis is solved by the method of initial parameters in the matrix form. The nonlinear equation system for the chosen calculation scheme is formed automatically and is solved iteratively. A special feature of the proposed approach is the nonlinear relation between the stiffness of the bearings and the forces acting upon them. As a model application example, the results of the static deformation analysis of portable boring machine ХТ7809-0524 are presented. An estimate of the bending stiffness and the corresponding distributions of bending deflections and rotations were obtained for several calculation schemes of the machine. The obtained solution quantities are presented in form of graphs along the spindle axis. It has been found, that the calculated equivalent stiffness of ХТ7809-0524 machine spindle shaft is lower than the normative value used in the industry. A strength assessment of the spindle shaft was also made and the distributions of internal forces and moments acting on shaft cross sections were obtained. It has been concluded, that under work loads the maximum stress in the shaft is acceptable to provide for the required factor of safety.

Keywords: spindle shaft, nonlinear support stiffness, static deformation analysis, mobile cutting machine.

Вступ. Аналіз статичної жорсткості і динамічних характеристик конструкцій сучасних верстатів є одним з важливих факторів при їх розробці. На даний час існує багато розрахунків у цій царені, виконаних для традиційних машинобудівних верстатів. Але майже немає такої інформації для мобільних портативних верстатів, які виконують ремонтні роботи, або технічне обслуговування великих заготовок «по місцю».

До мобільних верстатів висувається ряд вимог:

- легкого транспортування;
- високої універсальності і надійності;
- щільного приєднання до обробляємих деталей різної конфігурації.

Крім цього, портативний верстат повинен мати необхідний рівень статичної жорсткості і вібростійкості при виконанні операцій механічної обробки для отримання бажаної точності розмірів, профіля і якості поверхні деталі.

Мобільні верстати, внаслідок їх спеціального призначення, повинні мати відносно малу вагу, що відбивається на їх зниженій жорсткості. Внаслідок цього виникають похибки обробки, коли система верстату навантажується зусиллями різання. Такі похибки пов'язані з деформацією елементів верстату, які передають силові потоки, існуванням зазорів у розбірних з'єднаннях, компоновочною схемою верстату. При цьому слід зазначити, що напруження і деформації елементів верстату обумовлені сумісною дією механічного та теплового навантаження.

Мобільні верстати, як правило, мають шпindelний вузол, який не тільки утримує інструмент, а й забезпечує обертальний рух і його робочу подачу. Жорсткість шпindelного вузла має суттєвий вплив на точність і продуктивність верстату. Вона може складати 30 -40% від сумарної жорсткості верстата [1].

Шпindelні вали – сталеві циліндри, які спираються на підшипники. Робочий інструмент кріпиться на передньому кінці валу. Вісь отвору валу шпинделя і вісь обертання повинні співпадати, що забезпечує точність обробки.

Аналіз працездатності шпindelного вузла проводиться по здатності навантаження (міцності), статичної жорсткості та динамічним характеристикам. Статичний аналіз потрібен для оцінки переміщень, напружень та деформацій. Найчастіше визначаються згинальні переміщення системи інструмент – шпindelний вузол в зоні різання. Але для устаткування, призначеного для обробки глибоких отворів (розточування, зенкерування і т.п.), необхідна ще й оцінка крутильної та прокольної жорсткостей системи інструмент – шпindelний вузол в рамках розрахунків напруженого стану конструкції.

Сучасний стан проблеми і невирішені питання. В процесі розточування глибоких отворів розточувальна оправка (вал шпинделя) повинна бути довгою і тонкою, тому вона легко піддається статичним і динамічним відхиленням. Ці обставини приводять до розмірних помилок, знижують якість обробленої поверхні, знижують термін придатності інструмента.

Тому дослідження статичної жорсткості шпиндельного вала є необхідною умовою вибору як конструкції вала і підшипників, так і операційних параметрів процесу різання.

Під дією сил різання вал шпинделя піддається деформаціям згинання, кручення та розтягання – стискання. Згинання викликає переміщення по нормалі та дотичної до обробленої поверхні у точці контакту ріжучого клину та заготовки, кручення та розтягання – стискання - у окружному та осьовому напрямках відповідно.

В рамках статичного аналізу оцінюються вищезгадані переміщення на різних робочих режимах. Крім того визначаються внутрішні зусилля, напруження та деформації у компонентах шпиндельного вузла під дією сил різання і зусиль з боку привода.

Визначальну роль при оцінці жорсткості шпиндельного вузла відіграють переміщення при згинанні. Тому їм приділяється увага у першу чергу.

Першою моделлю статичного аналізу була пружна балка на жорстких опорах під дією сконцентрованої сили. У подальшому в [1,2] розроблений більш точний підхід, у якому запропоновано сумувати прогини валу шпинделя як пружної балки на жорстких опорах і відхилення жорсткого валу на лінійно пружних опорах, що моделюють підшипники. У [4] виявлені основні конструкційні параметри, які визначають жорсткість головного шпинделя верстату. У підрахунку переміщень використовувався вищезазначений підхід сумування переміщень, Роздивлялися питання оптимального вибору підшипників, між опорних відстаней та довжини консолі.

Аналіз розглянутих робот вказує на непридатність двох опорних моделей до статичного аналізу багато опорних шпиндельних вузлів. В межах цієї моделі неможливо врахувати вплив пружних характеристик опор з декількома підшипниками, або з багаторядними підшипниками.

П.М. Чернянським [1] був запропонований підхід до розрахунку згинальних переміщень багато опорних валів шпиндельних вузлів, в основу якого було покладено диференційне рівняння зігнутої осі балки на лінійно пружних опорах. Був розроблений комплекс[4] програм для розрахунку статичних характеристик шпиндельних вузлів методом початкових параметрів з використанням перехідних матриць.

Безпосереднє врахування конструктивних параметрів шпиндельних валів можливе при використанні чисельних методів, таких як метод скінчених елементів (МСЕ) або метод початкових параметрів (МПП), наприклад [5-12].

Але, відповідне програмне забезпечення є досить незручним для статичного аналізу багато опорних шпиндельних валів з нелінійними характеристиками жорсткості підшипників.

Тому, мета даної роботи – розробка розрахункової схеми, математичної моделі і програмного забезпечення для статичного аналізу роботи шпиндельного вала мобільного розточувального верстату, його міцності та жорсткості з урахуванням нелінійної жорсткості опор.

Постановка задачі. Як було зазначено, головною проблемою статичного розрахунку шпиндельного вала є визначення прогинів та кутів повороту у характерних перерізах, виникаючих під дією зусиль різання і навантаження з боку привода.

При розробці математичної моделі і розрахункової схеми були введені наступні гіпотези і припущення

- центрування шпиндельного вала та підшипників однакове;
- пружні властивості вала та його опор ізотропні в площині, ортогональній до осі обертання шпинделя (осесиметрична задача);
- шпиндельний вал вважався пружною балкою Тимошенко з малими прогинами і кутами повороту перерізів;
- радіальна (поперечна) жорсткість опор шпиндельного вала має нелінійну характеристику;
- корпус шпиндельного вузла, ріжучий клин та заготовка мають нескінчену жорсткість;
- навантаження на шпиндельний вал включає сили різання, зусилля з боку привода та реактивні сили від опор – підшипників;
- гравітаційні та відцентрові сили вважаються малими, вплив температурних ефектів не враховується.

Кожен підшипник багато опорного шпиндельного вала у розрахунковій схемі замінюється пружною сконцентрованою опорою з жорсткістю C_n , до якої прикладена реакція R_n , $n = 1, 2, 3, \dots, N$. На рис.1 подані варіанти розрахункових схем для шпиндельного вала портативної розточувальної машини, який спирається на п'ять пружних опор. На шпиндельний вал діють компоненти зусиль різання F_{xr} , F_{yr} , F_{zr} і моменти різання M_{xr} , M_{yr} , M_{zr} , а також зусилля і моменти з боку привода F_{xpr} , F_{ypr} , F_{zpr} , M_{xpr} , M_{ypr} , M_{zpr} (див. рис. 1б,с). Для оцінки жорсткості вала розрахункова схема навантажується одиничною силою (див. рис. 1а).

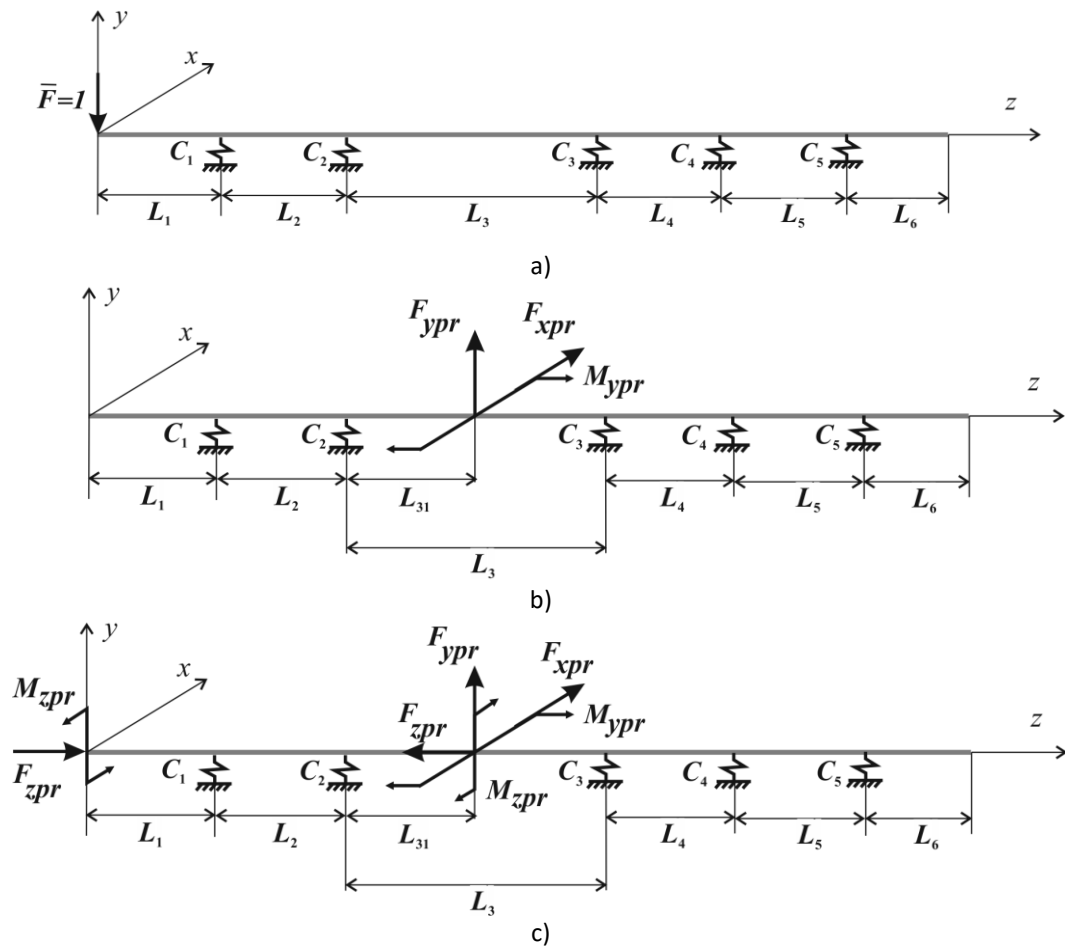


Рис.1 – Розрахункові схеми шпиндельного валу
 а) – розрахунок жорсткості валу під дією одиної сили,
 б) – розрахунок жорсткості валу під дією зусиль з боку приводу,
 с) – розрахунок жорсткості та міцності валу у робочому режимі

Моделі зусиль різання при розточуванні. Для оцінки напружень, деформацій та переміщень важливу роль має питання про точність відображення сил різання, виникаючих зокрема при розточуванні.

Розточування – операція, яка застосовується для збільшення розміру глибоких отворів великого діаметру. Діаметр отвору збільшується за використанням ріжучої вставки або розточувальної головки, яка закріплена на досить довгій розточувальній оправці. Довгі оправки деформуються під дією сил різання, а надмірне її відхилення порушує допуск на розмір отвору. Тому, необхідне використання такої моделі процесу розточування, яка дозволяє прогнозувати оптимальні параметри потужності, крутного моменту, зусиль різання і навантаження з боку приводу.

Процес розточування моделюється з використанням як механістичних моделей, так і косокутної трансформації ортогонального різання [13–16].

Зусилля різання зазвичай обчислюються як функція площі зрізання, яка залежить від радіусу вершини і геометрії ріжучого клину, а також від умов різання. Якщо передня поверхня інструменту гладка і однорідна, то ріжучий край моделюється як сукупність похилих ріжучих країв [14]. Питомі сили різання на кожному елементі ріжучого краю часто моделюються перетворенням ортогонального різання у косокутне [15,16]. Такий підхід потребує інформацію про геометрію інструмента, напруженні пластичного зсуву, куті зсуву і про середній коефіцієнт тертя для ортогонального різання конкретного матеріалу.

Отвори великого діаметру зазвичай обробляються розточувальними головками з декількома ріжучими вставками, розташованими симетрично, щоб сумарна компонента сили різання, ортогональна до оброблюємої поверхні, наближалась до нуля.

Ріжучі вставки можна розподілити на наступні групи:

- з опорним краєм і незначним радіусом заокруглення вістря;
- без опорного краю і значним радіусом заокруглення вістря
- з опорним краєм і значним радіусом заокруглення вістря.

В даній роботі передбачається використання інструменту зі вставками першого типу. Операція розточування здійснюється за рахунок подачі інструменту в напрямку осі вала шпинделя. У цьому випадку ріжучий край пластини перпендикулярний до напрямку подачі, а опорний край (боковий) паралельний до напрямку подачі. При стаціонарному процесі різання в радіальному напрямку відсутнє, а має місце лише тертя між опорним краєм і оброблюємою поверхнею.

В літературі домінує імперичний підхід до визначення зусиль різання, у відповідності з яким результуюча сила різання розкладається на: тангенціальну F_t (у напрямку швидкості різання), радіальну F_r та осьову F_f . Для їх визначення проведено багато чисельних експериментів. При точінні, розточуванні, прорізання пазів та ін. головна тангенціальна складова F_t розраховується за формулою [17]:

$$F_t = 10C_p t^l S^m V^n K_{p,n} \quad (1)$$

де C_p - коефіцієнт, враховуючий умови обробки;

l, m, n - показники ступеню;

t - глибина (ширина) зрізу, мм;

S - подача, мм/об;

V - швидкість різання, м/хв.;

$K_{p,n}$ - узагальнений поправочний коефіцієнт, враховуючий зміну умов обробки по відношенню до табличних значень.

Для визначення сил F_r та F_f існують аналогічні емпіричні ступеневі формули. Але для спрощення розрахунків, величини радіальної F_r та осьової F_f компонент сили різання можна використати співвідношення [17]:

$$F_r = (0,25 - 0,5)F_t, F_f = (0,1 - 0,25)F_t. \quad (2)$$

Відомі випадки застосування приблизної лінійної моделі для сили різання у вигляді її лінійної залежності від товщини та ширини зрізу. Відповідне лінійне рівняння дозволяє розрахувати компоненти сили різання у тангенціальному напрямку F_t , напрямку подачі (осьовому) F_f та радіальному F_r [14]:

$$\begin{aligned} F_t &= K_{tc}ta_0 + K_{te}t, \\ F_r &= K_{rc}ta_0 + K_{re}t, \\ F_f &= K_{fc}ta_0 + K_{fe}t, \end{aligned} \quad (3)$$

де $K_{tc}, K_{te}, K_{rc}, K_{re}, K_{fc}, K_{fe}$ - експериментальні коефіцієнти сили різання, залежні від матеріалу, геометрії ріжучої вставки, швидкості різання. Площа зрізання ta_0 в лінійній моделі розраховується як добуток ширини зрізання (довжини ріжучого краю) t з товщиною зрізу (подачі на оберт інструмента) a_0 .

Незалежно від конкретної моделі для складових F_t, F_f та F_r компоненти сили різання F_{xp}, F_{yp}, F_{zp} , що діють у технологічних напрямках по фіксованим в просторі осям x, y, z (див. рис. 1), можуть бути зв'язані співвідношеннями:

$$\begin{aligned} F_{xp} &= F_t \sin \phi - F_r \cos \phi, \\ F_{yp} &= F_t \cos \phi + F_r \sin \phi, \\ F_{zp} &= F_f. \end{aligned} \quad (4)$$

Тангенціальна та радіальна складові сили різання змінюються відповідно до обертання шпинделя, осьова (у напрямку подачі) є незмінною.

В рівняннях (4) $\phi = \omega\tau$ - кут повороту шпиндельного вала, ω - кутова швидкість обертання, τ - час.

При наявності декількох ріжучих вставок формули (4) набувають погляду:

$$\begin{aligned} F_{xp} &= \sum_{i=1}^M (F_{ti} \sin \phi_i - F_{ri} \cos \phi_i), \\ F_{yp} &= \sum_{i=1}^M (F_{ti} \cos \phi_i + F_{ri} \sin \phi_i), \\ F_{zp} &= \sum_{i=1}^M F_{fi}. \end{aligned} \quad (5)$$

де M - кількість ріжучих вставок, ϕ_i - кутове положення i -ої ріжучої вставки. По відношенню до положення першої вставки, позиція i -ої вставки визначається співвідношенням:

$$\phi_i = \phi + 2(i-1)\frac{\pi}{M}.$$

Значення компонент моментів сил різання M_{xp}, M_{yp}, M_{zp} вираховуються по залежностям:

$$\begin{aligned} M_{xp} &= \frac{D_c}{2} \sum_{i=1}^M F_{zi} \sin \phi_i, \\ M_{yp} &= \frac{D_c}{2} \sum_{i=1}^M F_{ti} \cos \phi_i + F_{ri} \sin \phi_i, \\ M_{zp} &= \frac{D_c}{2} \sum_{i=1}^M F_{ti} \end{aligned} \quad (6)$$

де D_c – діаметр розточувальної головки.

При наявності попарно симетрично встановлених вставок, компоненти $F_{xp}, F_{yp}, M_{xp}, M_{yp}$ дорівнюють нулю, а з боку інструмента на шпindelний вад діють сумарна осьова сила F_{zp} та крутний момент M_{zp} .

Метод рішення задачі статичного аналізу вала на нелінійно пружних опорах. У даній роботі використовується модель балки Тимошенко, в якій поряд з деформаціями згинання враховуються і деформації зсуву. Така модель актуальна для багато опорних валів, де згинальна жорсткість між опорних ділянок спів ставна з жорсткістю цих ділянок на зсув. Рішення диференціального рівняння зігнутої осі для моделі балки Тимошенко здійснюється методом початкових параметрів, у відповідності з підходом, запропонованим в роботах [18,19].

Спільне рішення рівняння зігнутої осі разом з граничними умовами на опорах дозволяє сформувати систему рівнянь з якої визначається прогин та кут повороту перерізу вала на початку координат (початкові параметри y_0 та Θ_0) і реактивні зусилля R_n , $n=1,2,\dots,N$. Система рівнянь представляється у матричній формі:

$$AX = B \quad (7)$$

де A - матриця коефіцієнтів при невідомих розміром $(N+2) \times (N+2)$;

B - вектор - стовбець правих частин розміром $(N+2)$;

$X = [y_0, \Theta_0, R_1, R_2, \dots, R_N]$ - вектор – стовбець невідомих (рішення).

Вирази для матриць A та B приведені у роботі [18].

Зазначимо, що запропонований підхід дозволяє підрахувати сумарні переміщення будь якого перерізу вала внаслідок його згинання з врахуванням поперечної податливості його пружних опор – підшипників [18,19].

Аналіз літератури по розрахункам пружних характеристик підшипників показує, що навіть без врахування технологічних зазорів і посадок на вал, жорсткість підшипників є суттєво нелінійною. Так у роботі [18] отримано вираз для радіальної секучої жорсткості шарикопідшипника з врахуванням зазору:

$$C_n(R_n) = 787(nr)^{0,666}(dR_n)^{0,333} \quad (8)$$

де n - кількість рядів шариків у підшипнику; r - кількість шариків у одному ряді; d - діаметр шарика.

$C_n(R_n)$ [н/мм] - жорсткість n – ої опори, яка нелінійно залежить від величини її реакції R_n , внаслідок чого вирішальна система (7) стає нелінійною.

У разі відсутності зазору в залежності (8) замість постійного множника 787 слід використовувати 751.

Для подолання нелінійності при рішенні системи (7) використовується метод послідовних ітерацій, який реалізований наступним чином:

1. задається початковий набір жорсткостей опор $C_{n0}, n=1,2,3,\dots,N$;
2. вирішується система лінійних рівнянь (7) і визначається початковий набір реактивних зусиль $R_{n1}, n=1,2,3,\dots,N$;
3. по відповідним залежностям для $C_n(R_n)$ вираховується новий набір жорсткостей опор $C_{n1}(R_n), n=1,2,3,\dots,N$;

4. із рішення системи (7) визначається новий набір реактивних зусиль $R_{n2}, n = 1, 2, 3 \dots N$;
5. перевіряється критерій досягнення точності (з величин жорсткостей чи реактивних зусиль) і якщо вона не досягнута, починається процес ітерацій з пункта 3.

Система рівнянь для конкретної розрахункової схеми складається автоматично з врахуванням діючих зовнішніх зусиль. У якості аргументів передаються масиви довжин ділянок вала і жорсткостей опор, модуль пружності, осьовий момент інерції перерізу вала, значення зовнішніх зусиль та точки їх прикладання. У даній роботі задача вирішувалась у пакеті MatLAB на основі програмного забезпечення, розробленого в [18].

Результати розрахунків. Головним критерієм, визначаючим розміри шпindelних валів є величина допустимих переміщень. Тому основними розрахунками шпindelних вузлів є розрахунки на жорсткість. Жорсткість шпинделя визначає його здатність протистояти переміщенням під дією сили різання. Вона визначається як величина, зворотна переміщенню переднього кінця валу шпинделя під дією одиничного зусилля. Кут повороту осі шпindelного валу теж є важливою характеристикою. Прогин переднього перерізу вала шпинделя визначає відхилення розмірів деталі, що обробляється, а кут повороту – похибки форми деталі і перекося кілець підшипників.

У типових розрахунках на жорсткість враховується, як правило, тільки деформація вала шпинделя та його опор. Деформації деталі, що обробляється, ріжучого інструменту, елементів з'єднання інструменту зі шпindelом визначаються додатковими розрахунками. В результаті статичного аналізу визначаються згинальна, осьова, а часто і крутна жорсткість.

Жорсткість визначається по переміщенню переднього перерізу шпindelного валу під навантаженням:

$$C = F/\Delta,$$

де F - зусилля, прикладене в переднього перерізу шпindelного валу;

Δ - величина переміщення в напрямку відповідного зусилля.

Величина, зворотна до жорсткості, називається податливістю.

При розрахунках радіальної жорсткості, радіальна складова сили різання F_r , яка діє на передній кінець валу шпинделя, розкладається по двом головним площинам, що перетинають вісь вала. Підраховуються величини відповідних радіальних (згинальних) переміщень Δ_1 та Δ_2 його кінця в цих площинах, сумарне переміщення

$$\Delta = \sqrt{(\Delta_1^2 + \Delta_2^2)} \quad (9)$$

і наведена радіальна жорсткість

$$C_r = F_r/\Delta, \quad (10)$$

Сучасні підходи, що до визначення переміщень, базуються на необхідності застосування суперпозиції ряду складових переміщення перерізу. Тому, переміщення у будь якій головній площині визначається наступним чином:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4, \quad (11)$$

де Δ_1 - переміщення, викликане згинанням валу шпинделя;

Δ_2 - переміщення, викликане податливістю пружних опор – підшипників;

Δ_3 - переміщення, викликане реактивними (защемляючими) моментами, які виникають у пружних опорно-упорних підшипниках;

Δ_4 - переміщення, викликане податливістю контакту між кільцями підшипника і поверхнею вала.

Переміщення (11) використовується у подальшому для розрахунку відповідної жорсткості (10).

Перераховані вище пружні компоненти переміщень вала в розрахунковому перерізі визначаються при сумісній дії відповідної компоненти сили різання і згинаючих зусиль, діючих на вал з боку привода, у найбільш інтенсивному режимі роботи верстату.

Оцінка жорсткості шпindelного валу проводиться виходячи з вимог до точності обробки. При цьому визначаються абсолютні значення прогину, кута повороту і поздовжнього переміщення переднього перерізу валу шпинделя. Вони порівнюються з допусками на лімітуючі характеристики геометрії деталі. Розраховуються також кути повороту опорних перерізів валу з метою оцінки кутів перекося кілець підшипників, величина яких обмежується міцністю і довговічністю підшипникового вузла.

У роботі проведено статичний аналіз шпindelного валу розточувальної машини ХТ7809-0524,

призначеної для розточування отворів великого діаметру. Мобильна машина входить до складу пристосування ТР79-746 (рис.2). Розточувальна машина спроектована для сумісної обробки осьових отворів діаметром від 128 до 144мм по класу точності Н7 у фланцевих з'єднаннях валів генераторів і турбін.

Базова конструкція пристосування складається з підставки для закріплення на деталі, що обробляється розточувальною машиною, самої машини ХТ7809-0524, пневматичної машини ХТ7809-0524, яка є приводом до розточувальної машини, інструменту.

В залежності від процесу обробки відповідний інструмент (розточувальна головка, зенкер, розгортка) фіксується у передній частині шпиндельного вала розточувальної машини. Робоче обертання здійснюється пневматичною машиною, осьове – у автоматичному режимі з фіксованою швидкістю подачі.

Розточувальна машина ХТ7809-0524 має наступні основні технічні характеристики: швидкість обертання валу шпинделя – 5,3 об/хв, швидкість осьового переміщення шпинделя робоча – 0,48 мм/об, пришвидчена – 8 мм/об, максимальний крутний момент – 2060 нм.

Розточувальна машина ХТ7809-0524 є шпиндельним вузлом, який приводиться до роботи пневматичною машиною ХТ7809-0527 через черв'ячну пару (Рис. 2).

Шпиндельний вузол кріпиться на підставці, а остання – на оброблюємій деталі (Рис. 2).

Конструкція шпиндельного вузла розточувальної машини показана на рис. 3.

Робочий інструмент розміщений на передньому кінці шпиндельного вала. Шпиндельний вал підтримується двома радіальними підшипниками марки 60210 ГОСТ 7242-81 і через черв'ячну шестерню - трьома опорними підшипниками марки 7000114 ДСТУ ГОСТ 8338:2008. Обертання шпиндельного вала забезпечується черв'ячною парою, а осьова подача – поворотом шестерні-гайки з постійною фіксованою кутовою швидкістю.

Для статичного аналізу шпиндельний вал моделюється балкою (моделі Тимошенко), яка спирається на п'ять нелінійно пружних радіальних опор – підшипників (Рис. 1). Розрахунки проводились для максимального виліту вала (довжині консолі L_1). Переріз балки дорівнює перерізу шпиндельного вала ($D = 50\text{мм}$), посилююча жорсткість черв'ячної шестерні не враховується.

Варіанти розрахункових схем шпиндельного вала приведені на рис.1:

- а) для оцінки згинальної жорсткості;
- б) для розрахунку прогинів та кутів повороту у робочому режимі;
- в) для оцінки міцності.

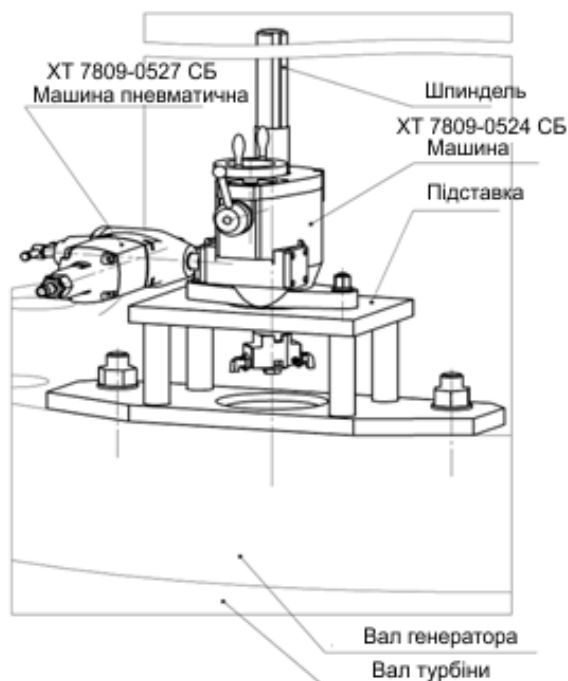


Рис.2 – Загальний вид пристосування ТР79-746

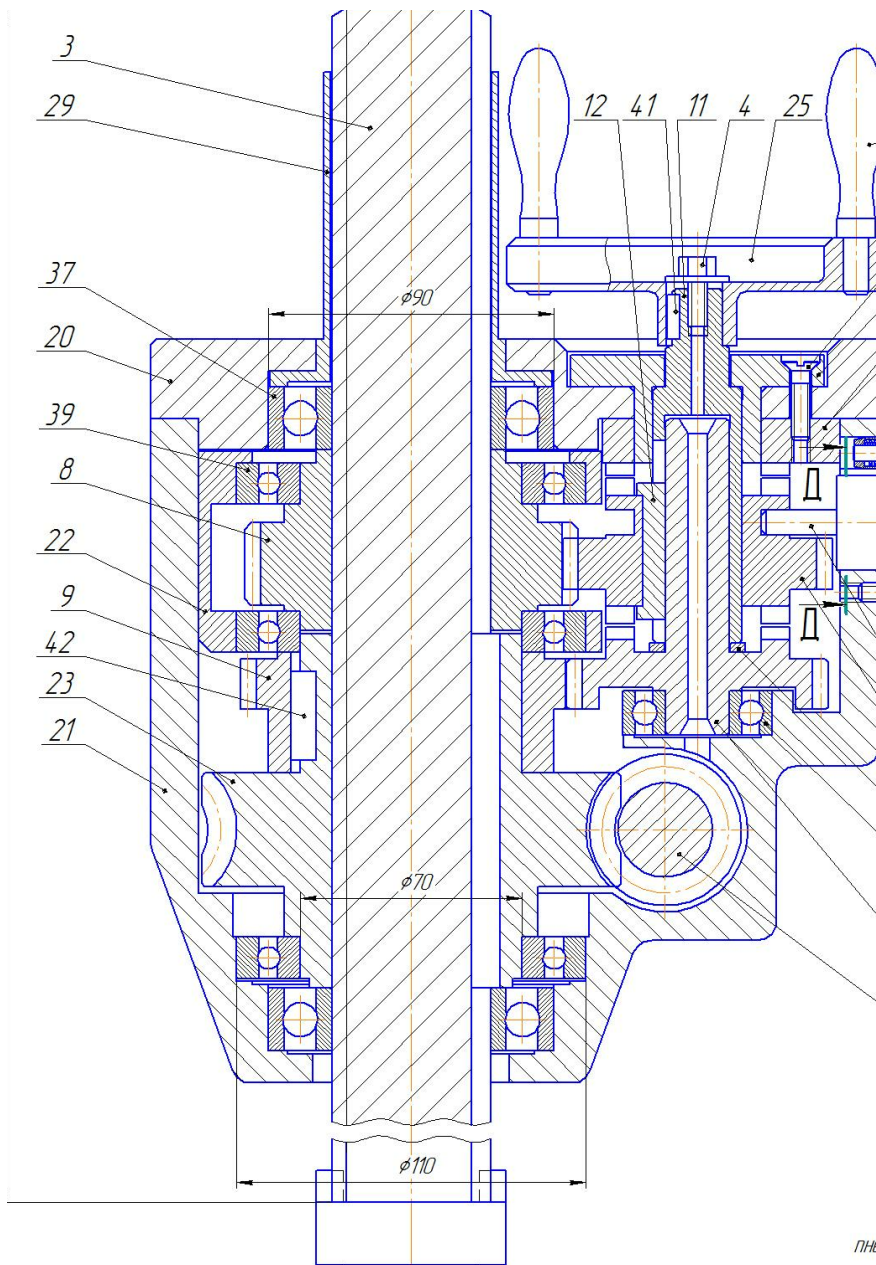


Рис.3 – Конструкція шпиндельного вузла розточувальної машини

Для розрахунку жорсткості вал у зоні різання навантажувався одиничною радіальною силою. Оскільки у даному устаткуванні використовуються інструменти з симетрично розташованими ріжучими вставками, сумарні складові сили різання $F_{xr}, F_{yr}, M_{xr}, M_{yr}$ дорівнюють нулю і вал згинається під дією зусиль $F_{xpr}, F_{ypr}, M_{xpr}$ з боку приводної черв'ячної шестерні. При розрахунку міцності шпиндельного валу окрім згинання треба враховувати кручення моментами M_{zr}, M_{zpr} і стискання силами F_{zr}, F_{zpr} (див. рис. 1).

Вихідними даними для розрахунків є значення зовнішніх зусиль $F_{xpr}, F_{ypr}, F_{zpr}, M_{xpr}, M_{ypr}, M_{zpr}$, модуль пружності E , модуль зсуву G , коефіцієнт форми перерізу K_t , осьові моменти інерції I_x, I_y , полярний та осьовий моменти опору $W_r = 2W_x$, площа поперечного перерізу валу A , масиви довжин ділянок L_n і початкових значень жорсткостей опор $C_n, n=1,2,3,4,5$, номер $k-1=2$ опори і координата $L_{k1} = L_{31}$ точки прикладання зусиль, діючих з боку привода.

Зусилля $F_{xpr}, F_{ypr}, F_{zpr}, M_{zpr}$, діючи з боку черв'ячного приводу підраховувались по відповідним залежностям з [21]. Стартові жорсткості пружних опор – підшипників вибирались по графічним даним з роботи [22].

Зовнішні зусилля, фізичні та геометричні характеристики розрахункової схеми подані в Табл. 1 і 2.

Таблиця 1 – Зовнішні зусилля

Зовнішні сили						
F_{xpr} , кН	F_{ypr} , кН	F_{zpr} , кН	F_{zr} , кН	M_{ypr} , Нм	M_{zpr} , Нм	M_{zr} , Нм
12,7	35,0	3,23	3,23	194,0	2100	2100

Таблиця 2 – Фізичні та геометричні характеристики

Фізичні та геометричні характеристики						
E , МПа	G , МПа	A , мм ²	$I_x = I_y$, мм ⁴	$W_r = 2W_x$, мм ³	K_t	L_{k1} , мм
$2,0 \cdot 10^5$	$0,8 \cdot 10^5$	1960	$3,07 \cdot 10^5$	$2,46 \cdot 10^4$	1,3	62,7

Характеристики підшипників, які використовуються у шпindelному вузлі розточувальної машини ХТ7809-0524 і стартові значення їх жорсткостей, що розраховувались по залежностям з [17] приведені у Табл. 3.

Таблиця 3 – Характеристики підшипників

Марка однорядного радіального підшипника	Внутрішній діаметр, мм	Кількість шариків	Діаметр шарика, мм	Стартова жорсткість Н/мм	Коеф. жорсткості у (8)
69210 ГОСТ 7242-81	50	10	12.7	$100 \cdot 10^3$	751
7000114 ГОСТ 8338:2008	70	18	7.94	$85 \cdot 10^3$	751

Довжина консолей та між опорних відстаней (див. рис. 1) наведені у таблиці 4.

Таблиця 4 – Довжина консолей та між опорних відстаней

Довжина консолей		Довжина міжопорних відстаней			
L_1 , мм	L_6 , мм	L_2 , мм	L_3 , мм	L_4 , мм	L_5 , мм
780,5	130	18,7	103,7	46,7	21,5

Рішення задачі статичного аналізу виконується інтегруванням диференціального рівняння зігнутої осі балки прямим методом початкових параметрів, який адаптований для багато опорних валів на нелінійно пружних опорах у середовищі пакету MatLAB [18].

Для розрахункових схем, які представлені на рис. 1 були вирішені наступні задачі.

Задача 1. Обчислення переміщень під дією одиничних зусиль $F_{yr}^* = 1$ та $M_{xr}^* = 1$ у типовому розрахунку на жорсткість з метою визначення рівня лінійної та кутової жорсткості шпindelного вузла у зоні різання (схема на рис. 1а).

Задача 2. Обчислення прогину під одиничною згинальною силою з боку приводу $F_{ypr}^* = 1$, який характеризує жорсткість шпindelного валу на між опорній ділянці (схема на рис. 1b).

Задача 3. Обчислення прогину і кутів повороту у зоні різання та на передній опорі під дією зусиль з боку приводу $F_{xpr}, F_{ypr}, M_{ypr}$ (згинаючі зусилля в зоні різання дорівнюють нулю) і оцінка жорсткості шпindelного вузла на робочому режимі (схема на рис. 1с).

Задача 4. Обчислення внутрішніх зусиль (згинаючих та крутних моментів, поздовжних сил), виникаючих на робочому режимі під дією $F_{xpr}, F_{ypr}, F_{zpr}, F_{zr}, M_{xpr}, M_{zpr}, M_{zr}$ та оцінка міцності шпindelного валу (див. схему на рис. 1с).

Задачі 1,2. Жорсткість визначалась по переміщенням перерізів шпindelного валу під одиничним навантаженням (див. рис. 1а): $C_{rr} = F_{yr}^* / y_0$, $C_{r\Theta} = M_{xr}^* / \Theta_0$, $C_{pr\Theta} = F_{xpr}^* / \Theta_{pr}$. У таблиці 5 приведені значення прогинів і кута повороту крайнього перерізу вала під дією одиничної сили та одиничного моменту, а також прогин під дією одиничної сили, прикладеної з боку приводу. У цій таблиці приведені і відповідні значення жорсткостей.

Таблиця 5 – Лінійні та кутові жорсткості при згинанні

Номер задачі	Прогин під одиничною силою, мкм	Лінійна изгибная жорсткість, н/мкм	Кут повороту під одиничним моментом, рад	Кутова жорсткість, нм/рад
1. $F_{yr}^* = 1$ ($M_{xr}^* = 1$)	5,28	0,19	$3,87 \cdot 10^{-6}$	$258 \cdot 10^3$
2. $F_{ypr}^* = 1$	0.038	26,3	-	-

Задача 3. Задача вирішувалась для двох варіантів розрахункової схеми вала на робочому режимі (див. рис. 1с). У варіанті 1 визначались переміщення у характерних перерізах вала для розрахункової схеми,

зображеної на рис. 1с, та проводилась оцінка його жорсткості на робочому режимі. У варіанті 2 вирішувалась та ж задача, але крайній переріз (зона різання) пружно закріплювався опорою великої жорсткості ($C = 500$ Н/мкм), що відповідає реальним умовам процесу розточування розточною головкою, оскільки вона спирається на оброблену поверхню. Результати розрахунків приведені у таблиці 6.

В таблиці 7 представлені жорсткості опор, отримані при вирішенні задачі 3, а також стартові (довідкові) жорсткості, розраховані по залежностям з [17]. Результати розрахунку переміщень зі стартовими жорсткостями у другому варіанті задачі 3 зведені в останній рядок таблиці 6.

Таблиця 6 – Переміщення перерізів валу на робочому режимі

№ варіанту	Прогин кінцевого перерізу, мкм			Кут повороту кінцевого перерізу, хв.		Кут повороту на передній опорі, хв	
	y_0	x_0	$(x_0^2 + y_0^2)^{0,5}$	Θ_{x0}	Θ_{y0}	Θ_{x1}	Θ_{y1}
1	308	171	352	1,55	0,818	1,55	0,818
2	2,9	1,6	3,05	0,51	0,207	1,54	0,653
Вар. 2, стартові жорсткості опор	1,1	0,576	1,24	0,222	0,206	1,67	0,777

Таблиця 7 – Розрахункові жорсткості опор

Задача 3	Жорсткості опор у площинах yOz и xOz , н/мкм									
	C_1		C_2		C_3		C_4		C_5	
	yOz	xOz	yOz	xOz	yOz	xOz	yOz	xOz	yOz	xOz
Варіант 1	165	96	258	156	238	184	150	142	55	82
Варіант 2	150	100	240	159	256	182	174	140	83	81
Стартові жорсткості	100	100	85	85	85	85	85	85	100	100

На рисунку 4 приведений розподіл прогинів шпindelного валу при згинанні у площині yOz (див. рис. 1с) для варіантів 1,2 задачі 3 та при стартових значеннях жорсткостей опор (для вар.2).

Задача 4. Для оцінки міцності проведено підрахунок внутрішніх зусиль (згинальних та крутних моментів, поздовжніх сил), виникаючих у шпindelному валі на робочому режимі. Їх розподіл показан на рис. 5.

З трафіків на рисунку 5 видно, що оцінку міцності слід проводити у перерізі, де прикладені зовнішні зусилля $F_{xpr}, F_{ypr}, F_{zpr}, F_{zr}, M_{xpr}$, діючі з боку приводу (див. рис. 1с). Шпindelний вал знаходиться під сумісною дією згинання, кручення і стискання. Еквівалентне напруження у небезпечній точці розраховується по енергетичній гіпотезі міцності (Мізеса):

$$\sigma_{екв} = ((M_{сум}/W_x + N/A)^2 + 4(M_k/W_f)^2)^{0,5}$$

де $M_{сум} = (M_x^2 + M_y^2)^{0,5}$

Прогини



Рис.4 – Розподілення прогинів по довжині валу

Внутрішні зусилля

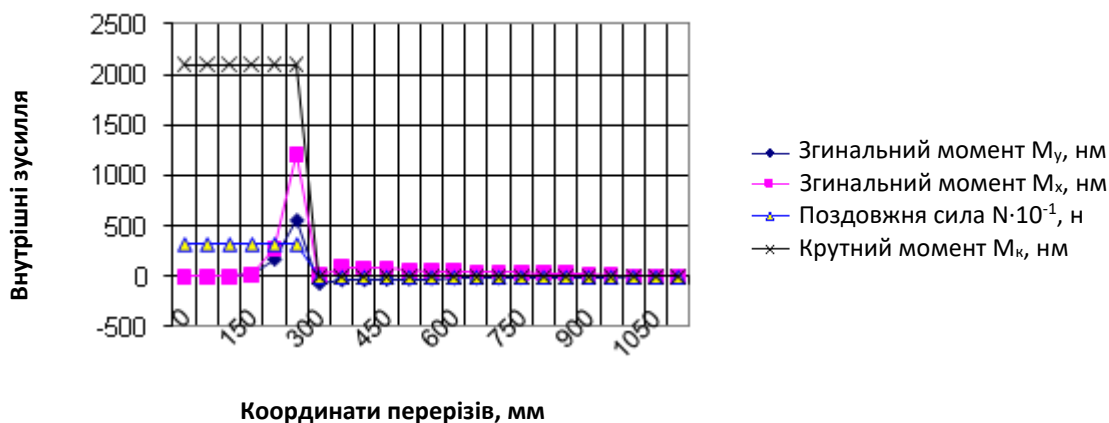


Рис.5 – Внутрішні зусилля

Величини внутрішніх зусиль і еквівалентного напруження $\sigma_{\text{екв}}$ в опасному перерізі приведені у таблиці 8.

Таблиця 8 – Внутрішні зусилля та еквівалентне напруження

Внутрішні зусилля в опасному перерізі					Еквівалентне напруження $\sigma_{\text{екв}}$, МПа
M_x , нм	M_y , нм	$M_{\text{сум}}$, нм	M_k , нм	N , н	
1212	565	1337	2100	3270	204

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки:

- обчислення згинальних переміщень під одиничною силою дозволило визначити рівні лінійної та кутової жорсткості шпиндельного валу в зоні різання (табл. 5). Внаслідок значного виліту валу його жорсткість виявилася замалою (0,19 н/мкм), нижчою за величину, яка рекомендована для верстатного устаткування (200 – 250 н/мкм). Враховуючи малу жорсткість, робочий інструмент (розточувальні головки, зенкери, розгортки) повинні мати періодично встановлені ріжучі леза для мінімізації згинаючих складових сил різання;
- жорсткість шпиндельного валу на між опорній ділянці 26,3 н/мкм (табл. 5) також нижче рекомендованої у машинобудуванні;
- при пружному закріпленні валу у зоні різання, що відповідає реальним умовам деформування в процесі обробки (вар. 2 задачі 3), відхилення кінцевого перерізу валу на робочому режимі в 3,05 мкм (див. табл. 6) відповідає вимогам які висуваються до точності обробки (2 – 3 мкм);
- кут повороту на передній опорі у робочому режимі (кут перекосу) у 1,54 хв. значно нижчий нормативного, прийнятого у верстатобудуванні (6 хв.);
- рівень максимальних напружень на робочому режимі (204 МПа) є достатнім для забезпечення необхідного запасу міцності шпиндельного валу при умові його виготовлення з високо міцної сталі;
- використання нелінійної моделі для розрахунків жорсткості опор – підшипників дає суттєве уточнення рішення задачі статичного аналізу багатоопорного шпиндельного валу (50 – 60%).

Висновки.

1. Аналіз спеціальних вимог та критеріїв до мобільних верстатів дозволив виявити, що ефективність його роботи залежить від жорсткості шпиндельного вузла, яка складає понад 40% жорсткості самого верстату.
2. На базі відомих підходів до статичних розрахунків шпиндельних вузлів запропоновані розрахункові схеми та математична модель для статичного аналізу цієї проблеми.
3. Для розрахунків деформацій згинання у запропонованому підході використовується модель балки Тимошенко. Рішення диференційного рівняння зігнутої осі балки здійснюється методом початкових параметрів у матричній формі.
4. Особливістю роботи є врахування нелінійної залежності деформації підшипників від діючих на них навантажень, що дозволило отримати вираз для радіальної жорсткості шарикопідшипника.
5. Нелінійна система рівнянь формується автоматично для конкретної розрахункової схеми. Для її рішення застосовується метод простих послідовних ітерацій.
6. У якості прикладу проведено статичний аналіз шпиндельного валу портативної розточувальної машини ХТ7809-0524, призначеної для розточування отворів великого діаметру.
7. Для декількох варіантів розрахункових схем проведена оцінка згинальної жорсткості, розрахунок прогинів та кутів повороту у робочому режимі. Зроблена оцінка міцності шпиндельного валу.

8. З'ясовано що:
лінійна жорсткість шпиндельного вала розточувальної машини ХТ7809-0524 нижче нормативної, прийнятої у верстатобудуванні;
кут повороту на передній опорі у робочому режимі (кут перекосу) значно нижчий, ніж допустимий у верстатобудуванні;
рівень максимальних напружень на робочому режимі є прийнятним і достатнім для забезпечення необхідного запасу міцності вала.
9. Використання нелінійної моделі для розрахунку жорсткостей опор - підшипників дає суттєве уточнення рішення задачі статичного аналізу шпиндельних валів.

