



European Vector of Modern Education, Science and Production – 2026

**Series of monographs
Slovak Publishing House
NES Nová Dubnica s.r.o.**

Monograph 4

Publishing House NES
Nová Dubnica s.r.o., 2026



European Vector of Modern Education, Science and Production - 2026

**Series of monographs
Slovak Publishing House
NES Nová Dubnica s.r.o.
Monograph 4**

Publishing House NES Nová Dubnica s.r.o., 2026

Editorial board :

Róbert Hulák – PhD, NES s.r.o., Slovenská Republika

Jiří Kabelka – PhD, DEL a.s., Czech Republic

Jitka Belková – Master of Engineering and Technology, Slovenská Republika

Zdeněk Navrátil – Master of Mechanical Engineering, Czech Republic

Reviewers :

Filip Gabriš – PhD, NES s.r.o., Slovenská Republika

Jana Hudecová – Master of Engineering and Technology, Slovenská Republika

Zdeněk Králíček – PhD, DEL a.s., Czech Republic

Series of monographs Slovak Publishing House NES Nová Dubnica s.r.o.,
Slovenská Republika

Monograph 4

The authors bear full responsible for the text, quotations and illustrations

Copyright by NES Nová Dubnica s.r.o., Slovenská Republika, 2026

ISBN 988 - 963 - 8454 - 15 - 3 - 3S

Editorial compilation

Publishing House NES Nová Dubnica s.r.o.

M.Gorkého 820/27, P.O.BOX

018 51 Nová Dubnica, Slovenská Republika

tel. +421-42-4401 209

TABLE OF CONTENTS

CHAPTER 1. MODERN BASICS OF ECONOMICS, MANAGEMENT AND TOURISM	7
1.1. Outsourcing and Evolution of Logistics Providers in the Conditions of Supply Chains Transformation: Current Trends and Ukrainian Realities ..	7
1.2. Foreign Trade of Lviv Region: Structural Transformations, Geopolitical Challenges and Digital Monitoring Tools	16
1.3. Energy Logistics as a Systemic Determinant of Economic Security	28
1.4. Professional Adaptation of War Veterans: Skill-gap Analysis and Tools to Overcome it in the Labor Market	40
1.5. Marketing Research as a Strategic Instrument for Developing Competitive Strategies in the Internet Service Provider Market	48
1.6. Proactive Management as a Factor in Increasing the Competitiveness of Enterprises in Foreign Markets	58
1.7. Features of Pricing in E-Commerce in the Context of Foreign Economic Activity	66
1.8. Modern Features of Forming the Tourist Image of Ukraine in the Conditions of Global Transformations	73
1.9. Modern Basics of Strategic Management of the Enterprise at the Bifurcation Point in the Face of Business Conflicts	84
CHAPTER 2. INNOVATIVE AND MODERN FOUNDATIONS OF PEDAGOGY AND PSYCHOLOGY	95
2.1. Ethnodesign as a Prerequisite for the Formation of Environmental Competence of Learners	95
2.2. Health-Saving Technologies as a Component of Sustainable Development of the Educational Process	115
2.3. Pedagogical Skills of a Teacher of Technological Education in Forming Readiness for Teaching Project Activities with a Mathematical Component	122
2.4. Social-Oriented Education as a Means of Developing the Innovative Receptivity of Future Teachers	140
2.5. Innovative and Modern Principles of the Development of Pedagogical Science	148
2.6. Standardization of the Content of Art School Activities as a Tool for Ensuring the Quality of Primary Art Education	164
CHAPTER 3. SCIENTIFIC VIEWS ON LAW AND HISTORY	177
3.1. From the History of Fiscal Activities of Customs Offices in Ukrainian Provinces (Second Half of the XVIII – Early XX Centuries)	177
CHAPTER 4. IMPROVEMENT OF SCIENTIFIC APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF PHYSICO-MATHEMATICAL AND TECHNICAL DIRECTIONS	195
4.1. Mechanics of Forming Hollow Products from Tubes to Achieve Optimal Quality and Interchangeability: Stress-Strain State and Kinematics	195

4.2. Mechanics of Forming Hollow Products from Tubes to Achieve Optimal Quality and Interchangeability: Mechanical Conditions for Quality Optimization	212
CHAPTER 5. THEORETICAL, METHODOLOGICAL AND HISTORICAL ASPECTS OF THE ATHLETE TRAINING SYSTEM	225
5.1. Historical Aspects of the Development of Gymnastics in the World and in Ukraine (Using the Example of Kirovograd Region)	225
5.2. Modern Approaches to the Physical Training of Volleyball Players Based on Calisthenics	248
5.3. Formation of Team Cohesion as a Component of Training of Young Volleyball Players at the Stage of Preliminary Basic Training	270
5.4. Formation of Technical Skills of Young Football Players at the Initial Stage of Multi-Year Training	282
5.5. Programming of the Pre-Competition Cycle of Athletes of Specialized Basic Training in Combat Sambo	304
CHAPTER 6. THEORETICAL ASPECTS OF IMPLEMENTING CLOUD TECHNOLOGIES IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF TRAINING FUTURE ENERGY INDUSTRY SPECIALISTS	330
4.1. Possibilities of Using Cloud Technologies in the Educational Process of Training Future Energy Industry Specialists	330
4.2. Introduction of Cloud-Based Services into the Educational Process of Training Future Energy Industry Specialists	333
ANNOTATION	341
ABOUT THE AUTHORS	349

**CHAPTER 4. IMPROVEMENT OF SCIENTIFIC APPROACHES TO THE
DEVELOPMENT OF PHYSICO-MATHEMATICAL AND TECHNICAL
DIRECTIONS**

**4.1. Mechanics of Forming Hollow Products from Tubes to Achieve Optimal Quality
and Interchangeability: Stress-Strain State and Kinematics**

**МЕХАНІКА ФОРМУВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ ІЗ ТРУБ ДЛЯ
ДОСЯГНЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ЯКОСТІ ТА ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ:
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН І КІНЕМАТИКА**

Сучасне машинобудування, металургійне обладнання та транспортні системи потребують широкого застосування осесиметричних порожнистих деталей, зокрема роликів рольгангів, конвеєрних роликів, опорних і напрямних елементів. Такі вироби працюють в умовах циклічних навантажень, інтенсивного зносу та підвищених контактних напружень, що висуває жорсткі вимоги до їх геометричної точності, міцності та довговічності.

Традиційні способи виготовлення подібних деталей (механічна обробка з масивної заготовки, зварювання окремих елементів, штампування з подальшим розточуванням) характеризуються значною матеріалоемністю, високими енергетичними витратами та наявністю структурних неоднорідностей у зоні з'єднань. Наявність зварних швів або концентраторів напружень знижує експлуатаційну надійність виробів та ускладнює забезпечення їх взаємозамінності.

Формування горловин безпосередньо на трубній заготовці методом ротаційної обкатки є ефективною альтернативою зазначеним технологіям. Процес забезпечує локалізацію пластичної деформації в обмеженій зоні контакту, раціональний перерозподіл металу та можливість отримання перехідних ділянок складної конфігурації без додаткових складальних операцій.

Особливої актуальності набуває формування відносно тонких горловин, коли необхідно зменшити діаметр при збереженні достатньої товщини стінки та несучої здатності виробу. У таких умовах механіка процесу визначається складним напружено-деформованим станом, змінною геометрією осередку деформації та впливом термомеханічних факторів.

Формування горловин на трубних заготовках методом локального пластичного деформування є складним просторовим процесом, що поєднує радіальне стискання, тангенціальний зсув і осьовий перерозподіл металу в обмеженій зоні контакту інструмента із заготовкою. На відміну від традиційних операцій штампування або редукування, ротаційна обкатка характеризується нестационарністю навантаження, переміщенням осередку деформації вздовж поверхні заготовки та змінною геометрією контактної площадки.