Список літератури

1. Чернянский П.М. Жесткость металлорежущих станков: Учебное пособие М.: изд. МВТУ, 1969. 20 с.
2. Решетов Д.Н. Расчет валов (шпинделей) с учетом упругого взаимодействия их с опорами. М.: Машгиз, 1939. 75 с.
3. Shareef, K.J.H, Brandon, J.A., "On the Quasi-Static Design of Machine Tool Spindles, " *Journal of Engineering Manufacture*, Voi. 204, 1990, pp. 91-104.
4. Зверев И.А., Самохвалов Е.И., Левина З.М. Автоматизированные расчеты шпиндельных узлов // *Станки и инструмент*, 1984. №2. с.11-15.
5. Yang S (1981), A study of the static stiffness of machine tool spindles, *Int. J. Mach. Tool Des. Res* **21**: 23-40. DOI.org/10.1016/0020-7357(81)90011-
6. Cao Y and Altintas Y (2007), A general method for the modelling of spindle-bearing systems, *J. Mech. Des. Transactions of the ASME* **126**: 1089-1104. DOI:10.1115/1.1802311
7. Cao H, Li B and He Z (2013), Finite Element Model Updating of Machine-Tool Spindle Systems, *Journal of Vibration and Acoustics* **135**: 0245031-0245034. DOI: 10.1115/1.4023045 4
8. Левина З.М., Зверев И.А. Расчет статических и динамических характеристик шпиндельных узлов методом конечных элементов // *Станки и инструмент*, 1986. №8. с.6-9.
9. D.E. Patil, V. A. Kamble, A.R. Balwan Design and Analysis of a Spindle of Special Purpose Drilling Machine by using Solid Works *Journal of Mechanical & Mechanics Engineering Volume 2 Issue 1 Page 1-12 2016*.
10. Satish Kumbhar, Vikram birangane, Design and Analysis of Machine Tool Spindle *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 48 Number 7 June 2017 387-392*
11. Satish Kumbhar, Vikram Birangane and Dynamic Analysis of Lathe Spindle using ANSYS *International Journal of Applied Engineering Research Volume 13, Number 9 (2018) pp. 6994-7000*
12. Jin-Woo Choia Development of an Automation Tool for the Three-Dimensional Finite Element Analysis of Machine Tool Spindles *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers* 24:2 (2015) 166~171
13. G. Subramani, R. Suvada, S.G. Kapoor, R.G. DeVor, W. Meingast, A model for the prediction of force system for cylinder boring process, *Proc. XV. NAMRC (1987) 439-446*.
14. Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design*, Cambridge University Press, 2000.
15. E.J.A. Armarego, M. Uthaichaya, Mechanics of cutting approach for force prediction in turning operations, *J. of Engineering Production* 1 (1977) 1-18.
16. J.A., Armarego, *Material removal processes—An intermediate course*, University of Melbourn, 1993.
17. Справочник технолога-машиностроителя. В двух томах. Т.2. Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985.
18. O. Kyrkach, V. Khavin, I. Khavina, "A computational technique for the static analysis of multi-support spindle shafts with nonlinear elastic bearings", *Proceedings of 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology Conference, Kharkiv, Ukraine, 5-10 Oct. 2020*, pp. 402-406.
19. An Enhanced Computational Technique for the Static Analysis of Multi-Support Spindle Shafts with Nonlinear Elastic Bearings, Valeriy Khavin; Oleksiy Kyrkach; Borys Kyrkach *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) 13-17 September 2021 Kharkiv, Ukraine*
20. Harris Tedric A. *Rolling bearing analysis / Tedric A. Harris. - 4th ed., (2001) 1074*.
21. Киркач Н.Ф., Баласаян Р.А. Расчет и проектирование деталей машин : (Учеб. пособие для техн. вузов).- 3-е изд., перераб. и доп. – Х., Основа, 1991.- 276 с.
22. Колесников, Л.А. Исследование статических и динамических характеристик шпиндельных узлов станков при автоматизированном проектировании: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» / Л.А. Колесников. – Минск: БНТУ, 2017. – 55 с.

Bibliography (transliterated):

1. P.M. Chernjanskij, "Zhestkost' metallovezhushchih stankov", MVTU, 1969, 20s
2. D.N. Reshetov, "Raschet valov (shpindelej) s uchetom uprugogo vzaimodejstviya ih s oporami", Mashgiz, 1939 75c.
3. Shareef, K.J.H, Brandon, J.A., "On the Quasi-Static Design of Machine Tool Spindles, " *Journal of Engineering Manufacture*, Voi. 204, 1990, pp. 91-104.
4. Zverev.I.A., Samokhvalov E.I., Levina Z.M. Avtomatizirovannye raschety shpindelnykh uzlov. Stanki i instrymnt. 1984. №2. s.11-15.
5. Yang S (1981), A study of the static stiffness of machine tool spindles, *Int. J. Mach. Tool Des. Res* **21**: 23-40. DOI.org/10.1016/0020-7357(81)90011-
6. Cao Y and Altintas Y (2007), A general method for the modelling of spindle-bearing systems, *J. Mech. Des. Transactions of the ASME* **126**: 1089-1104. DOI:10.1115/1.1802311
7. Cao H, Li B and He Z (2013), Finite Element Model Updating of Machine-Tool Spindle Systems, *Journal of Vibration and Acoustics* **135**: 0245031-0245034. DOI: 10.1115/1.4023045 4
8. Z.M. Levina, I.A. Zverev, "Raschet sticheskih i dinamicheskikh harakteristik shpindel'nyh uzlov metodom konechnyh elementov", *Stanki i instrument*, №8, 1986, s.6-9 (in Russian).

9. D.E. Patil, V. A. Kamble, A.R. Balwan Design and Analysis of a Spindle of Special Purpose Drilling Machine by using Solid Works Journal of Mechanical & Mechanics Engineering Volume 2 Issue 1 Page 1-12 2016.
10. 10.. Satish Kumbhar, Vikram birangane, Design and Analysis of Machine Tool Spindle International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 48 Number 7 June 2017 387-392
11. Satish Kumbhar, Vikram Birangane and Dynamic Analysis of Lathe Spindle using ANSYS International Journal of Applied Engineering Research Volume 13, Number 9 (2018) pp. 6994-7000
12. Jin-Woo Choia Development of an Automation Tool for the Three-Dimensional Finite Element Analysis of Machine Tool Spindles Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 24:2 (2015) 166~171
13. G. Subramani, R. Suvada, S.G. Kapoor, R.G. DeVor, W. Meingast, A model for the prediction of force system for cylinder boring process, Proc. XV. NAMRC (1987) 439–446.
14. Y. Altintas, Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design, Cambridge University Press, 2000.
15. E.J.A. Armarego, M. Uthaichaya, Mechanics of cutting approach for force prediction in turning operations, J. of Engineering Production I (1977) 1–18.
16. J.A., Armarego, Material removal processes—An intermediate course, University of Melbourn, 1993
17. Spravochnik tehnologa-mashinostroitelja. V dvuh tomah. T.2. Pod. red A. Kosilovoj I R. Mesherjakova. – M.:Mashinostroenije, 1985/
18. O. Kyrkach, V. Khavin, I. Khavina, "A computational technique for the static analysis of multi-support spindle shafts with nonlinear elastic bearings", Proceedings of 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology Conference, Kharkiv, Ukraine, 5-10 Oct. 2020, pp. 402-406.
19. An Enhanced Computational Technique for the Static Analysis of Multi-Support Spindle Shafts with Nonlinear Elastic Bearings, Valeriy Khavin; Oleksiy Kyrkach; Borys Kyrkach 2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek) 13-17 September 2021 Kharkiv, Ukraine
20. Harris Tedric A. Rolling bearing analysis / Tedric A. Harris. - 4th ed.,(2001)1074
21. Kyrkach N., Balasanyan R. Raschet I proektirovaniye detalej mashin. (Ychebn. posodije dlja techn. vuzov.) – 3-je izd., pererab. i dop. – Ch., Osnova, 1991.-276 s.
22. Kolesnikov L. Issledovaniye staticheskih i dinamicheskikh harakteristik shpindelnuh yzlov stankov pri avtomatizirovanom proektirovanii: uchebno-metodicheskoe posobije dlja studentov specialnosti 1-36 01 03 «Tehnologicheskoe oborudovanie mashinostroitel'nogo proizvodstva» / L. Kolesnikov.- Minsk, BNTU, 2017 – 55 s.

Поступила (received) 24.02. 2023

Відомості про авторів / About the Authors

Хавін Валерій Львович (Khavin Valerij) – кандидат технічних наук, професор кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», тел. (057)707-61-78; e-mail: Valerij.Havin@khp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4827-6474.

Киркач Борис Миколайович (Kyrkach Borys) – кандидат технічних наук, професор кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», тел. (057)707-62-33; e-mail: Borys.Kyrkach@khp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0432-12965.

Киркач Олексій Борисович (Kyrkach Oleksiy) – інженер-механік-конструктор, ТОВ «Енейбл Україна»; тел. (057)707-62-33; e-mail: olky@enabl.dk., ORCID: 0000-0003-4594-557X.

Хавіна Інна Петрівна (Khavina Inna) - кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та DATA-технологій «Харківського національного університету внутрішніх справ»; тел. 0501007816; e-mail: inna.khavina25@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1856-1186.

СИЗЫЙ Ю.А., СТАЛІНСКИЙ Д.В., ЄВСЮКОВА Ф.М., ЩЕРБІНІНА Т.Є., УШАКОВ О.О.

ДОСЛІДЖЕННЯ КРУТИЛЬНИХ СИСТЕМ ПРИВОДІВ ОБЕРТАННЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ВРІЗНОМУ ШЛІФУВАННІ НА ВЕРСТАТАХ МОДЕЛЕЙ 3М151 І 3М152

У статті представлені дослідження статичних і динамічних характеристик крутильних систем приводів обертання заготовок верстатів 3М151 і 3М152 Харківського машинобудівного заводу. Ці приводи відрізняються лише клинопасові передачами обертання осі ротора електродвигуна (ЕД) до шпинделя передньої бабки верстата. На верстаті 3М151 ця передача двоступенева із загальним передавальним відношенням 4,4, а в верстаті 3М152 - одноступенева з передавальним відношенням 2,5.

Дослідження виконано на основі опису приводів системою диференціальних рівнянь (ДУ) рівноваги дискретних систем в просторі станів і за допомогою структурних схем приводів у вигляді передавальних функцій елементів приводу і зв'язків між ними. У ДУ враховується розсіювання енергії крутильних коливань в електромагнітному зв'язку ротора зі статором двигуна постійного струму з незалежним збудженням. Дослідження моделей приводів в просторі станів дозволило отримати значення власних частот коливань і амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) при впливі на привід моментом різання (шліфування) з вихідною координатою - кутової швидкістю заготовки. Аналіз коренів характеристичних рівнянь досліджених приводів показав їх стійкість, але низьку швидкодію (тривале загасання) з дуже малою амплітудою коливань, які не можуть погіршити геометричну якість поверхні, що шліфується. Порівнянні приводів принципово не відрізняються за своїми динамічними характеристиками. Однак вони значно відрізняються за своїми статичними характеристиками.

Встановлено, що в приводі заготовки з двоступеневою пасовою передачею з двигуном 2ПД100МУХЛ4 неможливо отримати окружну швидкість обертання заготовки малого діаметра ($30 \div 40$) мм вище швидкості в 50 м/хв, що необхідно для зменшення граничної температури нагріву поверхні, що шліфується при врізному шліфуванні. Для приводу з одноступеневою пасовою передачею це обмеження відсутнє. Крім цього, енергія, що витрачається на реалізацію режимів врізного шліфування, при одноступеневій пасовій передачі приблизно в 1,5 рази менше її значення в приводі з двоступеневою пасовою передачею. Тому зміна приводу заготовки у верстаті 3М152 в порівнянні з верстатом 3М151 являється доцільним.

Ключові слова: Двигун постійного струму; диференціальні рівняння простору станів; модель у вигляді структурної схеми; передавальна функція; амплітудно-частотна характеристика; витрати енергії.

SIZY J.A., STALINSKY D.V., YEVSUKOVA F.M., SHCHERBININA T.E., USHAKOV O.O. INVESTIGATION TORSION SYSTEMS OF BLANKS ROTATION IN INFEEED GRINDING ON MACHINE-TOOLS MOD.3A151 AND 3A152

In article presented investigation of static and dynamic characteristics torsion systems of blanks rotation in the machine-tools produced by Kharkov machine-tool plant. These blanks rotation systems differ in v-belt transmissions from rotor of electric motor to spindle of headstock.

In the machine-tool 3A151 this v-belt transmission is two-steps with total transmission relation 4.4, but in the machine-tool 3M152 is one step with transmission relation 2.5. This investigation was realized on the base of system differential equations (DE) balance discrete systems by state space equations and with the help of structure rotation systems in the view transfer functions elements of drivers and the ties between them.

In (DE) are take account damping energy of rotation vibrations in electromagnetic ties rotor with stator direct-current motor. From drivers models in state space was received its gain-frequency characteristics in input action on the drivers cutting moment with output action by angular velocity of blank. The analysis of roots characteristic equations of transfer functions showed its stability but long damping with very little amplitude of vibrations, which cannot make worse of geometrical quality grinding surface. The drivers which compare are not different by their dynamic characteristics. But they very different by their statistic characteristics. It was established that in driver with two-step belt transmission with motor 2PD100MYXL4 impossibility get rotary velocity of blanks little diameters (30-40)mm over 50m/min which demands for reduce of maximum temperatures heating of surface in infeed grinding. For driver with one step belt transmission this limitation not take place. It was established that energy of grinding in driver with two-step belt transmission in 1.5 times more of it in driver with two-step belt transmission. Such as changing driver in machine-tool 3M152 with comparison machine-tool 3M151 was purposely.

Key words: DC motor; differential equations of state space; model in the form of a structural diagram; Transmission function; amplitude-frequency characteristic; energy costs.

Вступ. Випуск круглошліфувального верстата середніх розмірів моделі 3М151 був освоєний наприкінці 50-х років минулого століття на Харківському верстатобудівному заводі та тривав до кінця 80-х. За всі ці роки конструкція приводу обертання заготовки не зазнала змін.

Верстат моделі 3М152 змінив модель 3М151. У моделі 3М152 у приводі обертання заготовки одноступінчаста пасова передача замінила двоступінчасту в верстаті 3М151.

Верстат 3М152 випускався дуже короткий час до початку 90-х років і був припинений через загальний занепад верстатобудування в Україні.

Авторам статті не відомі причини, що спонукали конструкторів верстатів перейти з двох- на одноступінчасту передачу.

Мета та завдання, які вирішуються у статті. Автори вважають корисним виконати ретельне порівняння статичних та динамічних характеристик приводів заготівлі в верстатах моделей 3М151 та 3М152 та отримати обґрунтування доцільності або недоцільності переходу з двох- на одноступінчасту пасову передачу.

Перше питання, на яке слід відповісти при порівнянні: «Чи охоплюють можливості регулювання частоти обертання заготівлі рекомендації щодо режимів шліфування».

Друге, що зазвичай робиться щодо крутильної системи, це визначення нижчих власних частот крутильних коливань.

Ці частоти, згідно з прийнятою в середині 19-го століття методикою, визначають без урахування демпфування (розсіювання енергії) коливань, що знижує точність їх визначення.

У цій методиці електромагнітний зв'язок ротора зі статором двигуна описується наближеним обчисленням податливості [1] цього зв'язку. У той же час є можливість використання сучасної, найточнішої моделі електродвигуна, яка враховує розсіювання енергії при взаємодії електромагнітних полів статора та ротора, що дозволяє частково врахувати розсіювання енергії у приводі.

Тому ставиться завдання часткового обліку розсіювання енергії та оцінки впливу його на поведінку крутильних систем приводів у резонансних режимах роботи, що може бути зроблено отриманням передатних матричних функцій і частотних характеристик.

Важливу інформацію про динамічні властивості порівнюваних крутильних систем можна отримати за перехідними характеристиками, спостерігаючи за ними візуально, за допомогою структурних моделей систем, розробка яких та їх порівняльний аналіз є одним із важливих завдань дослідження.

Дослідження крутильних систем приводу обертання заготовки верстата моделі 3М151. Схема приводу обертання заготовки верстата 3М151 показано на рис. 1.

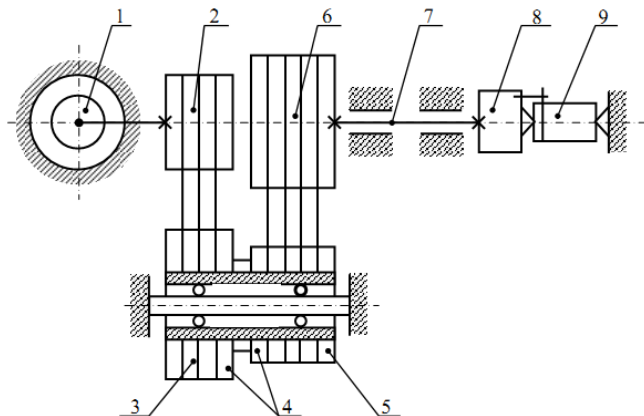


Рис. 1 – Схема приводу обертання заготовки верстата 3М151

1 – ротор; 2 – провідний шків першого ступеня реміної передачі; 3 – ведений шків першого ступеня реміної передачі; 4 – подвійний шків; 5 – провідний шків другого ступеня реміної передачі; 6 – ведений шків другого ступеня реміної передачі; 7 – шпindel; 8 – повідковий патрон; 9 – заготовка

На цьому рисунку розподілені маси ротора та шпінделя замінені без інерційними валами, показаними однією суцільною лінією. Маса валу ротора врахована в моменті інерції ротора, а маса шпінделя частково, по одній третій моменту інерції, приєднана до шківів 6 і патрона 8.

Моменти інерції всіх мас, що обертаються, визначені користуючись системою комп'ютерної математики MATLAB побудовою 3D моделі маси, момент інерції якої визначався, і обчисленням його відповідно до стандартної програми в MATLAB.

Отримані моменти інерції зосереджених мас згідно з рис. 1 зведені у Табл. 1.

Таблиця 1. – Моменти інерції зосереджених мас

№ п/п	Найменування маси	№ згідно рис.1	Момент інерції: Позначення I_i і величина, кгм^2
1	Ротор	1	$I_p = 0,011$
2	Шків на валу ротора	2	$I_1 = 0,048$
3	Подвійний шків	4	$I_2 = 0,106$
4	Шків на шпінделі	6	$I_3 = 0,15$
5	Патрон	8	$I_4 = 0,057$
6	Заготовка	9	$I_5 = 0,018$

Розміри і форма заготовки можуть бути дуже різноманітні. Приймаємо її діаметр $D = 100$ мм і довжиною впродовж вісі $L = 250$ мм і отримуємо $I_5 = 0,018$ кгм^2 .

Пружні зв'язки між зосередженими масами оцінювалися крутильною жорсткістю C_i [Нм/рад] за формулами згідно з [1]. У статті ці розрахунки не наводяться, крім жорсткості реміних передач.

Вихідні дані для першого ступеня клинопасової передачі наступні: радіус ведучого шківів $R_1 = 31,5$ см; веденого шківів $R_2 = 65$ мм; міжцентрова відстань шківів $L = 200$ мм; паси УО перерізу $F = 0,56$ см^2 ; число пасів $n = 3$; передаточне відношення $i_1 = R_2/R_1$.

Для передачі моменту M на веденому шківі 3, обумовленого моментом шліфування на заготовлі, тягнуча гілка передачі, з урахуванням попереднього натягу, повинна бути додатково навантажена зусиллям Q :

$$Q = \frac{2F \cdot E \cdot n}{L_{\text{эф}}} \cdot \Delta L_{\text{эф}}, \quad (1)$$

де $\Delta L_{\text{эф}}$ – додаткове розтягування гілки передачі, що тягне; E – модуль пружності при розтягу клинового пасу.

Момент M , який передається при такому натягу Q тягнутої гілки:

$$M = Q \cdot R_1 = \frac{2F \cdot E \cdot n R_1}{L_{\text{эф}}} \cdot \Delta L_{\text{эф}}, \quad (2)$$

Видовження $\Delta L_{\text{эф}}$ створюється пружним закручуванням шківів передачі, т.б.

$$\Delta L_{\text{эф}} = \varphi_1 R_1 - \varphi_2 R_2, \quad (3)$$

або

$$M = Q \cdot R_1 = \frac{2FE \cdot n \cdot R_1}{L_{\text{эф}}} (\varphi_1 R_1 - \varphi_2 R_2) = \frac{2FE \cdot n \cdot R_1^2}{L_{\text{эф}}} (\varphi_1 - \varphi_2 i_1), \quad (4)$$

де i_1 – передаточне відношення першого ступеня пасової передачі.

Помножувач при $(\varphi_1 - \varphi_2 \cdot i_1)$ і є крутильна жорсткість передачі, приведена до ведучого шківа передачі:

$$C = \frac{2FE \cdot n \cdot R_1^2}{L_{\text{эф}}}, \quad (5)$$

Підставивши вихідні дані для першого ступеня передачі і приймаючи $E = 2,5 \cdot 10^8$ Н/м², згідно рекомендацій [1] отримуємо $C_1 = 414$ [Н·м/рад].

Для другого ступеня авсової передачі вихідні дані наступні: паси O ; $F = 0,47$ см²; $n = 4$; $R_1 = 31,5$ мм; $R_2 = 67,5$ мм; $i = 2,14$; $L_{\text{эф}} = 16$ см.

Згідно з формулою (5) отримуємо $C_2 = 597$ [Н·м/рад].

Отримані значення крутильної жорсткості пружних зв'язків між зосередженими масами зведені у Табл. 2.

Таблиця 2 – Значення крутильної жорсткості пружних зв'язків між зосередженими масами

№ п/п	Пружний крутильний зв'язок між масами згідно рис. 1	Жорсткість: позначення C_i і величина, Н·м/рад
1	Ротор 1 – шків 2	$C_1 = 3000$
2	Шків 2 – шків 4	$C_2 = 414$
3	Шків 4 – шків 6	$C_3 = 597$
4	Шків 6 – патрон 8	$C_4 = 6,66 \cdot 10^4$
5	Патрон 8 – заготовка 9	$C_5 = 2,32 \cdot 10^5$

Математична модель крутильних коливань приводу – це система диференціальних рівнянь (ДК) електромагнітного зв'язку ротора зі статором та рівноваги моментів крутіння на зосереджених масах у динаміці.

Електромагнітний зв'язок ротора зі статором двигуна постійного струму з незалежним збудженням описується добре відомою системою ДК [2, 3]:

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} I_{\text{я}} + C_e \omega &= U; \\ I_{\text{п}} \frac{d\omega}{dt} &= M_{\text{д}} - M_{\text{с}}; \\ M_{\text{д}} &= C_{\text{м}} I_{\text{я}} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

Двигун привода заготовки 2ПД100МУХЛ4 докладно досліджений в [4] і параметри його відповідно паспортним даним і розрахунків [4] наступні: індуктивність якірного ланцюга $L_{\text{я}} = 0,087$ Гн, активний опір якірного ланцюга $R_{\text{я}} = 4,52$ Ом; коефіцієнти $C_e = 0,83$ В·с/рад; $C_{\text{м}} = 0,83$ Н·м/А; електромагнітна постійна часу $T_{\text{я}} = L_{\text{я}} / R_{\text{я}} = 0,0172$ с; момент інерції ротора $I_{\text{п}} = 0,011$ кг·м²; номінальна частота обертання $n_{\text{н}} = 2360$ хв⁻¹, що відповідає номінальній кутовій швидкості $\omega_{\text{ном}} = 247$ рад/с; момент, розвиваємий двигуном $M_{\text{д}}$ [Н·м]; U [В] – напруження постійного струму, що подається на обмотку якоря; $M_{\text{с}}$ [Н·м] – момент опору.

Регулювання кутовою швидкістю ω здійснюється величиною U від номінального його значення $U_{\text{ном}} = 220$ В у бік зменшення.

Номинальна потужність двигуна $N_n = 850$ Вт і коефіцієнт корисної дії (ККД) $\eta = 0,78$ з чого слідує номінальне значення струму якоря $I_n = (N_n / U_{ном}) \cdot 0,78 = 3,01$ А.

Відповідно до нормативів [8] умови експлуатації двигуна визначаються струмом у якірному ланцюзі. Він не повинен перевищувати значення $I_{пред}$ з умови перегріву двигуна, що залежить від тривалості встановленого режиму його роботи.

Для розглядається у статті процесу круглого зовнішнього врізного шліфування (КНВШ), тривалість якого не перевищує 60 с, $I_{пред} = 2 \cdot I_n = 6,02$ А.

Друге рівняння системи (6) це рівняння рівноваги моментів крутіння на роторі в динаміці і M_c - це момент пружного опору кручення зв'язку ротора зі шківом 2. Позначимо його як M_{y1} і обчислюємо наступним чином:

$$M_c = M_{y1} = C_1(\varphi - \varphi_1), \quad (7)$$

де φ – кут закручування ротора, рад; φ_1 – кут закручування шіва 2, рад. Якщо продиференціювати вираз (7) за час t , отримаємо:

$$\frac{dM_{y1}}{dt} C_1(\omega - \omega_1), \quad (8)$$

Тому замість другого рівняння системи (6) запишемо:

$$I_p \frac{d\omega}{dt} = C_m I_a - M_{y1}$$

і до нього додамо вираз (8).

В результаті замість системи (6) отримаємо наступну систему трьох рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} L_a \dot{I}_a + I_a R_a + C_e \omega &= U_a; \\ I_p \dot{\omega} &= C_m I_a - M_{y1}; \\ \dot{M}_{y1} &= C_1(\omega - \omega_1). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Наступним ДУ має бути рівняння рівності моментів на шківі 2 (рис. 1). Зліва нього діє момент M_{y1} , а має опір до нього момент пружного зв'язку ремінної передачі описаної рівнянням (4).

Позначивши (4) $M = M_{y2}$ і про диференціювавши його за часом t отримаємо:

$$\dot{M}_{y2} = C_2(\omega_1 - \omega_2 \cdot i_1), \quad (10)$$

де C_2 отримане вище і дорівнює 414 Н·м/рад.

Моменти M_{y1} і M_{y2} врівноважуються інерційним моментом маси шківів 2. Отже, рівність моментів на шківі 2 описується рівнянням (11):

$$I_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_{y1} - M_{y2}, \quad (11)$$

Наступною зосередженою масою приводу є подвійний шків 4. Рівність моментів на ньому описується за аналогією з (11) таким чином:

$$I_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{y2} - M_{y3}, \quad (12)$$

де ω_2 – кутова швидкість подвійного шківів 4, а M_{y3} – пружний момент другого ступеня ремінної передачі. $M_{y3} = L_2(\varphi_2 - \varphi_3 \cdot i_2)$, або

$$\dot{M}_{y3} = C_2(\omega_2 - \omega_3 \cdot i_2), \quad (13)$$

Таким чином, ми вже маємо систему семи ДК. Це рівняння (9), (10), (11), (12), (13).

Розглядаючи далі рівність моментів на шківі 6, патроні 8 та заготівлі 9 (див. рис. 1), за аналогією з вищеописаним, отримуємо:

$$\left. \begin{aligned} I_3 \frac{d\omega_3}{dt} &= M_{y3} - M_{y4}; \\ \dot{M}_{y4} &= C_3(\omega_3 - \omega_4); \\ I_4 \frac{d\omega_4}{dt} &= M_{y4} - M_{y5}; \\ \dot{M}_{y5} &= C_4(\omega_4 - \omega_5); \\ I_5 \frac{d\omega_5}{dt} &= M_{y5} - M_{\text{рез}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Отримана система ДУ є 12 рівнянь першого порядку. Така система теорії автоматичного управління називається системою простору станів [5].

Зовнішніми впливами на цю систему є: керуючий вплив U і вплив, що обурює, - момент різання (шліфування) $M_{\text{рез}}$.

Додавши позначення: $x_1 = I_3$; $x_2 = \omega_3$; $x_3 = M_{y3}$; $x_4 = \omega_4$; $x_5 = M_{y4}$; $x_6 = \omega_5$; $x_7 = M_{y5}$; $x_8 = \omega_3$; $x_9 = M_{y4}$; $x_{10} = \omega_4$; $x_{11} = M_{y5}$; $x_{12} = \omega_5$, уявимо систему рівнянь (9), (10), (11), (12), (13), (14) наступним матричним рівнянням стану:

$$\dot{X} = AX + BU, \quad (15)$$

Матриці рівняння (15) приведені на Рис. 2.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_e} & \frac{-Ce}{TeRe} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{Cm}{Ip} & 0 & \frac{-1}{Ip} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & 0 & -C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_1} & 0 & \frac{-1}{I_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_2 & 0 & -C_2 i_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_2} & 0 & \frac{-1}{I_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 & -C_3 i_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_3} & 0 & \frac{-1}{I_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_4 & 0 & -C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_4} & 0 & \frac{-1}{I_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_5 & 0 & -C_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_5} & 0 \end{bmatrix}; \quad \dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_{12} \end{bmatrix}; \quad X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{TeRe} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{I_5} \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} U \\ M_{\text{рез}} \end{bmatrix}$$

Рис. 2 – Матриці рівняння (15)

В (15) X – вектор стану (12×1); A – матриця коефіцієнтів системи (12×12); U – вектор входу (2×1). Виконавши перетворення Лапласа над (15) за нульових початкових умов отримаємо:

$$X(s) = (s \cdot E - A)^{-1} \cdot B \cdot U(s), \quad (16)$$

де E – одинична матриця (12×12). К (16) необхідно додати перетворений по Лапласу вектор виходу $Y(s)$:

$$Y(s) = C \cdot X(s) + D \cdot U(s), \quad (17)$$

де C – матриця виходу (2×12); D – матриця обходу, котра у у розглянутій задачі дорівнює нулю.

Приймаючи в якості вихідної координати кутову швидкість заготовки (т.б. $x_{12} = \omega_5$) при обурюючому впливі $M_{\text{рез}}$, матриця виходу буде наступною

$$C = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1].$$

Підставивши (16) в (17) отримаємо $Y(s) = C(sE - A)^{-1} \cdot B \cdot U(s)$ і матрична передаточна функція буде наступною:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C(sE - A)^{-1} \cdot B, \quad (18)$$

$$a) - I_a(t); b) - \omega(t); c) - \omega_s(t); d) - U_a(t) \cdot I_a(t)$$

Ці умови такі: керуючий вплив U_a задається ступінчастим сигналом з амплітудою 120В, а вплив, що обурює, задається також ступінчастим сигналом амплітудою 5Н·м і часом затримки 5 с. Такий вплив створює найбільш важкі умови роботи приводу, що дозволяють виявити динамічні характеристики приводу.

На відміну від рис. 5 на рис. 6 напруга U_a подається на якір двигуна безпосередньо, а через аперіодичне ланка першого порядку з коефіцієнтом передачі рівним одиниці і часом затримки 0,7 с, тобто. через передатну функцію $1/(0,7 \cdot s + 1)$ електронного потенціометра. Це необхідно, щоб при пуску двигуна струм якора I_a не перевищив допустиме його значення [8], що дорівнює $4I_{нЯ} = 4 \cdot 3,01 = 12A$.

З графіків рис. 6 видно поведінку I_a , 5, в перехідних і встановилися режимах роботи приводу. Нас насамперед цікавить вихідна ланка приводу – кутова швидкість заготовки $\omega_5(t)$. З графіка рис. 6б видно, що у встановленому режимі роботи, тобто. після приблизно 7 з $\omega_5(t) = 25,3$ рад/с з високочастотними коливаннями з малою амплітудою, що добре видно на рис. 6с. Для заготовки діаметром $d = 60$ мм, $\omega_5(t) = 25$ рад/с відповідає її окружній швидкості $S = 45$ м/хв.

Колівання на рис. 6с мають високочастотну та низькочастотну складові. Амплітуда низькочастотної складової приблизно дорівнює 0,25 рад/с, що відповідає швидкості $S = 0,45$ м/хв. Амплітуда високочастотних коливань набагато менше. Такі коливання S не можуть впливати на якість поверхні деталі при КНВШ.

Крім цього слід зазначити, що ступінчасте навантаження приводу моментом різання при КНВШ, і, як наслідок, зазначені вище коливання S не мають місце при КНВШ. Після торкання шліфувального кола поверхні заготовки глибина шліфування наростає у часі від нуля поступово до вирівнювання натягу пружної системи верстата з нормальною складовою сили шліфування.

Як видно із графіка рис. 6а $I_a(t)$ встановлюється на значенні приблизно рівному 6А, тобто. гранично-допустимому її значенні. У цьому момент різання дорівнює 5Н·м. Збільшення $M_{рез}$ більше 5Нм неможливо, т.к. це його граничне значення при будь-якій швидкості обертання заготовки, що настраюється. Це дуже важлива особливість приводу обертання з електродвигуном постійного струму з незалежним збудженням, з безступінчастим регулюванням частоти обертання напругою, що подається на якір двигуна в бік його зменшення від номінального значення в 220В.

У приводах обертання з асинхронним електродвигуном частоти обертання кінцевої ланки приводу - заготовки або інструменту, що задається, налаштовується передатним ставленням редукції в коробці швидкостей. Причому чим менше задається швидкість обертання, наприклад заготовки, тим більший момент різання можна до неї прикласти.

У аналізованому приводі заготовки зменшення швидкості її обертання досягається зменшенням напруги, що подається на якір, тобто. зменшенням енергії, що підводиться до двигуна.

Тож якщо ми захочемо зменшити частоту обертання заготовки проти її частотою на рис. 6, що дорівнює 25 рад/с, необхідно буде зменшити U_5 з 120В до, наприклад, 100В. Збільшити момент різання вище 5Н·м неможливо, т.к. при цьому, щоб подолати зріс $M_{рез}$, зростає I_a більше 6А, що неприпустимо.

Дослідження статичних та динамічних характеристик приводу обертання заготовки верстата 3М152. Однією з важливих завдань цього дослідження є обґрунтування доцільності або недоцільності заміни двоступінчастої ремінної передачі у верстаті 3М151 на одноступінчасту станку 3М152.

Щоб відповісти на поставлене запитання, виконаємо дослідження приводу обертання заготовки верстата 3М152 так само як і верстата 3М151. Обидва порівнювані верстати призначені як для круглого поздовжнього зовнішнього шліфування, так і для зовнішнього круглого врізного шліфування (КНВШ). Порівняння приводів будемо проводити стосовно КНВШ.

Параметри одноступінчастої передачі такі: діаметр шківів на валу ротора (провідний шків) $d_1 = 76$ мм; діаметр веденого шківів $d_2 = 190$ мм. Отже передатне відношення $i = 190/76 = 2,5$. Це значення менше ніж загальне передатне відношення у двоступінчастій передачі верстата 3М151, що дорівнює 4,4.

Виникає питання: «забезпечують такі приводи необхідний діапазон діаметрів циліндричних поверхонь, що шліфуються, при рекомендованому діапазоні швидкостей обертання заготовок».

Верстата 3М151 та 3М152 призначені для КНВШ циліндричних поверхонь $d = (30 \div 100)$ мм з рекомендованою окружною швидкістю $S = (30 \div 50)$ м/хв [9].

Відповідно до діапазонів S і d діапазон кутових швидкостей обертання заготовок буде наступним:

$$\omega_{min}(d = 100\text{мм}, S = 30\text{ м/мин}); \omega_{min} = \frac{S}{D/2} = \frac{30 \cdot 1000}{60 \cdot 50} = 10\text{ рад/с.}$$

$$\omega_{max}(D = 30\text{мм}, S = 50\text{ м/мин}); \omega_{max} = \frac{50 \cdot 1000}{60 \cdot 15} = 55\text{ рад/с.}$$

При двоступінчастій пасовій передачі цей діапазон $\omega_{заг}$ вимагає наступний діапазон кутових швидкостей двигуна:

$$\omega_{дв\ min} = \omega_{min} \cdot 4,4 = 10 \cdot 4,4 = 44\text{ рад/с;}$$

$$\omega_{дв\ max} = \omega_{max} \cdot 4,4 = 242\text{ рад/с.}$$

Згідно з паспортними даними двигун 2ПД100МУХЛ4 забезпечує номінальну кутову швидкість ротора

247 рад/с і дозволяє безступінчасто змінювати $\omega_{дв}$ у бік зменшення від 247 рад/с.

Таким чином, привід заготовки з двоступінчастою пасовою передачею забезпечує необхідні умови шліфування.

Для реалізації цих умов у приводі з одноступінчастою пасовою передачею, що забезпечує редукцію $i = 2,5$, необхідно, щоб двигун міг змінювати частоту обертання в таких межах:

$$\begin{aligned}\omega_{дв \min} &= \omega_{\min} \cdot 2,5 = 10 \cdot 2,5 = 25 \text{ рад/с;} \\ \omega_{дв \max} &= \omega_{\max} \cdot 2,5 = 55 \cdot 2,5 = 137,5 \text{ рад/с.}\end{aligned}$$

Такі частоти двигун 2ПД100МУХЛ4 забезпечує з помітним запасом на відміну від приводу з двоступінчастою пасовою передачею. У цьому приводі $\omega_{дв \max} = 242$ рад/с практично є граничною для двигуна, що застосовується.

Відомо [10], що одним із важливих факторів, що впливають на нагрівання заготовки при КНВШ, є окружна швидкість заготовки S . [10] показано, що збільшуючи S можна помітно зменшити максимальну контактну температуру поверхні заготовки.

Таким чином, привід з двоступінчастою пасовою передачею не дозволяє збільшувати S при шліфуванні заготовок з малим діаметром $d_3 = (30 \div 40)$ мм, а значить і зменшити їх нагрівання. Привід з одноступінчастою пасовою передачею дозволяє реалізувати цей ефект зменшення нагріву заготовки.

На рис. 7 показано схему приводу обертання заготовки на верстаті 3М152.

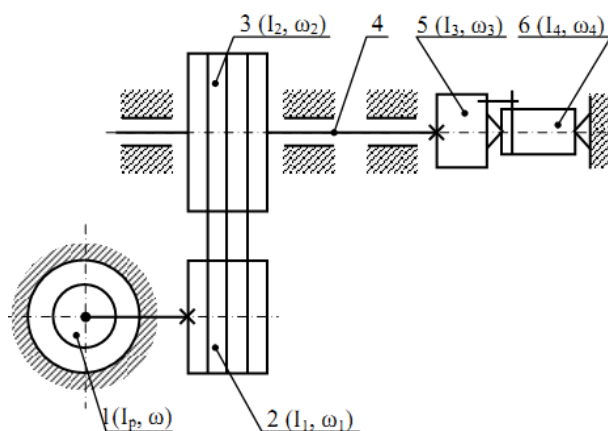


Рис. 7 – Схема приводу обертання заготовки верстата 3М152

1 – ротор; 2 – провідний шків; 3 – ведений шків; 4 – шпиндель; 5 – патрон повідковий; 6 – заготовка

Дослідження цього приводу, як і верстаті 3М151, проводили на основі ДУ, що описують рівновагу моментів кручення.

Біля цифрових позначень зосереджених мас у дужках стоять позначення моментів інерції та кутових швидкостей.

Оскільки двигун у порівнюваних приводах однаковий, то ДУ, що описують цей двигун і момент M_{y1} пружного зв'язку ротора зі шківом 2 такі ж як для верстата 3М151. Це рівняння (9). Інші рівняння отримані аналогічно як для приводу верстата 3М151 і вся система ДУ математичної моделі приводу обертання заготовки верстата 3М152 це система (18).

$$\left. \begin{aligned}L_r \dot{I}_r + I_r R_r + C_e \omega &= U; \\ I_p \dot{\omega} &= C_m I_r - M_{y1}; \\ M_{y1} &= C_1 (\omega - \omega_1); \\ i_1 \dot{\omega}_2 &= M_{y1} - M_{y2}; \\ M_{y2} &= C_2 (\omega_1 - \omega_2 \cdot i); \\ I_2 \dot{\omega}_2 &= M_{y2} - M_{y3}; \\ M_{y3} &= C_3 (\omega_2 - \omega_3); \\ I_3 \dot{\omega}_3 &= M_{y3} - M_{y4}; \\ M_{y4} &= C_4 (\omega_3 - \omega_4); \\ I_4 \dot{\omega}_4 &= M_{y4} - M_{\text{рез.}}\end{aligned} \right\} \quad (18)$$

В системі (18) невідомими є: C_2 - жорсткість на кручення ремінної передачі; I_1, I_2 – моменти інерції шківів. Останні визначені за кресленнями: $I_1 = 0,056 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $I_2 = 0,11 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Розрахунок C_2 виконаний за виразом (4) згідно наступних параметрів: профіль пасу O перерізом $F = 0,47 \text{ см}^2$; міжцентрова відстань $L = 38 \text{ см}$; кількість ременів $n = 3$; жорсткість на розтяг пасу $E = 2,45 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$; діаметр ведучого шківа $d_1 = 76 \text{ мм}$; діаметр веденого шківа $d_2 = 190 \text{ мм}$; $i = 190/76 = 2,5$.

Згідно (4) отримуємо $C_2 = 260 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}$ і таким чином є всі дані системи ДК (18). Для зручності користування системою (18) зберемо всі її параметри в таблицю 3.

Таблиця 3 – Параметри приводу заготівлі верстата 3М152

Група параметрів			
Моменти інерції згідно з рис. 6		Крутильна жорсткість пружного зв'язку між зосередженими масами	
Найменування та номер на рис. 6	Позначення та величина, кг·м ²	Найменування мас та їх номери на рис.6	Позначення та величина, Н·м/рад
Ротор 1	$I_p = 0,011$	Ротор 1 – шків 2	$C_1 = 3000$
Шків 2	$I_1 = 0,056$	Шків 2 – шків 3	$C_2 = 260$
Шків 3	$I_2 = 0,195$	Шків 3 – патрон 5	$C_3 = 6,66 \cdot 10^4$
Патрон 5	$I_3 = 0,085$	Патрон 5 - заготівка	$C_4 = 2,32 \cdot 10^5$
Заготівка	$I_4 = 0,018$		

Ввівши позначення $x_1 = I_p$; $x_2 = \omega$; $x_3 = M_{y1}$; $x_4 = \omega_1$; $x_5 = M_{y2}$; $x_6 = \omega_2$; $x_7 = M_{y3}$; $x_8 = \omega_3$; $x_9 = M_{y4}$; $x_{10} = \omega_4$. Представимо систему (18) в матричній формі:

$$\dot{X}_1 = A_1 \cdot X_1 + B_1 \cdot U, \quad (19)$$

Матриці рівняння (19) приведені на Рис. 8.

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{-1}{Te} & \frac{-Ce}{TeRe} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{Cm}{Ip} & 0 & \frac{-1}{Ip} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_1 & 0 & -C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_1} & 0 & \frac{-1}{I_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_2 & 0 & -C_{2i1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_2} & 0 & \frac{-1}{I_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_3 & 0 & -C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_3} & 0 & \frac{-1}{I_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_4 & 0 & -C_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_4} & 0 \end{bmatrix}; \quad \dot{X}_1 = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \end{bmatrix}; \quad X_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \end{bmatrix}; \quad B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{TeRe} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{I_4} \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} U \\ M_{pes} \end{bmatrix}$$

Рис. 8 – Матриці рівняння (19)

Виконавши перетворення Лапласа над (19) отримаємо:

$$X_1(s) = (s \cdot E - A_1)^{-1} \cdot B_1 \cdot U(s), \quad (20)$$

К (20) додаємо перетворений по Лапласу вектор виходу $Y_1(s)$:

$$Y_1(s) = C_1 \cdot X_1(s) + D \cdot U(s), \quad (21)$$

де матриця D дорівнює нулю.

Приймаючи в якості вихідної координати $x_{10} = \omega_4$ при впливі опору M_{py} матриця виходу C_1 буде наступною:

$$C_1 = 10, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 11.$$

Підставивши (20) в (21) отримаємо:

$$Y_1(s) = C_1(sE - A_1)^{-1} \cdot B_1 \cdot U(s);$$

і матрична передаточна функція буде наступною:

$$W_1(s) = \frac{Y_1(s)}{U(s)} = C_1(s \cdot E - A_1)^{-1} \cdot B_1, \quad (22)$$

На рис. 9 наведено роздрук розрахунку $W_1(s)$ і коренів характеристичного рівняння в пакеті «СС».

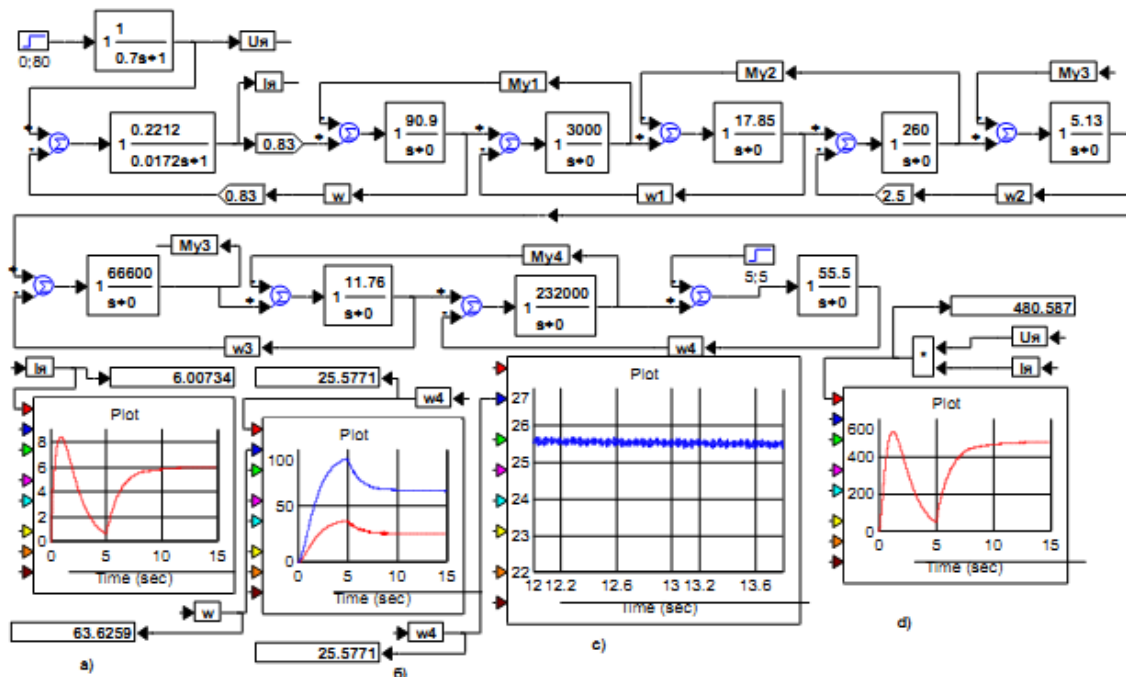


Рис. 11 – Структурна схема та результати моделювання приводу обертання заготовки верстата 3М152: а) – $I_a(t)$; б) – $\omega(t)$, $\omega_4(t)$; в) – $\omega_4(t)$; д) – $U_{я}(t) \cdot I_{я}(t)$

Вище динамічні характеристики порівнюваних приводів оцінювалися набором власних частот коливань (рис. 3 та рис. 9) та АЧХ на рис. 4 та рис. 10. Це порівняння не дозволяє віддати перевагу одному з порівнюваних приводів. Тому слід висновок, що динамічні характеристики приводів заготівлі верстатів 3М151 та 3М152 суттєво не відрізняються.

Висновки. Підсумовуючи виконане дослідження статичних і динамічних характеристик приводів заготовок верстатів 3М151 і 3М152 можна зробити такі висновки:

1. Привід заготівлі верстата 3М151 з двоступінчастою пасовою передачею не дозволяє виробляти КНВШ для заготовок малого діаметра (30÷40 мм) на окружній швидкості вище рекомендованої 50 м/хв. У той час, як збільшення цієї швидкості сприяє зменшенню максимальної контактної температури.

У той же час у верстаті 3М152 з одноступінчастою пасовою передачею в приводі заготовки підвищена окружна швидкість заготовок малого діаметра може бути реалізована. Таким чином, може бути реалізована важлива умова підвищення якості процесу шліфування.

2. КНВШ на верстаті з двоступінчастою клинопасовою передачею споживає в режимі шліфування в 1,5 рази більше енергії, ніж на верстаті з одноступінчастою пасовою передачею.

3. Конструкція приводу заготовки з двоступінчастою пасовою передачею складніша, ніж з одноступінчастою пасовою передачею і, отже, більш трудомістка у виготовленні.

4. За динамічними характеристиками перевага якогось із порівнюваних приводів не виявлено. Обидва приводи стійкі. Коріння характеристичних рівнянь передавальних функцій $W(1, 2) = \omega(s) / M_{рез}(s)$ (рис. 3) і $W1(s) = \omega_4(s) / M_{рез}(s)$ (рис. 9) знаходяться в лівій напівплощині коріння, тобто. дійсне коріння та дійсні частини комплексно-сполучених коренів негативні, що є необхідною та достатньою умовою стійкості.

Відповідно до пунктів 1, 2, 3, 4 загальних висновків слід, що перехід з двоступінчастої пасової передачі приводу заготовки в верстаті 3М151 на одноступінчасту в верстаті 3М152 є доцільним рішенням удосконалення процесу шліфування на середньому круглошліфувальному верстаті.

Список літератури

1. Ривин Е.И. Динамика приводов станков. М., «Машиностроение», 1966, 204 с.
2. Ч. Филипс, Р. Харбор. Системы управления с обратной связью. М. Лаборатория базовых знаний., 2001, 615 с.
3. Левин А.И. Математическое моделирование в исследовании и проектировании станков. М.: «Машиностроение», 1978, 183 с.
4. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Чайка Э.Г. Ушаков А.Н., Щербинина Т.Е. Расчет и исследование статических и динамических характеристик электродвигателя привода вращения заготовки круглошлифовального станка. – Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. № 2'2020, - 34-38 с.
5. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням. Навчальний посібник. – Київ. МДІАТ, 2003 – 383 с.
6. Галенко А.В., Чайка Э.Г. Элементы автоматизированного проектирования динамических САУ. Часть 2. Вычислительные программы исследования линейных моделей: Руководство по курсовому и дипломному проектированию. М.: МО СССР. 1991, 230 с.
7. Сизый Ю.А., Чайка Э.Г., Ушаков А.Н. Метод пространства состояний при исследовании и анализе крутильных колебаний привода вращения. «Вестник машиностроения», № 2, 2017, 3 – 7 с.
8. Справочник по электрическим машинам. В 2 Томах под общей редакцией Копылова И.П., Клокова Б.К. Том 1, Москва; Энергоатомиздат, 1988. – 258 с.
9. Справочник технолога-машиностроителя в 2-х томах. Том 2, под ред. Косиловой А.Г. и Р.К. Мещерякова. 4-е издание, переработанное и дополненное. – М: Машиностроение, 1985: - 469 с.

References (transliterated)

1. Rivin E.I. Dynamics of machine tool drives. M., "Mechanical Engineering", 1966, 204 p.
2. Charles Philips, R. Harbor. Feedback control systems. M. Laboratory of Basic Knowledge., 2001, 615 p.
3. Levin A.I. Mathematical modeling in the research and design of machine tools. M.: "Mechanical engineering", 1978, 183 p.
4. Sizy Yu.A., Stalinsky D.V., Chaika E.G., Ushakov A.N., Shcherbinina T.E. Calculation and study of the static and dynamic characteristics of the electric motor for rotating the workpiece of a circular grinding machine. - Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. No. 2'2020, - 34-38 p.
5. Petrakov Yu.V. Automatically control the processes of processing materials for designs. Navchalnyy pos_bnik. - Kiev. MDIAT, 2003 - 383 p.
6. Galenko A.V., Chaika E.G. Elements of automated design of dynamic ACS. Part 2. Computational programs for the study of linear models: A guide to course and degree design. M. : Ministry of Defense of the USSR. 1991, 230 p.
7. Sizy Yu.A., Chaika E.G., Ushakov A.N. State space method for research and analysis of torsional vibrations of a rotation drive. "Bulletin of mechanical engineering", No. 2, 2017, 3 - 7 p.
8. Handbook of electrical machines. In 2 Volumes, edited by I.P. Kopylov, B.K. Klovov. Volume 1, Moscow; Energoatomizdat, 1988. – 258 p.
9. Handbook of a technologist-mechanical engineer in 2 volumes. Volume 2, ed. Kosilova A.G. and R.K. Meshcheryakov. 4th edition, revised and enlarged. - M: Mechanical Engineering, 1985: - 469 p.
10. Sizy Yu.A., Stalinsky D.V. Dynamics and thermophysics of grinding. - Kh. : SE "UkrNTC" Energostal ", 2016. - 448 p.

Поступила (received) 07.01.2023

Відомості про авторів / Сведения про авторов / About the Authors

Сизий Юрій Анатолійович (Sizy Jury) – доктор технічних наук, ДП «УкрГТЦ «Енергосталь», м. Харків; тел.: + 38-066-788-24-41; e-meil: sisy.jurys@yandex.ua

Сталінський Дмитро Віталійович (Stalinsky Dmitry) – доктор технічних наук, генеральний директор ДП «УкрГТЦ «Енергосталь», м. Харків; тел.: + 38-067-578-13-77; e-meil: energostal@energostal.kharkov.ua

Євсюкова Фатима Магомедбійвна (Yevsiukova Fatyma) – доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299; e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru; ORCID: 0000-0002-9764-4106

Щербініна Тетяна Євгенівна (Shcherbinina Tatiana) – кандидат фіз.-мат наук, доцент кафедри прикладної математики НТУ «ХПІ», м. Харків; ; тел.: + 38-050-323-37-84; kurpa@kpi.kharkov.ua

Ушаков Олексій Олександрович (Ushakov Oleksiy) – магістр кафедри МТС МІТ НТУ «ХПІ», м. Харків; ; тел.: + 38-097-822-22-11; e-meil: parom38@yandex.ua

ПЕРМЯКОВ О.А., ЯКОВЕНКО І.Е., КАЛІНІЧЕНКО В.А., СКИБА О.С., ЮЖКОВИЧ П.

РЕВЕРСИВНИЙ ІНЖИНІРИНГ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ КОНТРОЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ

Автори, маючи кожен свій досвід наукової та практичної діяльності і накопичені знання з технології машинобудування, поставили собі за мету узагальнення та оцінку нових можливостей та альтернатив існуючим підходам до проектування технологічних процесів виготовлення або відновлення деталей в умовах реверсивного інжинірингу. Розглянуто сучасні технічні засоби, які є необхідними для виконання етапів реверсивного інжинірингу та забезпечують якість виготовлення і знижують трудомісткість технологічного проектування.

Ключові слова: реверсивний інжиніринг, технологічний процес, проектування, технічні засоби контрольних операцій.

PERMYAKOV O.A., YAKOVENKO I.E., KALINICHENKO V.A., SKIBA O.S., JOZKOWICZ P.

REVERSE ENGINEERING AND IMPLEMENTATION OF MODERN METHODS AND MEANS OF CONTROL OPERATIONS.

The authors, each with their own scientific and practical experience and accumulated knowledge of mechanical engineering technology, set themselves the goal of summarizing and evaluating new opportunities and alternatives to existing approaches to the design of technological processes of manufacturing or restoring parts in the conditions of reverse engineering. Modern technical means are considered, which are necessary for performing the stages of reverse engineering and ensure the quality of production and reduce the complexity of technological design

Keywords: reverse engineering, technological process, design, means of control operations.

Вступ. Автоматизація виробничого процесу проникає у всі галузі машинобудування, у всі ланки виробничого процесу, викликаючи в них якісні зміни, розкриваючи небачені раніше можливості зростання продуктивності праці, підвищення якості та збільшення випуску продукції, полегшення умов праці.

Сучасний розвиток інформаційних технологій у машинобудуванні надає нові можливості та альтернативу існуючим підходам до проектування технологічних процесів виготовлення або відновлення деталей. Завдяки розвитку сучасних технологій та сучасного обладнання машинобудування отримало такий потужний інструмент, як зворотний інжиніринг (реверс інжиніринг).

Реверсивний інжиніринг (реверс інжиніринг, зворотне проектування, reverse-engineering) – процес створення точної копії об'єкта за вже існуючим зразком. Зворотне проектування деталей потрібне, коли необхідне: відновлення втрачених деталей; відновлення зношених або деталей, що вийшли з ладу; збереження інформації про об'єкти для їхнього подальшого ремонту чи відтворення.

Реверс інжиніринг дуже корисний в інноваційній інженерній діяльності. Він важливий під час проведення дослідження механічних систем, що в подальшому вивченні за допомогою програмних засобів дозволяє виявити найбільш проблемні місця, які підлягають доопрацюванню чи модифікації, що скорочує час отримання інноваційних продуктів.

Аналіз досліджень та публікацій. Реверсивний інжиніринг не може існувати без відповідних програмних та технічних засобів. У наш час існує величезна кількість різноманітного високоточного обладнання та програмних засобів для проведення вхідного, міжопераційного та вихідного контролю (Inspection) деталей на виробництві, а також для проведення зворотного моделювання (reverse engineering). Нижче ми розглянемо декілька прикладів обладнання та програмних засобів (ПЗ), яке застосовується на підприємствах України та допомагає підтримувати конкурентоспроможність нашої продукції на світовому ринку.

Одним із основних етапів зворотного моделювання є процес 3D-сканування існуючого виробу. 3D-сканування об'єктів – це процес перетворення фізичної форми реального об'єкта на цифровий вигляд. При використанні певних технологій можливе збереження текстури і навіть кольору вихідного зразка. Таким чином, 3D модель необхідного виробу можна отримати без зайвих зусиль. 3D-сканування об'єктів допомагає підготувати необхідну модель до 3D-друку, або використовувати цю модель для інжинірингу. На даний момент існують такі методи сканування: контактний метод та безконтактний метод. Кожен із методів має свої плюси і мінуси, і вимагає використання відповідного обладнання.

Координатно-вимірювальна машина (КВМ) типу рука з лазерним сканером Hexagon MI ROMER (Франція)

КВМ типу рука Hexagon AbsoluteArm (рис.1) застосовується для вирішення задач контролю якості, інспекції, 3D-моделювання та зворотнього інжинірингу [1]. КВМ типу рука AbsoluteArm 7-Axis оснащена лазерним 3D-сканером, що робить її універсальним інструментом для швидкого об'ємного контролю поверхонь складної форми та створення високоточних 3D-моделей. Основні технічні характеристики:

- Сканування: лазер;
- Точність, мм: від 0,05;
- 3D — сітка: OBJ, STL та ін.;
- Вимірювання: DXF, IGS, STP та ін.;
- Хмара точок: TXT.

AbsoluteArm 7-Axis покриває наступні задачі:

- Контроль геометрії об'єктів;
- Перевірка деталей на відповідність кресленням;
- Порівняння з САД-моделлю;

- Зворотне моделювання;
- Відновлення втрачених моделей та креслень;
- Обмір зубчастих коліс та шестерень будь-якого типу і розміру;
- Серійний контроль виробів.

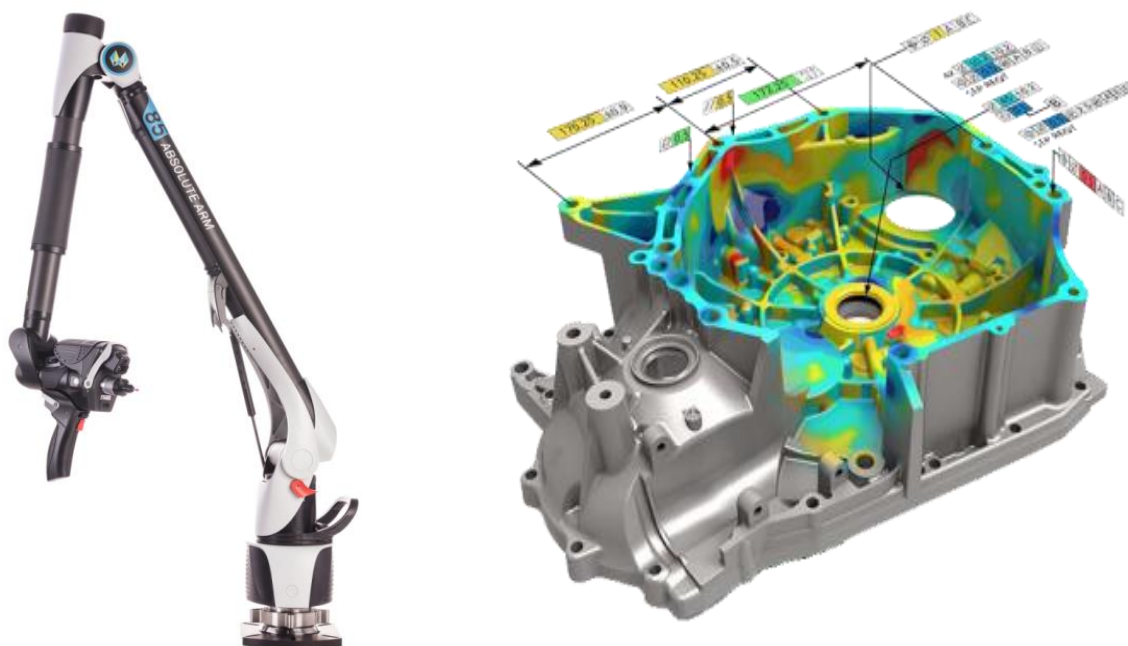


Рис.1 – КВМ типу рука HexagonAbsoluteArm та приклад деталі для якої виконується контроль геометрії

Координатно-вимірювальні машини HEXAGON MI DEA (Італія)

КВМ серії DEA GLOBAL (рис.2) розроблені спеціально для досягнення максимальної продуктивності при високій точності вимірів від 0,1 мкм.

Машини здатні вирішити найскладніші завдання метрологічного контролю та зворотного моделювання контактним методом. Основні технічні характеристики:

- Діапазони вимірювання, мм: від 500×700×500 до 6000×10000×4000;
- Точність вимірювання, мкм: від 0,5 (мкм) + L (мм)/1000;
- Результат вимірювання: звіт в текстовому та/або графічному вигляді;
- Сканування: тактильне, сплайнове.

Скануюча КВМ абсолютно незамінна при вирішенні задачі отримання геометричної інформації про поверхні, форма яких підбирається експериментально на моделях (наприклад, в авіа- та автомобілебудуванні). За результатами вимірювання дослідного зразка (або моделі) уточнюється технічна документація, складається керуюча програма для верстата з ЧПК. Дуже ефективним є застосування системи сканування спільно з фрезерним верстатом з ЧПК або обробним центром. [2]



Рис. 2 – КВМ серії DEA GLOBAL

Абсолютний трекер LEICA AT500 від HEXAGON MI (Швейцарія)

Абсолютний трекер LEICA AT500 - портативна КВМ для вимірювань великогабаритних деталей з високою точністю. Завдяки діапазону роботи у радіусі 160 метрів від станції система широко застосовується в авіабудуванні, важкому машинобудуванні, суднобудуванні та ін. [3]. Основні технічні характеристики:

- Діапазони вимірювання, м: 0,8 – 320;
- Точність вимірювання: 15 мкм + 6 мкм/м;
- Ступінь захисту: IP54;
- Робоча температура, °C: від -15 до +45;
- Результат: звіт в текстовому та/або графічному вигляді;
- Сканування: тактильне, сплайнове.



Рис. 3 – КВМ LEICA AT500

Оптичні сканери Artec 3D (США)

3D-сканери ArtecLeo, ArtecEva та SpaceSpider (рис.4) ідеально підходять для професійного використання. Вони сканують дуже швидко та з великою розподільною здатністю, що дозволяє отримати 3D-моделі високої якості не застосовуючи великих зусиль за короткий проміжок часу. Сканери ArtecLeo та ArtecEva дозволяють швидко та точно відсканувати об'єкти великих розмірів (включно до розмірів автомобіля). Сканер SpaceSpider створено спеціально для отримання високоточних моделей невеликих об'єктів з високою деталізацією.

Технологія тривимірного сканування, розроблена компанією Artec 3D, дозволяє з високою точністю та швидкістю отримувати інформацію про поверхню об'єктів (глибини), використовуючи принцип структурованого підсвічування, а вбудована у сканер фотокамера фіксує текстуру об'єкта. Завдяки такому технічному рішенню, 3D-сканери Artec дозволяють отримувати високоточні повнокольорові комп'ютерні моделі складних об'єктів [4]. Основні технічні характеристики:

- Точність, мм: від 0,05;
- Текстура: так;
- 3D-формат: OBJ, WRL, STL;
- Вимірювання: CSV, DXF, XML;
- Хмара точок: BTX, PTX.



Рис. 3 – 3D-сканери ArtecLeo, ArtecEva та SpaceSpider

Приклад сканування кронштейну за допомогою КВМ типу рука AbsoluteArm 7-Axis з подальшим моделюванням (реверс інжинірингом) в ПЗ GeomagicDesign X

Даний кронштейн було відскановано за допомогою КВМ типу рука AbsoluteArm 7-Axis оснащеною лазерним 3D-сканером RS-5 (точність сканування 0,028 мм) (рис.1).

Для отримання замкнутої моделі деталей необхідно було відсканувати з усіх боків. Програмне забезпечення сканера PolyWorks здійснює відображення процесу сканування у реальному часі, що дозволяє визначити те, що вже відскановано та майбутній обсяг роботи (рис. 6а). Після сканування деталі у двох положеннях упевнившись, що обидві групи містять спільну геометрію для роботи алгоритму вирівнювання, можна приступати безпосередньо до вирівнювання. Програмне забезпечення PolyWorks дозволяє виконувати вирівнювання відсканованих частин за загальною геометрією. Програмно визначається найкраще положення сканів у просторі з мінімальною відстанню між точками в цих сканах. Після завершення процедури вирівнювання ми отримуємо набір сканів, які максимально відповідають початковій деталі. Для подальшої роботи скани необхідно перетворити на полігональну модель. По суті, алгоритм виконує перетворення («склеювання») набору сканів у полігональну модель (рис.5а).



Рис. 4– Процес сканування кронштейну

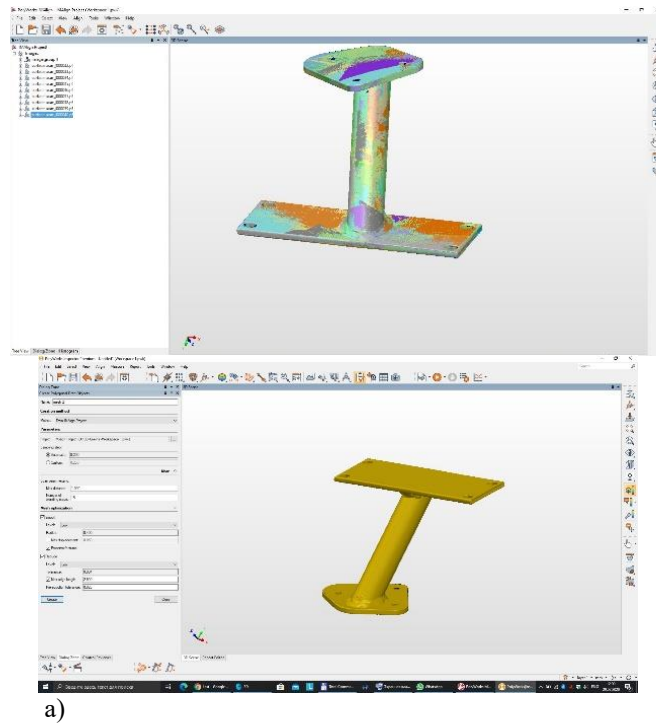


Рис. 5– Робота в ПЗ PolyWorks: а) робота зі сирими даними; б) готова полігональна модель

Для створення твердотільної параметричної моделі було використано ПЗ GeomagicDesign X (рис.6). GeomagicDesign X розроблено спеціально для роботи з полігональними моделями та для конвертування 3D-сканів в високоякісні моделі САПР з геометричною параметризацією. Це єдине в своєму роді ПО з автоматичним або покроковим створенням параметричної моделі, неймовірно точним суміщенням поверхонь 3D-сканів органічних об'єктів, можливістю редагування полігональних сіток і обробки хмари точок. За допомогою GeomagicDesign X тепер можна сканувати практично будь-який об'єкт і створювати готові до виробництва моделі. В даному ПЗ можливо робити не тільки твердотільне моделювання, а також поверхневе та моделювання за допомогою NURBS- кривих.

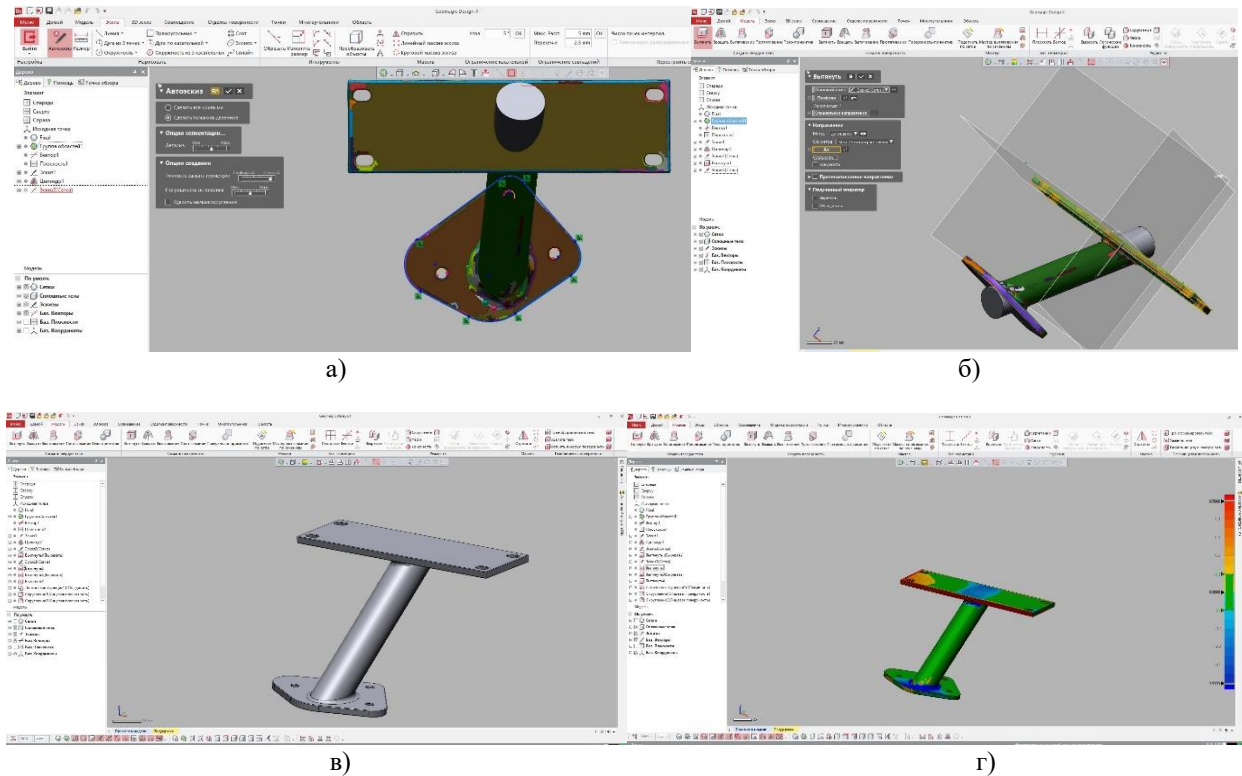


Рис.6– Робота в ПЗ GeomagicDesign X: а) створення ескізів за допомогою функції «ескіз за сіткою»; б) створення окремих твердотільних елементів; в) готова твердотільна модель; г) перевірка точності триманої твердотільної моделі відносно полігональної

Контроль та аналіз точності виготовлення деталі складної форми можна виконати за допомогою так званого порівняння отриманої геометрії з еталонною CAD-моделью (Inspection). Цей метод дозволяє значно пришвидшити вихідний контроль виробів криволінійних об'єктів, які раніше контролювались тільки за допомогою шаблонів.

Спочатку необхідно відсканувати готову деталь, яку ми отримали за допомогою механічної обробки або 3Д-друку, для одержання їх полігональної моделі. Другим кроком буде завантаження stl-моделі та CAD-моделі у ПЗ "GOM Inspect" чи PolyWorksInspector. Там їх необхідно вирівняти між собою, робимо це за допомогою функції best-fit (рис.7).



Рис.7 – Вирівняні stl-моделі щодо CAD-моделей за допомогою функції best-fit

Далі проводимо аналіз якості виготовлення за допомогою контролю відхилення поверхні stl-моделі щодо CAD-моделі. Результатам аналізу є карта відхилень, контрольні точки якої представлені на рисунку 8. Карта відхилень може бути надана у декількох представленнях: кольорова карта з діаграмою відхилень збоку вікна перегляду або додатково можна встановити маркери у точках, які нас цікавлять. Маркери дозволяють нам побачити числове значення невідповідності у конкретному місці, що полегшує аналіз результатів деталі на відповідність.

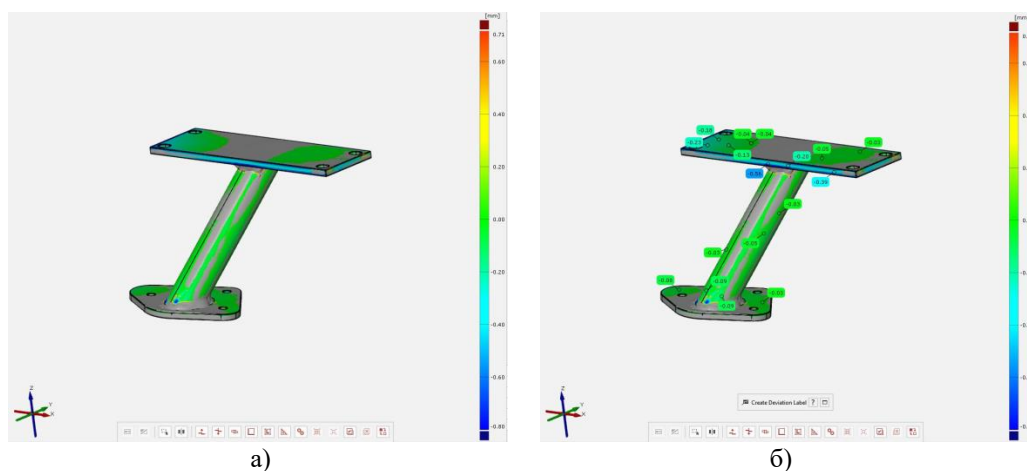


Рис.8 – Карта відхилень деталі: а) кольорова карта відхилень; б) кольорова карта з додатковими маркерами, що вказують числове значення невідповідності.

Після інспекшну результати збираються у протокол контролю, який можна прикріпити до кожної із перевірених деталей. Цей сучасний варіант контролю в декілька разів точніший та швидший за перевірку за допомогою шаблонів і дозволяє скоротити склад шаблонів майже до нуля, що зменшує витрати підприємства на обслуговування та зберігання шаблонів.

В роботі [5] наведено яскравий приклад впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій технологічного процесу як основи забезпечення якості і скорочення циклів виготовлення деталей. В процесі освоєння у виробництві лопаток парових турбін з титану замість нержавіючої сталі виникало чимало проблем. У зв'язку з тим, що лопатка має складний профіль і після виготовлення повинна відповідати конструкторській документації по точності геометричних розмірів від 0,3 до 0,03 мм, то в процесі її виготовлення є велика кількість контрольних операцій: контроль розмірів і форми по необхідній кількості розрізів.

Існуючий метод контролю плоскими шаблонами у спеціальному пристрою (стапелю) є не ефективним, він затратний по металоємкості і не зовсім може відповідати вимогам по точності виконання вимірів. Також

на проектування і виготовлення стапелю з шаблонами витрачається багато часу (до 4-х місяців), також, кількість одиниць оснастки може сягати до 50 найменувань і ця оснастка не може бути використана для іншого типорозміру, для іншої лопатки, тобто не є універсальною.

Для титанової лопатки виникла необхідність вхідного контролю заготовки (штамповки) з можливістю реверсного інжинірингу. Заготовка титанової лопатки майже в 5 разів дорожча від сталевий, тому припуски на механічну обробку необхідно звести до мінімально допустимих, при цьому виникає нова задача забезпечення рівномірності припуску на поверхні пера лопатки, що має складний профіль. Для цього було змінено структуру нового технологічного процесу і впроваджено контрольні і розміточні операції деталей складного профілю (рис.10) для забезпечення рівномірності припуску за допомогою координатно-виміральної машини типу рука FARO PRIME 1.2M (Швейцарія) з наступними основними технічними характеристиками:

Діапазон вимірювання	до 1200 мм;
Об'ємна точність довжини	$\pm 0,025$ мм;
Повторюваність точки	$\pm 0,016$ мм;
Дискретність	$\pm 0,001$ мм;
Маса	5,5 кг.

В комплекті є сучасний ноутбук з програмним забезпеченням DelcamPowerInspect для контролю та реверсного інжинірингу.

Ефект від впровадження методів і засобів контрольних операцій технологічного процесу полягає в наступному:

1. Суттєво знижено трудомісткість контрольних операцій та собівартість виготовлення шляхом відмови від дорогої спеціальної оснастки та необхідності виготовлення еталонних деталей, скорочено виробничі цикли.

2. Забезпечено підвищення якості виготовлення титанових лопаток для парових турбін за рахунок використання 3D моделей лопаток замість еталонних деталей-копіїв, точність яких саме лімітує це.

3. Засоби контролю є універсальними для лопаток, глободних черв'яків та інших деталей турбін на будь-якому етапі їх виготовлення.



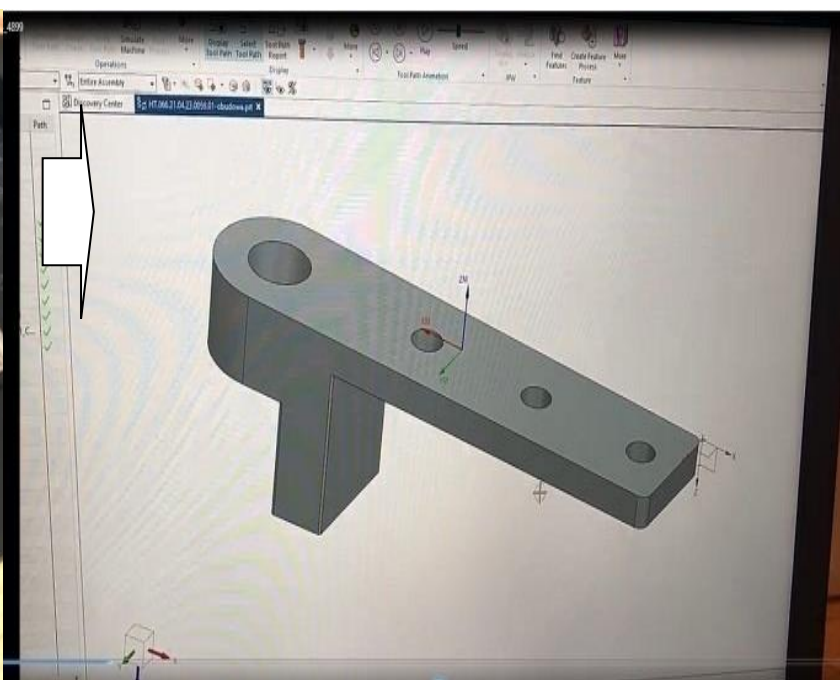
Рис.9 - Контроль титанових лопаток

Можливість створення 3D-моделей виробів методами ручного комп'ютерного графічного дизайну або за рахунок 3D-сканування, їх подальший експорт до САМ систем та використання методів традиційного субтрактивного виробництва (на основі верстатів з ЧПК) або методів адитивного виробництва (3D-друк) значно спрощує процес технологічного проектування та виготовлення деталі (рис.10).

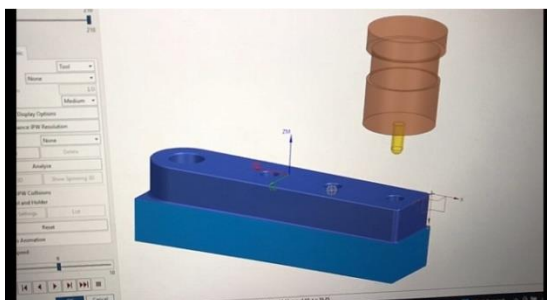
Аналіз зношеної деталі



Створення 3D CAD моделі



Експорт до САМ системи



Використання методів
традиційного субтрактивного виробництва
(на основі верстатів з ЧПК)

або

адитивного виробництва (3D-друк)

Виробництво (верстат з ЧПК)

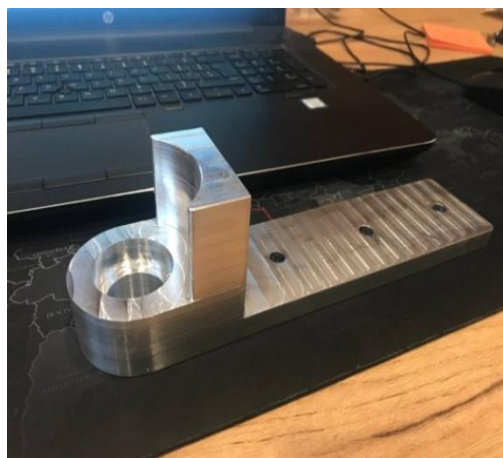


Рис. 10 – Реверсивний інжиніринг - створення точної копії об'єкта за вже існуючим зразком

Польська фірма HERMES TECHNIC [6] є компанією з багаторічним досвідом, яка займається широкими послугами в галузі металообробки, серійним і несерійним виробництвом, у тому числі регенерацією та ремонтом. Звичайною практикою став саме реверсивний інжиніринг зношених деталей за багаторазово перевіреною послідовністю (рис.11). Після аналізу деталі, відновлену копію якої необхідно отримати, створюється її 3D-модель методами ручного комп'ютерного графічного дизайну. Цей підхід є раціональним для нескладних деталей коли їх розміри є можливість отримати за допомогою звичайного мірального інструменту. Подальший експорт 3D-моделі до САМ системи дозволяє згенерувати керуючу програму та виконати обробку на відповідному верстаті з ЧПК.

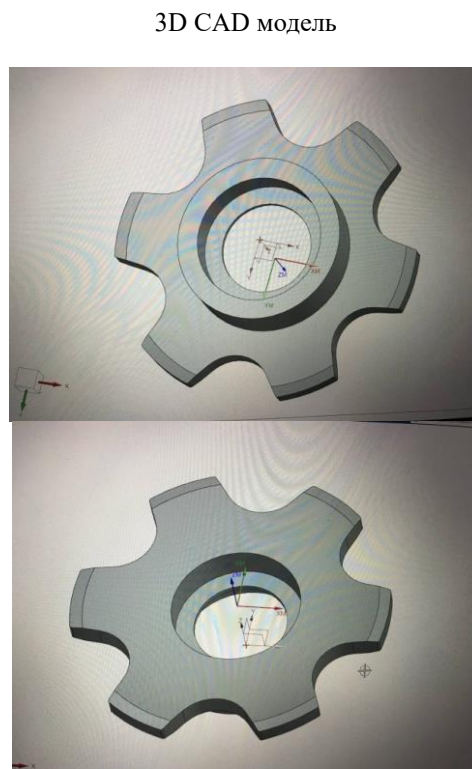


Рис. 11– Послідовність створення відновленої копії зношеної деталі

Висновки. Реверсивний інжиніринг прискорює та спрощує виробничі процеси. За допомогою сучасних високоточних технічних рішень (3D-сканерів та програмного забезпечення) метод забезпечує кілька важливих переваг:

Швидкість - багаторазове прискорення вимірювань порівняно з класичним методом, від кількох днів за кілька годин чи хвилин;

Точність – сканування дозволяє уникнути накопиченої помилки при знятті розмірів;

Універсальність - відтворення геометрії будь-якої складності та виробу практично будь-яких габаритів;

Контроль при проектуванні – швидка та наочна перевірка відхилення геометрії виробу від 3D-моделі у спеціалізованих програмах.

Слід вважати за доцільне вивчення, засвоєння та впровадження в практику роботи інженерів-механіків-технологів сучасного обладнання та програмних засобів для реалізації реверсивного інжинірингу на підприємствах машинобудівної галузі. Відповідно при підготовці фахівців за спеціальностями 131-Прикладна механіка та 133-Галузеве машинобудування виникає потреба у підготовці та викладанні окремого лекційного курсу та створення необхідної лабораторної бази для його забезпечення.

Список літератури:

1. <http://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=1158>; <https://hexagon.com/products/absolute-arm-7-axis>.
2. <https://hexagon.com/products/global-touch>; <http://www.koda.ua/ukr/products/desc.html?id=1291>.
3. <http://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=1262>; <https://hexagon.com/products/leica-absolute-tracker-at500>.
4. <http://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=812>; <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners>.
5. Іщенко Г.І. Технологічне забезпечення якості виготовлення складнопрофільних поверхонь турбінних лопаток з титанових сплавів: дис. на здобуття наук. ступ. кан. тех. наук 05.02.08 – технологія машинобудування. – Харків: НТУ«ХП», 2021 – 184 с.
6. <https://www.hermes-technic.pl/>
7. Петраков Ю.В. Технології виготовлення деталей складної форми. Частина 1: навч. посіб. / Ю.В. Петраков, С.В. Сохань, В.К. Фролов, В.М. Кореньков. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 288 с.

References (transliterated)

1. <http://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=1158>; <https://hexagon.com/products/absolute-arm-7-axis>.
2. <https://hexagon.com/products/global-touch>; <http://www.koda.ua/ukr/products/desc.html?id=1291>.
3. <http://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=1262>; <https://hexagon.com/products/leica-absolute-tracker-at500>.
4. <http://www.koda.ua/ukr/products/group.html?id=812>; <https://www.artec3d.com/portable-3d-scanners>.
5. Ishchenko H.I. Tekhnolohichne zabezpechennia yakosti vyhotovlennia slozhnoprofilnykh poverkhon turbinykh lopatok z tytanovykh splaviv: dys. na zdobuttia nauk. stup. kan. tekhn. nauk 05.02.08 – tekhnolohiia mashynobuduvannia. – Kharkiv: NTU«KhPI», 2021 – 184 s.
6. <https://www.hermes-technic.pl/>
7. Petrakov Yu.V. Tekhnolohii vyhotovlennia detalei skladnoi formy. Chastyna 1: navch. posib. / Yu.V. Petrakov, S.V. Sokhan, V.K. Frolov, V.M. Korenkov. – Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2020. – 288 s.

Поступила (received) 10.02.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пермяков Олександр Анатолійович (Permyakov Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: perm_a@i.ua, ORCID: 0000-0002-9589-0194

Яковенко Ігор Едуардович (Yakovenko Ihor) – кандидат технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м.Харків; +38 (057) 707-66-34; e-mail: igor.dych59@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8344-996X

Скиба Олександр Сергійович (Skyba Oleksandr) – начальник групи сервісу верстатів УА ТОВ ФІРМА «КОДА», м. Харків; e-mail: a.skyba@koda.ua; тел. +38(096) 53 222 37

Калініченко Віктор Анатолійович (Kalinichenko Viktor) – Начальник ВТК, Метролог вищої категорії: довжина, неруйнівний контроль, ISO/IEC 17025 УА ТОВ ФІРМА «КОДА», м. Харків, e-mail: kalinichenko@koda.ua; тел. +38(096) 619 09 95

Пшемислав Южкович (Przemyslaw Józkowicz) - HERMES TECHNIC, м.Легница, Польща; +48 512 137 836; e-mail: pjozkowicz@wp.pl

СТЕПАНОВ М.С., ЛИТОВЧЕНКО П.І., ІВАНОВА М.С., КОРНІЄНКО В.О., ІВАНОВА Л.П., ФРАНЦУЗОВ В.І.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИСТКИ МОР В БАРАБАННИХ МАГНІТНИХ СЕПАРАТОРАХ НА ВАЛЬЦЕШЛІФУВАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ

Шліфування валків прокатних станів - трудомісткий і тривалий процес, що супроводжується рясною подачею МОР у зону різання. При цьому ефективність процесу шліфування залежить також і від якості очищення МОР, яке забезпечується обраним способом очищення і конструкцією очисного пристрою: зокрема – магнітного сепаратора. У зв'язку з чим, досліджено процес очистки в магнітних сепараторах забрудненої МОР при шліфуванні валків прокатних станів, розглянуто та проаналізовано конструкції магнітних сепараторів, які використовуються для видалення забруднень з МОР. Розглянуто методи оцінки ефективності очистки магнітного сепаратора СМ5-МА і встановлено вплив концентрації забруднень на ступінь очистки. Виконано аналіз ефективного перерізу сепаратора СМ5-МА, при якому досліджено вплив швидкості проходження МОР і параметрів перерізу на якість очистки. Сформульовані напрямки і рекомендації по підвищенню ефективності конструкції барабанних магнітних сепараторів, що забезпечать зменшення питомих витрат на очистку 1 м³/г МОР при покращенні параметрів ступеня і тонкості очистки.

Ключові слова: концентрація механічних домішок, тонкість очистки, ступінь очистки МОР, критерії очистки, швидкість проходження МОР, магнітний барабан, ефективний переріз.

**STEPANOV M.S., LITOVCHENKO P.I., IVANOVA M.S., KORNIENKO V.A., IVANOVA L.P., FRANZUSOV V.I.
INCREASING THE EFFICIENCY OF COOLANT CLEANING IN DRUM MAGNETIC SEPARATORS ON ROLL GRINDING MACHINES**

Grinding of rolls of rolling mills is a laborious and lengthy process, accompanied by abundant supply of coolant to the cutting zone. At the same time, the efficiency of the grinding process also depends on the quality of coolant cleaning, which is ensured by the chosen cleaning method and the design of the cleaning device: in particular, a magnetic separator. In connection with this, the process of cleaning contaminated coolant in magnetic separators during grinding of rolls of rolling mills is studied, the designs of magnetic separators used to remove contaminated coolant are examined and analyzed. The methods of evaluating the effectiveness of the cleaning of the magnetic separator CM5-MA were considered, and the effect of the concentration of pollutants on the degree of cleaning was established. An analysis of the effective cross-section of the CM5-MA separator was carried out, during which the influence of the speed of coolant passage and cross-section parameters on the quality of cleaning was investigated. Directions and recommendations for increasing the design efficiency of magnetic drum separators have been formulated, which will ensure a reduction in specific costs for cleaning 1 m³/g of coolant while improving the parameters of the degree and fineness of cleaning.

Key words: concentration of mechanical impurities, fineness of cleaning, degree of cleaning of coolant, criteria of cleaning, speed of passage of coolant, magnetic drum, effective section.

1. Вступ. Застосування високоефективних МОР при шліфуванні валків прокатних станів не гарантує отримання максимального результату. Для найбільш повного використання потенційних можливостей МОР необхідна ефективна очистка її від механічних домішок, що накопичуються в системі застосування МОР в процесі обробки. Відомо, що вищеназвані домішки знижують, з однієї сторони, термін експлуатації МОР, а з другої сторони – погіршують параметри шліфування і якість отриманої поверхні.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Інтенсифікувати процес очистки МОР можна за рахунок використання енергетичної дії на рідину, що забруднена механічними домішками. До таких способів можна віднести дію, в тому числі, магнітних полів [1]. Для попередньої магнітної обробки МОР можна використовувати магнітні очисники, якщо вони забезпечують необхідні для покращення очистки параметри магнітного поля, в основному, його напруженість.

Установлено [2], що магнітна обробка МОР, яка забруднена механічними домішками, сприяє підвищенню ступеня очистки через фільтропапір.

Ефективність очистки від механічних домішок у магнітних очисниках залежить від напруженості магнітного поля, швидкості течії рідини, її в'язкості, розташування силових полів відносно напрямку руху потоку рідини та інших факторів. При дії магнітного поля на МОР, зусилля, яке притягує частинку в магнітне поле змінної напруженості, змінюється, і може поблизу полюса магніту перевищити силу ваги частинки в декілька тисяч разів.

Ефективність магнітної очистки визначається співвідношенням сил, що діють на частинку механічних домішок і залежить від розміру частинок.

Таких сил можна виділити дві: сила відриву та магнітна сила.

Сила відриву з боку потоку рідини, як сила лобового опору, визначається за формулою [3]:

$$F_p = 0,5 \rho_{\text{МОР}} k_c V_{\text{МОР-ч}}^2 S_q, \quad (1)$$

де $\rho_{\text{МОР}}$ – густина очищеної МОР; k_c – коефіцієнт лобового опору; $V_{\text{МОР-ч}}$ – швидкість МОР відносно частинки; S_q – площа проекції частинки на площину, нормальну до осі X, яка паралельна потоку рідини.