Особливістю формування відносно тонких горловин є необхідність забезпечення значного зменшення діаметра без критичного зменшення товщини стінки та без втрати стійкості оболонки. У цих умовах процес визначається

складним напружено-деформованим станом, у якому одночасно реалізуються стискуючі, розтягуючі та зсувні компоненти напружень. Орієнтація головних напружень змінюється в міру переміщення контактної зони, що обумовлює просторовий характер пластичної течії металу.

Кінематика процесу визначається взаємодією обертального руху заготовки, поступального переміщення інструмента та локального ковзання в зоні контакту. Величина часткового обжаття за один оберт, геометрія робочої поверхні інструмента, коефіцієнт тертя та температурний режим формують структуру осередку деформації та характер розподілу логарифмічних деформацій уздовж твірної горловини.

Дослідження напружено-деформованого стану і кінематики формування є необхідною передумовою встановлення закономірностей перерозподілу товщини стінки, визначення меж технологічних можливостей процесу та прогнозування силових параметрів. Саме аналіз механіки локальної пластичної деформації дозволяє перейти від емпіричного підбору режимів до науково обґрунтованого керування формуванням.

Отже, метою даного підрозділу є систематизація механічних уявлень про формування горловин на трубах, аналіз напружено-деформованого стану, кінематичних особливостей осередку деформації та встановлення кількісних зв'язків між геометрією інструмента, режимами деформування та структурою пластичної течії металу.

Процес формування горловин на трубчастих заготовках методом ротаційної обкатки інструментом тертя належить до класу локалізованих осесиметричних процесів пластичного формозмінення з рухомою зоною деформації. Його специфіка полягає у поєднанні редукування діаметра з одночасною зміною товщини стінки, що принципово відрізняє даний процес від класичних схем витяжки, обтиснення чи профілювання.

У випадку формування горловин відносно малого діаметра ($D_0/D \geq 2 \dots 4$) відбувається:

- значне зростання кривизни оболонки;
- локалізація пластичної зони в обмеженій області контакту;
- істотна зміна напружено-деформованого стану вздовж утворюючої;
- перерозподіл товщини стінки в осьовому та радіальному напрямках.

Більшість існуючих аналітичних підходів базуються на гіпотезах тонкостінної оболонки, плоскої деформації або припущенні про відсутність витяжки вздовж утворюючої. Такі припущення є коректними лише для обмеженого діапазону відносних товщин ($S/D \leq 0,1$) та помірних ступенів редукування. У випадку формування горловин малого відносного діаметра ці передумови перестають бути адекватними.

Отже, необхідний узагальнений підхід, що враховує:

- змінність геометрії контактної площадки;
- еволюцію кривизни оболонки;
- просторовий характер напруженого стану;

- кінематичну нестаціонарність процесу.

Геометрія контакту та параметри руху. Геометрія контакту інструмента із трубчастою заготовкою та кінематичні параметри процесу визначають базову структуру напружено-деформованого стану при формуванні горловин методом ротаційної обкатки. У сучасних дослідженнях процес розглядається як локалізована нестаціонарна пластична течія з рухомою зоною деформації, просторовою кінематикою та еволюційною зміною геометрії виробу [2–4, 12]. Саме поєднання обертального руху заготовки та поступального переміщення інструмента формує специфічну гвинтову траєкторію контакту, що принципово відрізняє цей процес від класичних осесиметричних схем обробки тиском.

Нехай трубчаста заготовка початкового радіуса R_0 і товщини стінки S_0 обертається з кутовою швидкістю ω , тоді як інструмент тертя переміщується вздовж осі зі швидкістю v . Осьова подача за один оберт визначається співвідношенням

$$h = \frac{v}{\omega}. \quad (1)$$

Параметр h має не лише кінематичний, а й структуроутворюючий зміст: він визначає крок гвинтового переміщення контактної площадки, ступінь перекриття послідовних зон деформації та інтенсивність накопичення пластичної деформації за цикл навантаження [12]. Зі зменшенням подачі підвищується рівномірність перерозподілу деформації, однак зростає тривалість процесу та енергетичні витрати, що підтверджено в роботах [5, 9].

Контакт між інструментом і заготовкою реалізується в обмеженій зоні шириною b , яка залежить від кута нахилу робочої поверхні інструмента φ , локальної товщини стінки S , миттєвого радіуса R та коефіцієнта тертя μ . Геометрія цієї зони є змінною в процесі редукування, оскільки зі зменшенням радіуса відбувається перерозподіл нормальних і дотичних складових контактної взаємодії. Дослідження процесів neck-spinning показують, що навіть незначна зміна кута φ суттєво впливає на довжину пластичної зони та характер течії металу [2, 4].

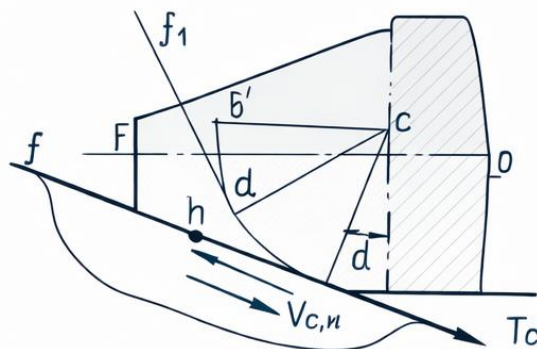


Рис. 1 – Схема взаємодії заготовки та інструмента в меридіальному напрямку

На відміну від традиційних моделей, у яких контактна площадка вважається фіксованою в просторі, реальний процес характеризується її гвинтовим переміщенням уздовж поверхні заготовки [2, 3]. Кутове зміщення контактної зони за один оберт визначається як:

$$\Delta\varphi = \frac{h}{R}. \quad (2)$$

Таким чином, формування горловини має дискретно-накопичувальний характер: кожен оберт створює нову локальну зону пластичної деформації, частково перекриваючи попередню. Величина $\Delta\varphi$ визначає ступінь перекриття деформованих ділянок і безпосередньо впливає на стабільність товщини стінки та геометричну точність профілю. Зменшення $\Delta\varphi$ сприяє згладженню градієнтів деформації, тоді як його зростання може призводити до хвилястості поверхні та нерівномірного розподілу напружень.

Швидкість точки на поверхні заготовки має дві взаємно перпендикулярні складові: окружну:

$$v_{\tau} = \omega R, \quad (3)$$

та осьову:

$$v_z = v. \quad (4)$$

Результуюча швидкість ковзання відносно інструмента визначається як:

$$v_{st} = \sqrt{(\omega R)^2 + v^2}. \quad (5)$$

Наявність двох ортогональних складових формує просторове поле швидкостей ковзання, яке не може бути адекватно описане лише у площині меридіонального перерізу. Саме ця просторовість зумовлює складний розподіл дотичних напружень, неоднорідність інтенсивності пластичної течії та формування градієнтів накопиченої деформації по товщині стінки. Чисельні моделі та експериментальні дослідження підтверджують, що ігнорування просторового характеру швидкісного поля призводить до заниження розрахункових контактних напружень і помилок у прогнозуванні товщини та профілю горловини [1, 4, 7].

Особливої уваги потребує співвідношення v/ω , яке визначає кінематичну подібність процесу. Зміна цього відношення за незмінних геометричних параметрів змінює структуру деформаційного поля та характер локалізації пластичної зони. У роботах [3, 9] показано, що оптимізація цього параметра дозволяє знизити пікові контактні напруження та забезпечити стабільність процесу при значних ступенях редукування.

Таким чином, геометрія контакту та параметри руху формують кінематичну основу механіки формування горловин. Подача h , кутове зміщення $\Delta\varphi$ і співвідношення v/ω виступають ключовими керуючими параметрами просторової локалізації деформації та формування напружено-деформованого стану. Їх коректне врахування є необхідною умовою забезпечення геометричної точності виробів відповідно до вимог відповідно до стандартів ISO серії 286 (ISO

286-1, ISO 286-2), що регламентують систему допусків і посадок [10, 11] та підвищення відтворюваності технологічного процесу.

Формування напружено-деформованого стану. Формування напружено-деформованого стану при обкатці горловин трубчастих заготовок є наслідком локалізованої контактної взаємодії інструмента з обертовою оболонкою, що перебуває у складному просторовому полі швидкостей. На відміну від класичних осесиметричних задач теорії оболонок, у процесі spinning forming зона пластичної деформації має обмежений характер і переміщується гвинтовою траєкторією, що обумовлює нестационарність напруженого стану [2-4, 12].

У зоні контакту формуються такі основні складові напружень: радіальні σ_r ; окружні (тангенціальні) σ_θ ; осьові σ_z ; дотичні напруження тертя τ .

Радіальні напруження визначаються контактним тиском інструмента, окружні – умовами обтискання оболонки при зменшенні радіуса, осьові – витяжкою або стисканням уздовж утворюючої, тоді як дотичні складові пов'язані з ковзанням у контактній зоні. Сукупність цих компонент формує тривимірний напружений стан із переважанням стискуючих складових у радіальному та осьовому напрямках.

Рівновага елементарного кільцевого елемента оболонки описується диференціальним співвідношенням

$$\frac{d\sigma_\theta}{dr} + \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = 0, \quad (6)$$

що відображає взаємозв'язок між окружними та радіальними напруженнями в умовах осесиметричного наближення. Проте в реальному процесі це співвідношення повинно доповнюватися урахуванням осьових градієнтів і дотичних складових, зумовлених гвинтовою кінематикою контакту.

Перехід матеріалу в пластичний стан визначається умовою текучості. Для ізотропного матеріалу доцільним є використання енергетичного критерію Мізеса:

$$\sigma_\theta^2 + \sigma_z^2 + \sigma_r^2 - \sigma_\theta\sigma_z - \sigma_z\sigma_r - \sigma_r\sigma_\theta = 2k^2, \quad (7)$$

де k – опір зсуву матеріалу. Застосування цього критерію дозволяє врахувати взаємодію всіх головних напружень та визначити інтенсивність еквівалентного напруження в зоні деформації.

Особливістю процесу формування горловин є поєднання локального радіального обтискання з осьовим перерозподілом металу. За умов значного редукування окружні напруження переходять у стан стиску, тоді як осьові можуть змінювати знак залежно від співвідношення параметрів v/ω , кута φ та коефіцієнта тертя. Експериментальні та чисельні дослідження показують, що зі зростанням кута нахилу інструмента зростає частка осьового стиску, тоді як зменшення подачі сприяє більш рівномірному розподілу напружень по товщині стінки [1, 4, 7].

Дотичні напруження тертя, що визначаються співвідношенням $\tau = \mu p$, істотно змінюють картину напруженого стану. Вони зумовлюють зсувні деформації у поверхневих шарах та формують градієнт інтенсивності деформації по товщині. У роботах [5, 9] показано, що нехтування дотичною складовою

призводить до зниження прогнозованих контактних навантажень та помилок у визначенні сил формування.

Важливою характеристикою є еволюційний характер напружено-деформованого стану. Кожен оберт заготовки супроводжується повторним навантаженням матеріалу в зоні перекриття контактних слідів, що спричиняє накопичення пластичної деформації. Отже, напруження в будь-який момент часу визначаються не лише миттєвими геометричними параметрами, а й історією деформування.

Таким чином, напружено-деформований стан при формуванні горловин слід розглядати як просторовий, нестационарний та еволюційний процес, у якому радіальні, окружні та осьові складові напружень взаємопов'язані через умови рівноваги, критерій пластичності та контактну взаємодію з інструментом. Саме комплексний підхід до опису цього стану забезпечує адекватне прогнозування контактних навантажень, товщини стінки та меж технологічної стійкості процесу [3, 13].

Контактні напруження. Контактні напруження є визначальним силовим параметром процесу формування горловин і безпосередньо впливають на розподіл пластичної деформації, стабільність товщини стінки та енергосилові показники обкатки. Нормальне контактне напруження p формується внаслідок локальної взаємодії інструмента з поверхнею заготовки та залежить від комплексу геометричних, кінематичних і трибологічних чинників.

У загальному вигляді нормальний контактний тиск можна подати як:

$$p = k \cdot f \left(\frac{S_0}{R_0}, \frac{R}{R_0}, \mu, \varphi, \Delta\varphi \right), \quad (8)$$

де k – опір зсуву матеріалу; S_0/R_0 – відносна товщина заготовки; R/R_0 – поточний ступінь редукування; μ – коефіцієнт тертя; φ – кут нахилу робочої поверхні інструмента; $\Delta\varphi$ – кутове зміщення контактної зони за один оберт.

Функція f відображає сукупний вплив геометрії контакту та кінематики процесу. Зі зменшенням радіуса R контактна площа змінюється, що призводить до зростання питомих навантажень. Водночас зменшення подачі (i , відповідно, $\Delta\varphi$) сприяє більш рівномірному розподілу контактного тиску вздовж гвинтової траєкторії. Аналогічні тенденції відзначені в дослідженнях процесів ротаційного формування та ротаційного витяжного формування трубчастих виробів, де показано істотну залежність пікових контактних напружень від співвідношення геометричних параметрів і режимів деформування [1, 3, 4].

Однак наведене представлення є лише локальним описом миттєвого стану. Реальний процес характеризується багаторазовим проходженням контактної зони через суміжні ділянки поверхні, що зумовлює циклічне перевантаження матеріалу. У результаті контактні напруження визначаються не тільки поточними геометричними співвідношеннями, а й історією попереднього деформування.

З позицій механіки пластичності це означає, що параметр ε_{Σ} залежить від накопиченої пластичної деформації. При кожному оберті заготовки виникає приріст деформації $\Delta\varepsilon_i$, а сумарна накопичена деформація визначається як

$$\varepsilon_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta\varepsilon_i. \quad (9)$$

Інтегральний характер параметра ε_{Σ} відображає еволюцію структури матеріалу та зміну його опору деформації. Зі збільшенням накопиченої деформації можливе зміцнення матеріалу, що приводить до зростання контактних напружень, або, за підвищених температур, їх зниження внаслідок розм'якшення. Чисельні моделі процесу обкатки підтверджують, що врахування історії навантаження дозволяє суттєво підвищити точність прогнозування контактних сил і товщини стінки [5, 6, 9].

Таким чином, контактні напруження у процесі формування горловин мають еволюційний характер і повинні розглядатися як функція не лише миттєвих геометричних і кінематичних параметрів, а й інтегральної накопиченої пластичної деформації. Ігнорування цього чинника призводить до недооцінювання пікових навантажень та помилок у визначенні меж технологічної стійкості процесу [13].

Механізм зміни товщини стінки. Зміна товщини стінки при формуванні горловин є наслідком сумісної дії радіального редукування та осьового перерозподілу металу. Оскільки процес відбувається в умовах пластичної деформації без утворення пор і розривів, для локальної ділянки матеріалу справедливою є умова збереження об'єму.

Для елементарного кільця трубчастой заготовки початкового радіуса R_0 , товщини S_0 та довжини елемента dL_0 об'єм до деформування дорівнює:

$$2\pi R_0 S_0 dL_0. \quad (10)$$

Після деформування, за умови зменшення радіуса до R , зміни товщини до S та довжини елемента до dL , об'єм набуває вигляду:

$$2\pi R S dL. \quad (11)$$

З урахуванням умови незмінності об'єму маємо:

$$2\pi R_0 S_0 dL_0 = 2\pi R S dL. \quad (12)$$

Звідси випливає співвідношення

$$S = S_0 \frac{R_0}{R} \frac{dL_0}{dL}. \quad (13)$$

Отримана залежність відображає загальний механізм зміни товщини: вона визначається не лише ступенем радіального редукування R_0/R , а й відносною зміною довжини елемента вздовж утворюючої.