Магнітна сила визначається за формулою [4]:

$$F_M = \chi H_m \frac{dH_m}{dx} W_q, \quad (2)$$

де χ – об’ємна магнітна сприйнятливність; H_m – напруженість магнітного поля у місці знаходження частинки; W_q – об’єм частинки.

Аналіз [5] показав, що зі зменшенням розміру частинок, сила F_M убуває швидше, ніж сила F_p . Для дотримання умови, при якій не відбудеться відрив частинки, що закріпилася, від барабана магнітного сепаратора ($F_M \geq F_p$), слід або збільшити напруженість магнітного поля вздовж сепаратора, або зменшити швидкість течії МОР.

Таким чином, важливим фактором, який впливає на процес магнітної очистки, є режим течії МОР у робочому зазорі магнітного сепаратора. При цьому, турбулентний режим перешкоджає магнітному осадженню частинок.

В роботі [6] стверджується, що у патронному магнітному сепараторі на ступінь очистки МОР від частинок розміром менше 5 мкм впливає відстань між патронами в ряду. При її збільшенні з 2 до 10 мм ступінь очистки зменшується з 75 до 15%, тобто геометричні параметри сепаратора є факторами, що впливають на ступінь очистки.

Ступінь очистки у магнітному очиснику залежить від швидкості течії рідини. Зменшення швидкості течії рідини сприяє зменшенню тонкості очистки (рис. 1) [7].

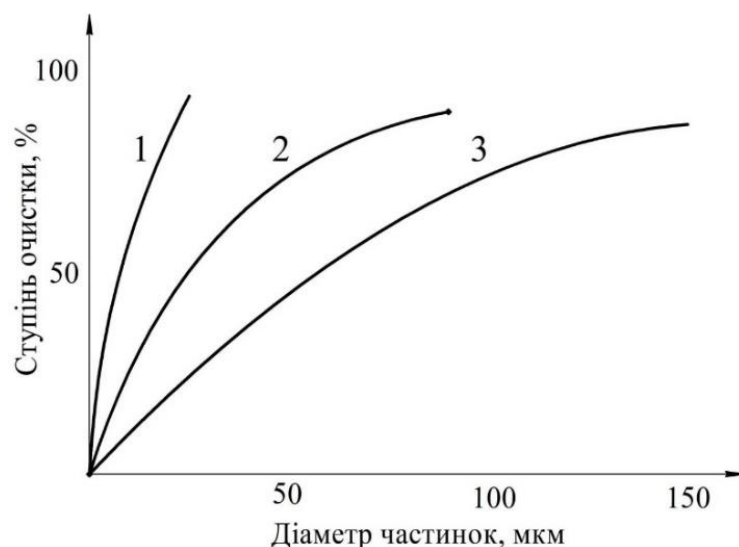


Рис. 1 – Вплив витрати рідини через магнітний очисник на ступінь очистки частинок різного розміру: 1 – 1/4 номінальної витрати; 2 – номінальна витрата; 3 – подвійна номінальна витрата

При проектуванні магнітних сепараторів для очистки МОР можна використовувати постійні магніти з литих сплавів АН, АНК, АНКО з різною конфігурацією, наприклад, кільцеві, багатополюсні, призматичні з циліндричною полюсною поверхнею і ін. [8, 9].

Барабан магнітного сепаратора може уявляти з себе набір ферито-барієвих магнітних елементів (6БИ240). Ферит барія уявляє собою хімічну сполуку $Ba \cdot 6Fe_2 \cdot O_3$, кристали якого мають гексагональну атомну структуру і одне переважне намагнічування, паралельне гексагональній осі.

Технологія виготовлення барієвих магнітів, особливо ізотропних, не є складною і подібна технології виготовлення керамічних деталей, що дає можливість отримати оптимальну для прийнятої конструкції сепаратора форму магнітного елемента.

Для підвищення ефективності магнітних очисників за рахунок збільшення площі взаємодії магнітного елемента з робочою рідиною, зменшення швидкості рідини при збереженні параметрів магнітів, отримали поширення різноманітні форми магнітних елементів. Наприклад, відомі конструкції, в яких магнітні елементи виконано у вигляді зірочок, що утворюють своїми западинами серію проточних каналів, по яким рухається рідина.

Дослідження [10] показують, що підвищення ефективності магнітних сепараторів з постійними магнітами можливе за рахунок підтримання визначеного функціонального стану об’єкту сепарації, яке досягається його попередньою обробкою.

Запропоновано [11] новий тип відкритого градієнтного магнітного сепаратора з використанням кількох джерел магнітного поля, зокрема з використанням квадрупольного електромагніту, що дозволяє здійснити безперервний поділ парамагнітних частинок діаметром у кілька десятків мікрометрів.

Дослідження магнітних елементів різної форми показали, що еліптичні елементи забезпечують більші на 10-15 % значення складових магнітної індукції у порівнянні з кільцевими, однак, щоб уникнути ускладнень конструктивного і технологічного характеру, найбільш доцільно використовувати магнітні елементи саме кільцевої і дискової форми для патронних магнітних сепараторів [12]. В магнітному сепараторі СМ5-МА в середині барабана закріплено постійні магніти в кількості 24 штуки, які мають арочну дугоподібну форму.

При магнітній очистці МОР металеві частинки, які коагулюють, захоплюють із собою неметалевий шлам (абразивні частинки, які є відходами і продуктами зносу шліфувального круга).

Технологія і техніка очистки МОР, в тому числі, в барабаних магнітних сепараторів, постійно удосконалюються [13].

В результаті досліджень встановлено оптимальні режими очистки МОР в барабанному магнітному сепараторі СМЗМА: $V=1-2$ м/с, концентрація шламу в МОР 25-30% [14].

Між тим, дослідження очистки МОР в магнітних пристроях показали і інші результати. За даними [15] ступінь очистки МОР при швидкості $V=1$ м/с частинки діаметром $d=10$ мкм, складає 60%. В той же час, при швидкості $V=0,2$ м/с ступінь очистки підвищується до 98%.

Барабанні магнітні сепаратори, що випускаються серійно, є дешевими, однак забезпечують гірші (у порівнянні з іншими магнітними очисниками) значення тонкості і ступеня очистки при високих капітальних затратах на очистку $1 \text{ м}^3/\text{год}$. Це пояснюється деякими конструктивними особливостями, а саме, малим ефективним робочим перерізом [12].

Крім усього іншого дуже важливу роль для продуктивності очистки має видалення шламу. У деяких наукових роботах [16] стверджується, що основним недоліком пристроїв для магнітної сепарації на постійних магнітах є складність розвантаження видалених феромагнітних включень, що потребує розробки нових варіантів конструкцій пристроїв. У роботі [17] запропоновано конструкцію магнітного сепаратора для очищення МОР від феромагнітних частинок, спорядженого пристроєм для очистки шламозбірних циліндричних магнітних дисків при задовільній продуктивності.

Таким чином, спираючись на розглянуті результати досліджень, можна зробити висновок, що актуальною проблемою очистки МОР при шліфуванні вальців прокатних станів є низька ефективність процесу, що проявляється у нестабільних показниках ступені і тонкості очистки МОР.

3. Мета дослідження. Проаналізувати процеси очистки у магнітних сепараторах барабанного типу, встановити фактори, що впливають на продуктивність і якість очистки і розробити рекомендації щодо вдосконалення конструкцій барабаних магнітних сепараторів і параметрів очистки.

4. Викладення основного матеріалу. Головною особливістю експлуатації барабаних магнітних сепараторів для очистки МОР на вальцешліфувальних верстатах є їхня робота в екстремальних умовах. Вказані умови визначаються значним машинним часом обробки, підвищеною забрудненістю МОР і великими об'ємами рідини, що проходять через сепаратор. У зв'язку з цим у системах застосування МОР можуть виникати відмови (рис.2 і табл.1).



Рис. 2 – Експлуатаційні характеристики магнітних сепараторів

При роботі із водоемульсійними МОР рекомендують відтискний валик знімати [18]. Однак, в умовах значних витрат МОР з підвищеною забрудненістю це може привести до підвищеної вологості шламу, який виділяється.

Особливо цей процес інтенсифікується в умовах обробки із самозаточуванням шліфувального круга [19].

За даними [12], барабанні магнітні сепаратори, що випускаються серійно, є найдешевшими пристроями серед магнітних очисників МОР, однак мають найгіршу ефективність очистки МОР внаслідок конструктивних особливостей – малого ефективного перерізу (рис. 3.) При цьому питомі капітальні витрати на очистку $1 \text{ м}^3/\text{год}$ самі високі.

Таблиця 1 – Технічні характеристики барабаних магнітних сепараторів для очистки МОР шліфувальних верстатів

Параметри	Умовні позначення сепараторів		
	СМ5-МА	МСА240	X43-45
Номінальна продуктивність дм ³ /хв	200	240	200
Діапазон температури МОР, °С	10-55	1-70	10-55
Кінематична в'язкість МОР при температурі 20°С, мм ² /с	1,405-1,408		
Температура навколишнього середовища, °С	1-40		
Магнітна система	24*	170**	
МОР	3-5% розчин емульсора у воді		
Габаритні розміри, мм	564x728x680(454)	285x525x296	240x730x300

* – кількість магнітів; ** – діаметр магнітного елемента, мм

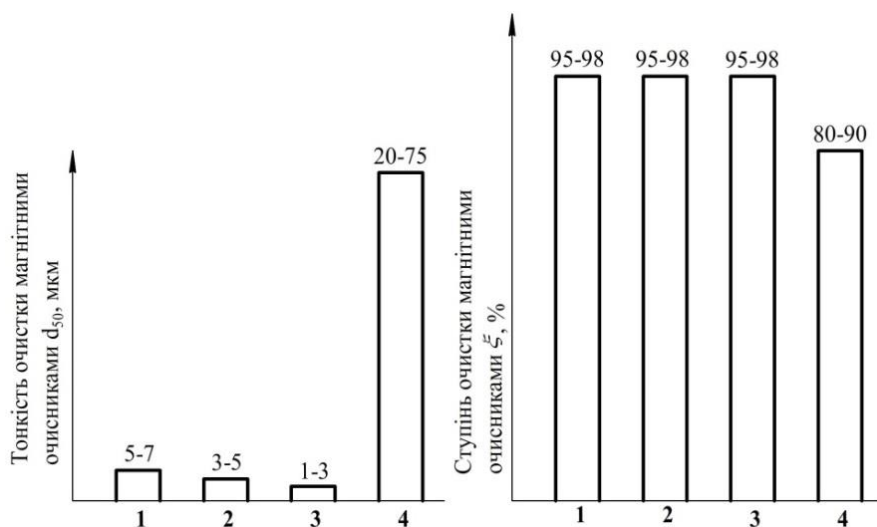


Рис. 3 – Ефективність очистки МОР магнітними очисниками: 1, 2, 3 і 4 – електромагнітний, ланцюговий, касетний і барабанный сепаратори [8]

В роботі [20] за допомогою числового моделювання отримано результати розрахунку барабанного магнітного сепаратора на постійних магнітах. При визначенні ступеня очистки МОР використовували ваговий і гранулометричний аналіз. Ваговий аналіз проводили двома методами.

Перший метод передбачав одночасне взяття проб МОР об'ємом 100 мл на вході у магнітний сепаратор (на виході з верстата) і на його виході. Концентрація забруднень визначалася шляхом фільтрування МОР через спеціальний папір з розміром пор у ньому 5-10 мкм с наступною сушкою і зважуванням забруднених фільтрів.

При використанні другого методу, фільтри, що володіють значною пропускною здатністю, встановлювалися перед і після магнітного сепаратора. Протягом визначеного часу t_c увесь об'єм МОР, що витікає з верстата проходить через фільтри з розміром пор 25-30 мкм. При цьому забезпечується максимальна витрата МОР [10].

Ступінь очистки по другому методу визначається за формулою:

$$\xi = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100\% , \quad (3)$$

де m_1 – маса забрудненого фільтра на вході сепаратора, г; m_2 – маса забрудненого фільтра на виході із сепаратора, г.

Гранулометричний склад оцінювали із застосуванням мікроскопічного аналізу і спеціальної методики [7].

Результати досліджень ефективності очистки магнітного сепаратора СМ5-МА (рис. 4) свідчать про наступне: при збільшенні концентрації забруднень у МОР від 0,37 до 1,05 г/дм³ ступінь очистки збільшується від 59,46 до 88,57%. Подальше збільшення концентрації механічних домішок до 2,1 г/дм³ призводить до зниження ступеню очистки до 76,19%. По оцінці ступеня очистки обидва методи дали практично ідентичні результати.

При використанні другого методу ступінь очистки складає 90,2% (розбіг результатів склав біля 1,5%),

що показано на рис. 5.

При розгляданні проб під мікроскопом, встановлено, що частинки розміром 15-20 мкм і більше сепаратор відбирає практично повністю (рис. 6). Кількість і розмір абразивних частинок залишається практично без змін.

На рис. 7 приведено мікрофотографії проб МОР, відібрані до (рис. 7, а) і після (рис. 7, б) магнітного сепаратора.

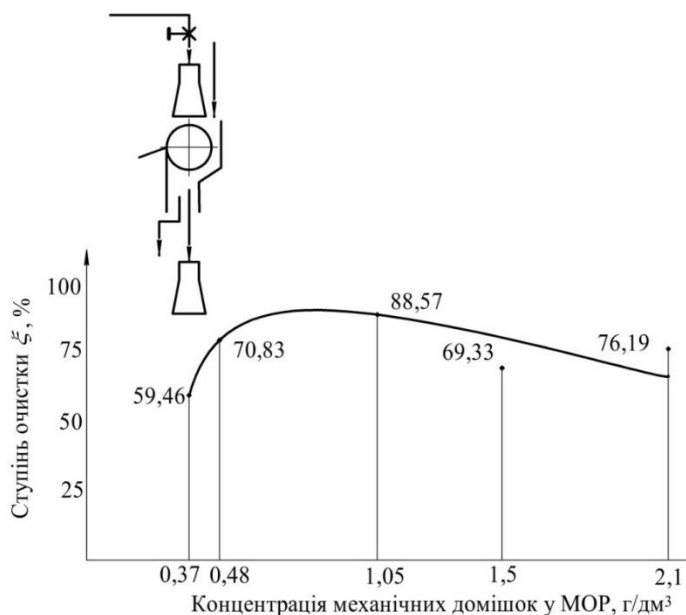


Рис. 4 – Вплив концентрації механічних домішок, що містяться в МОР, на ступінь очистки магнітним сепаратором СМ5-МА

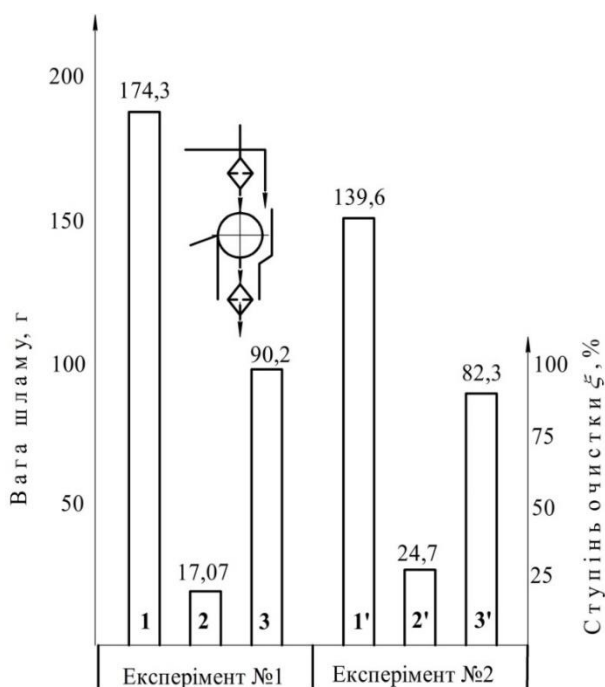


Рис. 5 – Дослідження ефективності очистки МОР магнітним сепаратором: 1 і 2 – вага шламу, г, на фільтрі перед і після магнітного сепаратора, відповідно; 3 – ступінь очистки.

Аналіз ефективного перерізу сепаратора СМ5-МА свідчить про те, що площину його завищено мінімум в 2,5 рази за рахунок ширини.

Збільшення ширини зазору негативно відбивалося на очисній можливості сепаратора. Однак, незважаючи на це, швидкість потоку в зазорі у півтори рази більше за необхідну.

Максимальна ефективність магнітної очистки від дрібнодисперсних частинок при ширині зазору 0,01 м і швидкості проходження МОР повинна складати 0,1 м/с.

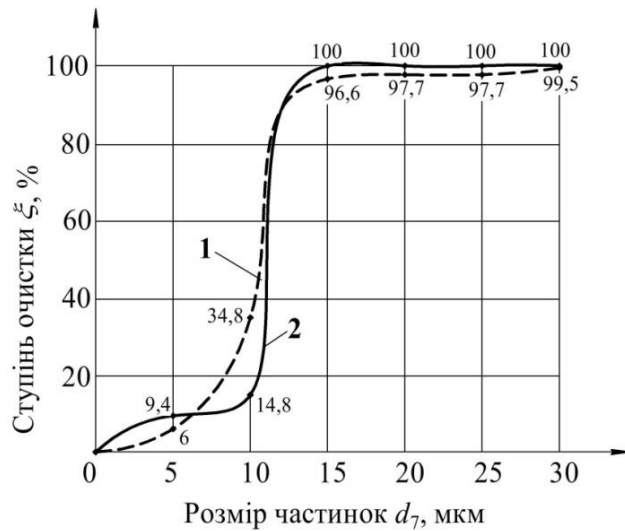


Рис. 6 – Графік зміни ступеню очистки магнітного сепаратора CM5-MA : 1 і 2 – номер експерименту

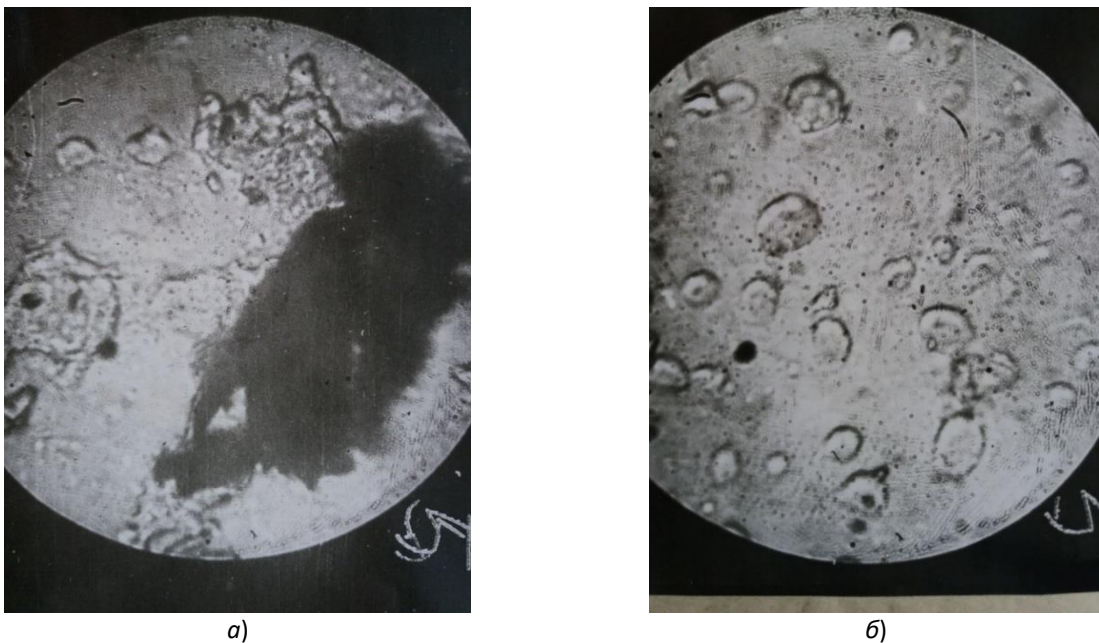


Рис. 7 – Мікрофотографії проб МОР, які відібрано на вході а) і на виході б) магнітного сепаратора.

Задавши дані значення швидкості потоку МОР, можна визначити площу ефективного перерізу по формулі:

$$S_{7c} = \frac{Q_{MOP}}{V_{MOP}} \quad (4)$$

Нескладні розрахунки показують, що для сепаратора CM5-MA ці вимоги не виконуються. При дотриманні цих умов довжина магнітного барабана може досягати 3 м, що в 3 рази більше, ніж у відомих аналогічних конструкцій.

Якщо при мінімальній швидкості потоку (0,01-0,02 м/с) МОР у зазорі не забезпечується задана ступінь очистки, тоді збільшують напруженість магнітного поля H за рахунок збільшення діаметру магнітного елемента.

Зауважимо, що зменшення швидкості потоку МОР до 0,01 м/с призводить до ще більш значного збільшення габаритів барабана і сепаратора в цілому.

Проведені дослідження і досвід експлуатації очисників МОР на вальцешліфувальних верстатах дозволили визначити основні напрямки підвищення ефективності очистки в магнітних сепараторах (рис. 8).

Спираючись на вказані напрямки розроблено нові конструкції барабаних магнітних сепараторів, які забезпечують зменшення питомих витрат на очистку 1 м³/г МОР при покращенні параметрів ступеня і тонкості очистки.



Рис. 8 – Основні напрямки підвищення ефективності очистки МОР в барабаних магнітних сепараторах

Висновки.

1. Досліджено процес очистки в магнітних сепараторах забрудненої МОР при шліфуванні валків прокатних станів, що обумовлено їхньою роботою в екстремальних умовах великим об'ємом потрібної МОР, тривалим машинним часом обробки, підвищеною забрудненістю МОР.

2. Розглянуто та проаналізовано конструкції магнітних сепараторів, які використовуються для видалення забруднень з МОР при роботі на вальцешліфувальних верстатах. Систематизовано їхні характеристики з точки зору їх переваг, недоліків і можливих експлуатаційних несправностей.

3. Розглянуто два методи оцінки ефективності очистки магнітного сепаратора СМ5-МА, які показали, що при збільшенні концентрації забруднень у МОР від 0,37 до 1,05 г/дм³ ступінь очистки збільшується від 59,46 до 88,57%. Подальше збільшення концентрації механічних домішок до 2,1 г/дм³ призводить до зниження ступеню очистки до 76, 19%.

4. Проведено аналіз ефективного перерізу сепаратора СМ5-МА, який показав, що площа його завищена мінімум в 2,5 рази за рахунок ширини. При цьому збільшення ширини зазору негативно впливає на очисні можливості сепаратора при тому, що швидкість потоку в зазорі у півтори рази більше за необхідну. Максимальна ефективність магнітної очистки від дрібнодисперсних частинок при ширині зазору 0,01 м і швидкості проходження МОР 0,1 м/с. Крім того, при невеликій швидкості потоку МОР (до 0,01 м/с) необхідно значно збільшувати габарити сепаратора в цілому.

5. За результатами досліджень сформульовано напрямки і рекомендації по підвищенню ефективності конструкції барабаних магнітних сепараторів, що забезпечать зменшення питомих витрат на очистку 1 м³/г МОР при покращенні параметрів ступеня і тонкості очистки.

Список літератури:

- Бердичевский Е.Г. Смазочно-охлаждающие средства для обработки материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
- Бульжев Е.М. К вопросу оптимизации режимов работы аппаратов для магнитной обработки СОЖ, загрязненных механическими примесями при шлифовании. Физико-химическая механика процесса трения. – НГУ, Иваново, 1977. – С. 63-65.
- Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергия, 1975. – 600 с.
- Полиградиентные магнитные сепараторы. Под. общ. ред. Мясникова Н.Ф. – М.: Недра, 1973. – 158 с.
- Сандуляк А.В., Федоткин И.М. Магнитное обезжелезивание конденсата. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 88 с.
- Наумова Н.Н. Эффективность очистки СОЖ от частиц размером менее 5 мкм в кассетном патронном магнитном сепараторе / Вестник УлГТУ, 4/2006. С. 40-53.
- Коновалов В.М., Скрицкий В.Я. Рокшевский В.А. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
- Гавриш А.П. Шлифование и доводка магнитных материалов. – М.: Машиностроение, 1985. – 118 с.
- Худобин Л.В., Бударин А.М., Сальковский Ф.М. и др. Технология обработки высокоэффективных магнитных сплавов. – М.: Энергия, 1989. – 184 с.
- T. Dimova, V. Arahamian, M. Marinova and M. Streblau, "Increasing the efficiency of permanent magnet separators by maintenance of certain functional state of the object of separation," 2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA.2014.6871849.
- S. Fukui et al., "Study on open gradient magnetic separation using multiple magnetic field sources," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 12, no. 1, pp. 959-962, March 2002, doi: 10.1109/TASC.2002.1018559.
- Бульжев Е.М., Худобин Л.В. Ресурсо-сберегающее применение смазочно-охлаждающих жидкостей при металлообработке. – М.: Машиностроение, 2004. – 352 с.
- Климов Е.С., Литвиненко А.И., Назаров С.В. Технология очистки отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей от ферромагнитных примесей. – Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2009. №5. – С. 99-101.
- Михайлов Н.Д. Эффективность селективной сепарации шлама от заточки твердосплавного инструмента с применением СОЖ. Смазочно-охлаждающие средства в процессе абразивной обработки. Сб. науч. трудов. – Ульяновск, 1988. – С.96-101.
- Бульжев Е.М., Вельмисов П.А., Решетников Ю.А. и др. Математическое моделирование процесса очистки СОЖ в патронном магнитном сепараторе. Смазочно-охлаждающие средства в процессе абразивной обработки. Сб. науч. трудов. – Ульяновск, 1992. – С.71-77.
- Шведчикова И.А., Мелконова И.В. Экспериментальная проверка трудоспособности дискового магнитного сепаратора новой конструкции. Вісник Східноукр. національн. ун-та ім. В. Даля. – 2019. – №1 – С. 125-130.
- Литвиненко А.Н., Сулейманов И.Р., Ягудин Д.Р. Разработка магнитного сепаратора для очистки смазочно-охлаждающих жидкостей от ферромагнитных частиц/«Молодой учёный», 2010 г. Том 1. № 5 (16). – С. 77-80.
- Худобин Л.В., Бердичевский Е.Г. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке. Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1977. – 189 с.
- Пермяков А.А., Жижев А.А. Повышение эффективности предварительного шлифования прокатных валков за счет восстановления режущей способности круга без правки. Вісник Сев. НТУ. Сер. Машинобудування та транспорт. Вип. 118. 2011. – С. 113-118.

30. Лозин А.А., Арсенюк В.М., Петровский Е.Б. Использование информационных технологий при расчете и моделировании стационарных магнитных систем в конструировании сепараторов на постоянных магнитах / Горный журнал, 2004, №5. – С. 64-68.

References (transliterated)

1. Berdichevskiy Ye.G. Smazochno-okhlazhdayushchiye sredstva dlya obrabotki materialov: Spravochnik. – M.: Mashinostroyeniye, 1984. – 224 s.
2. Bulyzhev Ye.M. K voprosu optimizatsii rezhimov raboty apparatov dlya magnitnoy obrabotki SOZH, zagryaznennykh mekhanicheskimi primesyami pri shlifovanii. Fiziko-khimicheskaya mekhanika protsessa treniya. – NGU, Ivanovo, 1977. – S. 63-65.
3. Chugayev R.R. Gidravlika. – L.: Energiya, 1975. – 600 s.
4. Poligradiyentnyye magnitnyye separatory. Pod. obsh. red. Myasnikova N.F. – M.: Nedra, 1973. – 158 s.
5. Candulyak A.V., Fedotkin I.M. Magnitnoye obezhelezivaniye kondensata. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 88 s.
6. Naumova N.N. Effektivnost' ochistki SOZH ot chastits razmerom meneye 5 mkm v kassetnom patronnom magnitnom separatore / Vestnik UIGTU, 4/2006. С. 40-53.
7. Konovalov V.M., Skritskiy V.YA. Rokshevskiy V.A. Ochistka rabochikh zhidkostey v gidroprivodakh stankov. – M.: Mashinostroyeniye, 1975. – 288 s.
8. Gavrish A.P. Shlifovaniye i dovodka magnitnykh materialov. – M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 118 s.
9. Khudobin L.V., Budarin A.M., Sal'kovskiy F.M. i dr. Tekhnologiya obrabotki vysokoeffektivnykh magnitnykh splavov. – M.: Energiya, 1989. – 184 s.
10. T. Dimova, B. Aprahamian, M. Marinova and M. Streblau, "Increasing the efficiency of permanent magnet separators by maintenance of certain functional state of the object of separation," 2014 18th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), Bourgas, Bulgaria, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA.2014.6871849.
11. S. Fukui et al., "Study on open gradient magnetic separation using multiple magnetic field sources," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 12, no. 1, pp. 959-962, March 2002, doi: 10.1109/TASC.2002.1018559.
12. Bulyzhev Ye.M., Khudobin L.V. Resurso-sberegayushcheye primeneniye smazochno-okhlazhdayushchikh zhidkostey pri metalloobrabotke. – M.: Mashinostroyeniye, 2004. – 352 s.
13. Klimov Ye.S., Litvinenko A.I., Nazarov S.V. Tekhnologiya ochistki otrabotannykh smazochno-okhlazhdayushchikh zhidkostey ot ferromagnitnykh primesey. – Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskkiye nauki. – 2009. №5. – S. 99-101.
14. Mikhaylov N.D.. Effektivnost' selektivnoy separatsii shlama ot zatochki tverdosplavnogo instrumenta s primeneniym SOZH. Smazochno-okhlazhdayushchiye sredstva v protsesse abrazivnoy obrabotki. Sb. nauch. trudov. – Ul'yanovsk, 1988. – S.96-101.
15. Bulyzhev Ye.M., Vel'misov P.A., Reshetnikov YU.A. i dr. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa ochistki protsessa ochistki SOZH v patronnom magnitnom separatore. Smazochno-okhlazhdayushchiye sredstva v protsesse abrazivnoy obrabotki. Sb. nauch. trudov. – Ul'yanovsk, 1992. – S.71-77.
16. Shvedchikova I.A., Melkonova I.V. Eksperimental'naya proverka trudosposobnosti diskovogo magnitnogo separatora novoy konstruksii. Visnik Skhidnoukr. natsional'n. un-ta im. V. Dalya.–2019.–№1– S. 125-130.
17. Litvinenko A.N., Suleymanov I.R., Yagudin D.R. Razrabotka magnitnogo separatora dlya ochistki smazochno-okhlazhdayushchikh zhidkostey ot ferromagnitnykh chastits/«Molodoy uchonyy», 2010 g. Tom I . № 5 (16). – S. 77-80.
18. Khudobin L.V., Berdichevskiy Ye.G. Tekhnika primeneniya smazochno-okhlazhdayushchikh sredstv v metalloobrabotke. Spravochnoye posobiye. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 189 s.
19. Permyakov A.A., Zhizhev A.A. Povysheniye effektivnosti predvaritel'nogo shlifovaniya prokatnykh valkov za schet vosstanovleniya rezhushchey sposobnosti kruga bez pravki. Visnik Sev. NTU. Ser. Mashinobuduvannya ta transport. Vip. 118. 2011. – S. 113-118.
20. Lozin A.A., Arsenyuk V.M., Petrovskiy Ye.B. Ispol'zovaniye informatsionnykh tekhnologiy pri raschete i modelirovanii statsionarnykh magnitnykh sistem v konstruirovanii separatorov na postoyannykh magnetakh / Gornyy zhurnal, 2004, №5. – S. 64-68.

Поступила (received) 31.01.2023

Відомості про авторів / About the Authors

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

Літовченко Петро Іванович (Petro Litovchenko) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4483-597X>, тел. 063-141-65-97, e-mail: pilitovchenko1950@gmail.com.

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

Корнієнко Володимир Олександрович (Volodymyr Korniienko), студент гр. МІТ-М222в Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4141-2972>; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: korney130893@gmail.com.

Іванова Лариса Петрівна (Larysa Ivanova) – старший викладач кафедри інженерної механіки Національної академії Національної гвардії України, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2390-7372>, e-mail: larisanangu@gmail.com.

Французов Віктор Іванович (Viktor Franzusov), старший викладач кафедри «Деталі машин та пневмогідросистеми» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2285-2568>; тел.: 063-393-80-82. e-mail: frantsuzov952@gmail.com.

САЄНКО О.Ф., ГУБСЬКИЙ С.О., ЧУХЛІБ В.Л., СЕРГІЄНКО М.Є., КОЛІСНИК К.Д.

ПІДХІД ДО ЗМЕНШЕННЯ КІЛЬКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПЕРЕХОДІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ГНУТИХ ПРОФІЛІВ

У статті проведено узагальнюючий огляд підходів до зменшення кількості технологічних переходів при зменшенні виробництва гнутих профілів. Розглянуті різні методи виробництва гнутих профілів, враховуючи вимоги до кінцевого виробу. Розроблено калібрування виготовлення коритного профілю за двома схемами калібрування. Цей розрахунок дозволяє ефективно здійснювати процес виробництва гнутих профілів і допомагає зменшити кількість технологічних переходів, що вимагаються для досягнення бажаного результату. Проведено моделювання виробництва коритного профілю та побудовані графіки, що ілюструють процес виготовлення профілю. Це дозволило візуалізувати різні аспекти технологічного процесу та з'ясувати, які методи та схеми калібрування є найбільш ефективними для досягнення мети. На основі отриманих даних були наведені обґрунтовані висновки. Ці висновки вказують на те, які підходи та методи виробництва гнутих профілів є раціональними при зменшенні кількості технологічних переходів. Результати дослідження можуть бути корисними для промислових підприємств, що займаються виробництвом гнутих профілів, допомагаючи їм обрати найбільш ефективні методи та схеми калібрування для покращення виробничого процесу та зниження витрат.

Ключові слова: профіль, гнуття, кліть, напруження, деформація, перехід, моделювання.

**SAIENKO O. F., HUBSKYI S. O., CHUKHLIB V. L., SERGIENKO N. Ye., KOLISNYK K. D.
APPROACH TO REDUCING THE NUMBER OF TECHNOLOGICAL TRANSITIONS IN THE PRODUCTION OF BENT PROFILES**

The article provides a generalized overview of approaches to reducing the number of technological transitions when reducing the production of bent profiles. In particular, various methods of producing bent profiles are considered, taking into account the requirements for the final product. The calculation of calibration of the production of trough profiles according to two calibration schemes has been developed. This calculation allows for an efficient production process of bent profiles and helps to reduce the number of technological transitions required to achieve the desired result. The production of a trough profile was modeled and graphs illustrating the profile manufacturing process were created. This made it possible to visualize various aspects of the technological process and find out which methods and calibration schemes are most effective for achieving the goal. Based on the data obtained, reasonable conclusions were drawn. These conclusions indicate which approaches and methods for producing bent profiles are optimal when reducing the number of process transitions. The results of the study can be useful for industrial enterprises engaged in the production of bent profiles, helping them to choose the most effective methods and calibration schemes to improve the production process and reduce costs.

Keywords: profile, bending, stand, stress, deformation, transition, modeling.

1. Вступ. Гнуті профілі - це елементи конструкцій, отримані шляхом вигину металевих листів або інших матеріалів. Гнуті профілі мають різну форму і розмір, вони можуть бути круглими, квадратними, прямокутними, овальними та інших форм, залежно від вимог конкретної конструкції [1].

Гнуті профілі використовуються в різних галузях промисловості, таких як будівництво, автомобільна і залізнична промисловість, машинобудування тощо [2].

Для виготовлення гнутих профілів в масовому виробництві зазвичай використовують спеціальне обладнання, таке як профілезгинальні стани. Вони можуть обробляти великі листи металу і виробляти гнуті профілі у великих обсягах і з високою точністю. Також використовують ручне згинання для невеликих профілів.

2. Методи виробництва гнутих профілів. Існує кілька методів виробництва гнутих профілів, які застосовуються залежно від вимог до кінцевого виробу, його розмірів, форми і матеріалу. Розглянемо основні методи виробництва гнутих профілів [1, 3, 4].

Гаряче згинання - метод, за якого профіль нагрівається до високої температури і згинається під дією спеціального обладнання. Цей метод дає змогу домогтися високої точності вигину, особливо під час роботи з великими профілями.

Холодне згинання - метод, за якого профіль згинається без попереднього нагрівання. Цей метод найбільш поширений для виготовлення гнутих профілів з легких металів, таких як алюміній або сталь.

Радіальне згинання - метод, за якого профіль згинається навколо центральної вісі. Цей метод зазвичай застосовується для виготовлення круглих або овальних профілів.

Профільне згинання - метод, за якого профіль згинається в площині профілю. Цей метод застосовується для виготовлення профілів з нерівномірною геометрією.

Згинання на вальцях - метод, за якого профіль прокатується між валками, що обертаються, і згинається відповідно до їхньої форми. Цей метод часто використовується для виготовлення гнутих профілів з товстостістого металу.

Згинання на згинальних машинах - метод, за якого профіль згинають на спеціальному обладнанні - згинальній машині. Цей метод дає змогу домогтися високої точності вигину і застосовується для виготовлення складних форм і великих профілів.

Кожен метод має свої переваги та обмеження, і вибір методу залежить від вимог до кінцевого виробу.

3. Розрахунок калібрування виготовлення коритного профілю. Кількість переходів гнутих профілів - це кількість точок вигину, через які проходить профіль під час його виробництва. Воно визначається відповідно до міжнародних стандартів, таких як ASTM (American Society for Testing and Materials) або EN (European Standards), які встановлюють вимоги до виробництва гнутих профілів.

Для визначення кількості переходів гнутих профілів використовуються різні методи, включаючи аналітичні розрахунки та експериментальні випробування [1, 5].

© О.Ф. Саєнко, С.О. Губський, В.Л. Чухліб, М.Є. Сергієнко, К.Д. Колісник, 2023

В аналітичному методі кількість переходів розраховується на основі геометричних параметрів профілю, таких як його довжина, радіус вигину та товщина стінки. Експериментальний метод полягає у вимірі кількості переходів на готовому гнучому профілі за допомогою спеціального інструменту.

Визначення кількості переходів гнутих профілів має важливе значення для оцінки їхньої якості та відповідності вимогам проекту. Чим більше кількість переходів, тим складнішою є форма профілю, що може вплинути на його міцність та стійкість у конструкції. Оптимальна кількість переходів залежить від конкретних вимог проекту та може бути визначена на основі досвіду та експертизи фахівців у галузі виробництва гнутих профілів [6].

Для подальшого дослідження було обрано калібрування валків для виробництва коритного профіля, який має геометричні розміри 34 x 19 x 27,5 x 2 мм, Сталь 10 (рис. 1). Розрахунок буде виконуватися за двома схемами калібрування з такими переходами 0°-10°-18°-30°-42°-54°-66°-78°-88°-90° (10 переходів) та 0°-10°-30°-54°-78°-88°-90° (7 переходів).

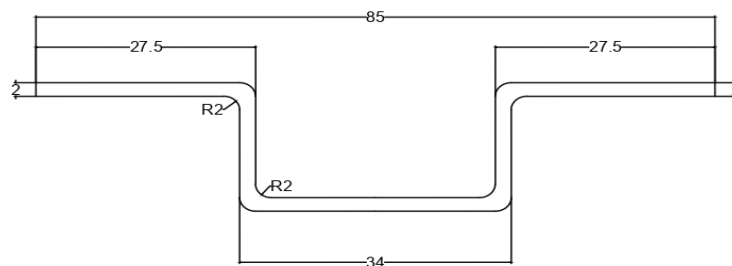


Рис. 1 – Коритний профіль, який має геометричні розміри 34 x 19 x 27,5 x 2 мм

При проектуванні профілю необхідно визначити ширину заготовки. Передбачається, що теоретична нейтральна вісь загнутої заготовки переміщується від середини товщини до внутрішнього краю заготовки, як показано на рис. 2 [1].

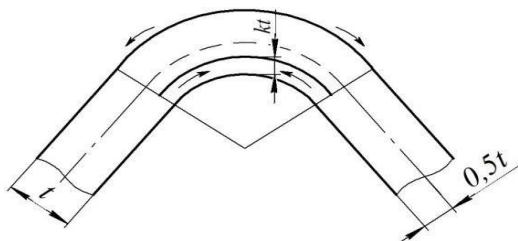


Рис. 2 – Теоретичне переміщення нейтральної вісі при згинанні заготовки

Нове положення при згинанні нейтральної вісі характеризується k -фактором (коефіцієнт зміщення нейтрального шару). Наприклад, k -фактор низьковуглецевих сталей, радіус згину яких рівний товщині заготовки, дорівнює приблизно 0,33 [7].

У дійсності при згинанні переміщення нейтральної вісі відбувається таким чином, як зображено на рис. 3.

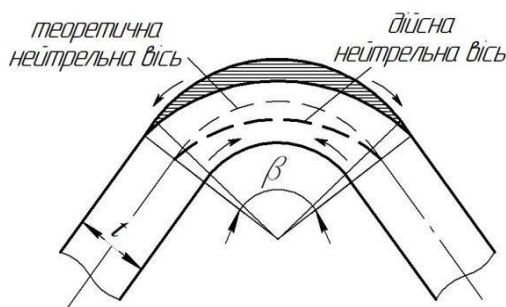


Рис. 3 – Дійсне переміщення нейтральної вісі при згинанні заготовки

Основними чинниками, що впливають на k -фактор – внутрішній радіус згинання, товщина матеріалу та механічні властивості металу.

Ширину заготовки можна визначити аналітичним, графоаналітичним або графічним методами. Вибір методу розрахунку залежить від складності перерізу профілю. Ширину заготовки зазвичай визначають за довжиною нейтрального шару профілю, який як умовно прийнято, не піддається деформації від згинання і поперечної витяжки. Результати розрахунків корегують з врахуванням потоншення металу в місцях згинання та поперечної витяжки [7, 8].

При визначенні ширини заготовки аналітичним методом переріз профілю ділять на елементарні ділянки, сума ширин яких є шириною заготовки (1)

$$L = \sum L_{\Pi} + \sum L_3, \quad (1)$$

де L – ширина заготовки, мм; $\sum L_{\Pi}$ – сума ширин прямолінійних ділянок, мм; $\sum L_3$ – сума ширин ділянок заокруглень, мм.

Загалом, за конструкцією комплект профілезгинальних валків розділяють на три групи. До першої та другої відносять валки, що виконують функцію підгинання до сумарного кута 30° та більше 30° , до 85° відповідно. До третьої групи відносять оздоблювальні валки.

Щоб розрахувати калібрування валків першої групи необхідно обрати спосіб калібрування та намітити положення профіля по відношенню до вісей валків. Далі необхідно визначити режим профілювання, що характеризується кутами підгинання.

Розглянемо калібрування валків для профілювання профілю по третьому методу (рис. 4) [7, 8].

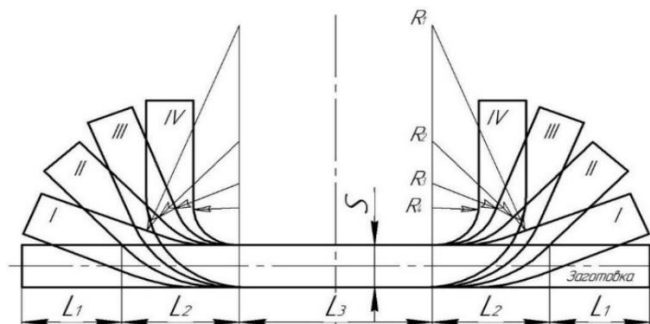


Рис. 4 – Третій метод калібрування гнутих профілів (I-IV послідовність процесу)

Третій метод необхідно застосовувати для профілів, що мають проміжні прямі ділянки, наприклад, для коритного профілю та швелерів, С-подібних і гофрованих профілів.

Деформація в окремих калібрах обмежена, так як у виробі не повинні виникати напруження, що викликають руйнування матеріалу. Тому при профілювання неможливо отримати великий кут за один прохід.

Слід враховувати основну вимогу поштучного профілювання – забезпечення плавного заходу металу в калібр. У перших калібрах профіль має малу жорсткість, заокруглення ще недостатньо намічені, тому приріст кутів підгинання обирається невеликим (8° – 10°). У наступних проходах приріст кутів підгинання збільшується до 12° – 15° . В останніх проходах через погіршення умов задання металу в калібр і значного наклепу вигнутих ділянок профілю приріст кутів підгинання приймають рівним 2° – 8° .

Змінні радіуси R_n визначають в залежності від кутів підгинання кожного калібру (2)

$$R_n = \frac{180 \cdot L_2}{\pi \cdot \alpha_n} - x \cdot s, \quad (2)$$

де L_2 – довжина ділянки, що підгинається, мм; n – порядковий номер калібру; α_n – кут підгинання в калібру n , град.

Валки другої групи, як правило, мають відкриті калібри.

Валки третьої групи призначені для отримання кінцевих кутів. В передчистовому калібрі основу профіля прогинають так, щоб вона стала перпендикулярною до похилої стінки калібру. Кут між полицею профіля та його основою сягає 90° .

4. Моделювання виробництва коритного профілю. Для розрахунку напружено-деформованого стану при виробництві коритного профілю при різній кількості переходів нами спочатку було використано Ubeso PROFIL. Це програмне забезпечення для проектування прокатних форм для будь-якого виробника профілів холодного прокату або вальцевих труб з листового металу, а також для проектувальників прокатних і трубопрокатних станів [9].

За допомогою Ubeso PROFIL можливо швидко отримати діаграму напружень, яка показує, чи можливе виготовлення коритного профілю при зменшеній кількості робочих клітей. Важливо, щоб напруження не перевищували допустимі значення і не знаходилися в критичних зонах, щоб уникнути дефектів на виході з прокатного стану.

Ввівши в Ubeso PROFIL дані кожної клітей та матеріалу з якого виготовляється профіль була побудована квіткова діаграма коритного профілю (рис. 5) та діаграма напружень (рис. 6) - при 10 робочих клітях (а) та при 7 робочих клітях (б).

360 МПа (при 10 робочих клітках) до 430 МПа (при 7 робочих клітках).

Величина інтенсивності напружень (рис. 8) збільшилася на 2 %.

Силкові параметри зросли при зменшенні кількості клітей. На верхньому валку дія сили (див. рис. 9) зросла на максимумах з 0,24 МН до 0,25 МН, тобто на 4 %.