У граничному випадку, коли осьова витяжка відсутня ($dL = dL_0$), маємо спрощений вираз:

$$S = S_0 \frac{R_0}{R}. \quad (14)$$

Це співвідношення відповідає класичній тонкостінній моделі оболонки, в якій деформація розглядається як чисто радіальне обтискання без перерозподілу металу вздовж осі. Подібне припущення використовується в ряді спрощених аналітичних моделей процесів ротаційного формування горловин [2, 5].

Однак експериментальні та чисельні дослідження показують, що при формуванні горловин малого діаметра, особливо за великих кутів нахилу інструмента та значних ступенів редукування, виникає помітна осьова складова пластичної деформації [1, 4, 7]. У цьому випадку довжина елемента змінюється ($dL \neq dL_0$), і товщина визначається як

$$S = S_0 \frac{R_0}{R} \cdot \eta, \quad (15)$$

де $\eta = \frac{dL_0}{dL}$ – коефіцієнт осьової деформації, що враховує витяжку або стиск уздовж утворюючої.

Якщо $\eta < 1$, відбувається осьова витяжка, що супроводжується додатковим зменшенням товщини. Якщо ж $\eta > 1$, має місце осьове стискання, яке сприяє потовщенню стінки. Таким чином, параметр η характеризує перерозподіл металу між радіальним і осьовим напрямками течії.

Припущення про відсутність осьової витяжки є прийнятним лише для відносно товстостінних заготовок за умови

$$S/D \leq 0,1, \quad (16)$$

коли деформація має переважно радіальний характер, а осьова складова є незначною. У випадку глибокого редукування, малого кінцевого діаметра та значного кута нахилу інструмента осьова складова пластичної течії стає визначальною. За цих умов класична тонкостінна модель втрачає адекватність, а механізм зміни товщини повинен розглядатися як результат просторового перерозподілу об'єму матеріалу.

Отже, еволюція товщини стінки в процесі формування горловин є багатофакторною та визначається співвідношенням радіального редукування, осьової деформації та кінематичних параметрів процесу. Коректне врахування цього механізму є необхідною умовою прогнозування геометричної точності та запобігання локальному потовщенню або надмірному витонщенню стінки виробу [3, 13].

Узагальнена механічна модель процесу. Системний аналіз геометрії контакту, кінематики руху та механізму зміни товщини стінки дає підстави розглядати процес формування горловини як складну нелінійну термомеханічну систему. Його принципові особливості полягають у поєднанні локалізованої пластичної течії з безперервною еволюцією геометрії заготовки та параметрів контакту.

Процес формування горловини доцільно трактувати як:

- *нестационарний*, оскільки напружено-деформований стан змінюється в часі разом із переміщенням інструмента та зменшенням радіуса;

- локально осесиметричний, адже в межах малої контактної ділянки можливе використання осесиметричного наближення, проте глобально процес має гвинтовий характер;
- такий, що характеризується рухомою пластичною зоною, яка переміщується вздовж поверхні заготовки з кроком, визначеним подачею за один оберт;
- з просторовим полем напружень, у якому одночасно присутні радіальні, окружні, осьові та дотичні складові;
- з еволюційною зміною товщини та кривизни, що впливає на жорсткість оболонки та умови рівноваги.

На відміну від класичних моделей осесиметричного редукування, у даному процесі геометрія, кінематика і силові фактори взаємно впливають один на одного. Зменшення радіуса змінює товщину, що, своєю чергою, впливає на жорсткість і розподіл контактного тиску. Одночасно підвищення температури в зоні деформації змінює опір зсуву матеріалу, а отже – величину контактних напружень. Подібний взаємозв'язаний характер параметрів відзначається у сучасних дослідженнях процесів ротаційного формування та ротаційного витяжного формування трубчастих виробів [1, 3, 4, 9].

Узагальнено нормальне контактне напруження можна представити як функціональну залежність:

$$p = k \cdot \Phi \left(\frac{S_0}{R_0}, \frac{R}{R_0}, \mu, \varphi, \omega, v, T, \varepsilon_{\Sigma} \right), \quad (17)$$

де k – опір зсуву матеріалу; S_0/R_0 – початковий геометричний параметр тонкостінності; R/R_0 – поточний ступінь редукування; μ – коефіцієнт тертя; φ – кут нахилу інструмента; ω, v – кінематичні параметри процесу; T – температура в зоні деформації; ε_{Σ} – накопичена пластична деформація.

Функція Φ відображає багатофакторний характер процесу і враховує як миттєві параметри контакту, так і еволюційні зміни матеріалу. Включення температури та накопиченої деформації до функціональної залежності є принципово важливим, оскільки саме ці параметри визначають зміну механічних властивостей у процесі обкатки.

Таким чином, механічна модель формування горловини має розглядатися як нелінійна задача контактної пластичності з рухомою зоною навантаження, змінною геометрією та термомеханічним зв'язком параметрів. Такий підхід забезпечує адекватне прогнозування контактних навантажень, товщини стінки, меж технологічної стійкості та геометричної точності виробу при різних режимах формування [6, 13].

Вплив тертя на формування напруженого стану. Тертя в процесі формування горловин виконує не лише допоміжну, а системоутворюючу функцію, оскільки визначає характер контактної взаємодії між інструментом і деформованою оболонкою. У зоні контакту поряд із нормальним тиском p діють дотичні напруження тертя

$$\tau = \mu p, \quad (18)$$

де μ – коефіцієнт тертя; p – нормальне контактне напруження.

Це співвідношення відповідає кулонівській моделі тертя та є прийнятним для інженерного опису процесу обкатки в умовах ковзання. Проте реальний розподіл дотичних напружень у зоні контакту є неоднорідним і залежить від просторового поля швидкостей, температури та стану поверхні інструмента [3, 5, 8].

Дотична складова суттєво змінює баланс сил у меридіональному та окружному напрямках. У меридіональному перерізі вона формує додаткову осьову складову стиску або розтягу, тоді як в окружному напрямі впливає на рівень зсувних деформацій. Унаслідок цього тертя безпосередньо впливає на:

- локалізацію пластичної зони;
- величину осьового стиску;
- інтенсивність потовщення або витоншення стінки;
- схильність оболонки до втрати стійкості.

За низьких значень коефіцієнта тертя матеріал легше перерозподіляється вздовж утворюючої, що сприяє осьовій витяжці та більш рівномірному розподілу товщини. Натомість зі зростанням збільшується частка осьового стиску, що може призводити до локального потовщення та концентрації деформації у вузькій зоні контакту. Подібні закономірності встановлені у роботах, присвячених оптимізації режимів spinning та dieless necking [4, 5, 9].

Особливої уваги потребує вплив тертя на стійкість тонкостінної оболонки. Підвищення дотичних напружень спричиняє зростання зсувних компонент напруженого стану, що підвищує ризик локального скручування, хвилястості або утворення напливів. За певних умов тертя може ініціювати втрату локальної стійкості навіть за відносно невеликих значень радіального редукування [7, 13].

У більшості традиційних аналітичних моделей тертя враховується як коефіцієнт, що масштабує контактну силу. Такий підхід є спрощеним і не відображає реального механізму течії металу в умовах гвинтового переміщення контактної зони. При формуванні горловин малого діаметра тертя виконує кінематично керуючу функцію, визначаючи напрям і співвідношення складових пластичної течії. Зі зростанням коефіцієнта тертя збільшується частка осьового стиску в зоні контакту; зростає ризик локального скручування оболонки; посилюється нерівномірність розподілу товщини; підвищується інтенсивність накопичення пластичної деформації у поверхневих шарах.

Таким чином, коефіцієнт тертя є не лише енергетичним параметром, що визначає рівень силових витрат процесу, а й структуроутворюючим чинником, який формує просторову картину напружено-деформованого стану та впливає на межі технологічної стійкості формування. Коректне врахування тертя є необхідною умовою побудови адекватної механічної моделі процесу обкатки горловин.

Кут нахилу робочої поверхні інструмента φ є одним із ключових параметрів процесу формування горловин, оскільки визначає геометрію зони контакту, напрям результуючої сили взаємодії та співвідношення складових швидкості

ковання. Зміна цього кута безпосередньо впливає на характер пластичної течії металу, ширину пластичної зони та умови стабільності оболонки.

Осьова подача за один оберт визначається співвідношенням

$$h = \frac{v}{\omega}, \quad (19)$$

де v – швидкість осьового переміщення інструмента; ω – кутова швидкість обертання заготовки.

З геометричної точки зору узгодженість кінематики руху та форми інструмента описується співвідношенням

$$h = b \tan \varphi, \quad (20)$$

де b – ширина контактної площадки.

Це співвідношення відображає зв'язок між кроком гвинтового переміщення контактної зони та її протяжністю у меридіональному напрямі. Таким чином, при фіксованій подачі зміна кута φ призводить до перерозподілу довжини контактної ділянки та зміни інтенсивності локального деформування.

Зі зменшенням кута нахилу інструмента зростає ширина контактної площадки b , що спричиняє розширення пластичної зони та зменшення питомого контактного тиску. Проте при цьому збільшується частка окружної деформації, а радіальний редуційний ефект реалізується більш поступово. У результаті формується підвищений рівень стискуючих окружних напружень, що може ініціювати втрату стійкості тонкостінної оболонки.

За збільшення кута φ зона контакту звужується, контактний тиск концентрується, а складова сили, спрямована вздовж осі заготовки, зростає. Це призводить до посилення осьового стиску та інтенсифікації перерозподілу металу вздовж утворюючої. При надмірних значеннях кута виникає ризик локального потовщення стінки, формування напливів і концентрації деформації у вузькій зоні контакту. Подібні закономірності відзначені у дослідженнях процесів ротаційної обкатки горловин та оптимізації профілю інструмента [2, 4, 9].

Критичний діапазон кута φ . Аналіз кінематичних і силових співвідношень, а також узагальнення експериментальних даних дозволяють виділити раціональний інтервал значень:

$$30^\circ \leq \varphi \leq 40^\circ.$$

При $\varphi < 30^\circ$:

- збільшується ширина зони контакту;
- зростає частка окружної деформації;
- підвищується ризик втрати локальної стійкості оболонки.

При $\varphi > 40^\circ$:

- зростає осьове стискання;
- формується надмірне потовщення стінки;
- можливе утворення напливів і локальна концентрація деформації.

Отже, кут нахилу робочої поверхні інструмента визначає не лише геометрію профілю горловини, а й механізм перерозподілу пластичної деформації між радіальним, окружним та осьовим напрямками.

Кут φ слід розглядати як кінематичний параметр керування механізмом течії металу. Він формує структуру напружено-деформованого стану, впливає на локалізацію пластичної зони та визначає межі технологічної стійкості процесу. Раціональний вибір кута нахилу інструмента є необхідною умовою забезпечення рівномірної товщини стінки та стабільності формування горловини.

Термомеханічні аспекти процесу. Процес формування горловин у режимах інтенсивного локального пластичного деформування супроводжується суттєвими тепловими ефектами. Незважаючи на відносно невелику тривалість контакту окремої ділянки з інструментом, висока інтенсивність деформації та значні контактні тиски зумовлюють локальне підвищення температури. Унаслідок цього механічна задача переходить у термомеханічно зв'язану.

Температура в зоні контакту визначається сумою:

- початкової температури заготовки T_0 ;
- тепловиділення від пластичної деформації;
- тепловиділення від тертя в контактній зоні.

У процесі пластичного деформування значна частина механічної роботи переходить у тепло. Підвищення температури можна оцінити за співвідношенням:

$$\Delta T = \frac{\beta \sigma_{\text{звз}} \varepsilon}{\rho c}, \quad (21)$$

де β – частка механічної енергії, що переходить у тепло (коефіцієнт Тейлора-Квінні); $\sigma_{\text{звз}}$ – еквівалентне напруження; ε – накопичена пластична деформація; ρ – густина матеріалу; c – питома теплоємність.

Для більшості металів у холодному деформуванні β наближається до 0,8–0,95, що свідчить про високий рівень перетворення механічної енергії в тепло. У зоні локалізованої деформації, характерній для обкатки горловин, це призводить до формування температурного максимуму безпосередньо під контактною площадкою. Додатковим джерелом тепла є робота сил тертя, інтенсивність якої визначається величиною $\tau = \mu p$ та швидкістю ковзання.

Оскільки зона контакту має гвинтовий характер переміщення, температурне поле також є нестационарним і просторово неоднорідним. Повторне проходження контактної зони через суміжні ділянки поверхні може спричиняти кумулятивний тепловий ефект, особливо за великих швидкостей обертання та підвищених значень коефіцієнта тертя.

Підвищення температури безпосередньо впливає на опір деформації матеріалу. У першому наближенні температурну залежність опору зсуву можна подати у вигляді:

$$k = k_0 \exp(-\alpha T), \quad (22)$$

де k_0 – опір зсуву за базової температури; α – температурний коефіцієнт; T – локальна температура.

Зі зростанням температури опір деформації зменшується, що призводить до зниження контактних напружень і необхідної сили формування. Проте одночасно активізуються структурні процеси: динамічне відновлення, рекристалізація, зміна текстури та локальна зміна механізму течії металу. У результаті змінюється співвідношення між радіальною, окружною та осьюовою складовими деформації.

Підвищена температура може позитивно впливати на стабільність процесу, зменшуючи ризик крихкого руйнування або локальної втрати пластичності. Водночас надмірний нагрів здатний спричинити нерівномірність товщини, зниження жорсткості оболонки та зростання схильності до втрати стійкості.

Термомеханічна складова процесу формування горловин не є другорядною. У процесі ротаційної обкатки формується локальна термомеханічна система, в якій температура та напруження перебувають у взаємному зворотному зв'язку: зростання напружень і деформації підвищує температуру, а підвищення температури змінює опір деформації та структуру матеріалу.

Ігнорування температурного фактора призводить до некоректного прогнозування товщини стінки, контактних напружень і сил обкатки. Тому адекватна механічна модель процесу повинна враховувати термомеханічну зв'язаність параметрів і розглядати формування горловини як задачу з урахуванням взаємодії механічних і теплових полів.

Критерії подібності процесу. Забезпечення відтворюваності результатів формування горловин при зміні масштабу заготовки або режимів обробки потребує формулювання критеріїв подібності процесу. Подібність у даному випадку має розглядатися не лише як геометрична, а як комплексна – геометрично-кінематично-термомеханічна.

Геометрична подібність. Для збереження співвідношення напружень і характеру пластичної течії повинні виконуватися умови інваріантності безрозмірних параметрів:

$$\frac{S_0}{R_0} = const,$$

де S_0/R_0 – початковий параметр тонкостінності заготовки;

$$\frac{R_p}{S_0} = const,$$

де R_p – радіус профілю інструмента (або характерний радіус кривизни зони контакту).

Перша умова забезпечує однакову жорсткість оболонки при масштабуванні, друга – подібність геометрії контактної взаємодії. Порушення цих співвідношень змінює співвідношення мембранних і згинальних напружень, що призводить до зміни механізму деформації та умов стійкості.

Додатково повинні зберігатися параметри:

$$\varphi = \text{const}, \Delta\varphi = \text{const}, \mu = \text{const},$$

що гарантує подібність геометрії зони контакту, кінематики її переміщення та умов тертя.

Кінематична подібність. Окрім геометричних співвідношень необхідною є кінематична подібність, яка визначається сталістю відношення

$$\frac{v}{\omega} = \text{const}.$$

Цей параметр задає осьову подачу за один оберт та визначає крок гвинтового переміщення пластичної зони. Зміна співвідношення v/ω навіть за збереження геометричних параметрів призводить до зміни структури напружено-деформованого стану, ступеня перекриття деформованих зон і рівня накопиченої пластичної деформації.