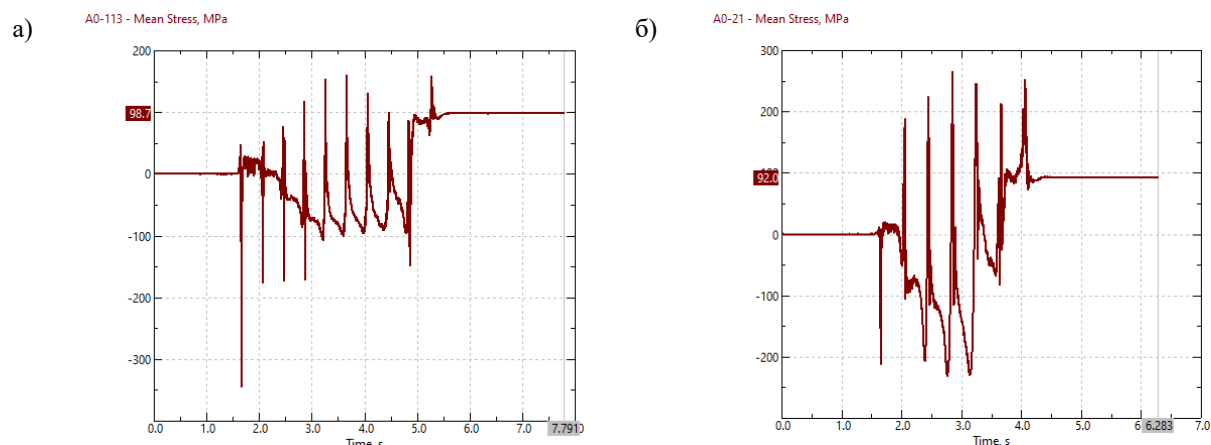


Рис. 7 – Графіки середніх напружень, МПа - при 10 робочих клітках (а) та при 7 робочих клітках (б)

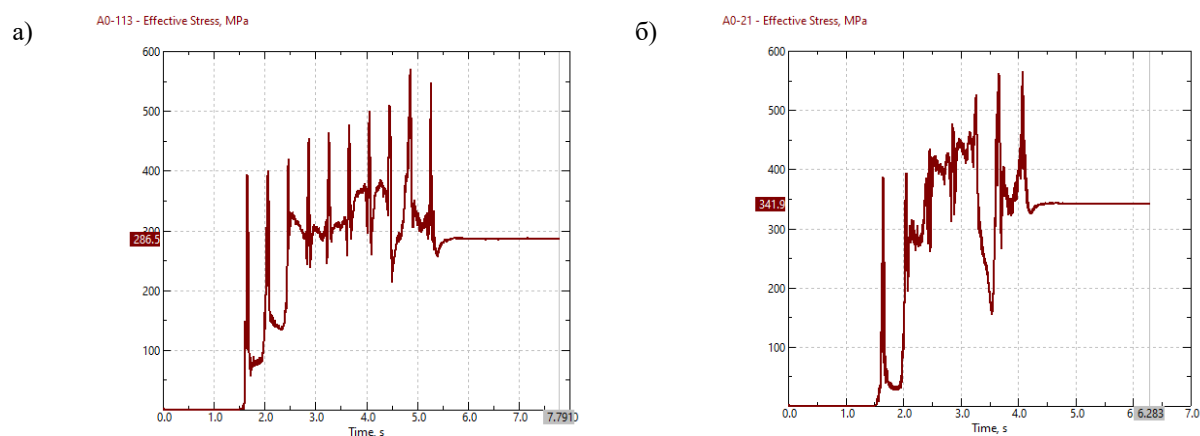


Рис. 8 – Графіки інтенсивності напружень, МПа - при 10 робочих клітках (а) та при 7 робочих клітках (б)

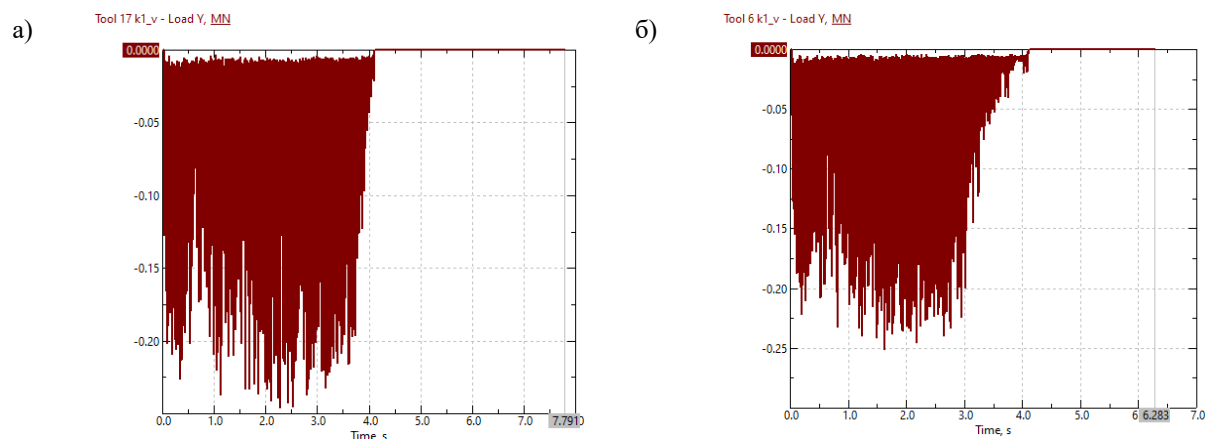


Рис. 9 – Графіки сили на валках, МН - при 10 робочих клітках (а) та при 7 робочих клітках (б)

Висновки. В даній роботі було розглянуто обґрунтований підхід до зменшення кількості переходів виробництва коритного профілю методом послідовного підгинання стінок виробу.

Були розглянуті формалізовані підходи, що використовуються для розрахунку кількості переходів при виробництві гнутих профілів. Було вказано, що загальноприйнятий підхід визначення кількості переходів, що базується на практичних напрацюваннях втратив свою актуальність.

Після обґрунтованого зменшення кількості клітей з 10 до 7 при виготовленні коритного профілю напружено-деформований стан заготовки змінився. Значення середніх напружень зросло на 19,5 %, а інтенсивність напружень зросла на 2 %. Силкові параметри також зросли, наприклад, величина дії сили на верхній валок на початку лінії профілювання зросла на 4 %. Але ці зміни не критичні та знаходяться в допустимих межах.

Провівши ряд розрахунків та моделювання технологічного процесу, а також провівши дослідження напружено-деформованого стану заготовки і енергосилових параметрів профілезгинального стану та

обравши оптимальний метод розрахунку профілю було встановлено, що розрахунки клітей для виготовлення профілю беруться з запасом та є можливість їх зменшити, це практично не вплине на кінцевий результат. Застосування розробленого підходу дозволяє зменшити матеріальні та енергетичні витрати на виробництво коритного профілю.

В подальшому планується розглянути вплив стійкості бокових стінок при виробництві коритного профілю на зменшення кількості технологічних переходів.

Список літератури:

31. Halmos T. Roll Forming Handbook / edited by George T. Halmos. Boca Raton: Taylor&Francis, 2006. 583p.
32. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. Local deformation in rollforming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. vol. 88, no. 9–12, 2405–2415pp.
33. Сталеві холодноформовані тонкостінні конструкції [Текст]: монографія / В. О. Семко. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2017. – 325 с.
34. Flexible Roll Forming of the Variable Depth Profiles / Ahmad Erfani Moghadam. – Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Masters of Research, Institute for Frontier Materials Deakin University, 2017. – 159 p.
35. Формалізовані підходи до визначення числа технологічних переходів при виробництві гнутих профілів / В. Л. Чухліб, С. О. Губський, А. О. Окунь // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР : зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2020. № 2. – С. 169-173. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2020.2.16>.
36. Mahajan P. FE Simulation of roll forming of a complex profile with the aid of steady state properties. SteelResearchInternational, 2021. vol. 89, no. 5.
37. Методичні вказівки до виконання лабораторних і практичних робіт з курсів «Технології та обладнання для виробництва гнутих профілів» та «Виробництво гнутих профілів»: для студентів освітньої програми «Прикладна механіка» денної і заочної форми навчання / уклад. С. О. Губський, В. Л. Чухліб, А. О. Окунь, А. В. Ашкелянець, О. А. Юрченко. – Харків : НТУ «ХПІ», 2021. – 40 с.
38. Калибровка валков для производства гнутых профилей проката / Тришевский И.С., Мирошниченко В. И., Стукалов В. П. // Киев: Техника, 1980. 168 с. Rollform Design Software. URL: <https://www.ubeco.com/profil.htm> (дата звернення: 01.06.2023).
39. Qform UK. URL: <https://www.qform3d.com/> (дата звернення: 01.06.2023).

References (transliterated)

1. Halmos T. Roll Forming Handbook / edited by George T. Halmos. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. 583p.
2. Abeyrathna B., Rolfe B., Hodgson P., Weiss M. Local deformation in rollforming. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. vol. 88, no. 9-12, 2405-2415pp.
3. Cold-formed steel thin-walled structures [Text]: monograph / V.O. Semko - Poltava: ASMI LLC, 2017. 325 p.
4. Flexible Roll Forming of the Variable Depth Profiles / Ahmad Erfani Moghadam. – Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Masters of Research, Institute for Frontier Materials Deakin University, 2017. – 159 p.
5. Formalized approaches to determining the number of technological transitions in the production of bent profiles / V. L. Chukhlib, S. O. Gubsky, A. O. Okun // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mechanical Engineering and CAD: a collection of scientific papers - Kharkiv: NTU "KhPI", 2020. № 2. - С. 169-173. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2020.2.16>.
6. Mahajan P. FE Simulation of roll forming of a complex profile with the help of steady state properties. SteelResearchInternational, 2021. vol. 89, no. 5.
7. Methodical instructions for laboratory and practical work in the courses "Technologies and equipment for the production of bent profiles" and "Production of bent profiles": for students of the educational program "Applied Mechanics" of full-time and part-time education / comp. S.O. Gubsky, V.L. Chukhlib, A.O. Okun, A.V. Ashkelyanets, O.A. Yurchenko - Kharkiv: NTU "KhPI", 2021. 40 p.
8. Trishevskiy I.S. Calibration of rolls for the production of bent rolled profiles / Trishevskiy I.S., Miroshnychenko V.I., Stukalov V.P. 168 с.
9. Rollform Design Software. URL: <https://www.ubeco.com/profil.htm> (accessed June 01, 2023).
10. Qform UK. URL: <https://www.qform3d.com/> (accessed June 01, 2023).

Поступила (received) 30.01.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Сасенко Олексій Федорович (Saienko Oleksii) – студент кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (050) 202-63-28; e-mail: gta13042002@gmail.com.

Губський Сергій Олександрович (Hubskey Serhii) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; тел.: (066) 219-20-50; e-mail: gubskiyso@gmail.com.

Чухліб Віталій Леонідович (Chukhlib Vitaliy) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6176-0917>; тел.: (095) 792-55-92; e-mail: profdnepro@gmail.com.

Сергієнко Микола Єгорович (Sergienko Nikolay) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Автомобіле- і тракторобудування»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5168-1924>; тел.: (050) 632-72-14; e-mail: nesergienko@gmail.com

Колісник Костянтин Дмитрович (Kolisnyk Kostiantyn) – магістр кафедри «Комп’ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (068) 580-68-16.

ФАДЕЄВ В.А., НАБОКА О.В., МЕХОВИЧ К.С.

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РЕІНЖИНІРИНГ ПІДПРИЄМСТВ МАШИНОБУДУВАННЯ :ЕВОЛЮЦІЯ, ПРОБЛЕМИ, ШЛЯХИ ВИРІШЕННЯ

У статті розглянуто актуальні питання сучасного розвитку машинобудування України. Відзначено, що для економіки України початку ХХІ століття характерно катастрофічне скорочення обсягів виробництва та прогрессируюча деградація технічної бази промислових підприємств, що послужило згортанню як простого, так і розширеного відтворення у багатьох галузях народного господарства. Впоратись з цією небезпечною тенденцією може лише промисловість та її провідна галузь – машинобудування. Умови, в яких належить функціонувати промислому комплексу України в найближчій перспективі знаходяться під впливом ринкового механізму саморегуляції, з одного боку, різних коригувальних впливів з боку державних органів керування та ряду суб'єктивних та об'єктивних факторів. Найбільш впливовими факторами визначено глобалізацію, цифрову трансформацію, пандемію, військові конфлікти, тощо. Надано стислу інформацію щодо сутності цих процесів. Зазначено, що глобалізація економіки – складний та суперечливий процес. З одного боку, вона полегшує господарську взаємодію між державами, що створює умови для доступу країн до передових досягнень людства, забезпечує економію ресурсів, стимулює світовий прогрес. З іншого, глобалізація несе негативні наслідки: закріплення периферійної моделі економіки, втрату своїх ресурсів країнами, що не входять до «золотого мільярда», розорення малого бізнесу, поширення на слабкі країни глобалізації і конкуренції, зниження рівня життя та ін. Зазначено, що Україна поступово розвивається у галузі цифрової технології та цифрової трансформації, але все ще має значний потенціал для подальшого розвитку. Важливим критерієм якості процесу ЦТ у бізнесі стає рівень «цифрової зрілості», а його підвищення – бізнес-стратегія. Така зрілість визначається як поступовий і цілеспрямований процес організаційного навчання, що обумовлює реакцію на цифрове конкурентне середовище, що виникає і змінюється. Під недостатньою зрілістю бізнес-процесів розуміється низький рівень процесного управління в компанії, де не визначені та не регламентовані основні та допоміжні процеси, їхня автоматизація здійснюється хаотично, має локальний характер, процеси не адаптовані під плановані до впровадження новітні технології. Авторами запропоновано підхід до здійснення технологічного реінжинірингу з використанням технологій форсайту на підприємствах машинобудування із попередньою діагностикою готовності підприємств до цифрових перетворень, яка відповідає рекомендаціям стандарту TOGAF та має здійснюватися у межах формування архітектурного бачення компанії на початковому етапі реалізації трансформаційного проекту.

Ключові слова: глобалізація, цифровізація, цифрова трансформація, цифрова зрілість, технологічний реінжиніринг, технології форсайта.

FADEYEV V.A., NABOKA O.V., MEKHOVYCH K.S.

TECHNOLOGICAL RE-ENGINEERING OF MACHINE-BUILDING ENTERPRISES: EVOLUTION, PROBLEMS, SOLUTION WAYS

The article discusses the current nutrition of the current development of machine building in Ukraine. It is noted that for the economy of Ukraine at the beginning of the 21st century, catastrophic short-term expansion and progressive degradation of the technical base of industrial enterprises were characteristic, which served as a creak of both simple and extended implementation among rich galuzi people's dominion. To get in the way of this unsafe trend, you can only use the industry and її провідна galuz - machine-building. Think, in order to function in the industrial complex of Ukraine in the nearest future, to be under the influence of the market mechanism of self-regulation, on the one hand, various corrective inflows from the side of the state authorities, caring for and a number of subjective and objective factors c.Globalization, digital transformation are the most important irrigation factors , pandemic, military conflicts, just. . It is given to the stylist the information about the urgency of these processes. From one side, it will make it easier for the government to interact between the powers, which I create minds for the access of the country to the advanced reach of people, ensure the economy of resources, stimulate the progress of the world. On the other hand, globalization brought negative consequences: a fixed peripheral model of the economy, a waste of its resources by countries that do not enter the "golden billion", ruining small businesses, expanding on the weak edges of globalization and competition tsii, lowering the equal of life and in. It is clear that Ukraine is progressively developing in the field of digital technology and digital transformation, but there is still a significant potential for further development. An important criterion for the strength of the DH process in business is the “digital maturity”, and its promotion is business strategy. This maturity is seen as the steps and goals of the process of organizational training, which determines the reaction to the digitally competitive environment, which is brought about and changed. Due to the insufficient maturity of business processes, the low level of process management in the company is understood, because the main and additional processes are not defined and not regulated, the automation is now chaotic, may be local in nature, the processes are not adapted and planned before the introduction of new technologies. The authors advocated the development of technological re-engineering with the development of technology foresight at the enterprises of machine-building and the forward diagnostic readiness of companies to digital transformation, as in accordance with the recommendations of the TOGAF standard and may zdiysnyuvatisya at the boundaries of the formation of the architectural tower of the company at the cob stage of the implementation of the transformation project.

Keywords: globalization, digitalization, digital transformation, digital maturity, technological reengineering, foresight technologies.

Вступ. У західноєвропейській економіці машинобудування посідає 1-е місце серед інших галузей промисловості за кількістю зайнятих і за вартістю продукції (до 40 % вартості європейського промислового продукту). Саме машинобудування використовує високі технології і привносить їх в інші галузі у вигляді сучасних машин, обладнання, технологій і тим визначає рівень розвитку економіки. За роки «незалежності» вітчизняна промисловість зазнала суттєвої трансформації. На промисловість України припадало 1/3 основних фондів та понад 35% населення, зайнятого у народному господарстві. За розвиненістю промислового сектору Україна посідала друге місце серед країн СНД, на її території працювало понад вісім тисяч підприємств та промислових об'єднань. Фундаментом у національній економіці України та, зазвичай, одним з найрозвиненіших секторів традиційно було машинобудування. Більшість продукції машинобудування належить до такої, яка може і повинна отримувати інвестиції, певна частина її є проміжними виробами, що надходять у інші галузі, де виробляється інноваційна продукція машинобудування. Наприклад, структура машинобудівного комплексу країн Західної Європи охоплює 20 великих галузей та більш за 100 спеціалізованих підгалузей і виробництв. З 1940 до 1990 р.р. обсяг його продукції зріс у 95 разів. З кінця 70-х років машинобудування в Україні стає провідною галуззю промисловості. У 2007 році зростання машинобудування склало 19% проти 7,6% промисловості загалом. 2008-2009 роки характеризувалися спадом з причини кризи. У 2009 р. зниження обсягу виробництва становило 45%, але вже у 2010 році він виріс на 11%, у тому числі у машинобудуванні – на 36% (2011р. на 8% та 17%, відповідно).

© В.А. Фадєєв, О.В. Набока, К.С. Мехович, 2023

Частка комплексу у загальному обсязі промисловості становить 12%, а обсяг ВВП – 7%. Понад 90 відсотків верстатного парку та технологій відноситься до 111–1У технологічним переділам, а їх моральне та фізичне зношування за різними оцінками становить від 75 до 80%. Енерговитрати на одиницю промислової продукції у 6-8 разів перевищують аналогічний показник у розвинених країнах. Для порівняння: в економічно розвинених країнах на частку машинобудівних виробництв припадає від 30 до 50% загального обсягу випуску промислової продукції (у Німеччині – 53,6%, Японії – 51,5%, Англії – 39,6%, Італії – 36,4%, Китаї – 35,2%). В Україні практично ліквідовано систему підготовки та перепідготовки робітничих кадрів, а національна інноваційна система далека від досконалості.

Ліквідація підприємств та відсутність ефективної економічної політики у сфері малого та середнього бізнесу призвели до масового безробіття і відтоку із країни інтелектуального ресурсу.[1-3] Загалом промисловий потенціал України значно поступається провідним світовим країнам. Незважаючи на це, фахівці порівнюють його з потенціалом Англії та Франції, узятих разом. Розглянемо проблеми розвитку вітчизняного машинобудування та окреслимо реальні шляхи їх вирішення.

Аналіз літератури. Вітчизняними вченими-економістами приділяється певна увага дослідженню проблем інноваційно-технологічного розвитку галузей економіки, де розвитку технологічному реінжинірингу промислового виробництва приділено окрему увагу. Зокрема потрібно відзначити таких дослідників з зазначеної тематики: О. Амоша, Є. Баляснікова, Л. Безчасний, Н.Басюркіна, І.Бритченко, В.Вовк, С.Войт, В.Гесць, В. Гусев, О.Дацій, Б. Єгоров, Н.Захарченко, С.Льяшенко, І. Іртищева, Т. Кваша, Ю.Кіндзерський, В. Лагодієнко, А. Мазаракі, О. Маслак, С. Мехович, О.Наумов., О.Павлова, О.Попов, Й.Петрович, І.Савенко, І.Седікова, Л.Таранюк, Л. Федулова, С. Черемних, Н. Чухрай та інші. Серед зарубіжних економістів питаннями модернізації промисловості через здійснення технологічного реінжинірингу займалися: П.Аллен, Х. Ван Німвеген, Давенпорт Т., В.Демінг, Е. Зіндер, К.Есселінг, Р.Кімбі, Р.Манганеллі, Н. Оболенські, М.Робсон, Ф.Уллах, Д.Харрінгтон, Д. Чампі та ін. У наукових працях всебічно розглянуто теоретичні питання впровадження інновацій і технологій в промислове виробництво. Разом з цим потребують додаткових досліджень теоретико-методологічні питання впровадження технологічного реінжинірингу у сучасне промислове виробництво з урахуванням суттєвих трансформацій зовнішнього середовища та міжнародних відносин під впливом суб'єктивних і об'єктивних факторів.

Методи дослідження. Методологічною основою дослідження є система загальнонаукових і спеціальних методів. Виконані дослідження базувалися на застосуванні методу декомпозиції для обґрунтування та визначення загальної інваріантної організаційної форми системних інноваційних перетворень виробничо-технологічної основи проблемних промислових підприємств; методу системного аналізу для визначення головних напрямків формування стратегії і тактики інноваційних перетворень виробництва; теорії випадкових процесів для аналізу стану робіт з інноваційного перетворення виробництва; теорії прийняття рішень для аналізу існуючих підходів до технологічного переозброєння виробничо-технологічної бази підприємств; аналізу випадкових процесів для визначення особливостей процесу проведення інноваційних перетворень підприємств. Інформаційну базу досліджень становили законодавчі та нормативні акти України, офіційні публікації Державної служби статистики України, у роботі використовувалися публікації міжнародних і вітчизняних організацій, дані інформаційно-аналітичних бюлетенів та оглядів, монографічна і довідкова література, наукові праці вітчизняних і зарубіжних вчених, матеріали періодичних видань. Для обробки інформації використовувались сучасні аналітичні та комп'ютерні технології.

Результати дослідження. Для України, як і для всіх країн світу, характерні процеси глобалізації. Норвезький економіст Ерік Райнерт, говорячи про шлях України, зазначав, що секрет багатих країн простий - кожна з них, перш ніж перейти до вільного ринку, пройшла шлях державного регулювання, захисту внутрішнього ринку та нарощування виробництва. Політику МВФ і Світового банку до кризових економік Райнерт порівнює з ліками, які знімають тимчасовий біль, але не лікують власне хворобу. Україна - вже точно не «третій світ», вважає Райнерт. Для України найнагальніша проблема – конфлікт кількох ідеологій управління країною та груп, які їх відстоюють, між залишками радянської економіки та неоліберальними концепціями, що їх пропонують західні країни. Важливо самим дійти думки, як розбудувати країну функціонально, яке місце України в світі.

Радянська і західна капіталістичні системи пріоритетним визначали виробництво. Після розвалу Союзу більшість пострадянських держав, зокрема й Україна, обрали неолібералізм, якому властиво продавати будь-що, а не виробляти. «Не можна легко важити із набутками минулого», - зауважує Райнерт. Україні варто і надалі розвивати наукомісткий виробничий сектор, дорожити людськими ресурсами. Адже багато недавніх членів ЄС допустили відтік фахівців на користь Західної Європи. Людей треба залишати, навіть якщо виробництво буде не вигідне. Серед пріоритетів України - відбудова свого внутрішнього ринку, який дасть бізнесу можливість інвестувати в економіку та соціум. Райнерт стверджує, що голод буває тільки в тих країнах, які спеціалізуються на сільському господарстві. У державах Західної Європи і США лише 3% населення залучено до сільського господарства, водночас така частка забезпечує потреби своїх країн і навіть дозволяє торгувати сільськогосподарською продукцією. Дуже важливо досягти синергії між сільським господарством і промисловістю. Чим обробленішим буде сільськогосподарський продукт, то краще країна буде захищена. [4] Ці міркування норвезького економіста засновано на глибокому спостереженні еволюційних процесів розвитку економіки, тому вони мають сенс у виборі стратегії розвитку. А міркувати є над чим.

Умови, в яких належить функціонувати промислому комплексу України в найближчій перспективі
ISSN 2079–004X(Print), ISSN 2786–7587(Online). Вісник НТУ «ХП». 2023.№2 (8)

складаються під впливом ринкового механізму саморегуляції, з одного боку, різних коригувальних впливів з боку державних органів керування та ряду суб'єктивних та об'єктивних факторів.(рис .1)

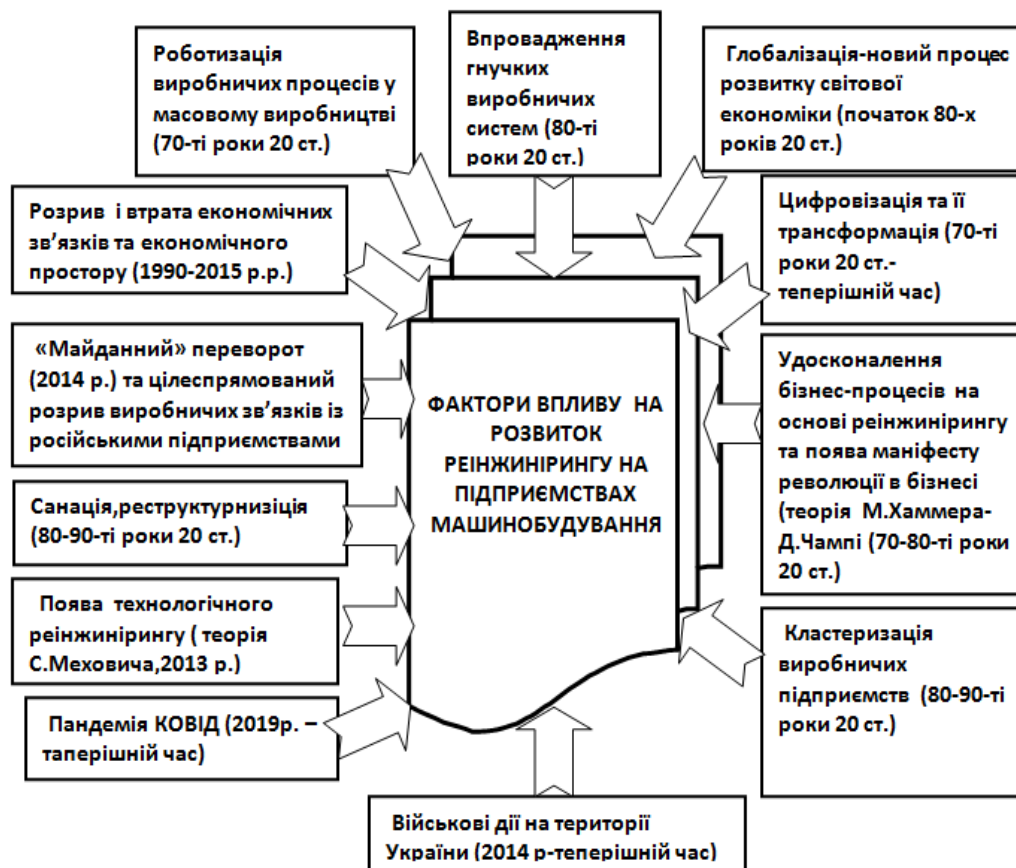


Рис.1 – Еволюція технологічного реінжинірингу під впливом суб'єктивних та об'єктивних факторів на економіку України

Саме суб'єктивні фактори, які послідовно створювали та накопичували всі уряди України починаючи з 1990 року, обумовили ліквідацію виробничих зв'язків, які формувалися десятиріччями, привели до ліквідації конкурентоспроможних галузей станкобудування, машинобудування, ливарного виробництва, аерокосмічної галузі, тощо.

Глобалізація економіки – складний та суперечливий процес. З одного боку, вона полегшує господарську взаємодію між державами, що створює умови для доступу країн до передових досягнень людства, забезпечує економію ресурсів, стимулює світовий прогрес. З іншого, глобалізація несе негативні наслідки: закріплення периферійної моделі економіки, втрата своїх ресурсів країнами, що не входять до «золотого мільярда», розорення малого бізнесу, поширення на слабкі країни глобалізації конкуренції, зниження рівня життя та ін. Зробити плоди глобалізації доступними максимальному числу країн – одне з завдань, що стоять перед світовим співтовариством.

Для економіки України початку ХХІ століття характерно катастрофічне скорочення обсягів виробництва та прогрессируюча деградація технічної бази промислових підприємств, що послужило згортанням як простого, так і розширеного відтворення у багатьох галузях народного господарства. Впоратись з цією небезпечною тенденцією може лише промисловість та її провідна галузь – машинобудування. Машинобудування матеріалізує інновації у вигляді нових машин, обладнання, приладів та технологічних процесів. Його особлива роль полягає в тому, що воно має виступати як фондоутворюючий комплекс, що формує активну частину основних виробничих фондів практично в усіх галузях народного господарства, утримуючи виробничо-технічний потенціал на належному рівні та закладаючи тим самим основу для переходу до нового технологічного устрою. Нинішній стан машинобудівного комплексу не дозволяє вирішувати цю проблему, тому першорядною стоїть завдання його корінних перетворень- технологічного реінжинірингу. На відміну від фінансової санації, технологічний реінжиніринг спрямовано на формування сучасного верстатного парку та конкурентоспроможних технологій.

Технологічному реінжинірингу підлягає вся промисловість, але пріоритетом є машинобудівна галузь, включаючи його основу – верстатобудування. Питання подолання кризових явищ у промисловості є предметом активного обговорення у вчених колах та серед фахівців. Водночас шляхи виведення вітчизняних підприємств із кризового стану в умовах деградації їх виробничої бази та практично повної ізоляції від зовнішнього ринку потребують ретельного аналізу. Потребує обґрунтування стратегії інтеграції

машинобудування України у світове господарство, а також механізми державної підтримки промислового розвитку. За багатьма теоретичними та практичним питанням даних проблем не склалося єдиної наукової думки та наукового апарату. Управлінські структури практично інтуїтивно намагаються виробити стратегію оздоровлення для керованих підприємств. Роз'єднаність теоретичних досліджень існуючих проблем та дискусійний характер ряду питань є однією з головних причин, що стримують розробку стратегії структурної розбудови економіки України.

Концептуальний підхід до організації інноваційних перетворень промислового виробництва означає наявність керівної ідеї та орієнтацію на певні пріоритети. Якою має бути керівна ідея і як не помилитися у виборі пріоритетів на даному, не простому етапі трансформації вітчизняної економіки – найважливіші методологічні питання, що потребують вирішення.

Технологічний реінжиніринг є відповіддю на ринкові виклики середовища та є фактором придбання ринкових переваг підприємства. Предметом технологічного реінжинірингу можуть бути як окремі підприємства, і галузі, і групи галузей. Як показала практика, технологічна санація одиничних підприємств, реструктуризація не можуть дати глобального економічного ефекту і не призводять до корінних змін у економіці. В умовах ринкової конкуренції це дає лише конкурентні переваги окремо взятим підприємствам, які стали на шлях інноваційних перетворень. Якщо на такі зміни не реагує ринкове оточення, підприємство може виявитися ізольованим у інноваційному середовищі.

Виняток становлять лише ті інновації, які дають можливість інтегруватись у світову економіку. Тому реалізація програм технологічного реінжинірингу доцільна на основі кластерного підходу. В цьому випадку інноваційні нововведення можуть сформувати ринкові переваги всієї економіки. В Україні історично створено сприятливі умови для формування територіальних машинобудівних кластерів. Найбільш переконливим доказом цієї гіпотези є інноваційний аерокосмічний кластер «Мехатроніка». Цей кластер створено у 2016 році та він сьогодні об'єднує понад 40 високотехнологічних підприємств України. Головний принцип формування провідних підприємств цього кластеру-технологічний реінжиніринг – корінні перетворення всієї виробничої бази. Наслідком цих процесів є новий виток у циклічному розвитку.

Ефективність реінжинірингових перетворень залежить від структури та якісних характеристик інноваційного середовища, яке є сукупність державних інститутів, банківської системи, правових, виробничих, організаційних,

техніко-технологічних та інших інститутів, що забезпечують реалізацію інноваційних ідей та проєктів. Концептуальний підхід до організації інноваційних перетворень промислового виробництва означає наявність керівної ідеї та орієнтацію на певні пріоритети. Якою має бути керівна ідея і як не помилитися у виборі пріоритетів на даному, не простому етапі трансформації вітчизняної економіки – найважливіший методологічний питання, що потребує вирішення.

Минули роки реформ і зарубіжний досвід свідчать про те, що державне регулювання та вільні ринкові відносини - це не взаємовиключні, а органічно взаємодоповнюючі друзі, друга частина економічної системи, що динамічно розвивається. Найбільш ефективно процеси її розвитку можуть керуватися на основі довгострокової стратегії та середньострокової державної економічної політики.

Створюючи матеріально - речову частину інвестицій, машинобудування є активним учасником зазначеного процесу. Темпи освоєння нової техніки та масштаби її виробництва є необхідними передумовами для прискореного технологічного розвитку галузей народного господарства. Це визначає, по-перше, активну роль машинобудування як суб'єкта реформ у загальнодержавній політиці ринкових перетворень і, по-друге, є основою його віднесення до числа пріоритетних галузей. Управління технологічним реінжинірингом фактично означає управління інноваційно – інвестиційним процесом. Вектор розвитку будь-якої економіки визначає інноваційна, інвестиційна та структурна політика. Між їхніми цілями та завданнями існує тісний зв'язок.

Фактично, остання значною мірою визначається двома першими, оскільки зміна структурних зв'язків та економічних пропорцій простежується, перш за все, через кількісні та якісні зміни основних компонентів кожного структурного елемента. Здійснити такі зміни без інновацій неможливо, тому необхідний обсяг та напрями інвестицій у економіці визначаються її перспективною структурою. Структурно-інвестиційну політику можна охарактеризувати як цілісну складову частину соціально-економічної політики. Ступені оптимізації пропорцій інвестицій та структурних економічних побудов оцінюються з позиції критерію найвищої економічної ефективності функціонування економіки та підвищення рівня у суспільному розвитку. Фактичний рівень оптимізації може бути визначений

на основі застосування стандартної моделі міжгалузевого балансу. Згідно з оцінками фахівців, співвідношення інвестицій у інновації та валового національного продукту має бути не менше 2,5%. [5]

Проте не лише глобалізація сприяє вирішенню проблем розвитку економіки. Цифрові технології дозволяють людям отримувати швидкий та надійний доступ до інформації з усього світу. Це робить міжнародні відносини більш прозорими та доступними для більш широкого кола людей. Вони також дозволяють людям легко спілкуватися між собою з будь-якої точки світу. Це полегшує співпрацю між людьми з різних країн та регіонів. Цифрові технології забезпечують можливість здійснювати електронні операції, такі як купівля та продаж товарів та послуг в Інтернеті. Це дозволяє підприємствам легко входити на міжнародні ринки та здійснювати операції з клієнтами з усього світу. Також відбуваються зміни в природі роботи та зайнятості, зокрема знижуючи значення географічних меж у бізнесі та можливості працювати на відстані.

Скандинавські країни, такі як Норвегія, Швеція та Данія, вважаються одними з лідерів у галузі

цифрової трансформації. Ці країни володіють сильною інфраструктурою та екосистемою цифрових технологій, що дозволяє їм розвиватися в цифрову економіку.[6]

Китай відомий своєю швидкою цифровою трансформацією та високим рівнем використання цифрових технологій у бізнесі та повсякденному житті. За останні десятиріччя в цій країні створено сильну інфраструктуру та екосистему цифрових технологій, включаючи штучний інтелект, що дозволяє китайським компаніям ефективно конкурувати на міжнародних ринках.

Європейські країни, такі як Німеччина та Франція, займають лідерську позицію у розвитку індустрії Інтернету речей та іншої промислової автоматизації. Вони також активно вивчають питання кібербезпеки та досліджують нові технології, такі як штучний інтелект.

США мають розвинену інфраструктуру цифрових технологій та є лідерами у галузі соціальних мереж та технологій штучного інтелекту. США також відомі своїми великими технологічними компаніями, такими як Google, Facebook та Amazon.

Україна також поступово розвивається у галузі цифрової технології та цифрової трансформації (ЦТ) і має значний потенціал для подальшого розвитку. Країна має розвинену інфраструктуру мобільного зв'язку та широкосмугового Інтернету, хоча існують проблеми з якістю зв'язку та покриттям в деяких регіонах країни. Країна поки що має деякі проблеми з кібербезпекою, зокрема з вразливістю банківської системи та електронної державної інформації, однак уряд України здійснює заходи для покращення кібербезпеки, зокрема заснувавши Державну службу кібербезпеки. Загалом, Україна має значний потенціал у цифровізації, і використання цього потенціалу може стати драйвером економічного розвитку та зміни якості життя громадян. Однак, щоб використати цей потенціал на повну, потрібно вирішити ряд внутрішніх проблем, подолати наслідки військових дій, вийти на нові рубежі в галузі освіти та інфраструктури, а також покращити інвестиційний клімат в країні.

Можна стверджувати, що процеси глобалізаційні і цифровізації мають прямий вплив на процеси реінжинірингу, сприяють залученню інвестицій, спрощують комунікацію та взаємодію з іноземними компаніями та партнерами. Досвід кожної країни є унікальним в розбудові свого потенціалу та світових процесах – участі у міжнародних організаціях, розвитку технологій, будівництві інфраструктури, міжнародному поділі праці. Важливим критерієм якості процесу ЦТ у бізнесі стає рівень «цифрової зрілості», а його підвищення – бізнес-стратегія.

Така зрілість визначається як поступовий і цілеспрямований процес організаційного навчання, що обумовлює реакцію на цифрове конкурентне середовище, що виникає і змінюється.[7] Цифрова зрілість-це здатність виявляти, створювати і брати участь у створенні, пропонувати, монетизувати та адаптуватися в умовах ЦТ.[8] Інакше кажучи, це рівень системного розуміння всіх процесів, ключових аспектів, компетенцій, пов'язаних із ЦТ та її використанням, у розробці стратегій, бізнес-моделей, систем взаємодії з партнерами і т.і. Аналізуючи цю зрілість та «цифрову готовність» різних компаній, фахівці відзначають у багатьох випадках очевидне відставання організаційної культури, організаційної поведінки та навчання від операційних процесів та технологій [9].

Перетворення у промисловості, що відбуваються під впливом інноваційних проваджень, дозволяють збільшити обсяги та підвищити якість вироблюваної продукції, підвищити ефективність виробництва. Отримані додаткові прибутки дозволяють здійснювати інвестиції у подальший розвиток підприємства, водночас збільшуючи його вартість для власників. Безперечні переваги отримують як виробники продукції (послуг), так і споживачі, отримуючи більш якісну, функціональну продукцію у скорочений термін, при можливому одночасному зниженні витрат.

Тому вважаємо, що підвищення рівня інноваційного розвитку країни в рамках промислової революції Індустрія 4.0 дозволяє забезпечити її сталий розвиток. Для забезпечення ефективності змін в ІТ-інфраструктурі та в бізнес-середовищі компанії, а також для розміщення пріоритетів і послідовності виконання проектів необхідна координація цифрової трансформації на стратегічному рівні. Це зумовлено тим, що такі перетворення зачіпають не тільки ІТ-область, а й бізнес-процеси та організаційну структуру компанії. Тому трансформація має бути узгоджена з іншими ініціативами компанії через операційні та функціональні стратегії.[10].

Слід відзначити, що, на думку аналітиків, стратегія цифрового перетворення має дещо інші цілі, ніж традиційна ІТ-стратегія. На відміну від останньої, орієнтованої на ІТ-управління в компанії, вона практично не враховує зміни бізнес-середовища. Стратегія цифрової трансформації зосереджується на перетворенні продуктів, послуг, процесів та організаційних компонентів за рахунок впровадження інформаційних технологій та поєднує в собі бізнес- та ІТ-стратегію.

Під недостатньою зрілістю бізнес-процесів розуміється низький рівень процесного управління в компанії, де не визначені та не регламентовані основні та допоміжні процеси, їхня автоматизація здійснюється хаотично, має локальний характер, процеси не адаптовані під плановані до впровадження новітніх технологій. [11].

Прозорість та чіткість розподілу обов'язків та відповідальності між учасниками проекту трансформації дозволяє залучити до участі більшість зацікавлених сторін, тим самим забезпечивши необхідні взаємодії та спільну діяльність, спрямовану на досягнення стратегічних цілей. Слід погодитись із фахівцями, що однією з головних проблемних зон у цих процесах є нездатність залучити до роботи над цифровим перетворенням співробітників, які безпосередньо працюють із клієнтами та партнерами [12]. Чим активніше участь співробітників у трансформації, тим вище їх мотивація змінюватися разом з технологіями, що впроваджуються, тим успішніше проходять перетворення, тим більше позитивних ефектів отримує

компанія від таких перетворень. Узгодженість дій ІТ-підрозділу з іншими структурними одиницями компанії також є критерієм зрілості бізнес-процесів при цифровій трансформації.

Важливість цього чинника зазначає приблизно кожен четвертий представник бізнесу [13,14,15]. Усе це сприяє підвищенню ефективності застосування ІТ-рішень. Взагалі, ІТ-архітектура має бути реалізована на принципах API, забезпечуючи мікросервісну архітектуру та інтеграцію як усередині, так і із зовнішніми партнерськими ресурсами. Така ІТ-архітектура є критично важливою основою запровадження нових технологій у організації [16,17]. API (Application Programming Interface) – це набір правил, протоколів та інструментів, які дозволяють різним програмам взаємодіяти один з одним. Завдяки API, програмісти можуть створювати більш складні та функціональні програми, використовуючи вже існуючі сервіси та програми. API є однією з найважливіших технологій у світі програмування, оскільки він дозволяє інтегрувати різні компоненти програми та підвищувати її ефективність.

Без використання API програмістам довелося б розробляти всі компоненти програми з нуля, що займає багато часу і зусиль. Використання API має як переваги, і недоліки. Серед головних переваг можна виділити швидкість розробки (використання готових API може суттєво прискорити процес розробки додатків та сервісів), економію ресурсів (розробники можуть використовувати готові API замість створення власних функцій та сервісів, що дозволяє заощаджувати ресурси та час), покращена функціональність (використання API дозволяє розширювати функціональність додатків та сервісів, додаючи нові можливості та функції). Серед недоліків використання API можна виділити обмеженість (використання API може бути обмежене певними правилами та обмеженнями, встановленими розробниками додатків та сервісів), залежність від сторонніх сервісів (якщо програма або сервіс залежать від стороннього API, будь-які зміни в них можуть вплинути на роботу програми або сервісу та безпека (використання API може підвищити вразливість програм та сервісів до кібератак, якщо не вжити відповідних заходів захисту).

Загалом, незважаючи на існуючі недоліки, використання API є важливим інструментом для розробників програм та сервісів у процесі ЦТ. Він дозволяє прискорити процес розробки, розширити функціональність і покращити користувальницький досвід. API є важливим інструментом для розробки додатків і сервісів, який дозволяє прискорити процес розробки, розширити функціональність і покращити досвід користувача. При використанні API необхідно враховувати як його переваги, так і недоліки та приймати відповідні рішення.

При прийнятті рішення у процесі ЦТ важливо враховувати причини та проблеми, своєчасно визначити, які з них можливо вирішити чи зменшити їх вплив на результат перетворень. Важливо також визначити, скільки і якою мірою важливості проблеми виявилися поза сфери впливу. Такими проблемами часто є незацікавленість керівництва компанії у цифровій трансформації, низька зрілість процесного управління, застаріла ІТ-інфраструктура. Якщо досить важливі проблеми опинилися в даній категорії в значній кількості, слід визнати, що компанія не готова до подібної трансформації та можливість невдачі досить висока.

Таким чином, на основі вищевикладеного пропонується наступний підхід до діагностики готовності компанії до цифрової трансформації напередодні

головної стадії реалізації проекту технологічного реінжинірингу. Цей підхід пов'язано із виконанням певних аналітичних етапів.

Етап 1. Визначення ключових тенденцій у цифровій трансформації в галузі із використанням технологій форсайта.

Етап 2. Порівняльний аналіз рівня «цифрової зрілості» компанії та оцінка її готовності до реалізації проекту технологічного реінжинірингу та визначення причин виникнення даних проблем з використанням відомих методів оцінки поточної реальності, адаптувавши його з урахуванням особливостей бізнесу конкретної компанії..

Етап 3. Розробка бізнес-стратегії підвищення рівня «цифрової зрілості» компанії та планування процесу організаційного навчання відповідно стратегії технологічного реінжинірингу, що обумовлює реакцію на мінливе цифрове конкурентне середовище.

Етап 4. Розробка бізнес-стратегії цифровізації компанії на основі ключових тенденцій у цифровій трансформації відповідно прогнозу на основі технологій форсайта.[18]

Підхід до здійснення технологічного реінжинірингу на підприємствах машинобудування із попередньою діагностикою готовності компаній до цифрових перетворень відповідає рекомендаціям стандарту TOGAF та має здійснюватися у межах формування архітектурного бачення компанії на початковому етапі реалізації проекту технологічного реінжинірингу. [19]

Методика опису архітектури TOGAF (скорочення від The Open Group Architecture Framework) була запропонована некомерційним об'єднанням The Open Group, до якого входить ряд провідних виробників інформаційних технологій, а також компаній зі списку Fortune 1000. [20] TOGAF позиціонується її авторами не як деяка еталонна модель, а як "засіб для розробки архітектур інформаційних систем". Основне призначення - прискорити і полегшити процес розробки архітектури конкретної організації, забезпечуючи при цьому можливість майбутнього розвитку. У грудні 2003 року було опубліковано версія 8.1 цієї моделі. Основним полем для застосування TOGAF є, перш за все, програмна інфраструктура інформаційної системи (На протипагу таким типам архітектур, як бізнес-архітектура, архітектура даних і додатків). Таким чином, вона в найкращій мірі підходить для опису інтеграційних компонент, Що використовуються для підтримки широкого спектру корпоративних додатків, перш за все, критичних для бізнесу (mission-critical). Оскільки ця інтеграційна архітектура сильно залежить від рішень, що приймаються в інших областях, то в

рамках TOGAF в необхідній мірі розглядаються і ці суміжні області.