Термічна подібність. В умовах інтенсивного локального деформування суттєвого значення набуває термічна подібність, яка передбачає збереження подібності температурних полів. Це означає сталість безрозмірних параметрів, що характеризують співвідношення між швидкістю тепловиділення та тепловідведенням (умовно – подібність критеріїв теплової дифузії).

Порушення термічної подібності змінює температурну залежність опору деформації, а отже – рівень контактних напружень і характер пластичної течії.

Подібність процесу формування горловин має багатофакторний характер і не зводиться лише до геометричних співвідношень. Для забезпечення масштабної та технологічної відтворюваності необхідно одночасне виконання умов геометричної, кінематичної та термічної подібності. Лише комплексне дотримання цих критеріїв дозволяє зберегти структуру напружено-деформованого стану, характер локалізації пластичної зони та механізм зміни товщини стінки при зміні масштабу або режимів формування.

Межі технологічної стійкості. Процес формування горловин тонкостінних трубчастих заготовок супроводжується дією значних стискуючих окружних і осьових напружень, що створює передумови для втрати локальної або загальної стійкості оболонки. Межі технологічної стійкості визначаються умовами, за яких напружено-деформований стан залишається керованим і не переходить у режим неконтрольованих формозмін [4, 7].

Втрати стійкості можуть проявлятися у вигляді: локального скручування; хвилястості стінки; утворення напливів; осьового короблення.

Ці явища є наслідком перевищення критичних значень стискуючих напружень у поєднанні з недостатньою жорсткістю оболонки.

Умова стійкості тонкостінної оболонки в першому наближенні може бути записана як:

$$\sigma_{\theta} < \sigma_{кр} \tag{23}$$

де σ_{θ} – окружне напруження стиску; $\sigma_{кр}$ – критичне напруження втрати стійкості.

Для тонкостінної циліндричної оболонки критичне напруження визначається співвідношенням:

$$\sigma_{кр} = \frac{ES}{R}, \quad (24)$$

де E – модуль пружності матеріалу; S – товщина стінки; R – поточний радіус.

Зменшення радіуса при редукуванні супроводжується одночасною зміною товщини стінки та жорсткості оболонки. У початковій стадії процесу зменшення радіуса підвищує кривизну та знижує стійкість до окружного стиску. Водночас локальне потовщення може частково компенсувати цей ефект. Таким чином, межа стійкості визначається взаємодією геометричних і силових факторів [4, 9].

При значних ступенях редукування, коли виконується умова

$$\frac{S}{D} > 0,1,$$

тонкостінна модель оболонки стає непридатною. У цьому випадку механізм втрати стійкості змінюється: замість хвилястості або локального короблення можуть реалізовуватися об'ємні форми пластичної нестійкості, пов'язані з локальною концентрацією деформації та формуванням напливів [3, 13].

Додатково на межу стійкості впливають тертя, температура та кінематичні параметри процесу. Підвищення коефіцієнта тертя збільшує осьовий стиск, що підвищує ризик локальної нестійкості. Зростання температури знижує модуль пружності та опір деформації, змінюючи критичні умови втрати стійкості [1].

Межа технологічних можливостей формування горловин визначається не лише геометрією заготовки, а комплексом взаємопов'язаних параметрів. Узагальнено її можна подати у вигляді функціональної залежності

$$\Psi = f\left(\frac{S_0}{D_0}, \varphi, \mu, \omega, v, T\right), \quad (25)$$

де параметр Ψ характеризує запас технологічної стійкості процесу.

Отже, оцінювання допустимого ступеня редукування повинно базуватися на багатофакторному аналізі, що враховує жорсткість оболонки, кінематику руху інструмента, умови тертя та термомеханічний стан матеріалу.

Узагальнена концепція механіки формування горловин. На основі виконаного аналізу процес формування горловини доцільно розглядати як складну нелінійну термомеханічну систему з еволюційною геометрією та рухомою локалізованою зоною деформації.

Його концептуальні ознаки можна сформулювати так:

- нестационарний локалізований процес пластичної течії;
- система з рухомою гвинтовою зоною деформації;
- просторовий напружено-деформований стан;
- термомеханічно зв'язана задача;
- багатофакторний процес з еволюційною зміною товщини та кривизни.

Кінематична гвинтова природа контакту визначає дискретно-накопичувальний характер пластичної деформації. Тертя формує напрям течії металу, температура змінює опір деформації, а еволюція товщини впливає на

жорсткість оболонки та умови стійкості. Таким чином, усі параметри процесу перебувають у взаємному зворотному зв'язку.

Узагальнена функціональна залежність контактного напруження може бути подана у вигляді

$$p = k \cdot \Phi \left(\frac{S_0}{D_0}, \frac{R}{R_0}, \mu \varphi, \frac{v}{\omega}, T, \varepsilon_T \right), \quad (26)$$

де функція Φ відображає багатофакторний і еволюційний характер процесу.

Таким чином, механіка формування горловин повинна розглядатися як задача контактної пластичності з рухомою зоною навантаження, змінною геометрією та термомеханічним зв'язком параметрів. Саме такий підхід забезпечує адекватне прогнозування контактних навантажень, товщини стінки, меж технологічної стійкості та відтворюваності геометричних параметрів виробу.

Таким чином, процес формування горловин трубчастих заготовок методом ротаційної обкатки має просторовий, нестационарний і багатофакторний характер. Контактна зона інструмента переміщується гвинтовою траєкторією, що зумовлює дискретно-накопичувальний механізм пластичної деформації. У зв'язку з цим класичні плоскі та спрощені осесиметричні моделі не забезпечують повного опису реального напружено-деформованого стану, оскільки не враховують просторову структуру швидкісного поля та еволюцію геометрії виробу.

Показано, що контактні напруження мають еволюційний характер і визначаються не лише миттєвими геометричними та кінематичними параметрами, а й історією деформування, яка описується інтегральним параметром накопиченої пластичної деформації. Механізм зміни товщини стінки формується сумісною дією радіального редукування та осевого перерозподілу металу. За умов глибокого редукування та значних кутів нахилу інструмента осьова складова течії стає визначальною, що обмежує застосування спрощених тонкостінних моделей.

Встановлено, що коефіцієнт тертя є не лише енергетичним, а й структуроутворюючим параметром процесу, оскільки визначає напрям течії металу, характер локалізації пластичної зони та схильність оболонки до втрати стійкості. Кут нахилу робочої поверхні інструмента виконує функцію кінематичного параметра керування процесом, формуючи співвідношення між радіальною, окружною та осевою складовими деформації та впливаючи на рівномірність товщини стінки.

Обґрунтовано, що процес має виражений термомеханічний характер: локальне тепловиділення в зоні контакту змінює опір деформації матеріалу, рівень контактних напружень і умови стабільності формування. Температура та напруження перебувають у взаємному зворотному зв'язку, тому ігнорування температурного фактора призводить до похибок у прогнозуванні товщини стінки та силових параметрів процесу.

Показано, що межі технологічної стійкості визначаються комплексною взаємодією геометричних, кінематичних, трибологічних і термічних чинників. Втрата стійкості може проявлятися у вигляді хвилястості, локального

скручування, напливів або осьового короблення і залежить від жорсткості оболонки, ступеня редукування, кута інструмента, коефіцієнта тертя та температурного стану матеріалу.

Встановлено, що подібність процесу має комплексний характер і не зводиться лише до збереження геометричних співвідношень. Для забезпечення масштабної та технологічної відтворюваності необхідне одночасне виконання умов геометричної, кінематичної та термічної подібності.

Таким чином, механіка формування горловин повинна розглядатися як нелінійна термомеханічно зв'язана задача контактної пластичності з рухомою гвинтовою зоною деформації та еволюційною геометрією. Сформульовані положення створюють теоретичну основу для подальшого розвитку розрахункових моделей, визначення меж технологічних можливостей процесу та оптимізації параметрів формування з метою забезпечення геометричної точності та стабільності виробів.

Список використаних джерел

1. Wang C., Yu H., Tian W., Zhao C., Jiang L., Bai Q. Research on the integral forming process of thin walled and thick mouth seamless gas cylinders. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Art. 17021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44377-z>
2. Arai H., Gondo S. Oblique/Curved Tube Necking Formed by Synchronous Multipass Spinning. *Metals*. 2020. Vol. 10(6). Art. 733. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10060733>
3. Zheng J., Li Z., Shu X. Tube spinning process: Recent advances and challenges. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*. 2024. Vol. 4(4). Art. 2024014. DOI: <https://doi.org/10.51393/j.jamst.2024014>
4. Gao P. Deformation characteristics and process optimization in neck-spinning of variable-diameter tube. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*. 2025. Art. 2025007. DOI: <https://doi.org/10.51393/j.jamst.2025007>
5. Kwiatkowski L., Tekkaya A. E., Kleiner M. Fundamentals for controlling thickness and surface quality during dieless necking-in of tubes by spinning. *CIRP Annals*. 2013. Vol. 62(1). P. 299–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.054>
6. Kocabiçak A. C., Wang C., Han S., Nguyen-Xuan H., Kosec G., Wang L., Abdel Wahab M. A deep neural network approach to predict dimensional accuracy of thin-walled tubes in backward flow forming plasticity process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2025. Vol. 141. P. 59–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.044>
7. Guo Y., Wang Y., He Y., Zhang H. New technique of precision necking for long tubes with small radius and large reduction ratio. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2020. Vol. 27. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-019-0565-7>
8. Kulik T. O., Kulik O. M. Increasing the operational durability of the friction tool for spinning of necks. *Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*. 2024. No. 1. P. 166–169. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-57>
9. Yan X., Zhang Y., Wang Q., Liu Y. Dynamic optimization of die-less spinning process through time-varying forming law for processing parameters. *Journal of*

Manufacturing Processes, 2024, Vol. 112, DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.08.0XX>

10. ISO 14405-1:2016. Geometrical product specifications (GPS) – Linear sizes – Part 1: General. Geneva: International Organization for Standardization, 2016.

11. ISO 1101:2017. Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

12. Kulik T. Kinematic Analysis of Workpiece Rotation Effects on Pipe Neck Formation via Friction-Based Spinning. In: *Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference «Achievements of Science and Applied Research»* (April 7–9, 2025, Dublin, Ireland). European Open Science Space, 2025. P. 88–90. DOI: 10.70286/EOSS-07.04.2025

13. Kulik T. Defining the Technological Boundaries of Rotary Friction Spinning for Small-Diameter Neck Formation. In: *Литво. Металургія. 2025: Матеріали XXI Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Харків – м. Київ, 7–29 травня 2025 р.). 2025. P. 331–333.

4.2. Mechanics of Forming Hollow Products from Tubes to Achieve Optimal Quality and Interchangeability: Mechanical Conditions for Quality Optimization

МЕХАНІКА ФОРМУВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ ІЗ ТРУБ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ЯКОСТІ ТА ВЗАЄМОЗАМІННОСТІ: МЕХАНІЧНІ УМОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЯКОСТІ

Забезпечення оптимальної якості та взаємозамінності порожнистих виробів, сформованих із труб, є ключовою вимогою серійного виробництва деталей машин, зокрема роликів рольгангів, конвеєрних та опорних елементів [1-3]. Експлуатаційна надійність таких виробів визначається не лише їх матеріальними характеристиками, а насамперед стабільністю геометричних параметрів горловин, співвісністю посадкових поверхонь, рівномірністю товщини стінки та відсутністю локальних зон ослаблення [4].

Якість сформованої горловини безпосередньо пов'язана з механікою процесу її утворення. Нерівномірний розподіл деформацій, коливання контактних напружень, нестабільність часткових обтиснень або зміна умов тертя можуть призводити до овальності, конусності, локального потоншення стінки та відхилення розмірів від номінальних значень [2,4,5]. Таким чином, проблема якості має механічну природу і повинна розглядатися через призму закономірностей пластичної деформації [3].

Взаємозамінність виробів у серійному виробництві досягається за умови відтворюваності процесу формування. Це передбачає виконання геометричних та кінематичних умов подібності, стабільність безрозмірних параметрів процесу, контроль відносного обтиснення та забезпечення однакових термомеханічних режимів для партії заготовок [6,7]. Лише за таких умов можливо гарантувати мінімальні відхилення розмірів і стабільні механічні властивості.



Рис. 1 – Форми горловин труб, які отримують методом ротаційної обкатки

Особливе значення має встановлення граничних співвідношень між радіусом труби, товщиною стінки, кутом нахилу інструмента та шириною осередку деформації, які забезпечують рівномірний перерозподіл металу без втрати стійкості оболонки [4,5,13]. Визначення цих механічних умов дозволяє сформувавши критерії оптимізації процесу та мінімізувати похибки формування.

Таким чином, даний підрозділ спрямований на визначення механічних передумов забезпечення геометричної точності, стабільності процесу та структурної однорідності матеріалу як основи досягнення оптимальної якості і взаємозамінності порожнистих виробів із труб.

Поняття якості та взаємозамінності в умовах ротаційного формування. Якість порожнистих виробів, отриманих із труб методом ротаційної обкатки інструментом тертя, є інтегральною характеристикою, що відображає ступінь відповідності геометричних, механічних і структурних параметрів виробу заданим конструктивним та експлуатаційним вимогам [1,3]. На відміну від виробів, отриманих механічною обробкою з масивної заготовки, при ротаційному формуванні остаточні параметри виробу формуються безпосередньо в процесі пластичної деформації, що зумовлює тісний зв'язок між механікою формозмінення та показниками якості [2].

У загальному вигляді якість сформованої горловини можна представити як функціонал:

$$Q = f(G, S, \sigma_{\text{зат}}, \varepsilon, Str, R_a), \quad (1)$$

де G – геометричні параметри (діаметр, конусність, овальність, співвісність);
 S – розподіл товщини стінки; $\sigma_{\text{зат}}$ – залишкові напруження; ε – ступінь пластичної деформації;
 Str – структурний стан металу; R_a – параметри шорсткості поверхні.

Особливістю процесу ротаційного формування є те, що всі складові функціоналу Q формуються одночасно в межах локальної зони пластичної деформації, яка переміщується вздовж заготовки. Тому будь-яка зміна кінематичних або силових параметрів процесу безпосередньо відображається на геометричних і механічних характеристиках виробу.

Геометрична якість у першу чергу визначається точністю формування діаметра горловини та стабільністю профілю [4]. В умовах ротаційної обкатки можливі такі види відхилень: овальність перерізу, конусність, ексцентриситет осі горловини відносно базової поверхні, хвилястість стінки [11]. Їх виникнення зумовлене нерівномірністю напружено-деформованого стану, коливанням контактних напружень та нестабільністю кінематичних параметрів (відношення подачі до кутової швидкості).

Взаємозамінність виробів у серійному виробництві означає можливість встановлення деталі без додаткової підгонки за умови дотримання встановлених допусків [6,7,10]. Математично це може бути записано у вигляді:

$$\Delta G \leq T_d, \quad (2)$$

де ΔG – фактичне відхилення розміру, T_d – допуск.

Проте у випадку пластичного формування забезпечення взаємозамінності має не лише геометричний, а й механічний характер [3]. Нерівномірний розподіл товщини стінки або наявність зон локального потовщення чи потоншення призводить до неоднакової жорсткості виробів, навіть за дотримання номінальних розмірів. Тому критерій взаємозамінності повинен враховувати стабільність перерозподілу металу:

$$\frac{\Delta S}{S} \rightarrow \min \quad (3)$$

Крім того, у процесі ротаційного формування формується поле залишкових напружень, яке залежить від інтенсивності пластичної деформації та температурного режиму. Нерівномірний розподіл залишкових напружень може спричинити пружне повернення після розвантаження та додаткові геометричні відхилення. Отже, якість виробу слід розглядати як результат сумісної дії миттєвого напружено-деформованого стану та його еволюції в процесі деформування.