Висновки. В результаті проведеного дослідження було доведено необхідність проведення попередньої діагностики готовності компанії до впровадження програм технологічного реінжинірингу та цифрової трансформації. Це дозволить організаціям оцінити свої можливості та обмеження, що накладаються поточною організаційною структурою, принципами управління, фінансовими, людськими та ІТ-ресурсами. Обрунтовано ефективною застосування архітектурного підходу для проектування та реалізації технологічних перетворень, в рамках якого перетворення розглядаються як наслідок впливу процесів глобалізації та цифровізації, а підприємство- як сукупність елементів бізнес-архітектури, інформаційної та технологічної архітектури. На стадії попереднього аналізу готовності компанії до подібних перетворень такий підхід дозволить комплексно дослідити особливості поточного стану організації, сформулювати цільову модель, а також план переходу з поточного в цільовий стан. Таким чином, авторами запропоновано підхід до здійснення технологічного реінжинірингу на підприємствах машинобудування із попередньою діагностикою готовності компанії до цифрових перетворень, яка відповідає рекомендаціям стандарту TOGAF та має здійснюватися у межах формування архітектурного бачення компанії на початковому етапі реалізації трансформаційного проекту.

Отримані авторами результати та сформовані пропозиції мають суттєве прикладне значення, оскільки дозволяють провести попередню комплексну оцінку діяльності компанії з погляду її готовності до цифрової трансформації з метою досягнення позитивного економічного ефекту, без чого неможливо здійснювати програми технологічного реінжинірингу виробництва. Запропонований метод дозволить компанії з'ясувати, з якими проблемами вона може зіткнутися, які з них окажуть найбільший вплив на результат і які зусилля необхідно докласти для створення оптимальних умов технологічних перетворень.

Список літератури

- 1.[Електронний ресурс.] Джерело інформації: <http://upr-search.com.ua/44-promyshlennost-ukrainy-obshhiy-vzglyad.html>
- 2.Мехович С.А.Экономические проблемы гибких производственных систем: Монография.-Харьков:НТУ «ХПИ»,2007.-232 с.
- 3.Мехович С.А.Формирование региональных межотраслевых связей на основе концепции технологического реинжиниринга: монография / Мехович С.А., – Х: «Щедра садиба плюс». – с. 352, прил. 7., рус., укр.
4. Ігор Шаров. Від мрії – до дії! – К.: Арт Економі, 2016. – С. 118. ISBN 978-617-7289-19-6
5. [Електронний ресурс.] Джерело інформації: <file://localhost/C:/Users/1/Desktop/vse%20pro%20vse.09.10.13/vse%20o%20modernizatsii/teoriya%20modern13.mht>
6. 3. Demirkan H., Spohrer J. C., Welsler J. J. Digital Innovation and Strategic Transformation. *IT Professional*. 2016:14–18. URL: <https://doi.org/10.1109/MITP.2016.115>.
7. [Електронний ресурс.] Джерело інформації: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Technology-Media-Telecommunications/deloitte-digital-maturity-model.PDF>.
8. [Електронний ресурс.] Джерело інформації: <https://www.gartner.com/imagesrv/symposium/orlando/docs/2014GartnerSymposiumconsultingDigitalBusiness.pdf>.
9. Gartner (2019) *Gartner hype cycle*. Available at: [Електронний ресурс.] Джерело інформації:<https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle> (accessed 17 January 2019).
10. Matt C., Hess T., Benlian A. (2015) Digital transformation strategies. *Business & Information Systems Engineering*, vol. 57, no 5, pp. 339–343.
11. . Bashkirova O.V., Dolganova O.I. (2017) *Smart company. Strategy and tactics of creation*. Moscow: Economics (in Russian).
12. Maor D., Reich A., Yocarini L. (2017) *The people power of transformations*. [Електронний ресурс.] Джерело інформації: <https://www.mckinsey.com/business-functions/organization/our-insights/the-people-power-of-transformations> (accessed 05 February 2019).
13. . IDG Communications (2018) *State of digital business transformation*. Available at: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1624046/Digital%20Business%20Executive%20Summary_FINAL.pdf (accessed 04 December 2018).
14. Bourne V. (2018) *Measuring business transformation progress around the world*. [Електронний ресурс.] Джерело інформації: <https://www.delltechnologies.com/en-us/perspectives/digital-transformation-index.htm#> (accessed 05 February 2019).
15. Fitzgerald M., Kruschwitz N., Bonnet D., Welch M. (2013) *Embracing digital technology a new strategic imperative*. Massachusetts Institute of Technology.
16. PwC (2018) *Digital champions. Global study of digital operations in 2018*. PwC.
17. IT Verlag f r Informationstechnik GmbH (IT-Daily.net) (2018) *Limitierte IT-Ressourcen bremsen die digitalin transformation*. [Електронний ресурс.] Джерело інформації: <https://www.it-daily.net/shortnews/20011-limitierte-it-ressourcen-bremsen-die-digitalen-transformation> (accessed 16 February 2019).
18. Centre for Strategic Futures, n.d. Who We Are [WWW Document]. URL <https://www.csf.gov.sg/who-we-are/> (accessed 8.23.19).
19. [Електронний ресурс.] Джерело інформації: http://ni.biz.ua/3/3_5/3_59500_metodika-TOGAF.html#google_vignette
20. [Електронний ресурс.] Джерело інформації:<https://businessyield.com/ru/terms/list-of-fortune-1000-companies/>

References (transliterated)

- 1.[Elektronnij resurs.] Dzhherelo informacii: <http://upr-search.com.ua/44-promyshlennost-ukrainy-obshhiy-vzglyad.html>
- 2.Mekhovich S.A.Ekonomicheskie problemy gibkih proizvodstvennyh sistem: Monografiya.-Har'kov:NTU «HPI»,2007.-232 s.
- 3.Mekhovich S.A.Formirovanie regional'nyh mezhotraslevykh svyazey na osnove koncepcii tekhnologicheskogo reinzhiniringa: monografiya / Mekhovich S.A., – H: «Shchedra sadiba plyus». – s. 352, pril. 7., rus., ukr.
4. Igor Sharov. Vid mrii – do dii! – K.: Art Ekonom, 2016. – S. 118. ISBN 978-617-7289-19-6
5. [Elektronnij resurs.] Dzhherelo informacii: <file://localhost/C:/Users/1/Desktop/vse%20pro%20vse.09.10.13/vse%20o%20modernizatsii/teoriya%20modern13.mht>
6. 3. Demirkan H., Spohrer J. C., Welsler J. J. Digital Innovation and Strategic Transformation. *IT Professional*. 2016:14–18. URL: <https://doi.org/10.1109/MITP.2016.115>.
7. [Elektronnij resurs.] Dzhherelo informacii: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Technology-Media-Telecommunications/deloitte-digital-maturity-model.PDF>.

- Telecommunications/deloitte-digital-maturity-model. PDF).
8. [Elektronnij resurs.] Dzhерело інформації: (<https://www.gartner.com/imagesrv/symposium/orlando/docs/2014GartnerSymposiumconsultingDigitalBusiness.pdf>).
 9. Gartner (2019) Gartner hype cycle. Available at: [Elektronnij resurs.] Dzhерело інформації: <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle> (acc.17Jan. 2019).
 10. Matt S., Hess T., Benlian A. (2015) Digital transformation strategies. *Business & Information Systems Engineering*, vol. 57, no 5, pp. 339–343.
 11. Bashkirova O.V., Dolganova O.I. (2017) Smart company. Strategy and tactics of creation. Moscow: Economics (in Russian).
 12. Maor D., Reich A., Yocarini L. (2017) The people power of transformations. [Elektronnij resurs.] Dzhерело інформації: <https://www.mckinsey.com/business-functions/organization/our-insights/the-people-power-of-transformations> (accessed 05 February 2019).
 13. IDG Communications (2018) State of digital business transformation. Available at: https://cdn2.hubspot.net/hubfs/1624046/Digital%20Business%20Executive%20Summary_FINAL.pdf (accessed 04 December 2018).
 14. Bourne V. (2018) Measuring business transformation progress around the world. [Elektronnij resurs.] Dzhерело інформації: <https://www.delltechnologies.com/en-us/perspectives/digital-transformation-index.htm#> (accessed 05 February 2019).
 15. Fitzgerald M., Kruschwitz N., Bonnet D., Welch M. (2013) Embracing digital technology a new strategic imperative. Massachusetts Institute of Technology.
 16. PwC (2018) Digital champions. Global study of digital operations in 2018. PwC.
 17. IT Verlag für Informationstechnik GmbH (IT-Daily.net) (2018) Limitierte IT-Ressourcen bremsen die digitalin transformation. [Elektronnij resurs.] Dzhерело інформації: <https://www.it-daily.net/shortnews/20011-limitierte-it-ressourcen-bremsen-die-digitalen-transformation> (accessed 16 February 2019).
 18. Centre for Strategic Futures, n.d. Who We Are [WWW Document]. URL <https://www.csf.gov.sg/who-we-are/> (accessed 8.23.19).
 19. [Elektronnij resurs.] Dzhерело інформації: http://ni.biz.ua/3/3_5/3_59500_metodika-TOGAF.html#google_vignette
 20. [Elektronnij resurs.] Dzhерело інформації: http://ni.biz.ua/3/3_5/3_59500_metodika-TOGAF.html#google_vignette

Поступила (received) 20.02.2023

Відомості про авторів/ About the Authors

Фадеев Валерій Андрійович (Fadeev Valeri) – доктор технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, тел.:+ 380 50 323 64 18, e-mail: fadeev@fed.com.ua, ORCID: 0000-0003-2535-9039

Набока Олена Володимирівна (Naboka Olena) – кандидат технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, тел.:+ 380 50 986 50 27, e-mail: namirauza@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3997-5481

Мехович Катерина Сергіївна (Mekhovich Katherine), аспірант кафедри економіки бізнесу та міжнародних економічних відносин Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, тел.:+ 380 93 391 99 66, e-mail: kate.mehovich@gmail.com

НАБОКА О.В., ФАДЕЄВ В.А., ЄВСЮКОВА Ф.М.

ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУЧАСНОЇ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОЇ ОБРОБКИ.

У статті описані фактори росту ефективності обробки виробів на електроерозійному обладнанні, завдяки застосування лінійних приводів з високою динамічною точністю. Також в роботі досліджено міжелектродний проміжок в зоні обробки, його вплив на оптимальні енергетичні режими та максимальне знімання матеріалу. Електрод подається в зону іскроутворення в 5-10 разів частіше, відносна тривалість у декілька разів більше, ніж у верстатах з КГП-приводами. Видалення шламу за рахунок помпового ефекту від швидких переміщень електрода замість прокачування. Застосування лінійних двигунів, сервоприводів, прецизійних датчиків лінійного положення, пристрою автоматичного заправлення дроту, пошуку отвору, запобігання обриву дроту - збільшить продуктивність дротово-вирізної обробки на 40-100%. Проведено порівняльний аналіз продуктивності обробки деталей на обладнанні із застосуванням лінійних і КГП (кульково-гвинтової пари) приводів.

Ключові слова: дротово-вирізна обробка матеріалів, лінійний привід, електрод, зона обробки, міжелектродний проміжок, продуктивність.

NAVOKA O.V., FADEEV V.A., YEVSUKOVA F.M.

FACTORS INFLUENCING THE EFFICIENCY OF MODERN ELECTRO-EROSION PROCESSING.

The article describes the factors of increasing the efficiency of processing products on EDM equipment, due to the use of linear drives with high dynamic accuracy. Also, the inter-electrode gap in the processing zone, its influence on optimal energy regimes and maximum material removal was investigated in the work. The electrode is fed into the spark formation zone 5-10 times more often, the relative duration is several times longer than in machines with KGP drives. Sludge removal due to the pumping effect from rapid movements of the electrode instead of pumping. The use of linear motors, servo drives, precision linear position sensors, devices for automatic wire feeding, hole search, wire breakage prevention - will increase the productivity of wire-cutting processing by 40-100%. A comparative analysis of the performance of parts processing on equipment with the use of linear and KGP (ball-screw pairs) drives was carried out.

Keywords: wire-cut processing of materials, linear drive, electrode, processing zone, inter-electrode gap, productivity.

1. Вступ. У зв'язку з розвитком обробки металів тиском, точного лиття, широким використанням пластичних мас у багато разів збільшилася потреба в штампах, прес-формах й інших виробках з деталями складної форми, обробка яких досить трудомістка й складна. У деяких сучасних машинах і приладах іноді зустрічаються деталі, які не можуть бути оброблені механічними методами (наприклад, отвори й фасонні прорізи особливо малих розмірів, сполучні канали у важкодоступних місцях і т.п.). Для обробки жароміцних, нержавіючих, магнітних й інших важкооброблюваних сталей, а також твердих сплавів, напівпровідникових матеріалів, рубінів, фериту, кварцу й інших матеріалів, деталей складної форми з успіхом використовуються електрохімічні й електрофізичні методи розмірної обробки.

2. Аналіз літератури. Для вирішення проблем, що пов'язані з обробкою цих виробів можливо використання сучасного електроерозійного обладнання з лінійними приводами, що мають високу динамічну точність. Для підвищення якості та продуктивності обробки прецизійних деталей в електроерозійних верстатах використовується КЧПУ - генератор LQW серії, жорсткий диск і рідкокристалічний монітор з сенсорним управлінням. КЧПУ-генератори - перші ЧПУ-системи, здатні безпосередньо працювати з твердотільними 3D-моделями. Завдяки тому, що керуюча програма будується автоматично безпосередньо по конструкторській 3D-моделі, нові системи КЧПУ дозволяють обійтися без контурного програмування на верстаті або зовнішньому комп'ютері. Виключається людський чинник і ризик помилки оператора. Дані 3-мірних твердотілих моделей можуть імпортуватися безпосередньо в КЧПУ-генератор, де вони автоматично перетворюються в оптимізовані управляючі ЧПУ-програми, без яких-небудь додаткових пристроїв. Всі параметри обробки автоматично додаються в контурну програму, що економить і час, і витрати. КЧПУ дозволяє виконати візуалізацію програми в 3D-просторі, забезпечуючи можливість попередньої перевірки, що гарантує точні і надійні результати. А застосування лінійних двигунів, сервоприводів, прецизійних датчиків лінійного положення, пристрою автоматичного заправлення дроту, пошуку отвору, запобігання обриву дроту - збільшить продуктивність дротово-вирізної обробки на 40-100%.

3. Методи дослідження. Лінійні повідні істотно спростили конструкцію, значно підвищивши надійність і довговічність верстатів. Нами було досліджено три головних фактора росту ефективності завдяки застосування лінійних приводів:

- 1) Стабільно оптимальний міжелектродний проміжок, досягнутий завдяки найвищій динамічній точності лінійного приводу дозволяє отримати, у результаті, оптимальні енергетичні режими й максимальне знімання;
- 2) Електрод подається в зону іскроутворення в 5-10 разів частіше, відносна тривалість у декілька разів більше, ніж у верстатах з КГП-приводами;
- 3) Видалення шламу за рахунок помпового ефекту від швидких переміщень електрода замість прокачування.

Завдяки високій динамічній точності лінійного приводу досягнутий оптимальний проміжок в зоні обробки (величину оптимального проміжку задає в електроерозійних верстатах система комп'ютерного ЧПУ, розраховуючи його за станом проміжку і даними "бази знань" електроерозійної обробки) - це оптимальні енергетичні режими іскроутворення і, в результаті, найбільш продуктивна і якісна обробка при найменшому зносі електроду.

© О.В. Набока, В.А. Фадєєв, Ф.М. Євсюкова, 2023

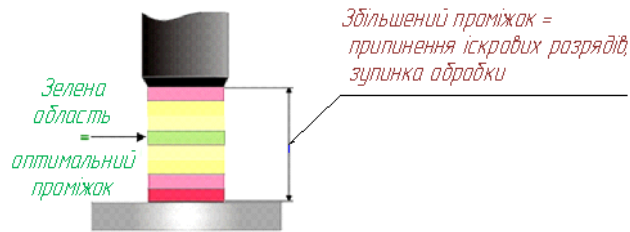


Рис. 1 – Збільшений міжелектродний проміжок

У міру збільшення проміжку число іскрових розрядів падає. На певній величині проміжку обробка зупиняється.

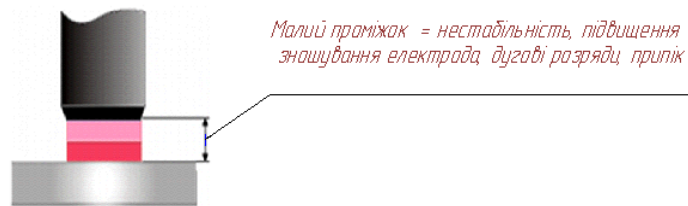


Рис. 2 – Зменшений міжелектродний проміжок

У міру зменшення міжелектродного проміжку ефективність розрядів падає (розряди через гази), знос електроду зростає, на певній величині проміжку виникають дугові розряди, що наводить до псування електроду і деталі.

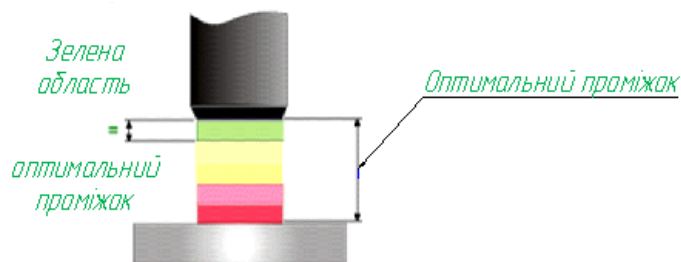


Рис.3 – Оптимальний міжелектродний проміжок

Унікальна сервосистема коректує положення електроду відповідно до команд КЧПУ 500 разів в секунду!

Також за рахунок вживання лінійного приводу відбувається скорочення часу релаксацій (відведення електроду). Електрод подається в зону іскроутворення в 5-10 разів частіше, за рахунок цього відносна тривалість робочого циклу у декілька разів більше, ніж у верстатах з КГП-приводами.

Видалення шламу відбувається за рахунок помпового ефекту від швидких переміщень електроду замість прокачування.

4. Результати дослідження. Якби удалося вести процес при постійній енергії імпульсів, то продуктивність можна було б оцінити як множення енергії імпульсів на їх частоту. На практиці умови протікання кожного окремого імпульсу можуть відрізнятися із-за відмінностей в стані міжелектродного проміжку і розміру проміжку, невідповідності між числом імпульсів, вироблених генератором і реалізуємих в проміжку, а також із-за інших причин. При розрахунку продуктивності:

$$Q = \psi A_{\text{и}} f,$$

де $A_{\text{и}}$ - енергія імпульсу; ψ - коефіцієнт, що враховує кількість неробочих імпульсів: $\psi = f / f_{\text{г.и}}$ (тут $f_{\text{г.и}}$ - частота імпульсів, що виробляється генератором; f - частота імпульсів, що викликають ерозію). Таким чином, підвищити продуктивність можна, якщо підібрати оптимальне поєднання чинників, що дозволяють збільшити долю корисної енергії імпульсу, його потужність і частоту дотримання робочих імпульсів. Для цього необхідно досягти оптимального співвідношення між максимальним значенням сили струму I_{max} в імпульсі і його тривалістю $\tau_{\text{и}}$. Наприклад, в разі режимів обробки з середньою силою струму 10... 100 А найбільша продуктивність може бути досягнута при співвідношенні $I_{\text{max}} / \tau_{\text{и}} = 5...8 \text{ MA/c}$.

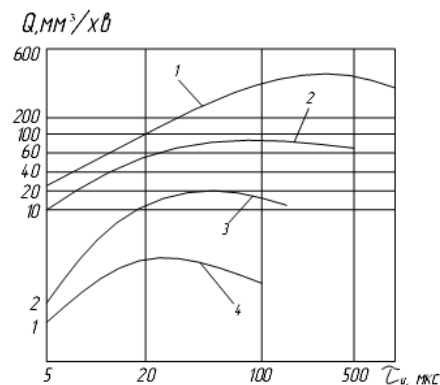


Рис. 4 – Залежності продуктивності Q від тривалості імпульсу $\tau_{п}$: крива 1 ($I = 15$ А), крива 2 ($I = 8$ А), крива 3 ($I = 4$ А)

Проведено порівняльний аналіз продуктивності обробки деталей на обладнанні із застосуванням лінійних і КГП (кульково-гвинтової пари) приводів. При обробці використовувались мідні, графітові, латунні електроди. Тож продуктивність обробки при використанні лінійних приводів значно вища за продуктивність обробки на електроерозійному обладнанні з КГП.

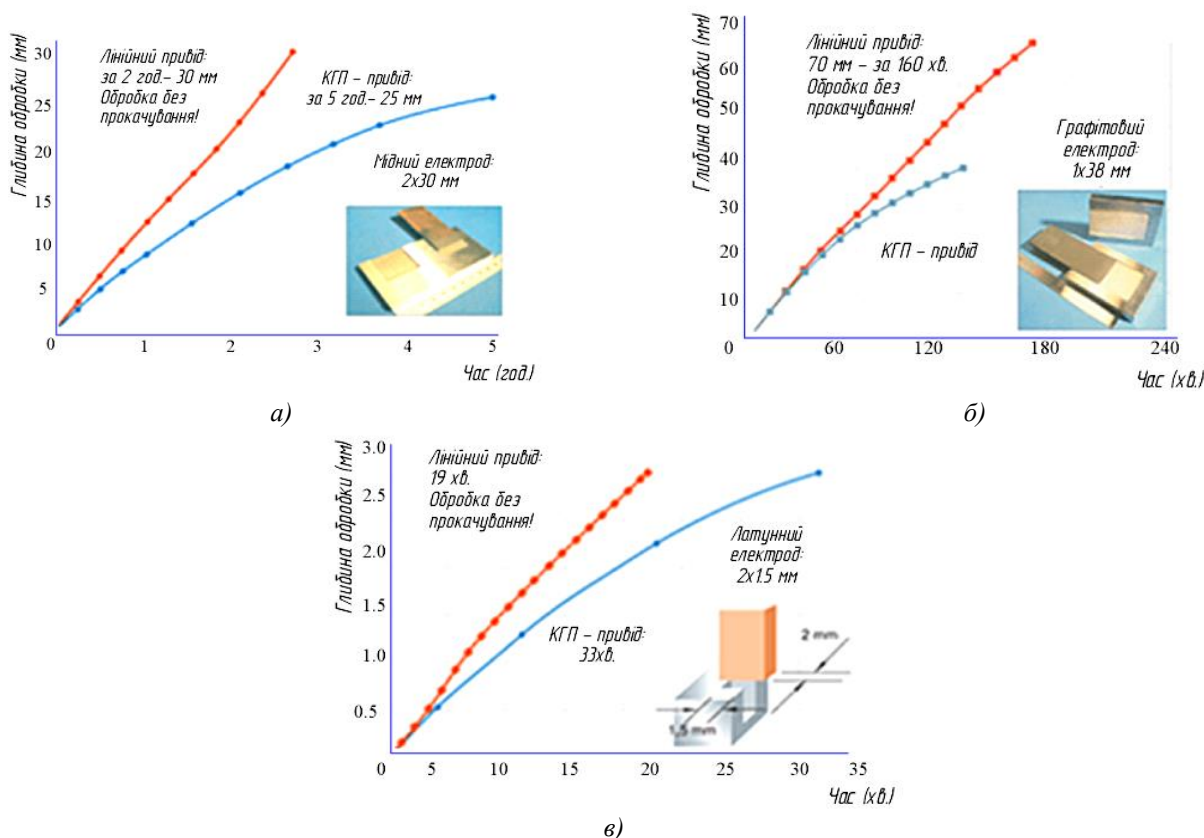


Рис. 5 – Порівняльний аналіз продуктивності обробки деталей різної глибини із застосуванням лінійних і КГП - приводів:

а) глибина обробки = 30 мм, б) глибина обробки = 70 мм, в) глибина обробки = 3 мм

5. Висновки. Метою роботи є підвищення ефективності електроерозійної обробки, що включає використання сучасних лінійних приводів з високою динамічною точністю в електроерозійних процесах. Для цього вирішені питання: оптимізації енергетичних режимів іскрових розрядів. Підвищення продуктивності можливо досягти оптимальним поєднанням чинників, що дозволяють збільшити долю корисної енергії імпульсу, його потужність і частоту дотримання робочих імпульсів. Для цього необхідно оптимальне співвідношення між максимальним значенням сили струму I_{max} в імпульсі і його тривалістю $\tau_{п}$. Визначена тривалість робочого циклу у декілька разів більше, ніж у верстатах з КГП-приводами.

Видалення шламу відбувається за рахунок помпового ефекту від швидких переміщень електроду замість прокачування. Лінійний привід не лише забезпечує в 1,5 ~ 3 рази більшу швидкість вирізання, але і дозволяє обробляти на глибину, недоступну для електроерозійних верстатів із звичайними приводами.

Список літератури

1. Амитан Г. Л., Барон Ю. М. и др. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методом обработки. / Под общ. ред. Волосатова В. А. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. – 719 с.
2. Киселев М. Г. Электроэрозионная обработка материалов: Учебно-методическое пособие, -Мн.: УП "Технопринт", 2004. – 112 с.
3. Думпе В. Э. Электроэрозионная обработка деталей, К., "Техника", 1975. – 144с.
4. Артамонов Б. А., Волков Ю. С. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. – М. Высш. шк., 1983. – 247 с.
5. Мицкевич М. К., Бушик А. И. и др. Электроэрозионная обработка металлов, М.: Наука и техника, 1988. – 216 с.
6. [http:// www. Sodick.ru](http://www.Sodick.ru)
7. [http:// www. mashizdat.ru](http://www.mashizdat.ru)
8. Москаленко В. В. Электрический привод. Учебное пособие для электротехн. спец. – М.: Высш. шк., 1991. – 430 с.
9. Сандлер А. С. Электропривод и автоматизация металлорежущих станков. Учебное пособие для вузов. М., "Выш. школа", 1972. – 440с.

References (transliterated)

1. Amitan G. L., Baron Yu. M. et al. Handbook of electrochemical and electrophysical processing methods. / Under the total. ed. Volosatova V. A. - L.: Mashinostroyeniye, Leningrad. department, 1988. - 719 p.
2. Kiselev M. G. Electroerosive processing of materials: Educational and methodical manual, -Mn.: UE "Technoprint", 2004. - 112 p.
3. Dumpe V. E. Electroerosive machining of parts, K., "Technique", 1975. - 144p.
4. Artamonov B. A., Volkov Yu. S. Electrophysical and electrochemical methods of processing materials. - M. Higher. school, 1983. - 247 p.
5. Mitskevich M. K., Bushik A. I. et al. Electroerosive processing of metals, Moscow: Nauka i Tekhnika, 1988. – 216 p.
6. [http:// www. Sodick.ru](http://www.Sodick.ru)
7. [http:// www. mashizdat.ru](http://www.mashizdat.ru)
8. Moskalenko VV Electric drive. Textbook for electrical engineering. specialist. - M.: Higher. school, 1991. - 430 p.
9. Sandler A. S. Electric drive and automation of metal-cutting machines. Textbook for universities. M., "High School", 1972. – 440p.

Відомості про авторів/ About the Authors

Набока Олена Володимирівна (Naboka Olena) – кандидат технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, тел...: + 380 50 986 50 27, e-mail: namirauza@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3997-5481

Фадеев Валерій Андрійович (Fadeev Valeri) – доктор технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, тел...: + 380 50 323 64 18, e-mail: fadeev@fed.com.ua, ORCID: 0000-0003-2535-9039

Євсюкова Фатима Магаметбієвна (Yevsiukova Fatyma) – доцент кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, тел...: + 380 97 941 22 99, e-mail: fatimaevsukova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9764-4106

ОХРИМЕНКО О.О., КАМЧАТНА–СТЕПАНОВА К.В., КЛОЧКО Л.В., ПЕРМЯКОВ Є.О., МИРОНЕНКО О.Є., ІВАНЧЕНКО В.В.

АНАЛІТИЧНИЙ ПІДХІД ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ МІЦНІСНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИМЕТРИЧНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛІС

Поверхневий шар у процесі швидкісного зубофрезерування асиметричних циліндричних зубчастих коліс зазнає неодноразового пластичного деформування та призводить, у свою чергу, до зміни фізико-механічних властивостей та структури металу. З метою підвищення навантаженості зубців у приводах машин важкого машинобудування пропонується застосування зубчастих передач з асиметричною формою зубців яка відображає функціональну різницю передач за ГОСТ1643-81 та асиметричним профілем. Відповідно до змін, що відбуваються в поверхневому шарі, глибина зміцненого деталі зміни характеру інтерференційних ліній на рентгенограмах при пошаровому стравлюванні досліджуваної поверхні в залежності від швидкості різання. Швидкість різання постає як фактор, що визначає швидкість здійснення пластичної деформації поверхневого шару. З підвищенням швидкості деформації відбувається зростання межі міцності та межі плинності конструкційних матеріалів. Підвищення межі плинності знижує пластичність матеріалу, що обробляється і діє в бік зменшення ступеня зміцнення. З підвищенням температури та ступеня деформації швидкість перебігу процесу розміцнення, що відбувається за рахунок рекристалізації, зростає. Підвищення температури різання сприяє підвищенню інтенсивності процесу розміцнення та зменшенню ступеня зміцнення.

Ключові слова: Асиметричні, циліндричні, зубчасті колеса, швидкісне зубофрезерування, поверхневий шар, пластичне деформування, глибина зміцненого шару, швидкість різання, межа міцності, межа плинності

OKHRIMENKO O.A., KAMCHATNAYA – STEPANOVA K.V., KLOCHKO L.V., PERMYAKOV E.O., MIRONENKO O.E., IVANCHENKO V.V.

ANALYTICAL APPROACH FOR PREDICTING THE STATE OF STRENGTH PARAMETERS OF ASSYMETRIC GEARS

During the process of high-speed gear hobbing of asymmetrical cylindrical gear gears, the surface layer undergoes repeated plastic deformation and leads, in turn, to a change in the physical and mechanical properties and structure of the metal. In order to increase the importance of teeth in machine drives of important machinery, the use of gears with an asymmetrical shape of the teeth is demonstrated, which reflects the functional difference of gears according to GOST 1643-81 and an asymmetrical profile. In accordance with the changes, occurring in the surface layer, the depth of the hardened layer is determined by the change in microhardness across the cross section of the part and by changing the nature of interference lines on x-ray diffraction patterns during layer-by-layer etching of the surface under study depending on the cutting speed. The cutting speed acts as a factor that determines the rate of plastic deformation of the surface layer. With increasing strain rate, the tensile strength and yield strength of structural materials increase. Increasing the yield strength reduces the plasticity of the processed material and acts in the direction of reducing the degree of hardening. With increasing temperature and degree of deformation, the rate of the softening process, which occurs due to recrystallization, increases. An increase in cutting temperature increases the intensity of the softening process and reduces the degree of hardening.

Keywords: Asymmetrical, cylindrical, wheel gears, high-speed hobbing, surface layer, plastic deformation, depth of the hardened layer, cutting speed, tensile strength, yield strength

Введення. У багатьох зубчастих передачах навантаження на один зуб значно вище і застосовується для більш тривалих періодів часу. З метою підвищення навантаженості зубців в приводах машин важкого машинобудування пропонується застосування зубчастих передач з асиметричною формою зубців яка відображає функціональну різницю передач за ГОСТ1643-81 та асиметричним профілем [2, 3]. У разі асиметричних передач стандартну симетричну зубчасту рейку оснащення змінюють шляхом зміни кута тиску на одній із бічних поверхонь. Однак такий спрощений підхід до конструкції асиметричної передачі істотно обмежує можливість максимізувати продуктивність для широкого спектра можливих застосувань цих передач.

Мета досліджень. Установити аналітичний підхід прогнозування стану параметрів міцності асиметричних зубчастих коліс за рахунок технологічних та конструктивних факторів, що впливають на глибину та ступеня зміцнення поверхневого шару асиметричних зубчастих коліс. [1, 2, 3, 4, 5].

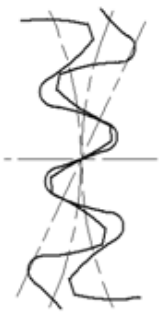
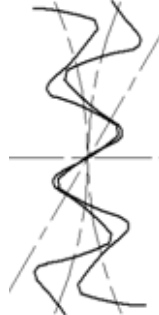
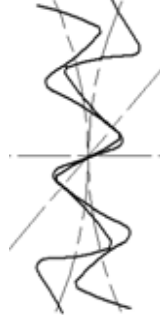

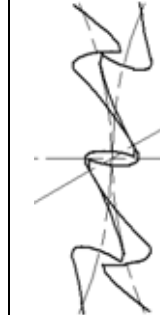
Літературний обзор. Альтернативний метод Direct Gear Design не обмежений попередньо обраними основними параметрами зацеплення і забезпечує асиметричну геометрію зубів шестерні, оптимізовану для конкретних додатків із зубчастою передачею [1, 3, 6, 7, 8].

У Табл. 1 представлено різні випадки передавання крутного моменту парами циліндричних зубчастих коліс з ідентичними зубчастими передачами на 24 зубці для ілюстрації двоспрямованих та односпрямованих приводів. Випадки №1 і №2. Зубці шестерні симетричні, і їхня довговічність поверхні однакова для обох бічних поверхонь зубів. Корпус №1 представляє традиційно сконструйовані кутові зубчасті колеса 25° з профілем повного радіуса. Цей випадок вважається базовим, і його контактна напруга Герца, несуче навантаження і питома ковзна швидкість приймаються як 100% для порівняння з іншими випадками передачі. Цей тип профілів зубчастих коліс використовується в аерокосмічній промисловості, оскільки вони забезпечують кращу міцність на вигин і зносостійкість поверхні бічних поверхонь порівняно зі стандартними 20° датчиками кута тиску, типовими для комерційного застосування. Корпус №2 - це симетричні шестерні з високим кутом 32°, оптимізовані методом Direct Gear Design. Його контактна напруга в Герцах менша приблизно на 8%, а питома швидкість ковзання приблизно на 6% нижча, ніж у базової шестерні. Це має забезпечити кращу бічну поверхню бічної поверхні зуба або опір скорингу. Однак навантаження на підшипник на 7% вище.

Випадок №3. Ці асиметричні шестерні призначені для передавання здебільшого односпрямованого навантаження з кутом нахилу 40°, за якого бокові поверхні зубів забезпечують 12% контактної напруги та 25% зменшення швидкості ковзання.

Водночас контактна напруга і швидкість ковзання берегових флангів близькі до цих параметрів базових передач і повинні забезпечувати таку саму навантажувальну здатність поверхні зуба, як і базові зубчасті колеса.

Таблиця 1 – Різні випадки передавання крутного моменту парами циліндричних зубчастих коліс з ідентичними зубчастими передачами

Випадок #	1	2	3	4	5
Передача навантаження	Двоспрямований		Переважно односпрямований	Односпрямований	
Навантажені боковини	обидва	обидва	привід, вигін з нижчим навантаженням	привід, винос без навантаження	Тільки приводний фланг
Профіль зуба	Симетричний (базовий)	Симетричний	Асиметричний	Асиметричний	Асиметричний
Зубчасте зачеплення					
Кут тиску, °	25	32	40/24*	46/10*	60/-**
Коефіцієнт асиметрії	1.0	1.0	1.19	1.42*	-**
Коефіцієнт контакту	1.35	1.2	1.2/1.44*	1.2/1.0	1.2/-**
Контактна напруга в герцах, %	100	92	88/102*	86/150*	94/-**
Навантаження на підшипник, %	100	107	118/99*	130/92*	181/-**
Питома швидкість ковзання, %	100	94	75/108*	68/97*	49/-**

* для ведучого/обертального зубчастого колеса;

** сітка для бічної поверхні зуба відсутня.

Цей тип передач може знайти застосування для приводів з одним основним напрямком передавання навантаження, але вони повинні бути здатні переносити більш легке навантаження протягом коротших періодів часу в протилежному напрямку.

Випадок №4. Ці асиметричні шестерні мають кут повороту на 46°, що дає змогу зменшити контактну напругу на 14% і швидкість ковзання на 32%. Недоліком таких зубів є дуже високе (+30%) навантаження на підшипник. Ці типи передач призначені тільки для односпрямованої передачі навантаження. Їхні бічні кути нахилу під кутом 10° мають незначну вантажопідйомність. Ці типи зубчастих передач можуть знайти застосування для приводів тільки з одним напрямком передавання навантаження, яке може іноді не мати контакту із зубцями бічної поверхні навантаження, як у разі зубного відскоку у високошвидкісних передачах.

Асиметричні шестерні № 5 мають тільки бічні поверхні зубів із крайнім кутом тиску 60°, без будь-яких евольвентних бічних зубів. У результаті навантаження на підшипник значне.

Вибір коефіцієнта асиметрії зубчастої передачі K дорівнює

$$K = \frac{\cos \alpha_{wc}}{\cos \alpha_{wd}}, \quad (1)$$

де: α_{wd} – кут тиску приводу для ведучого зубчастого колеса, α_{wc} – кут тиску приводу для обертального зубчастого колеса.

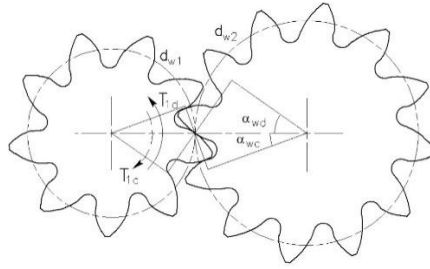


Рис. 1. Асиметрична зубчаста пара

Існує багато застосувань, наприклад, описаних у випадку №3, де шестерна пара передає навантаження в обох напрямках навантаження, але зі значно різною величиною і тривалістю (Рис.1). У цьому випадку коефіцієнт асиметрії зубчастої передачі K може бути визначений вирівнюванням потенціалу накопичення поверхневого ушкодження зуба, що залежить від робочої контактної напруги та кількості циклів навантаження на бічні поверхні зубів. Інакше кажучи, коефіцієнт безпеки контактної напруги S_H має бути однаковим для фланців приводу і берега. Цю умову можна представити як

$$S_H = \frac{\sigma_{HPd}}{\sigma_{Hd}} = \frac{\sigma_{HPC}}{\sigma_{Hc}}, \quad (2)$$

Де:

σ_{Hd} and σ_{Hc} – робочі контактні напруги для приводів,
 σ_{HPd} and σ_{HPC} – допустимі контактні напруги для приводів і берегових зубів, які залежать від кількості циклів навантаження.

Потім з (2)

$$\frac{\sigma_{Hd}}{\sigma_{Hc}} = \frac{\sigma_{HPd}}{\sigma_{HPC}}. \quad (3)$$

Контактна напруга в точці кроку [5] дорівнює $\sigma_H = z_H z_E z_\varepsilon z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{d_{w1} b_w} \frac{u \pm 1}{u}}$,
 (4)

де:

$z_H = \sqrt{\frac{2 \cos(\beta_b) \cos(\alpha_{wt})}{\cos(\alpha_t)^2 \sin(\alpha_{wt})}}$ - Фактор зони, який призначений для безпосередньо спроекттованих циліндричних шестерень

$$z_H = \frac{2}{\sqrt{\sin(2\alpha_w)}}; \quad (5)$$

z_E - Коефіцієнт еластичності, що враховує властивості матеріалу редуктора (модуль пружності та коефіцієнт Пуассона); s

Z_\square – Коефіцієнт контактного відношення, його консервативне значення для циліндричних зубчастих передач дорівнює $Z_\square = 1.0$;

Z_\square – Коефіцієнт спіралі для циліндричних зубчастих коліс $Z_\square = 1.0$;

F_t – Номінальне дотичне навантаження, при діаметрі тангажу d_{w1} is $F_t = \frac{2T_1}{d_{w1}}$;

T_1 – Обертальний момент шестерні;

b_w – Ширина контактної поверхні; Знак "+" для зовнішньої передачі, знак "-" для внутрішньої передачі.

Тоді для безпосередньо спроекттованих прямозубих шестерень контактне напруження в точці кроку може бути

$$\text{представлене як } \sigma_H = z_E \frac{2}{d_{w1}} \sqrt{\frac{2T_1}{b_w \sin(2\alpha_w)} \frac{u \pm 1}{u}}. \quad (6)$$

Тепер це рівняння можна подати для контакту приводного ведучого та відомого колеса і використовувати для рівняння (3)

$$\frac{\sin(2\alpha_{wc})}{\sin(2\alpha_{wd})} = A, \quad (7)$$

де:

$$A = \frac{T_{1c}}{T_{1d}} \left(\frac{\sigma_{HPd}}{\sigma_{HPc}} \right)^2 \quad (8)$$

- - коефіцієнт, що відображає різницю прикладеного навантаження і число циклів для фланців приводу і берега;

T_{1d} і T_{1c} - T_{1d} і T_{1c} - момент обертання ведучої шестерні, прикладеної до приводу і бічних сторін зубів..

Згідно з [5] Допустима напруга за обмеженого терміну служби або коефіцієнт безпеки в обмеженому діапазоні напруг визначається з використанням коефіцієнта ZNT". Це дає змогу замінити допустимі контактні напруги в рівнянні (8) для коефіцієнтів життя

$$A = \frac{T_{1c}}{T_{1d}} \left(\frac{Z_{NTd}}{Z_{NTc}} \right)^2 \quad (9)$$

Коли визначається коефіцієнт A і вибирається кут тиску в приводі, відповідно, рівняння (7) і (1) обчислюють кут берегового тиску і коефіцієнт асиметрії.

Якщо зуби шестерні однаково навантажені як в основному, так і в зворотному напрямку обертання, то і коефіцієнт A , і коефіцієнт асиметрії K дорівнюють 1,0, а зуби шестерні симетричні.

Приклад №1: Крутний момент T_{1d} ведучої шестерні вдвічі більший за крутний момент T_{1c} . Бічна поверхня ведучого зубчастого колеса має 109 навантажувальних циклів, а бічна поверхня зубчастого колеса має 106 циклів навантаження протягом усього терміну служби зубчастої передачі. З кривої S-N [5] для сталевих передач наближене відношення коефіцієнтів життя $ZNT_d/ZNT_c = 0,85$. Тоді коефіцієнт $A = 0,852/2 = 0,36$. Припускаючи, що кут тиску в приводі дорівнює $w_d = 36^\circ$, кут берегового тиску з рівняння (7) дорівнює $w_c = 10^\circ$, а коефіцієнт асиметрії з рівняння (1) $K = 1,22$.

У багатьох односпрямованих зубчастих передачах, таких як, наприклад, трансмісії силової системи, що видаються незворотними, бокові поверхні зубів завантажуються через інерцію системи під час сповільнення приводної системи або відскоку зуба в приводах із високим числом обертів. Така вартість бічного навантаження на зуб може бути значною і має враховуватися під час визначення коефіцієнта асиметрії K .

Якщо зубчаста передача повністю незворотна, а бічні берегові зуби ніколи не передають навантаження (випадки № 4 і № 5), коефіцієнт асиметрії визначається тільки геометрією фланця приводу. У цьому разі збільшення тиску в приводі може бути обмежено мінімальним обраним коефіцієнтом контакту і розділовим навантаженням, прикладеним до підшипників. Застосування дуже високого кута тиску в приводі призводить до зменшення кута тиску в бічному напрямку і можливого підрізання його евольвентного профілю поблизу кореня зуба. Іншим обмеженням коефіцієнта асиметрії необоротного приводу зубчастого колеса є збільшення стискаючого напруження під час вигину біля берега. Зазвичай для звичайних симетричних передач стискаюча згинальна напруга не є проблемою, тому що її допустима межа значно вища, ніж для розтягувальної згинальної напруги

Основна частина .При всіх методах механічної обробки асиметричних циліндричних зубчастих коліс на ступінь їх зміцнення впливатимуть силовий та температурний фактори.

Враховуючи, що майже всі інструменти (фрези, оснащені ріжучими пластинками з твердого сплаву і мінералокераміки, ролики), що застосовуються при механічній обробці асиметричних циліндричних зубчастих коліс, мають округлену робочу ділянку із заданою величиною радіусу, для визначення зміцнення поверхневого шару від силового. частини фрези сферичним індентором [3, 4, 9, 10]. При втиску сферичного індентора в поверхню матеріалу зусилля, що діє на нього, пов'язане з діаметром відбитка:

$$P = m d_0^n, \quad (10)$$

де d_0 – діаметр відбитка; m і n -коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу.

Виразивши діаметр відбитка через площу пластичного відбитка, отримаємо

$$P = m \frac{4A_r}{\pi}^{n/2}. \quad (11)$$

Зусилля деформування відповідно до розробленої теорії контактної взаємодії:

$$P = c' k \sigma_T A_r. \quad (12)$$

Підставляючи (2) (3), отримаємо рівняння для визначення ступеня зміцнення:

$$k = \frac{m}{0,6c' \sigma_T} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{n/2} A_r^{(n/2-1)}, \quad (13)$$

де $0,6$ – коефіцієнт, що враховує перехід пластичних деформацій на основу виступів шорсткості.

Таким чином, (3) є вихідним для розрахунку ступеня зміцнення при зубофрезеруванні без урахування температурних змін [4, 6, 9].

Площа A_r у кожному даному випадку визначається умовами обробки. Коефіцієнти m і n визначаються при випробуванні на твердість за Раквеллом (HRC) при різних навантаженнях. Так, для деяких матеріалів значення цих коефіцієнтів наведено нижче:

Марка сталі:	40	45	40X	18XН3А	34ХМ	3Х13	1Х18Н9Г	38Х1Н
m	44	56	63	135	75	61	40	63
n	2,32	2,31	2,32	2,31	2,29	2,31	2,26	2,32/

При зубофрезеруванні площа контакту фрези з асиметричним циліндричним зубчастим колесом, що обробляється, що визначає ступінь зміцнення:

$$A_r = \left[\arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{\rho} \right) + h_3 \frac{\Delta h_{\text{уп}}}{\sin \alpha} \right] \times \left[\frac{t-R_z}{\sin \varphi} + 4 \arccos \left(1 - \frac{R_z}{r} \right) \right], \quad (14)$$

де Δh – пружно-пластичний шар, що відтісняється, оброблюваного матеріалу; h_3 – зношування по задній поверхні фрези; $\Delta h_{\text{уп}}$ – величина пружного відновлення, що розраховується за формулою:

$$\Delta h_{\text{уп}} = 2,4(1 - \mu^2) \left(\frac{HB}{E} \right)^2. \quad (15)$$

Підставляючи (14) (15), отримаємо рівняння для розрахунку площі фактичного контакту інструменту із заготовлею при зубофрезеруванні

$$A_r = \left[\arccos \left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) + h_3 + \frac{2,4\rho(1 - \mu^2) \left(\frac{HB}{E} \right)^2}{\sin \alpha} \right] \times \left[\frac{t-R_z}{\sin \varphi} + 4 \arccos \left(1 - \frac{R_z}{\rho} \right) \right]. \quad (16)$$

При швидкісному зубофрезеруванні площа контакту фрези із заготовлею:

$$A_r = \left[\arccos \left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) + \frac{\pi \rho \arccos \left[1 - 24(1 - \mu^2) \left(\frac{HB}{E} \right)^2 \right]}{90} \right] \times \frac{\pi \rho \arccos \left(1 - \frac{R_z}{\rho} \right)}{90}. \quad (17)$$

При ППД обробці площа фактичного контакту інструменту із заготовлею:

$$A_r = \pi R \frac{t_{\text{мисх}}}{100} \left(\frac{h_{\text{пл}}}{R_{\text{р исх}}} \right)^{v_{\text{исх}}} \times \left\{ h_{\text{киц}} \frac{180 - \arccos \frac{S - a_{\text{пл}}}{a_{\text{пл}}}}{180} + h_{\text{упр}} \left[1 - \frac{180 - \arccos \frac{S - a_{\text{пл}}}{a_{\text{пл}}}}{180} \right] \right\}. \quad (18)$$

Підставляючи (16) (18), отримаємо рівняння для розрахунку ступеня зміцнення при лезовій зубообробці від силового фактора:

$$k = \frac{m}{0,6c' \sigma_T} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{n/2} \left\{ \left[\arccos \left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) + h_3 + \frac{2,4\rho(1 - \mu^2) \left(\frac{HB}{E} \right)^2}{\sin \alpha} \right] \times \left[\frac{t-R_z}{\sin \varphi} + 4 \arccos \left(1 - \frac{R_z}{\rho} \right) \right] \right\}^{(n/2-1)}. \quad (19)$$

Для розрахунку ступеня зміцнення від силового фактора при швидкісному зубофрезеруванні

$$k = \frac{m}{0,6c' \sigma_T} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{n/2} \left\{ \left[\arccos \left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T} \right) \right] + \frac{\pi \rho \arccos \left[1 - 24(1 - \mu^2) \left(\frac{HB}{E} \right)^2 \right]}{90} \right] \times \left[\frac{\pi \rho \arccos \left(1 - \frac{R_z}{\rho} \right)}{90} \right] \right\}^{(n/2-1)}. \quad (20)$$

Причиною деформації поверхневого шару (а отже, і зміцнення) є те, що різання металів здійснюється зубом фрези з радіусом округлення ріжучої кромки і часткове пружне відновлення незрізаного

деформованого металу.

Так, для фрез з прецизійним доведенням по переднім і заднім поверхням, заточених алмазним кругом, радіус заокруглення ріжучої кромки зубів фрези $\rho = 3 \dots 10$ мкм, для черв'ячних модульних фрез виготовлених із швидкорізальної сталі Р6М5, із зносом по задній поверхні ,3 мм радіус округлення ріжучої кромки зубів фрези $= 20 \dots 60$ мкм; для черв'ячних модульних твердосплавних фрез Т15К6, ВК100М радіус заокруглення ріжучої кромки зубів фрези $\rho = 80 \dots 450$ мкм.

Розглянуті фактори, впливаючи на деформацію поверхневого шару, виявляються в залежності від режимів різання, марки оброблюваного та інструментального матеріалів, геометрії інструменту та ін.

Таким чином, метал, що утворює поверхневий шар у процесі різання, зазнає неодноразового пластичного деформування. Це призводить, своєю чергою, до зміни всіх фізико-механічних властивостей і структури металу. Згідно з дислокаційною теорією, зміцнення металу при наклепі полягає в концентрації дислокацій біля ліній зсувів. Атомні шари у місці розташування дислокацій пружно спотворені таким чином, що виникає локальний концентратор напруги. При пластичній деформації кількість дислокацій у металі може збільшитись на кілька порядків. Якщо недеформованому металі середня щільність дислокацій $j = 10^6 - 10^8$ см², то наклепаном металі вона зростає до $j = 10^{14}$ см². В результаті збільшення щільності дислокацій та взаємодії їх силових полів відбувається зміцнення металу при пластичному деформуванні.

Ступінь зміцнення асиметричних циліндричних зубчастих коліс характеризується глибиною пластично деформованого поверхневого шару h_c та ступенем наклепу N , що визначається за формулою

$$N = \frac{H_1 - H}{H} \cdot 100\% , \quad (21)$$

де H_1 – мікротвердість деталі безпосередньо з поверхні; H – мікротвердість поверхневого шару на глибині залягання h_c .

Відповідно до змін, що відбуваються в поверхневому шарі, глибина зміцненого шару визначається або зміни мікротвердості по перерізу деталі, або зміни характеру інтерференційних ліній на рентгенограмах при пошаровому стравлюванні досліджуваної поверхні.

Що стосується зустрічного зубофрезерування формула для визначення глибини наклепаного шару має такий вигляд:

$$h_n = \frac{1 - \sin \beta}{2 \sin \beta} \cdot \sin \psi_{\tilde{n}\tilde{e}} , \quad (22)$$

де $\psi_{ск}$ – кут ковзання.

Кут зсуву β розраховується за формуламіе

$$tg \beta = \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \cdot \sin \psi_{\tilde{n}\tilde{e}} , \quad (23)$$

де ξ – усадка стружки; γ – передній кут фрези.

Формула (12) справедлива, коли відношення глибини відносного впровадження, що призводить до різання без застосування мастила, відповідає $a_i/\rho \geq 0,5$, а з мастилом – $a_i/\rho \geq 0,31$. Товщина шару, що зрізається $a_i = Sz \cdot \sin \psi_{ск} \cdot \sin \rho$.

Швидкість різання постає як фактор, що визначає швидкість здійснення пластичної деформації поверхневого шару. З підвищенням швидкості деформації, як відомо, відбувається зростання межі міцності та межі плинності конструкційних матеріалів. Підвищення межі плинності знижує пластичність матеріалу, що обробляється і діє в бік зменшення ступеня зміцнення.

Швидкість різання визначає тривалість контакту задньої поверхні фрези із виробом. При великій швидкості різання поверхня деталі проходить через зону контакту, не отримавши ступеня зміцнення, який вона могла б отримати при малій швидкості різання та тривалішому контакті.

При підвищенні швидкості різання до деякої величини відбувається звуження пластичної зони та зменшення глибини її поширення нижче лінії зрізу. Те й інше діє у бік зменшення ступеня зміцнення.

Швидкість різання, як температурний фактор, змінює ступінь розвитку наросту при зубофрезеруванні черв'ячними модульними фрезами з швидкорізальної сталі Р6М5 і характер обтікання та підминання металу із зони стружкоутворення у бік задньої грані. Ступінь зміцнення збільшує дійсний радіус заокруглення ріжучої кромки і тим самим сприяє підвищенню наклепу [6, 10, 11, 12].

Швидкість різання впливає зміна інтенсивності процесу розміцнення. При пластичному деформуванні в поверхневих шарах металу відбуваються два одночасно протікають процеси: ступінь зміцнення та розміцнення. З підвищенням температури та ступеня деформації швидкість перебігу процесу розміцнення, що відбувається за рахунок рекристалізації, зростає. Підвищення температури різання сприяє підвищенню інтенсивності процесу розміцнення та зменшенню ступеня зміцнення.

При зустрічному зубофрезеруванні на вугіллі ковзання зуба фрези $\psi_{ск}$ підвищення температури контакту до температури, що відповідає максимальному крихтению, сприятиме зниженню ступеня

зміцнення, а подальше підвищення температури має діяти у бік підвищення наклепу, тому що пластичність у цьому випадку підвищується.

Висновки.

- Вибір коефіцієнта асиметрії зубців зубчастого колеса К слід враховувати залежно від застосування зубчастої передачі.

- Для асиметричної пари зубчастих передач, яка має різні умови застосування навантаження у протилежних напрямках, вибір коефіцієнта асиметрії К заснований на вирівнюванні потенційного накопиченого пошкодження поверхні зуба в обох напрямках передачі навантаження.

- Для односпрямованих ланцюгових та планетарних зубчастих передач вибір коефіцієнта асиметрії К до підстав на вирівнюванні потенційного накопиченого пошкодження поверхні зубів на обох сторонах шестерні (або планетарної передачі).

- У процесі швидкісного зубофрезерування асиметричних циліндричних зубчастих коліс поверхневий шар зазнає неодноразового пластичного деформування та призводить, у свою чергу, до зміни фізико-механічних властивостей та структури металу. - Відповідно до змін, що відбуваються в поверхневому шарі, глибина зміцненого шару визначається за зміною мікротвердості по перерізу деталі та зміни характеру інтерференційних ліній на рентгенограмах при пошаровому стравлюванні досліджуваної поверхні в залежності від швидкості різання.

- Швидкість різання виступає як фактор, що визначає швидкість здійснення пластичної деформації поверхневого шару.

- З підвищенням швидкості деформації відбувається зростання межі міцності та межі плинності конструкційних матеріалів. Підвищення межі плинності знижує пластичність матеріалу, що обробляється і діє в бік зменшення ступеня зміцнення.

- З підвищенням температури та ступеня деформації швидкість протікання процесу розміцнення, що відбувається за рахунок рекристалізації, зростає. Підвищення температури різання сприяє підвищенню інтенсивності процесу розміцнення та зменшенню ступеня зміцнення..

Список літератури

1. Henriot, G. "Gears and Planetary Geartrains, Brevini, Reggio nell'Emilia, 2001
2. Kudriavtsev, V.N. "Planetary Gears, Mashinostroenie, Leningrad, 1966.
3. Kapelevich, A.L. Direct Gear Design. CRC Press, 2013.
4. Ключко А. А. Технологическое основы обеспечения процесса зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / А. А. Ключко, А. Н. Кравцов; Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" - Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014 – 299 с.: ил., табл.; - (Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). ISBN 978-5-906703-02-6.
5. Шелковой А. Н. Критерии формирования структур и параметров систем обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. пр. Тематичний випуск : Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ ХПІ, 2013. – Вип. 8. – С. 185–200. – Укр., рос., англ. Мовами
6. Мироненко Е. В. Топография износа зубонарезного инструмента при формообразовании зубчатых реек / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск : К. : ДГМА, 2008. – Вып. 23. – С. 69–73
7. Масляная СОЖ при зубообработке: эффективность и перспективы их применения. Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов / Е. В. Мироненко, А. Г. Суслев, А. А. Ключко [и др.] // Международный информационно-технический журнал. – Харьков, 2008. – № 5. – С. 70–73..
8. Тимофеев, Ю.В. Сетевое многоуровневое представление организационно-технологических структур производственных систем / Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, Ю.Г. Гуцаленко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Збірка наукових праць. Тематичний випуск Технологія в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - №23. - С.194-213.
9. Тимофеев, Ю.В. Модернизация организационно-технологической структуры участка обработки детали «Стакан верхний» / Ю.В.Тимофеев, А.Н.Шелковой, А.А. Пермяков // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Збірка наукових праць. - Краматорськ: ДДМА. – Вип.19. – 2004. – С.75-81.
10. Magomed Hasanov, Alexander Klochko, Vadim Horoshaylo, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev Duplex Scheme of the Technological Impact of the Provision of Operational Properties of a Hardened Large Module Gears // Int. J. of Integrated Engineering Vol. 14 No. 6 (2022) p. 55-62, <http://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie>. ISSN : 2229-838X e-ISSN : 2600-7916 (Skopus)
11. . Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. Mechanics and Advanced Technologies, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
12. Ключко О.О., Саприкіна Е.В., Федорова А.О., Мироненко О.С., Іванченко В.В. Ланцюгове логарифмічне сполучення зубчастих циліндричних передач // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023, 17–20 травня 2023 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. — Харків : НТУ «ХПІ». – С. 171.

Bibliography (transliterated):

1. Henriot, G. "Gears and Planetary Geartrains, Brevini, Reggio nell'Emilia, 2001
2. Kudriavtsev, V.N. "Planetary Gears, Mashinostroenie, Leningrad, 1966.
3. Kapelevich, A.L. Direct Gear Design. CRC Press, 2013.
4. Klochko A. A. Tekhnologicheskoe osnovy` obespecheniya` processa` zuboobrabotki` zakalenny`kh` krupnomodul`ny`kh` zubchaty`kh` koles [Tekst] / A. A. Klochko, A. N. Kravcov; Donbasskaya gosudarstvennaya mashinostroitel`naya akademiya; Zakrytoe akcionerное ob-vo "ONIKS" - Kramatorsk: DGMA; Irbit: ONIKS, 2014 – 299 s.: il., tabl.; - (Seriya: «Proektirovanie i primenenie rezhushhego instrumenta v mashinostroenii» / Obshh. red. Yu.M. Solomenczev). ISBN 978-5-906703-02-6.
5. Shelkovej A. N. Kriterii formirovaniya struktur i parametrov sistem obrabotki, obespechivayushhikh zadanny`e` ekspluatatsionny`e` svoystva zakalenny`kh` krupnomodul`ny`kh` zubchaty`kh` koles / A. N. Shelkovej, E. V. Mironenko, A. A. Klochko // Vi`snik Naczi`onal`nogo

tekhni`chnogo uni`versitetu «Kharki`vs`kij poli`tekhni`chnij i`nstitut» : zb. nauk. pr. Temati`chnij vipusk : Suchasni` tekhnologi`yi v mashinobuduvanni`. – Kharki`v : NTU KhPI, 2013. – Vip. 8. – S. 185–200. – Ukr., ros., angl. Movami

6. Mironenko E. V. Topografiya iznosa zubonareznogo instrumenta pri formoobrazovanii zubchaty`kh reek / E. V. Mironenko, A. A. Klochko // Nadezhnost` instrumenta i optimizatsiya tekhnologicheskikh sistem: sb. nauch. tr. – Kramatorsk : K. : DGMA, 2008. – Vy`p. 23. – S. 69–73

7. Maslyanaya COZh pri zuboobrabotke: e`ffektivnost` i perspektivy` ikh primeneniya. Metalloobrabotka. Oborudovanie i instrument dlya professionalov / E. V. Mironenko, A. G. Suslov, A. A. Klochko [i dr.] // Mezhdunarodny`j informaczi`onno-tekhnicheskij zhurnal. – Khar`kov, 2008. – # 5. – S. 70–73..

8. Timofeev, Yu.V. Setevoe mnogourovnevoe predstavlenie organizaczi`onno-tekhnologicheskikh struktur proizvodstvenny`kh sistem / Yu.V. Timofeev, A.N. Shelkovej, Yu.G. Guzalenko // Vi`snik Naczi`onal`nogo tekhn`chnogo uni`versitetu "Kharki`vs`kij poli`tekhni`chnij i`nstitut": Zbi`rka naukovikh prac`. Temati`chnij vipusk Tekhnologi`ya v mashinobuduvanni`. - Kharki`v: NTU "KhPI", 2005. - No23. - S.194-213.

9. Timofeev, Yu.V. Modernizatsiya organizaczi`onno-tekhnologicheskoy struktury` uchastka obrabotki detali «Stakan verkhnij» / Yu.V. Timofeev, A.N. Shelkovej, A.A. Permyakov // Nadi`jni`st` i`nstrumentu ta optimi`zaczi`ya tekhnologi`chnikh sistem: Zbi`rka naukovikh prac`. - Kramatorsk: DDMA. – Vip.19. – 2004. – S.75-81.

10. Magomed Hasanov, Alexander Klochko, Vadim Horoshaylo, Borys Vorontsov, Anton Ryazantsev Duplex Scheme of the Technological Impact of the Provision of Operational Properties of a Hardened Large Module Gears // Int. J. of Integrated Engineering Vol. 14 No. 6 (2022) p. 55-62, <http://penerbit.uthm.edu.my/ojs/index.php/ijie>, ISSN : 2229-838X e-ISSN : 2600-7916 (Skopus)

11. . Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. Mechanics and Advanced Technologies, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.

12. Klochko O.O., Sapriki`na E.V., Fedorova A.O., Mironenko O.Ye., Gvanchenko V.V. Lanczyugove logarifmi`chne spoluchennya zubchastikh czili`ndrichnikh peredach // G`nformaczi`jni` tekhnologi`yi: nauka, tekhnika, tekhnologi`ya, osvita, zdorov`ya: tezi dopovi`dej KhXKhG mi`zharodnoyi naukovo-praktichnoyi konferenczi`yi MicroCAD-2023, 17–20 travnya 2023 r. / za red. prof. Sokola Ye.G. — Kharki`v : NTU «KhPI». – S. 171.

Поступила (received) 12.02.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Охріменко Олександр Анатолійович (Okhrimenko Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (067) 267-69-43; e-mail: alexhobs77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5446-6987;

Камчатна-Степанова Катерина Валеріївна (Kamchatna-Stepanova Kateryna) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-7825-1238>. E-mail: katerina.ks@i.ua

Клочко Лариса Володимирівна (Klochko Larisa) – методист Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків, Україна; тел. (096) 8295602, e-mail: klochkoL1971@gmail.com, ORCID: 0009-0006-1488-0709

Пермяков Єгор Олександрович (Permiakov Yehor) – аспірант кафедри технологій машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (098)2309163, e-mail: Bedger2014@gmail.com

Мироненко Олег Євгенович (Mironenko Oleh) аспірант кафедри комп`ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна; ORCID: [0009-0002-6626-5629](https://orcid.org/0009-0002-6626-5629), тел. 0501028428, e-mail: om7251975@gmail.com

Іванченко Владислав Володимирович (Vladyslav Ivanchenko) аспірант кафедри комп`ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ, Україна, тел. 099 178 7915, e-mail xenkok1997@gmail.com.

МАЙБОРОДА В. С., ДЖУЛІЙ Д. Ю., ЗАСТАВСЬКИЙ К. О.

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ ОПОРУ З БОКУ ПОРОШКОВОГО СЕРЕДОВИЩА НА РУХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОМУ ОБРОБЛЕНІ В КІЛЬЦЕВІЙ ВАННІ

Досліджено вплив технологічних параметрів процесу магнітно-абразивного оброблення (МАО) на сили опору руху деталей різних розмірів і форми, виготовлених з феро- і парамагнітних матеріалів які діють з боку фероабразивного порошкового середовища, сформованого з різних порошоків в магнітно-абразивний інструмент (МАІ). Визначено особливості взаємодії

структурних елементів МАІ з оброблюваними поверхнями. Встановлено вплив напруженості магнітного поля на сили опору руху деталей різних розмірів і форми в МАІ. Показано, що процес взаємодії МАІ з оброблюваними поверхнями зразків з характерними розмірами до 12 мм у кільцевій ванні шириною 35 мм відбувається в режимі "вільного обтікання", в той час, як МАО зразків з характерними розмірами більше 12 мм відбувається в режимі "обтікання" і "заклинювання" представницьких об'ємів МАІ між полюсним наконечником і оброблюваною поверхнею – в зоні сформованої малорухомої мертвої зони.

Зі зростанням розмірів частинок МАІ від 200/100 мкм до 400/315 мкм відносна величина, на яку має місце збільшення сил опору, складає 1,25–1,65, що пояснюється більшою величиною намагніченості крупніших порошоків і їх утворень в складі МАІ і відповідно більшою його жорсткістю.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення, магнітно-абразивний інструмент, великий магнітний зазор, сила опору, деталі з пара- феромагнітних матеріалів, напруженість магнітного поля.

MAIBORODA V. S., DZHULII D. Yu., ZASTAVSKIY K. O.

INVESTIGATION OF THE DRAG FORCES FROM THE SIDE OF THE POWDER ENVIRONMENT ON THE PARTS MOVEMENT DURING THE MAGNETO-ABRASIVE FINISHING IN THE ANNULAR BATH

The influence of the technological parameters of the magneto-abrasive finishing (MAF) process on the drag forces to the parts movement of different sizes and shapes, made of ferro- and paramagnetic materials, which act from the side of the ferro-abrasive powder medium formed from various powders in the magneto-abrasive tool (MAT) was investigated. The features of the interaction of the structural elements of the MAT with the surfaces being finished are determined. The influence of the magnetic field strength on the drag forces of the movement of the parts of different sizes and shapes in the MAT was established. It was shown that the process of interaction of MAT with the surfaces of samples being finished with characteristic dimensions up to 12 mm in the annular bath with a width of 35 mm occurs in the "free flow around" mode, while the MAF of samples with characteristic dimensions larger than 12 mm occurs in the "flow around" and "jamming" mode of representative volumes of the MAT between the pole tips and the surface being finished – in the zone of the formed little moving dead zone.

With the increase in the size of the MAT particles from 200/100 μm to 400/315 μm , the relative value by which the drag forces increase is 1.25–1.65, which is explained by the greater magnetization of larger powders and their formations in the composition of the MAT and, accordingly its greater rigidity.

Keywords: magneto-abrasive finishing, magneto-abrasive tool, large magnetic gap, drag force, parts made of para- and ferromagnetic materials, magnetic field strength.

Ефективне використання магнітно-абразивного оброблення (МАО) на фінішних операціях виготовлення деталей складної форми, коли доцільним є застосування верстатів з великими магнітними зазорами неможливе без вичерпної інформації про особливості формування магнітно-абразивного інструменту (МАІ), його структурування, знання умов при яких відбувається нівелювання структурних елементів МАІ відносно оброблюваних поверхонь. При цьому важливо враховувати форму і розміри оброблюваних виробів, траєкторію і особливостей їх переміщення в робочих зонах, які зазвичай мають кільцеву форму і можуть бути певної ширини і різної форми в поперечному перерізі.

Зазначені фактори в значній мірі будуть визначати продуктивність процесу МАО і здатність забезпечувати відповідну якість, які залежать від умов оброблення, нормальних і тангенціальних сил, що виникають в зонах контакту МАІ – оброблювана поверхня. Теоретичний аналіз, виконаний із застосуванням розрахунків величин інтегральної інтенсивності процесів МАО складнопрофільних деталей, таких як свердла, мітчики, лопатки ГТД дозволили встановити раціональні значення співвідношення від дії прогнозуємих нормальних і тангенціальних складових сил, які виникають при МАО [1–6]. Виконані модельні експериментальні дослідження на деталях простої форми – циліндричні зразки різних розмірів і з різних матеріалів дозволили визначити реальні значення питомих сил тертя, які виникають при МАО різними магнітно-абразивними порошками при різних умовах МАО [7].

Дослідження сил лобового опору, які виникають при МАО аналогічних зразків, наведені в [8, 9] показали, що важливими факторами є магнітні властивості матеріалів зразків, виготовлених з магнітних (феромагнітних) і немагнітних (пара- і діамагнітних) матеріалів. Наприклад, для зразків з немагнітних матеріалів, таких як Д16Т, БрОЦ, ВТ8 вони практично однакові в наведених межах зміни умов МАО і не відрізняються для різних розмірів зразків. Експериментальні дослідження показали відсутність суттєвої різниці в значеннях лобового опору при МАО зразків виготовлених як з магнітних, так і немагнітних матеріалів для швидкостей переміщення в діапазоні 1–3 м/с. Важливо відзначити, що мають місце специфічні особливості формування МАІ при визначенні сил опору, що виникають при МАО зразків з магнітних матеріалів у порівнянні з немагнітними і пов'язані з силами магнітного походження, пондеромоторними силами [9], що потребує їх більш ретельного аналізу.

Зважаючи на вищезазначене метою роботи було визначення умов МАО (швидкості оброблення, типу і розмірів використаних магнітно-абразивних порошоків, напруженості магнітного поля), форми і розмірів зразків з магнітних і немагнітних матеріалів на сили опору і визначення механізмів взаємодії окремих груп частинок, з яких формується при МАО магнітно-абразивний інструмент, з оброблюваними поверхнями.

Експериментальні дослідження проводили на установці типу кільцева ванна [4, 10] з шириною робочої зони 35 мм і висотою 30 мм. Установка має вимірювальний модуль і блок для фіксації реальних значень сил опору, що виникають з боку МАІ при МАО досліджуваних зразків.

В якості зразків використовували стовбчасті елементи висотою 30 мм виготовленні з феромагнітної сталі 40Х13 і немагнітного сплаву ВТ8. В поперечному перетині зразки мали круглу форму – циліндри з діаметром 8, 12 і 16 мм, – рівнобічний трикутник з довжиною сторони 8, 12 і 16 мм, – квадрат з довжиною сторони 8, 12 і 16 мм.

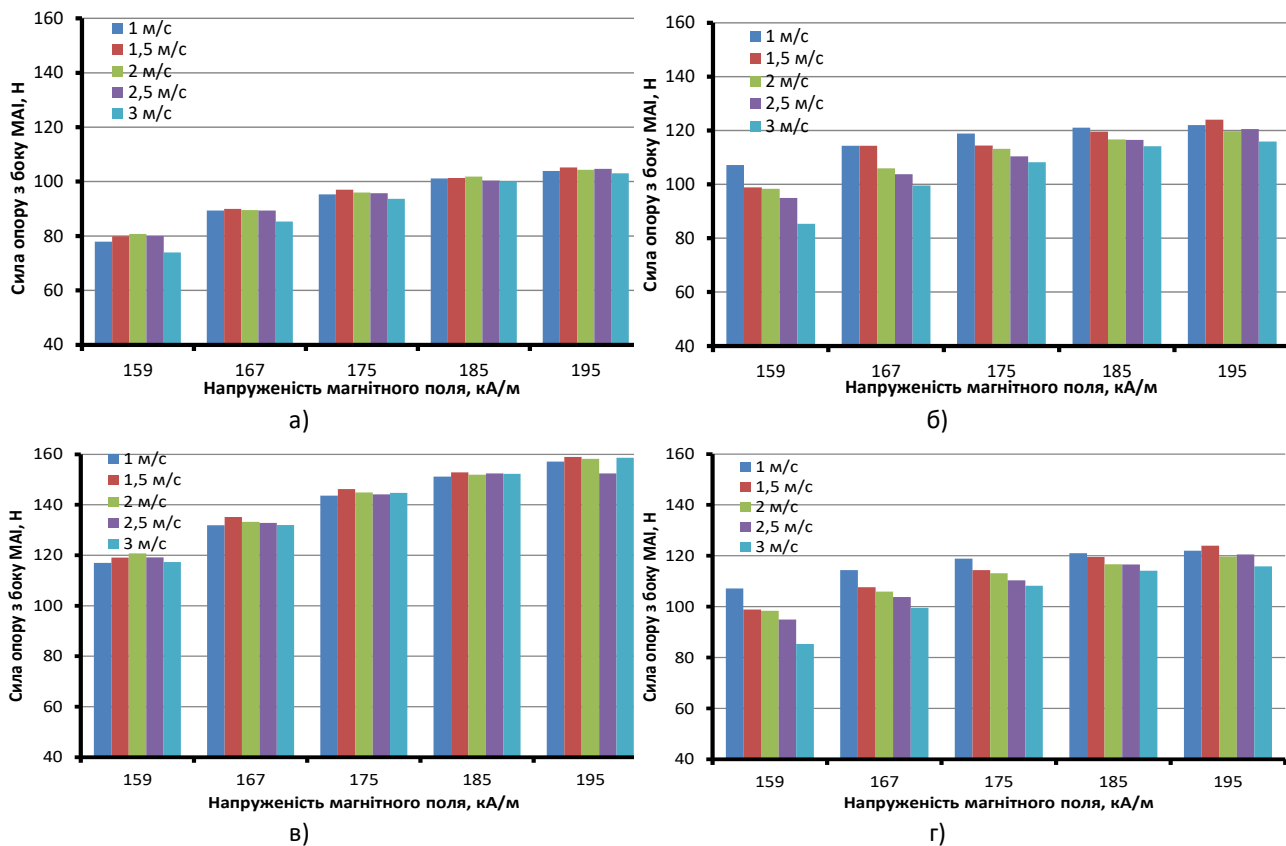
При дослідженнях зразки розташовували в вимірювальному пристосуванні в середній частині робочого зазору установки. Варіанти базування зразків по відношенню до напрямку руху в кільцевій ванні представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Варіанти базування зразків в робочій зоні

Номер варіанта				
1	2	3	4	5

В якості магнітно-абразивних порошків використовували рівновісні оскольчасті порошки Феромап з розміром частинок 200/100 і 400/315 мкм та округлі рівновісні порошки Полімам-М аналогічних розмірів [10, 11]. Коефіцієнт заповнення робочої зони дорівнював 0,8. Для відновлення форми і властивостей МАІ в процесі оброблення і підтримання його в стабільному стані застосовували відновлювальний елемент [4, 12]. Процес МАО здійснювали при швидкостях переміщення зразків в кільцевій ванні, яка змінювалась в діапазоні 1–3 м/с при напруженості магнітного поля в робочому зазорі 0–200 кА/м.

Експериментальні дослідження зміни сил опору в залежності від швидкості переміщення в процесі МАО зразків різної форми, розмірів та виготовлених з магнітних і немагнітних матеріалів дозволили підтвердити попередні результати досліджень, виконаних на циліндричних зразках [13]. Характерні гістограми зміни сил опору при різних швидкостях переміщення зразків різних розмірів і за умов різних варіантів їх базування в робочому зазорі при дослідженнях наведено на рис. 1.



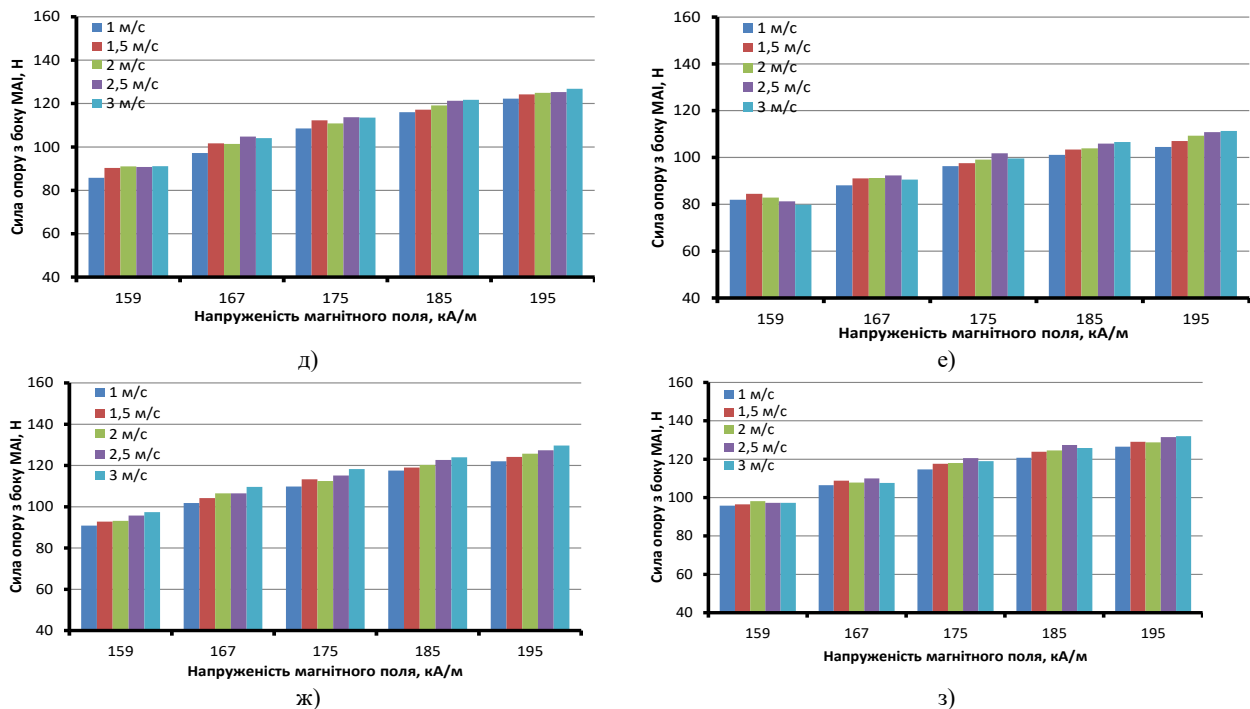


Рис. 1 – Гістограми зміни сил опору з боку МАІ при MAO зразків з поперечними перерізами у вигляді циліндру – а), б), квадрата в), г) і трикутника – д), е), ж), з) з характерним розміром 8 мм – а), б), в), г), 12 мм – б), в), г), 16 мм – д), е), ж), з), виготовлених з феромагнітного – а), б), г), е), з), немагнітного – а), в), д), ж) матеріалів при різних варіантах їх базування в робочих зазорах – варіант 1 – а), б), 2 – в), г), 5 – д), е), варіант 4 – ж), з), порошками Полімам-М (400/315 мкм) – а), в), Полімам-М (200/100 мкм) д), ж), Феромап (400/315 мкм) – б), г), Феромап (200/100 мкм) е), з) при різних швидкостях MAO і напруженості магнітного поля в робочому зазорі

Підтверджено [8, 9, 13], що швидкість MAO майже не впливає на сили опору з боку МАІ, що діють на оброблювані зразки в досліджуваному діапазоні їх швидкостей переміщення, тому при подальшому аналізі результатів вимірювань з певною точністю можна використовувати середні значення сил опору для діапазону швидкостей переміщення зразків 1–3 м/с.

Аналіз впливу розмірів частинок магнітно-абразивного матеріалу показав, що при використанні порошків з розміром частинок 400/315 мкм при обробленні як магнітних, так і немагнітних зразків величина сил опору як правило більша ніж при MAO порошками з розміром частинок 200/100 мкм. Відносна величина на яку збільшуються сили опору зі зростанням розмірів частинок МАІ складає при використанні порошку Полімам-М 1,25–1,65, а порошку Феромап – 1,25–1,5, що є достатньо близькими значеннями. Більші величини лобового опору, який створює при MAO МАІ, сформований з порошків Полімам-М, пояснюється більшою величиною намагніченості зазначених порошків і їх утворень у порівнянні з Феромап [10] і відповідно більшою жорсткістю магнітно-абразивного інструменту, більшою здатністю опиратися переформуванню під час MAO.

Результати експерименту показали, що для зразків циліндричної форми і у вигляді паралелепіпеду з квадратом в поперечному перерізі з характерним розміром 8 мм при варіантах їх базування в робочих зонах при MAO – 1, 2 та 3 (таблиця 1) сили опору, який створює МАІ при переміщенні, практично однакові як для магнітних, так і немагнітних зразків. Різниця в величинах отриманих результатів не перевищує похибки експерименту і змінюється від 20 до 110 Н в залежності від напруженості магнітного поля. Аналогічні результати мають місце при MAO зразків аналогічної форми з характерним розміром – 12 мм при варіантах їх базування в робочих зонах 1 та 2 і не перевищують 150 Н, а при варіанті базування – 3 сила опору дещо більша, але не перевищує величини 180 Н. Причому більші значення отримано при MAO магнітних зразків. Сили лобового опору з характерним розміром 16 мм і варіантом базування в робочій зоні – 5 практично однакові з величиною сил опору, отриманих на зразках з характерним розміром 12 мм. Проте має місце суттєве збільшення сил опору для зразків з характерним розміром 16 мм при варіанті їх базування 2 і 3, особливо виготовлених з магнітної сталі, які досягають 250–300 Н. Пояснення зазначеного факту полягає в особливостях структурування МАІ в робочих зонах і характером взаємодії структурних елементів МАІ з поверхнею зразків [4, 10, 12]. У випадку зазначених варіантів базування зразків з характерним розміром 16 мм в процесі MAO відбувається активне переміщення порцій порошку під дією динамічних сил в напрямку до полюсних наконечників. При цьому відбувається збільшення величини майже нерухої "мертвої зони" [4] до величини 10–12 мм, що утворюється біля поверхні полюсних наконечників. Особливо характерне таке збільшення величини "мертвої зони" при MAO феромагнітних зразків, для яких в зазорі між поверхнею зразка і полюсним наконечником має місце концентрація магнітного потоку, підвищена на 20–30% величина магнітної індукції [8], що сприяє гальмуванню руху порошкових утворень, які рухаються перед зразком утворюючи фронт збурень в МАІ [4, 12]. При цьому в зазначеній зоні відбувається ущільнення порошку.

Зважаючи на вище відзначене можна припустити, що процес взаємодії МАІ з оброблюваними поверхнями зразків з характерними розмірами до 12 мм у кільцевій ванні шириною 35 мм відбувається в режимі "вільного обтікання", в той час, як МАО зразків з характерними розмірами більше 12 мм відбувається в режимі "обтікання" і "заклинювання" представницьких об'ємів МАІ між полюсним наконечником і оброблюваною поверхнею – в зоні сформованої малорухомої мертвої зони [4, 12], аналогічно процесу МАО, що реалізується в схемах з малими робочими зазорами [14, 15].

Встановлено, що сили лобового опору зразків різних розмірів, з різних матеріалів, за умов різних варіантів їх базування в робочій зоні певною мірою залежать від величини магнітної індукції в магнітних зазорах верстата. За умов достатньої точності (похибка не перевищує 7%) отримані залежності зміни величини сил опору від реальної величини магнітної індукції – з врахуванням величини відносної магнітної проникливості МАІ, що сформовано з певного магнітно-абразивного порошку можна апроксимувати лінійними функціями в досліджуваних діапазонах зміни технологічних параметрів процесу МАО. Такі функції мають вигляд $F_L = R_B \times B + F_0$, де B – величина магнітної індукції в робочих зазорах, F_0 – сила лобового опору при $B=0$ Тл, R_B – параметр, який показує вплив величини магнітної індукції – B на силу лобового опору F_L . Порівняння результатів, отриманих в результаті експериментальних досліджень, виконаних на зразках різних за розміром, формою, при різних варіантах їх базування в робочих зонах доцільно виконувати після перерахунку по відношенню до міделевого перерізу зразків, тобто визначення модуля питомого тиску МАІ на оброблювану поверхню в залежності від реальної величини магнітної індукції – $r_B = R_B/S$, де S – величина міделевого перерізу зразка, який піддається лобовому тиску. Значення параметрів r_B наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Значення параметрів r_B , МПа/Тл

Характерний розмір зразка, мм	Форма і варіант базування при МАО	Порошок магнітно-абразивний		Магнітні властивості матеріалу зразка	
		Тип	Розмір частинок, мкм	магнітний	немагнітний
				r_B , МПа/Тл	r_B , МПа/Тл
8	1	Поліам-М	200/100	1,1	1,33
			400/315	1,68	1,98
		Феромап	200/100	1,12	1,23
			400/315	1,57	1,6
	2	Поліам-М	200/100	1,16	1,32
			400/315	1,8	1,92
		Феромап	200/100	1,18	1,23
			400/315	1,66	1,51
12	1	Поліам-М	200/100	1,14	1,16
			400/315	1,53	1,63
		Феромап	200/100	1	0,93
			400/315	1,25	1,37
	2	Поліам-М	200/100	1,23	0,96
			400/315	1,74	1,38
		Феромап	200/100	1,24	1,02
			400/315	1,42	1,25
	3	Поліам-М	200/100	1,19	0,84
			400/315	1,36	1,27
		Феромап	200/100	1,1	0,84
			400/315	1,3	1,04
16	1	Поліам-М	200/100	1,39	1,04
			400/315	1,63	1,4
		Феромап	200/100	1,09	0,86
			400/315	1,33	1,04
	2	Поліам-М	200/100	1,58	1,41
			400/315	1,96	1,46
		Феромап	200/100	1,43	1,06
			400/315	1,77	1,39
	3	Поліам-М	200/100	1,4	1,04
			400/315	1,49	1,44
		Феромап	200/100	1,39	1,12
			400/315	1,5	1,34
	4	Поліам-М	200/100	1,16	1,02
			400/315	1,48	1,35
		Феромап	200/100	1,02	1,03
			400/315	1,31	1,04
	5	Поліам-М	200/100	0,92	1,02
			400/315	1,24	1,25
		Феромап	200/100	0,87	0,88
			400/315	1,25	1,24

Аналіз отриманих значень параметру r_B дозволив встановити, що найбільша величина r_B притаманна зразкам з квадратним поперечним перетином при варіанті 2 їх розташування в робочому зазорі при МАО. Пояснення цього факту полягає в тому, що на величину сил опору з боку МАІ і відповідно модуль питомого тиску впливають особливості взаємодії структурних елементів МАІ з оброблюваними поверхнями. Зазначенні особливості полягають в тому, що певна частина порошку зміщується з ущільненої зони перед зразком в зони між плоскою боковою поверхнею і полюсними наконечниками, де вже сформована малорухома мертва зона. При цьому відбувається не тільки збільшення її товщини, а підвищення в ній щільності порошкового середовища, що сприяє активізації ефекту заклинювання і, як наслідок, до зростання загальних сил опору з боку МАІ.

Висновок. Виконано дослідження впливу умов МАО, форми та розмірів магнітних та немагнітних зразків на сили опору, що діють на них під час руху вздовж робочого зазору верстата з великим магнітним зазором, та визначено механізм взаємодії окремих груп частинок МАІ з оброблюваними поверхнями. Сили лобового опору майже не залежать від швидкості переміщення вздовж робочого зазору, в досліджуваному діапазоні, а залежать певною мірою від магнітної індукції. Визначено, що при використанні порошоків з розміром частинок 400/315 мкм величина сил опору більша ніж для порошоків 200/100 мкм як для магнітних, так і для немагнітних зразків. Встановлено, що для зразків з характерним розміром до 12 мм взаємодія МАІ з оброблюваними поверхнями відбувається в режимі "вільного обтікання", а для зразків з розміром більше 12 мм – в режимі "обтікання" та "заклинювання" представницьких об'ємів МАІ між оброблюваними поверхнями та полюсними наконечниками в малорухомих зонах, аналогічно процесам, які відбуваються при схемах МАО з малими робочими зазорами. Визначено модуль питомого тиску в залежності від реальної величини магнітної індукції, найбільша його величина притаманна для зразка квадратного перетину при його розташуванні плоскою поверхнею відносно вектора руху.

Список літератури:

1. Майборода В. С. Магнітно-абразивна обробка осевого і кінцевого різального інструменту. 5. Дослідження впливу умов базування деталей на зміну геометричних характеристик різальних кромки свердел при магнітно-абразивній обробці / В.С. Майборода, Д.В. Хроновский, В.І. Солодкий, Н. В. Ульяненко / Наукові вісті НТУУ "КПІ", 2002. – №5. – С.69–73.
2. Джулій Д. Ю. Підвищення якості багатограних непереточуваних твёрдосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Джулій Дмитро Юрійович. – Київ, 2014. – 175 с.
3. Тарган Д. В. Підвищення якості мітчиків із швидкокорозійної сталі магнітно-абразивним методом: дис. ... док. філософії / Тарган Дмитро Валентинович. – Київ, 2021. – 165 с.
4. Майборода В. С., Слободянюк І. В., Джулій Д. Ю. Магнітно-абразивная обработка деталей сложной формы. Житомир: ПП "Рута", 2017. 272 с.
5. Гейчук В. М. Синтез кінематики процесу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.03.01 "Процеси механічної обробки, верстата та інструменти" / Гейчук Володимир Миколайович – Київ, 2012. – 40 с.
6. Майборода В. С. Особливості магнітно-абразивного оброблення твёрдосплавного інструмента з захисними фасками на різальних кромках / В. С. Майборода, Д.Ю. Джулій, І. В. Слободянюк, Ю. Й. Бесарабець // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків: НТУ "ХПІ", 2022. – № 1 (5) 2022. – С. 66–73.
7. Майборода В. С. Особливості взаємодії магнітно-абразивного інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах кільцевої ванни / Р. Б. Жук, В. С. Майборода, К.О. Заставський, Р. Б. Жук // Технічна інженерія – Житомир, 2021. – № 2 (88). – С.3–13.
8. Майборода В. С. Дослідження сил лобового опору, що виникають в магнітно-абразивному інструменті при обробленні циліндричних деталей в кільцевій ванні / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій, Ю.Й. Бесарабець, І. В. Слободянюк, К. О. Заставський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків: НТУ "ХПІ", 2022. № 2 (6) 2022. – С. 16–22.
9. Заставський К. О. Вплив розміру деталей на сили лобового опору при магнітно-абразивному обробленні / К. О. Заставський, В. С. Майборода // Mechanics and Advanced Technologies. – Київ, 2022. – Том 6, № 2 (2022) – С.168–177.
10. Майборода В. С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович. – Київ, 2001. – 404 с.
11. Ткачук І. В. Геометричні характеристики магнітно-абразивних порошоків / І. В. Ткачук, В. С. Майборода // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наук. праць. – Краматорськ, 2014. – Вип. 34 – С. 49 – 55.
12. Ткачук І. В. Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зонах кільцевого типу: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Ткачук Іванна Валентинівна. – Київ, 2015. – 164 с.
13. Dzhulii D. Y. Analysis of the forces acting from the side of the magneto-abrasive tool on parts being machined during magneto-abrasive machining in conditions of the annular bath with large working gaps / D. Y. Dzhulii, V. S. Maiboroda, K. O. Zastavskiy // Mechanics and Advanced Technologies. – 2023. – Vol.7. – №1. – с.49-55.
14. Сакулевич Ф. Ю. Основы магнітно-абразивной обработки. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с.
15. Барон Ю. М. Магнітно-абразивная и магнітная обработка изделий и режущих инструментов. Ленинград: Машиностроение, 1986. 176 с.

References (transliterated)

1. Maiboroda V. S., Khronovskij D. V., Solodkij V. I., Ulyanenko N. V. *Magnitno-abrazivna obrobka osovogo i kinczevogo rizalnogo instrumentu. 5. Doslidzhennya vplivu umov bazuvannya detalej na zminu geometrichnikh kharakteristik rizalnikh kromok sverdel pri magnitno-abrazivnij obrobci* [Magneto-abrasive machining of axial and end cutting tools. 5. Research of influence of conditions of basing

- of parts on change of geometrical characteristics of cutting edges of drills at magneto-abrasive machining] / *Naukovi visti NTUU "KPI"* [Scientific news of NTUU "KPI"]. Kyiv. №5. 69–73 (2002).
2. Dzhulii D. Yu. *Pidvishhennya yakosti bagatogrannikh neperetochuvanikh tverdosplavnykh plastin pri magnitno-abrazivnomu obroblenni v kilczevij vannii* [Increasing quality of multisided not sharpened hard-alloy plates by using magneto-abrasive machining in ring-type working area]: dis. cand. tech. sciences. – Kyiv. 175 p (2014).
 3. Tarhan D. V. *Pidvyshchennia yakosti mitchykyv iz shvydkorizalnoi stali mahnitno-abrazivnym metodom* [Improving the quality of taps made of high-speed steel using the magneto-abrasive method]: dis. PhD. – Kyiv. 165 p (2021).
 4. Maiboroda V. S., Slobodianiuk I. V., Dzhulii D. Yu. *Magnitno-abrazivnaya obrabotka detalej slozhnoy formy* [Magneto-abrasive machining of parts of complex shape]: monografiya. – Zhytomyr: PP "Ruta". 272 p (2017).
 5. Geichuk V. M. *Syntezy kinematyky protsesu mahnitno-abrazivnoi obrobky v kiltsevii vannii* [Synthesis of the kinematics of the magneto-abrasive machining process in an annular bath]: Autoref. doc. tech. sciences. – Kyiv. 40 p (2012).
 6. Maiboroda V. S., Dzhulii D. Yu., Slobodianiuk I. V., Besarabets Yu. Jo. *Osoblyvosti mahnitno-abrazivnoho obroblennia tverdosplavnoho instrumenta z zakhysnymy faskamy na rizalnykh kromkakh* [Specific features of magneto-abrasive machining of carbide tools with protective chamfers on the cutting edges] / *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering] / *Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t"* [National technical Kharkiv Polytechnic University]. Kharkiv. № 1 (5). 66–73 (2022).
 7. Maiboroda V. S., Zastavskiy K. O., Zhuk R. B. *Osoblyvosti vzaiemodii mahnitno-abrazivnoho instrumentu z obrobljuvanoiu poverkheiu v umovakh kiltsevoi vannii* [Peculiarities of the interaction of the magneto-abrasive tool with the machined surface in the conditions of the annular bath] / *Tekhnichna inzheneriia* [Technical engineering]. Zhytomyr. № 2 (88). 3–13 (2021).
 8. Maiboroda V. S., Dzhulii D. Yu., Besarabets Yu. Jo., Slobodianiuk I. V., Zastavskiy K. O. *Doslidzhennia syl lobovoho oporu, shcho vynykaiut v mahnitno-abrazivnomu instrumenti pry obroblenni tsylindrychnykh detalei v kiltsevii vannii* [Investigation of the drag forces arising in the magneto-abrasive tool during the finishing of cylindrical parts in the annular bath] / *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: Tekhnolohii v mashynobuduvanni* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering] / *Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t"* [National technical Kharkiv Polytechnic University]. Kharkiv. № 2 (6). 16–22 (2022).
 9. Zastavskiy K. O., Maiboroda V. S. *Vplyv rozmiru detalei na syly lobovoho oporu pry mahnitno-abrazivnomu obroblenni* [The influence of the parts size on the drag forces during magneto-abrasive finishing] / *Mechanics and Advanced Technologies*. Kyiv. № 2 (2022). 168–177 (2022).
 10. Maiboroda V. S. *Osnovi stvorennia i vikoristannya poroshkovogo magnitno-abrazivnoho instrumentu dlya finishnoyi obrobki fasonnykh poverkhon* [Fundamentals of creating and using of the powder magneto-abrasive tool for finishing of shaped surfaces]: dis. doc. tech. sciences. – Kyiv. 404 p (2001).
 11. Tkachuk I. V., Maiboroda V. S. *Heometrychni kharakterystyky mahnitno-abrazivnykh poroshkiv* [Geometric characteristics of magneto-abrasive powders] / *Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system. Zbirnyk nauk. prats* [Reliability of the tool and optimization of technological systems. Collection of sciences. Works]. Kramatorsk. № 34. 49 – 55 (2014).
 12. Tkachuk I. V. *Formuvannya magnitno-abrazivnoho instrumentu zi stabilnimi vlastivostyami v robochikh zonakh kilczevogo tipu* [Formation of the magneto-abrasive tool with stable properties in working zones of ring type]: dis. cand. tech. sciences. – Kyiv. 164 p (2015).
 13. Dzhulii D.Y., Maiboroda V. S., Zastavskiy K. O. *Analysis of the forces acting from the side of the magneto-abrasive tool on parts being machined during magneto-abrasive machining in conditions of the annular bath with large working gaps* / *Mechanics and Advanced Technologies*. Kyiv. Vol.7. №1. 49–55 (2023).
 14. Sakulevich F. Yu. *Osnovy magnitno-abrazivnoy obrabotki* [Fundamentals of magneto-abrasive machining]. – Minsk: Science and technology. 328 p (1981).
 15. Baron Yu. M. *Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdeliy i rezhushchikh instrumentov* [Magnetic-abrasive and magnetic machining of products and cutting tools]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1986. 176 p.

Поступила (received) 15.02.2023р.

Відомості про авторів / About the Authors

Майборода Віктор Станіславович (Maiboroda Viktor Stanislavovych) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6902-6928>; e-mail: maiborodavs@gmail.com.

Джулій Дмитро Юрійович (Dzhulii Dmytro Yuriyovych) – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8863-626X>; e-mail: dmytro.dzhulii@gmail.com.

Заставський Костянтин Олегович (Zastavskiy Kostiantyn Olegovich) – аспірант кафедри конструювання машин Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-3372-369X>; e-mail: zastavskiy96@gmail.com.

ХАВІН В.Л., КИРКАЧ Б.М., ШЕРГІН С.Ю.

ВДОСКОНАЛЕНА ІНЖЕНЕРНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ РАДІАЛЬНОЇ ЖОРСТКОСТІ РОЛИКОВИХ ПІДШИПНИКІВ

В роботі представлений аналіз квазістатичних моделей та обґрунтовано вибір найбільш ефективної інженерної моделі для розрахунку радіальної жорсткості роликових підшипників. Проведено аналіз квазістатичних моделей розрахунку жорсткості роликових підшипників, який полягає в чисельно-аналітичному моделюванні співвідношень сила-переміщення в умовах контактної взаємодії. Відзначено, що для роликових підшипників частіше використовуються напівемпіричні залежності, що запропоновані Палмгреном, Джонсом і Харрісом. Для всіх чисельно-аналітичних квазістатичних моделей роликових підшипників введена узагальнююча залежність зв'язку між силою і переміщенням при контакті в рамках теорії контакту по Герцу, де характеристики жорсткості визначаються рішенням відповідної контактної задачі. Наведено числові значення констант, які отримані декількома авторами на основі емпіричних підходів або приблизного рішення контактної задачі по Герцу для сталевих підшипників. У даній роботі представлений аналіз квазістатичних моделей розрахунку жорсткості і обґрунтовано формування найбільш ефективної інженерної моделі для розрахунку констант радіальної жорсткості роликових підшипників. Для рішення контактної задачі окремого елемента кочення і доріжок кочення використана скінченноелементна періодична модель, що складається з двох половинок елемента кочення, які контактують окремо з частиною внутрішнього і зовнішнього кільця підшипника відповідно та мають фізично обґрунтовані граничні умови. Трудовитрати і комп'ютерний час, необхідний для реалізації запропонованого підходу, менше, ніж при використанні методу кінцевих елементів для визначення жорсткості «в лоб» для кожного окремого підшипника, що робить цю модель ефективною інженерною моделлю розрахунку жорсткості роликових підшипників.

Ключові слова: квазістатичні моделі роликових підшипників, ефективна чисельно-аналітична модель розрахунку констант радіальної жорсткості

KHAVIN V., KYRKACH B., SHERHIN S

AN IMPROVED ENGINEERING MODEL FOR CALCULATING THE RADIAL STIFFNESS OF ROLLER BEARINGS

The paper presents an analysis of quasi-static models for calculating stiffness and substantiates the choice of the most effective engineering model for calculating the radial stiffness of roller bearings. The analysis of quasi-static models for calculating the stiffness of roller bearings is carried out, which consists in numerical-analytical modeling of force-displacement ratios under conditions of contact interaction. It is noted that for roller bearings, semi-empirical dependencies proposed by Palmgren, Jones and Harris are more often used. For all numerical-analytical quasistatic models of roller bearings, a generalizing relationship between force and displacement at contact is introduced within the framework of the Hertz contact theory, where the stiffness characteristics are determined by the solution of the corresponding contact problem. The numerical values of constants obtained by several authors on the basis of empirical approaches or an approximate solution of the contact Hertz problem for steel bearings are given. In this paper, an analysis of quasi-static models for calculating stiffness is presented and the choice of the most effective engineering model for calculating the radial stiffness constants of roller bearings is substantiated. To solve the contact problem of a separate rolling element and rolling tracks, a finite element periodic model consisting of two halves of the rolling element is used, which are in contact separately with part of the inner and outer bearing rings, respectively, and have physically justified boundary conditions. The labor and computer time required to implement the proposed approach is less than when using the finite element method to determine the stiffness "in the forehead" for each individual bearing, which makes this model an effective engineering model for calculating the stiffness of roller bearings.

Keywords: quasi-static models of roller bearings, effective numerical-analytical model for calculating radial stiffness constants

Вступ. Підшипник кочення - це механічна конструкція, що складається з набору елементів кочення, розташованих в сепараторах між нерухомим і обертливим кільцями – обоймами. Взаємодія між кожним з цих підшипникових елементів здається досить простим, але через взаємозв'язок між елементами і процесами робить моделювання поведінки підшипника кочення складним завданням.

У зв'язку з труднощами розробки досить коректних моделей розрахунку, створення нової конструкції підшипника кочення часто здійснюється на основі експериментальних досліджень, де створений підшипник багаторазово випробовується в умовах експлуатації. Оскільки кількість конструктивних і експлуатаційних параметрів часто досить велике, процес проектування стає трудомістким і дорогим. Такі труднощі призвели до необхідності розробки аналітичних і чисельно-аналітичних моделей, де характеристики підшипника моделюються параметрично, як функції геометрії конструкції і експлуатаційних параметрів підшипників, що скорочує експериментальні роботи.

Існує три типи рівнянь, які моделюють поведінку підшипника:

- рівняння рівноваги, на основі яких формуються моделі статичного (квазістатичного) аналізу підшипників;
- рівняння визначення власних значень, де для знаходження значень критичного параметра використовуються умови рівноваги;
- динамічні рівняння, де до зовнішніх сил і моментів додаються інерційні сили і моменти.

Для підшипників кочення моделі першого типу (квазістатичні моделі) використовуються для оцінки розподілу навантаження на елементи кочення, контактних напружень і деформацій, жорсткості підшипників і втомної довговічності. Квазістатичні моделі можуть враховувати відцентрові сили, швидкості обертання елементів кочення, прослизання і змащування, технологічні зазори і посадки.

Огляд і невирішена частина проблеми. Основною відмінністю квазістатичних моделей є чисельно - аналітичне моделювання співвідношень сила-переміщення в умовах контактної взаємодії. Для шарикопідшипників це класичне рішення з еліптичним контактом по Герцу, в той час як для роликових підшипників частіше використовуються напівемпіричні залежності, запропоновані Пальмгреном, Джонсом і Харрісом [1-3]. Необхідна ще й оцінка крутильної та продольної жорсткостей системи інструмент – шпіндельний вузол.

Джонс [2] запропонував найбільш часто використовувану гіпотезу, яка стверджує, що кутова швидкість тіла кочення навколо осі, нормальної до площини контакту, дорівнює нулю на доріжці кочення, що забезпечує більший момент тертя, і відповідна доріжка кочення є керуючою.

В рамках цих моделей також вводиться таке кінематичне обмеження: відносне прослизання між тілом кочення і взаємодіючою доріжкою дорівнює нулю в точці зони контакту.

В останні десятиліття використовується гіпотеза, що є альтернативною гіпотезі Джонса, яка полягає в забезпеченні мінімуму енергії тертя, що розсіюється в контактах кочення при наявності прослизання [4].

Однією з основних моделей при пректуванні роликів підшипників є модель розрахунку їх жорсткості. Перші роботи з розрахунку жорсткості роликів підшипників кочення були виконані Палмгеном [1], Джонсом [2] та Харрісом [3]. Надалі Де-Мюль та ін. [5, 6] на основі моделі Джонса [2] чисельно-аналітично сформулювали матриці пов'язаної жорсткості роликів підшипників. Тонг і Хонг [7, 8] на основі теорії Де-Мюля та ін. [5, 6] розробили змінну в часі матрицю жорсткості кінцевого роликів підшипника. На основі контакту відповідно до теорії Герца, Лім та ін. [9, 10] отримали матрицю жорсткості роликів підшипника з 5 ступенями свободи. Гуо та Паркер [11] розробили скінченноелементну модель на основі контактної механіки і отримали жорсткість для різних типів роликів підшипників.

У цій роботі представлений аналіз квазістатичних моделей розрахунку жорсткості і обґрунтовано формування найбільш ефективної інженерної моделі для розрахунку радіальної жорсткості роликів підшипників

Основна частина. Складність визначення жорсткості підшипника полягає в необхідності коректного і відносно простого опису пов'язаної контактної взаємодії між роликом і кільцями підшипника. Теорія пружного контакту Герца разом з інтегралом С'явола [12] для оцінки розподілу зусиль по елементами кочення є основою для класичного прогнозування жорсткості підшипників кочення.

Умови контакту між роликами і доріжками кочення підшипникових кілець є важливим аспектом для визначення жорсткості підшипників. Вважається, що ролик і доріжка кочення від самого початку стикаються уздовж лінії. Відомо, що при контакті двох циліндричних тіл з паралельними осями, що стикаються уздовж лінії, утворюється порівняно невелика площа контакту. Найбільш часто використовуване приближення для визначення розподілу напружень і ширини області контакту засноване на теорії контакту Герца. У зв'язку з різкою зміною геометрії (кривизни) контактуючих тіл, розраховану в рамках класичної теорії Герца, ширину контакту слід розглядати лише як добре приближення до реального контакту.

Основні гіпотези моделей, розглянутих в даній роботі в рамках теорії Герца, наступні:

- кільця не згинаються, а піддаються тільки локальній контактній деформації;
- похибки форми доріжок кочення і роликів невеликі і не враховуються;
- не враховується сила тертя в доріжці кочення;
- відсутні осьові похибки виготовлення роликів;
- деформації лінійно-пружні;
- контактні зусилля між роликами і сепаратором зневажаються.

Для всіх чисельно-аналітичних квазістатичних моделей роликів підшипників узагальнююча залежність між силою і переміщенням в контакті в рамках теорії контакту по Герцу представляється у вигляді:

$$Q = K\delta^m, \quad (1)$$

де Q — нормальне зусилля, що діє на ролик, K — характеристика жорсткості, δ — нормальне переміщення, m — показник нелінійності (в класичних моделях $m \approx 1,1$ для роликів підшипників).

Контактне зусилля Q_n (обумовлене рівновагою) однакове для внутрішнього (Q_i) і зовнішнього (Q_e) кілець:

$$Q_i = Q_e = Q_n \quad (2)$$

Повне радіальне контактне переміщення внутрішнього кільця по відношенню до зовнішнього кільця в нормальному напрямку відносно доріжок кочення визначається співвідношенням:

$$\delta_n = \delta_i + \delta_e \quad (3)$$

де δ_i і δ_e контактні деформації в контакті елемента кочення з внутрішнім і зовнішнім кільцями відповідно. Для кінцевого ролика деформація контакту між внутрішнім кільцем і роликом проектується в напрямку контактної деформації (контактного зусилля) зовнішнього кільця підшипника. Проекція дорівнює $\delta_i \cos \beta$, а повне відносне переміщення внутрішнього і зовнішнього кілець підшипника в напрямку зусилля Q_e становить:

$$\delta_n = \delta_e + \delta_i \cos \beta \quad (4)$$

де β — кут конусності ролика.

Згідно (2) - (4) для окремого ролика, що стикається з внутрішнім і зовнішнім кільцями, маємо:

$$Q_n = K_n \delta_n^m \quad (5)$$

де результуюча характеристика жорсткості визначається залежністю:

$$K_n = \left[\frac{1}{(1/K_i)^{1/\delta} + (1/K_e)^{1/\delta}} \right]^m \quad (6)$$

У цьому виразі K_i і K_e - характеристики жорсткості контакту елемента кочення з внутрішнім і зовнішнім кільцем підшипника відповідно. Характеристики жорсткості залежать від матеріалу ролика і кільця, довжини l і діаметра ролика D , конфігурації доріжок кочення, наявності тертя і мастила і т.ін. Характеристики жорсткості визначаються шляхом рішення відповідної контактної задачі. Спосіб формування характеристик жорсткості в залежності (4) і розрізняє чисельно-аналітичні моделі і визначає рівень їх коректності.

На основі залежностей (1) - (6) сформовані моделі розрахунку жорсткості циліндричних і конічних роликів підшипників. Пружне контактне деформування між роликом і внутрішнім та зовнішнім кільцями інтерпретується як дві послідовні пружини [16]. Оскільки кут конусності конічного валика невеликий, для зручності розрахунку його прийнято розглядати як циліндричний ролик діаметром D^* , рівним середньому діаметру конічного валика.

Співвідношення (5) дозволяє сформулювати узагальнений вираз для розрахунку повного радіального переміщення в контакті ролика з кільцями:

$$\delta_r = K_n^\circ Q_n^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

$$K_n^\circ = P_r l^{m_1} D^{m_2} \quad (8)$$

Числові значення констант в залежності (8), отримані на основі емпіричних підходів або приблизного рішення контактної задачі для сталевих підшипників, були запропоновані декількома авторами (табл. 1):

Таблиця 1. Значення констант

Автор	P_r	m_1	m_2	m
Палмгрен, Харріс [1,3]	$7,68 \cdot 10^{-5}$	-0,8	0	1,1
Брандлейн та ін. [13]	$9,48 \cdot 10^{-5}$	-0,85	0	1,1
Хуперт [14]	$15,8 \cdot 10^{-5}$	-0,89	-0,093	1,1
Ло Цзивей і Тайнуй [15]	$4,8310^{-5} \left[(1+k_i)^{0,1} + (1-k_e)^{0,1} \right]$	-0,74	-0,1	1,1

У таблиці 1 $k_i = D/D_i$, $k_e = -D/D_e$ — для контакту ролика з внутрішнім і зовнішнім кільцем відповідно, D_i , D_e — діаметри внутрішньої і зовнішньої доріжок кочення відповідно. Залежність для P_r (табл. 1) в [15] поширена на підшипники з конічними роликами і має вигляд: $P_r = 4,83 \cdot 10^{-5} \left[(1+k_i)^{0,1} \cos \beta + (1-k_e)^{0,1} \right]$.

В [17] для радіальних і радіально-упорних шарикопідшипників з z елементами кочення розглядається модифікований метод Джонса-Харріса (МЖМ), де, на відміну від класичної моделі Джонса-Харріса (ЖМ), для вирішення контактної задачі окремого елемента кочення і доріжок кочення використовується не числово-аналітична модель контакту по Герцу, а скінченноелементна періодична модель, що складається з двох півсфер (половини елемента кочення), що контактують окремо з 1/2-ою частиною внутрішнього і зовнішнього кільця підшипника відповідно, мають фізично обґрунтовані граничні умови [18]. У даній роботі для більш коректного визначення характеристики жорсткості K_n° для контакту окремого елемента кочення і доріжок кочення використовується запропонована в [19] скінченноелементна модель, що складається з періодичної симетричної частини, яка включає половину елемента кочення (напівциліндр), що контактує з відповідними частинами внутрішнього і зовнішнього кільця підшипника (рис. 1). Граничні умови задавалися з умов свободи бічних поверхонь, фіксації нижньої поверхні зовнішнього кільця і навантаження верхньої поверхні внутрішнього кільця стискаючою силою Q_n . Розраховувалося зближення нижньої поверхні зовнішнього кільця та верхньої поверхні внутрішнього кільця δ_a .

Значення радіальної жорсткості для контакту окремого елемента кочення з доріжками (рис. 1) в роботі [19] визначалося залежністю:

$$k_a = Q_n / \delta_n, \quad (9)$$

Співвідношення (7) і (9) дозволяють записати вираз для визначення коефіцієнта жорсткості K_n° :

$$K_n^\circ = Q_n^{\frac{m-1}{m}} / k_a \quad (10)$$

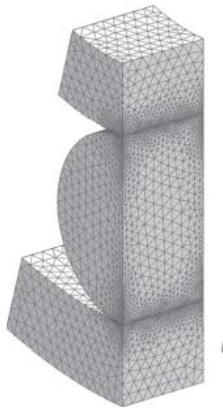


Рис.1 – Скінченноелементна модель

Значення K_n° для роликів підшипника було визначено з роботи [19], характеристики якого наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Характеристики підшипника

Характеристика	Зовнішній діаметр зовнішнього кільця D_e , мм	Внутрішній діаметр зовнішнього кільця D_i , мм	Зовнішній діаметр внутрішнього кільця d_e , мм	Внутрішній діаметр внутрішнього кільця d_i , мм	Довжина ролика l , мм	Діаметр ролика D , мм	Кількість роликів z , шт
Чисельне значення	35	30,3	19,3	15	6	5,5	11

У таблиці 3 представлені результати розрахунку характеристики жорсткості K_n° (10) за даними роботи [19] ($m = 1,1$).

Таблиця 3. Коефіцієнт жорсткості K_n°

Параметр	Стискаюче зусилля Q_n , Н	Середня радіальна жорсткість k_a Н/мм	Коефіцієнт жорсткості, $Q_n^{\frac{m-1}{m}} / k_a$, мм/і ^{$\frac{1}{m}$}	Середня характеристика жорсткості, K_n° , мм/і ^{$\frac{1}{m}$}
Чисельне значення	37	80972	1,39	$1,65 \cdot 10^{-5}$
	3706	131626	2,11	

Для статичного розподілу зусиль між елементами кочення для зовнішньої радіальної сили в ЖМ – моделі можуть бути використані залежності, отримані Стрібеком [20] за допомогою інтеграла С'яволла [12] для сили, що діє на найбільш навантажену кульку підшипника:

$$Q_{\max} = \lambda F_r, \quad (11)$$

де $\lambda = 4,37/z$ та $\lambda = 5,0/z$ для підшипника без технологічного зазору в підшипнику і за наявності зазору відповідно; z – кількість роликів в підшипнику, F_r – зовнішнє радіальне зусилля.

Радіальна жорсткість підшипника найчастіше визначається через деформацію найбільш навантаженого ролика відповідною максимальною силою Q_{\max} , що визначається в залежності (11).

Інший варіант більш коректного чисельного визначення максимальної сили Q_{\max} з урахуванням спільного деформування z^* навантажених елементів кочення розглядається, зокрема, в роботі [21] шляхом вирішення системи $(z^* + 1)/2$ нелінійних рівнянь, які з урахуванням технологічного зазору Δ в підшипнику мають вигляд:

$$F_r = Q_{\max} + 2(K_n^\circ)^{-m} \sum_{j=1}^q \delta_{nj}^m \cos \psi_j, \quad (12)$$

$$Q_{\max}^{\frac{1}{m}} = (\delta_{nj} + \frac{\Delta}{2}) / (K_n^\circ \cos \psi_j), \quad j = 1, 2, \dots, q \quad (13)$$

де $q = (z^* - 1) / 2$; $\psi_j = j\gamma$ – кут, що визначає положення j – го ролика по відношенню до радіальної зовнішньої стискаючої сили F_r , що діє на підшипник; $\gamma = 2\pi / z$ – кутова відстань між сусідніми елементами кочення. При необхідності в залежностях (12), (13) можна враховувати вплив швидкості обертання (відцентрових сил).

Невідомі δ_{nj} , $j = 1, 2, \dots, q$ і Q_{\max} – є результатом розв'язання нелінійної системи рівнянь (12), (13) при заданій силі F_r . Константа m , а також характеристика жорсткості контакту K_n° , попередньо визначаються для конкретної марки підшипника чисельно, шляхом вирішення відповідної контактної задачі методом скінченних елементів (див. рис.1) і залежностей (9), (10). Рішення нелінійної системи рівнянь (12) і (13) здійснюється методом Ньютона-Рафсона. При відсутності зазору Δ система (12), (13) має аналітичне рішення:

$$Q_{\max} = \lambda F_r \quad (14)$$

$$\lambda = (1 + 2 \sum_{j=1}^q (\cos \psi_j)^{m+1})^{-1} \quad (15)$$

Значення радіальної жорсткості підшипника визначаються із залежності (7) через абсолютну деформацію найбільш навантаженого ролика:

$$\delta_{r \max} = K_n^\circ Q_{\max}^{\frac{1}{m}} \quad (16)$$

Тоді, беручи до уваги (11) або (14), вираз (16) набуває вигляду:

$$\delta_{r \max} = K_F^\circ F_r^{\frac{1}{m}} \quad (17)$$

де $K_F^\circ = \lambda^{\frac{1}{m}} K_n^\circ$ – характеристика жорсткості підшипника в цілому.

Для моделей з табл. 1, в табл. 4 з урахуванням (15) наведені значення характеристики жорсткості K_F° для підшипника.

Таблиця 4. Характеристики жорсткості K_F°

Модель	Палмгрен, Харріс [1,3]	Брандлейн та ін. [13]	Хуперт [14]	Ло Цзивей і Тайнуй [15]	Наша робота
$K_F^\circ, 10^5 \frac{i}{\dot{i} \frac{1}{m}}$	0,747	0,838	1,11	0,898	0,667

Залежність (17) дозволяє розрахувати радіальні жорсткості підшипника [17]:

– «сікуча» жорсткість:

$$C_r = (K_F^\circ)^{-1} F_r^{\frac{m-1}{m}}, \quad (18)$$

– «дотична» жорсткість:

$$C_r^* = m(K_F^\circ)^{-1} F_r^{\frac{m-1}{m}}. \quad (19)$$

Для оцінки ефективності запропонованої моделі було проведено порівняння жорсткостей підшипника, представленого в таблиці 2, отриманих з відомих моделей, з розрахунковими даними з [19].

На рисунку 2 представлені залежності радіальних «секущих» жорсткостей (в Н/мм) роликового підшипника для відомих з літератури моделей і запропонованої в даній роботі моделі.

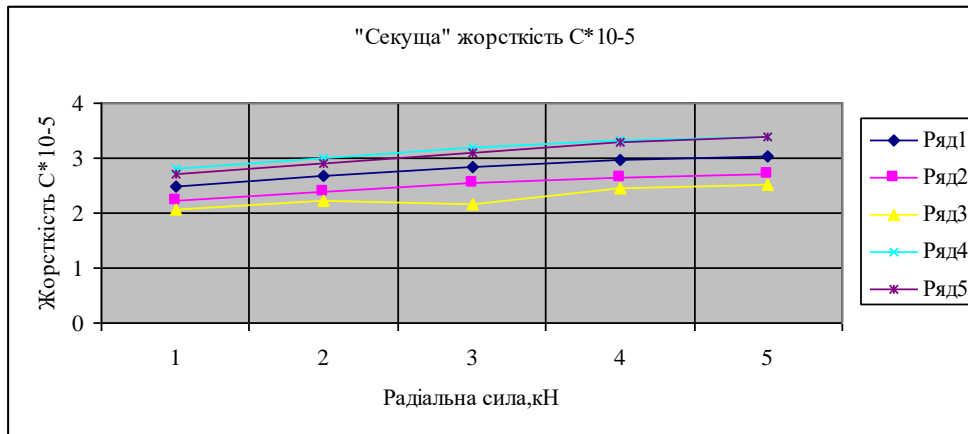


Рис.2 — Радіальна жорсткість підшипника.

Тут позначено: Ряд 1 – модель Палмгрена-Харріса [1,3], Ряд 2 – модель Брандліяна та ін. [13], Ряд 3 – модель Ло Цзівея і Тайнуя [15], Ряд 4 – модель цієї роботи, Ряд 5 – розрахунок підшипника "в цілому" методом скінченних елементів [19].

Аналіз результатів, представлених на рис.2, показує, що найкраще наближення до «точного» рішення дає модель Палмгрена-Харріса, чисельно-аналітичний підхід, запропонований в даній роботі, дає результати, які практично збігаються з розрахунком підшипника «в цілому» методом скінченних елементів.

Застосування запропонованої чисельно-аналітичної моделі дозволяє при незначних обчислювальних трудовитратах отримати сімейство кривих для роликового підшипника, що характеризують залежність його радіальної жорсткості, як від зовнішнього зусилля, так і від швидкості обертання, що забезпечить інженерний розрахунок жорсткостей з досить високим ступенем точності. Слід зазначити, що теплові ефекти і попередня затяжка, які можуть вплинути на розподіл напружень і жорсткість підшипника, не розглядалися.

У даній роботі приділено увагу ефективній моделі розрахунку радіальної жорсткості, але осьова і кутова жорсткості можуть бути вирішальними при вібраціях. В цьому випадку необхідно ефективне формування матриці жорсткості підшипника з 6 ступенями свободи, що вимагає окремого аналізу.

Висновки. Проведено аналіз запропонованого чисельно-аналітичного підходу для розрахунку радіальної жорсткості циліндричних роликових підшипників у порівнянні з відомими з літератури результатами. Запропонована чисельно-аналітична модель забезпечує підвищення точності за рахунок чисельного уточнення коефіцієнта жорсткості для контакту окремого елемента кочення з кільцями підшипника.

Перевагою запропонованого підходу є можливість автоматичного обліку технологічного зазору і швидкості обертання вала (відцентрової сили, що діє на кульку).

Запропонований в роботі підхід до розрахунку жорсткості циліндричних роликових підшипників може бути з достатнім ступенем точності використаний для практичних розрахунків жорсткості конічних роликових підшипників із заміною конічних роликів на циліндричні із середнім діаметром.

Трудовитрати і комп'ютерний час, необхідний для реалізації запропонованого чисельно-аналітичного підходу, помітно менше, ніж при використанні методу скінченних елементів для визначення жорсткості «в лоб» для кожного окремого підшипника, що робить дану модель ефективною інженерною моделлю розрахунку жорсткості роликових підшипників.

Список літератури

1. A. Palmgren, *Ball and Roller Bearing Engineering*, Philadelphia, Burbank, 1959
2. Jones, A. B. (1960), "A General Theory for Elastically Constrained Ball and Radial Roller Bearings," *Transactions of the ASME. Series D, Journal of Basic Engineering*, 82, pp 309-320.
3. Harris, T. A. (1966), *Rolling Bearing Analysis*, John Wiley
4. Gupta, P. K. (2002), "On a Kinematic Hypothesis for Angular Contact Ball Bearings," *ASTM Symposium on Rolling Element Bearings*, Orlando, FL, April 22-24, 2002, pp 39-47.
5. J. M. de Mul, J. M. Vree, and D. A. Maas, "Equilibrium and associated load distribution in ball and roller bearings loaded in five degrees of freedom while neglecting friction—part I: general theory and application to ball bearings," *Journal of Tribology*, vol. 111, no. 1, pp. 142–148, 1989.
6. J. M. de Mul, J. M. Vree, and D. A. Maas, "Equilibrium and associated load distribution in ball and roller bearings loaded in five degrees of freedom while neglecting friction—part II: application to roller bearings and experimental verification," *Journal of Tribology*, vol. 111, no. 1, pp. 149–155, 1989.
7. V.-C. Tong and S.-W. Hong, "Characteristics of tapered roller bearing subjected to combined radial and moment loads," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology*, vol. 1, no. 4, pp. 323–328, 2014.
8. V. Tong and S. Hong, "Study on the stiffness and fatigue life of tapered roller bearings with roller diameter error," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 231, no. 2, pp. 176–188, 2016.
9. T. C. Lim and R. Singh, "Vibration transmission through rolling element bearings, part I: bearing stiffness formulation," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 139, no. 2, pp. 179–199, 1990
10. T. Lim and R. Singh, "Vibration transmission through rolling element bearings, part V: effect of distributed contact load on roller bearing stiffness matrix," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 169, no. 4, pp. 547–553, 1994.
11. Y. Guo and R. G. Parker, "Stiffness matrix calculation of rolling element bearings using a finite element/contact mechanics model," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 51, pp. 32–45, 2012.
12. H. Sjøvall, "Belastningsfördelningen inom kul-och rullager vid givna yttre radial-och axialbelastningar," *Teknisk Tidskrift. Mekanik*, 1933.
13. J. Brandlein, P. Eschmann, L. Hasbargen et al., *Ball and Roller Bearings: Theory, Design, and Application*, John Wiley & Sons, Ltd, 3rd edition, 1999

14. L. Houper, "A Uniform analytical approach for ball and roller bearings calculations," *Journal of Tribology*, vol. 119, no. 4, pp. 851–858, 1997
15. L. Jiwei and L. Tianyu, *Analysis, Calculation and Application of Rolling Bearing*, Machinery Industry Press, 2009
16. S. Kabus, M. R. Hansen, and O. O. Mouritsen, "A new quasistatic multi-degree of freedom tapered roller bearing model to accurately consider non-Hertzian contact pressures in timedomain simulations," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, vol. 228, no. 2, pp. 111–125, 2014.
17. В.Л.Хавін, Б.М.Киркач, С.Ю.Погорілов, С.Ю.Шергін, Ефективна модель розрахунку нелінійної жорсткості шарикопідшипників. //Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні, 2023.–№1(7).– сс.82–93.
18. Yuan Kanga, Ping-Chen Shen, Chih-Ching Huang, Shyh-Shyong Shyr, Yeon-Pun Chang "A Modification of the Jones-Harris Method for Deep-Groove Ball Bearings," *Tribology International*, Vol. 39, No. 11, 2006, pp. 1413-1420. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2005.12.005>.
19. Alberto Gabrielli, Mattia Battarra, and Emiliano Mucchi A Critical Analysis of Finite-Element Modeling Procedures for Radial Bearing Stiffness Estimation Mathematical Problems in Engineering Volume 2021, Article ID 9955398, 18 pages <https://doi.org/10.1155/2021/9955398>
20. R. Stribeck, "Ball Bearings for Various Loads," *Transactions of the ASME*, Vol. 29, 1907, pp. 420-463
21. A new approach for the load calculation of the most loaded rolling element for the rolling bearing with internal radial clearance - The case study Radoslav Tomović .Original Article : March 19th, 2020 DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-17922/v1>

Bibliography (transliterated):

1. A. Palmgren, *Ball and Roller Bearing Engineering*, Philadelphia, Burban, 1959
2. Jones, A. B. (1960), "A General Theory for Elastically Constrained Ball and Radial Roller Bearings," *Transactions of the ASME. Series D, Journal of Basic Engineering*, 82, pp 309-320.
3. Harris, T. A. (1966), *Rolling Bearing Analysis*, John Wiley
4. Gupta, P. K. (2002), "On a Kinematic Hypothesis for Angular Contact Ball Bearings," *ASTM Symposium on Rolling Element Bearings*, Orlando, FL, April 22-24, 2002, pp 39-47.
5. J. M. de Mul, J. M. Vree, and D. A. Maas, "Equilibrium and associated load distribution in ball and roller bearings loaded in five degrees of freedom while neglecting friction—part I: general theory and application to ball bearings," *Journal of Tribology*, vol. 111, no. 1, pp. 142–148, 1989.
6. J. M. de Mul, J. M. Vree, and D. A. Maas, "Equilibrium and associated load distribution in ball and roller bearings loaded in five degrees of freedom while neglecting friction—part II: application to roller bearings and experimental verification," *Journal of Tribology*, vol. 111, no. 1, pp. 149–155, 1989.
7. V.-C. Tong and S.-W. Hong, "Characteristics of tapered roller bearing subjected to combined radial and moment loads," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology*, vol. 1, no. 4, pp. 323–328, 2014.
8. V. Tong and S. Hong, "Study on the stiffness and fatigue life of tapered roller bearings with roller diameter error," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 231, no. 2, pp. 176–188, 2016.
9. T. C. Lim and R. Singh, "Vibration transmission through rolling element bearings, part I: bearing stiffness formulation," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 139, no. 2, pp. 179–199, 1990
10. T. Lim and R. Singh, "Vibration transmission through rolling element bearings, part V: effect of distributed contact load on roller bearing stiffness matrix," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 169, no. 4, pp. 547–553, 1994.
11. Y. Guo and R. G. Parker, "Stiffness matrix calculation of rolling element bearings using a finite element/contact mechanics model," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 51, pp. 32–45, 2012.
12. H. Sjøvall, "Belastningsfördelningen inom kul-och rulllager vid givna yttre radial-och axialbelastningar," *Teknisk Tidskrift. Mekanik*, 1933.
13. J. Brandlein, P. Eschmann, L. Hasbargen et al., *Ball and Roller Bearings: Theory, Design, and Application*, John Wiley & Sons, Ltd, 3rd edition, 1999
14. L. Houper, "A Uniform analytical approach for ball and roller bearings calculations," *Journal of Tribology*, vol. 119, no. 4, pp. 851–858, 1997
15. L. Jiwei and L. Tianyu, *Analysis, Calculation and Application of Rolling Bearing*, Machinery Industry Press, 2009
16. S. Kabus, M. R. Hansen, and O. O. Mouritsen, "A new quasistatic multi-degree of freedom tapered roller bearing model to accurately consider non-Hertzian contact pressures in timedomain simulations," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, vol. 228, no. 2, pp. 111–125, 2014.
17. Khavin V., Kyrkach B., Pogorilov S., Sherhin S. An effective model for calculating the nonlinear rigidity of ball bearings. // Bulletin of the National Technical University «KHPI». Series: Techniques in a machine industry. 2023.–№1(7). – pp.82–93.
18. Yuan Kanga, Ping-Chen Shen, Chih-Ching Huang, Shyh-Shyong Shyr, Yeon-Pun Chang "A Modification of the Jones-Harris Method for Deep-Groove Ball Bearings," *Tribology International*, Vol. 39, No. 11, 2006, pp. 1413-1420. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2005.12.005>.
19. Alberto Gabrielli, Mattia Battarra, and Emiliano Mucchi A Critical Analysis of Finite-Element Modeling Procedures for Radial Bearing Stiffness Estimation Mathematical Problems in Engineering Volume 2021, Article ID 9955398, 18 pages <https://doi.org/10.1155/2021/9955398>
20. R. Stribeck, "Ball Bearings for Various Loads," *Transactions of the ASME*, Vol. 29, 1907, pp. 420-463
21. A new approach for the load calculation of the most loaded rolling element for the rolling bearing with internal radial clearance - The case study Radoslav Tomović .Original Article : March 19th, 2020 DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-17922/v1>

Поступила (received) 15.02.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Хавін Валерій Львович (Khavin Valerij) – кандидат технічних наук, професор кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», тел. (057)707-61-78; e-mail: Valerij.Havin@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4827-6474.

Киркач Борис Миколайович (Kyrkach Borys) – кандидат технічних наук, професор кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», тел. (057)707-62-33; e-mail: Borys.Kyrkach@khpi.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4594-557X.

Шергін Сергій Юрійович (Sherhin Sergij) – старший викладач кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», тел. (057)707-61-78; e-mail: Serhii.Sherhin@khpi.edu.ua, ORCID: 0009-0000-3449-2064.

ЗМІСТ

<i>Гасанов М.І., Мигущенко Р.П., Шолковий О.М., Фадеев В.А., Заковоротний О.Ю., Клочко О.О., Федоренко В.С.</i> Управління життєвим циклом продукції авіаційного підприємства.....	3
<i>Черновол М.І., Пермяков О.А., Немировський Я.Б., Шепеленко І.В., Горбулик В.І.</i> Методологія технологічного проектування процесу відновлення деталей.....	10
<i>Мироненко Є.В., Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Клименко Г.П., Миранцов С.Л.</i> Сучасний стан лезової обробки блочно-модульним інструментом на важких верстатах із ЧПК	17
<i>Яковенко І.Е., Пермяков О.А., Дергоусов В.М. Науменко О.А., Янголенко Я.А.</i> Досвід синтезу багатоінструментних наладок у застосуванні до сучасних умов	30
<i>Шелковий О.М., Феденюк Д. В., Летюк В.М., Міроненко С.О., Іщенко М.Г.</i> Алгоритм пошуку в умовах серійного виробництва варіантів структури технологічного процесу механообробки на заданій множині технологічного обладнання.....	39
<i>Новіков Ф. В., Полянський В. І</i> Теоретичне визначення температури різання при лезовій обробці	50
<i>Степанов М.С., Полонський Л.Г., Літовченко П.І., Іванова М.С., Корнієнко В.О.</i> Визначення забрудненості мор механічними домішками при шліфуванні валків прокатних станів.....	58
<i>Хавін В.Л., Киркач Б.М., Киркач О.Б., Хавіна І.П.</i> Статичний аналіз шпиндельного валу мобільного розточувального верстату	65
<i>Сизий Ю.А., Сталінський Д.В., Євсюкова Ф.М., Щербініна Т.Є., Ушаков О.О.</i> Дослідження крутильних систем приводів обертання заготовки при врізному шліфуванні на верстатах моделей 3М151 і 3М152.....	78
<i>Пермяков О.А., Яковенко І.Е., Калініченко В.А., Скиба О.С., Южкович П.</i> Реверсивний інжиніринг та впровадження сучасних методів і засобів контрольних операцій.....	91
<i>Степанов М.С., Літовченко П.І., Іванова М.С., Корнієнко В.О., Іванова Л.П., Французов В.І.</i> Підвищення ефективності очистки мор в барабанних магнітних сепараторах на вальцешліфувальних верстатах.....	100
<i>Сасько О.Ф., Губський С.О., Чухліб В.Л., Сергієнко М.Є., Колісник К.Д.</i> Підхід до зменшення кількості технологічних переходів при виробництві гнутих профілів.....	108
<i>Фадєєв В.А., Набока О.В., Мехович К.С.</i> Технологічний реінжиніринг підприємств машинобудування: еволюція, проблеми, шляхи вирішення.....	114
<i>Набока О.В., Фадєєв В.А., Євсюкова Ф.М.</i> Фактори впливу на ефективність сучасної електроерозійної обробки.....	122
<i>Охрименко О.О., Камчатна – Степанова К.В., Клочко Л.В., Перм'яков О.О., Мироненко О.Є., Іванченко В.В.</i> Аналітичний підхід прогнозування стану міцнісних параметрів асиметричних зубчатих коліс	126
<i>Майборода В. С., Джулій Д. Ю., Заставський К. О.</i> Дослідження сил опору з боку порошкового середовища на рух деталей при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні.....	134
<i>Хавін В.Л., Киркач Б.М., Шергін С.Ю.</i> Вдосконалена інженерна модель розрахунку радіальної жорсткості роликів ідшипників.....	140

CONTENTS

<i>Hasanov M.I., Mygushchenko R.P., Sholkovy O.M., Fadeev V.A., Zakovorotniy O.Yu., Klochko O.O., Fedorenko V.S.</i> Management of the life cycle of products of the aviation enterprise.....	3
<i>Chernovol M.I., Permyakov O.A., Nemyrovskiy Y.B., Shepelenko I.V., Horbulyk V.I.</i> methodology of technological design of the process of restoration of parts,,,,,,.....	10
<i>Mironenko E.V., Kovalev V.D., Vasylychenko Y.V., Klymenko G.P., Myrantsov S.L.</i> The current state of blade processing with a block-module tool on heavy CNC machines	17
<i>Yakovenko I.E., Permyakov O.A., Dergousov V.M. Naumenko O.A., Yangolenko Ya.A</i> Experience in the synthesis of multi-instrument setups in application to modern conditions	30
<i>Shelkovy O.M., Fedeniuk D.V., Letyuk V.M., Mironenko S.O., Ishchenko M.G.</i> The search algorithm in the conditions of serial production of variants of the structure of the technological process of mechanical processing on a given set of technological equipment.....	39
<i>Novikov F.V., Polyanskyi V.I.</i> Theoretical determination of cutting temperature during blade processing ...	50
<i>Stepanov M.S., Polonskyi L.G., Litovchenko P.I., Ivanova M.S., Kornienko V.O.</i> Determination of mortar contamination by mechanical impurities during grinding of rolls of rolling mills.....	58
<i>Khavin V.L., Kyrkach B.M., Kyrkach O.B., Khavina I.P.</i> Static analysis of the spindle shaft of a mobile boring machine	65
<i>Sizyy Yu.A., Stalinsky D.V., Yevsyukova F.M., Shcherbinina T.E., Ushakov O.O.</i> Study of torsional systems of workpiece rotation drives during mortise grinding on machine tools of models 3M151 and 3M152.....	78
<i>Permyakov O.A., Yakovenko I.E., Kalinichenko V.A., Skyba O.S., Yuzhkovich P.</i> Reverse engineering and implementation of modern methods and means of control operations.....	91
<i>Stepanov M.S., Litovchenko P.I., Ivanova M.S., Kornienko V.O., Ivanova L.P., Frantsov V.I.</i> Increasing the efficiency of pest cleaning in drum magnetic separators on roller grinding machines.....	100
<i>Sayenko O.F., Gubskiy S.O., Chuhlib V.L., Sergienko M.E., Kolisnyk K.D.</i> An approach to reducing the number of technological transitions in the production of bent profiles.....	108
<i>Fadeev V.A., Naboka O.V., Mehovich K.S.</i> Technological re-engineering of machine-building enterprises: evolution, problems, ways to solve it.....	114
<i>Naboka O.V., Fadeev V.A., Yevsyukova F.M.</i> Factors affecting the effectiveness of modern electroerosion processing.....	122
<i>Okhrimenko O.O., Kamchatna – Stepanova K.V., Klochko L.V., Permyakov O.O., Myronenko O.E., Ivanchenko V.V.</i> Analytical approach of forecasting the state of the strength parameters of asymmetric gears	126
<i>Maiboroda V.S., Julyi D.Yu., Zastavskiy K.O.</i> Investigation of resistance forces from the powder medium on the movement of parts during magnetic abrasive processing in a ring bath.....	134.
<i>Khavin V.L., Kyrkach B.M., Shergin S.Yu.</i> An improved engineering model for calculating the radial stiffness of roller bearings.....	140

ДЛЯ НОТАТКІВ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ». СЕРІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ В**

Збірник наукових праць

№ 2'(8) 2023

Відповідальний редактор

*О.О. Пермяков, д-р техн. наук, професор,
НТУ «ХПІ», Україна*

*Зам. відповідального
редактора*

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

*Відповідальний
секретар:*

*О. В. Набока, канд. техн. наук, професор,
НТУ «ХПІ», Україна*

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».

Кафедра технології машинобудування та металорізальні верстати

Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: oleksandr.klochko@khpri.edu.ua, ukrstanko21@ukr.net

Підп. до друку 27.02.2023 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний. Друк офсетний.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 8,75. Тираж 100 пр. Зам. № 25.
Ціна договірна.

Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О. 61002, м. Харків, вул. Багалія, 16 Свідоцтво №
24800000000079553, від 16.05.2007 р.