Таким чином, поняття якості в умовах ротаційного формування має багатофакторний механічний зміст. Воно визначається узгодженістю кінематики процесу, стабільністю контактних напружень, рівномірністю пластичної течії та керованістю термомеханічного режиму. Взаємозамінність при цьому є похідною від стабільності механічних умов формування і може бути забезпечена лише за умови відтворюваності напружено-деформованого стану в кожному циклі деформування.

Оптимізація якості та взаємозамінності потребує формування системи механічних критеріїв, які пов'язують геометричні показники виробу з параметрами кінематики, контактної взаємодії та структурними змінами металу.

Вплив напружено-деформованого стану на геометричну точність. Геометрична точність горловини, сформованої методом ротаційної обкатки, безпосередньо визначається характером напружено-деформованого стану (НДС) у зоні контакту інструмента із заготовкою [2,4]. На відміну від статичних процесів обтискання, у даному випадку НДС є просторовим, нестаціонарним та таким, що

еволюціонує в міру переміщення осередку деформації. Саме ця еволюційність зумовлює формування остаточного профілю виробу [5].

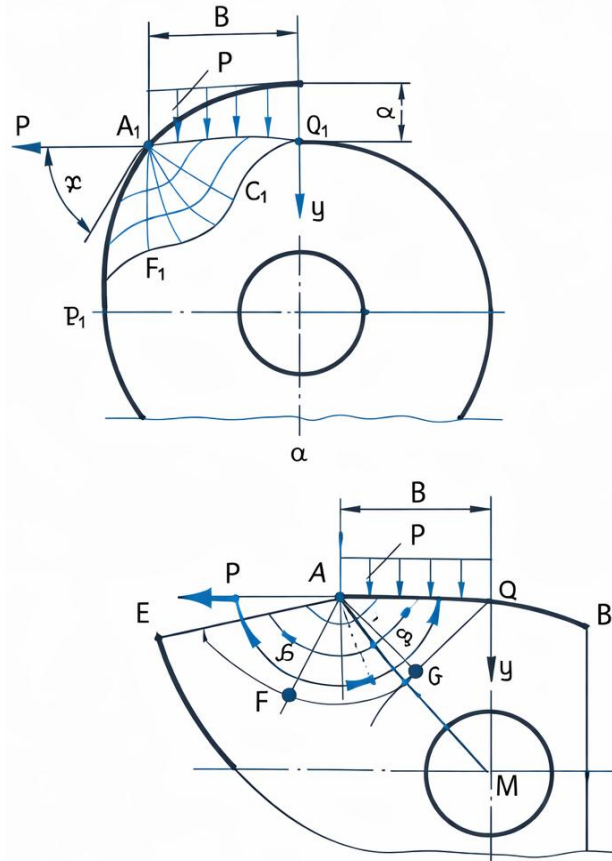


Рис. 2 – Поля напружень в заготовці під дією одностороннього бічного тиску

У зоні контакту діють радіальні, окружні та осьові напруження. Радіальні напруження визначають ступінь зменшення діаметра, окружні – стабільність форми перерізу, а осьові – перерозподіл металу вздовж утворюючої. Порушення балансу між цими складовими призводить до відхилень форми.

Радіальне переміщення елемента оболонки під дією контактного тиску може бути оцінене співвідношенням:

$$u_r = \frac{pR}{ES'} \quad (4)$$

де p – контактне напруження, R – поточний радіус, S – товщина стінки, E – модуль пружності.

Збільшення контактного напруження або зменшення товщини стінки підвищує величину пружного відновлення після розвантаження. Це зумовлює відхилення фактичного діаметра від номінального після завершення деформування [4,8].

Окружна деформація визначається як:

$$\varepsilon_\theta = \frac{\Delta R}{R} \quad (5)$$

а відповідне напруження:

$$\sigma_{\theta} = E \varepsilon_{\theta}. \quad (6)$$

При перевищенні критичного рівня окружних напружень можливе виникнення локальної втрати стійкості оболонки, що проявляється у вигляді овальності або хвилястості [4]. Критичне напруження тонкостінної оболонки можна оцінити як:

$$\sigma_{\text{кр}} = \frac{ES}{R}. \quad (7)$$

Умовою збереження геометричної стабільності є:

$$\sigma_{\theta} < \sigma_{\text{кр}}. \quad (8)$$

Однак у реальному процесі НДС не є однорідним по периметру. Через гвинтовий характер переміщення контактної зони формується асиметричне поле напружень, що може спричиняти ексцентриситет горловини [12]. Таким чином, точність форми перерізу залежить не лише від величини контактної тиску, а й від рівномірності його розподілу.

Осьові напруження визначають ступінь витяжки або стиску вздовж утворюючої. Якщо осьова складова надмірна, виникає локальне потовщення стінки; якщо недостатня – можливе надмірне потоншення. Умовно можна записати критерій осьової рівноваги:

$$\sigma_z \approx \frac{\tau}{\tan \varphi}, \quad (9)$$

де τ – дотичне напруження тертя, φ – кут нахилу робочої поверхні інструмента.

Звідси випливає, що кут нахилу інструмента прямо впливає на співвідношення між радіальним і осьовим стиском, а отже – на геометричну точність сформованого профілю.

Суттєвим фактором є накопичена пластична деформація. Нерівномірність її розподілу уздовж утворюючої призводить до різної жорсткості ділянок горловини, що може викликати локальні відхилення після зняття навантаження. Тому стабільність НДС у кожному циклі деформування є необхідною умовою досягнення відтворюваності розмірів.

Таким чином, геометрична точність у процесі ротаційного формування є результатом механічної рівноваги оболонки в умовах просторового навантаження, яке постійно змінюється. Отже, контроль якості повинен здійснюватися не лише через геометрію інструмента, а через керування параметрами НДС: величиною контактної тиску, співвідношенням швидкостей подачі та обертання, коефіцієнтом тертя та температурним режимом.

Таким чином, забезпечення геометричної точності є механічною задачею узгодження напружено-деформованого стану з умовами стійкості оболонки та мінімізації пружного повернення після розвантаження.

Формування стабільної товщини стінки як критерій якості. Одним із визначальних показників якості порожнистих виробів, сформованих із труб, є стабільність товщини стінки в зоні горловини [1,4]. На відміну від суто

геометричних параметрів (діаметра або довжини), товщина стінки визначає жорсткість, несучу здатність і довговічність виробу. Навіть за дотримання номінальних розмірів відхилення товщини можуть спричинити нерівномірний розподіл напружень під час експлуатації та зниження ресурсу [5].

У процесі ротаційного формування перерозподіл металу відбувається за умови збереження об'єму. Для елементарної ділянки оболонки виконується співвідношення:

$$2\pi R_0 S_0 dL_0 = 2\pi R S dL, \quad (10)$$

де R_0, S_0, dL_0 – початкові параметри, R, S, dL – поточні параметри.

Звідси випливає:

$$S = S_0 \frac{R_0}{R} \frac{dL_0}{dL}. \quad (11)$$

Якщо осьова деформація відсутня ($dL = dL_0$), то

$$S = S_0 \frac{R_0}{R}. \quad (12)$$

Проте в реальному процесі відбувається часткова осьова деформація ε_z , що модифікує вираз:

$$S = S_0 \frac{R_0}{R} (1 + \varepsilon_z). \quad (13)$$

Таким чином, товщина стінки є функцією не лише редукування діаметра, а й співвідношення між радіальною та осьовою складовими деформації. Нерівномірність цього співвідношення вздовж утворюючої призводить до формування зон потовщення або потоншення.

Величина варіації товщини може бути представлена як:

$$\Delta S = f(\mu, \varphi, \omega, v, T, S_0/R_0), \quad (14)$$

де параметри процесу визначають інтенсивність перерозподілу металу.

Особливої уваги потребує вплив коефіцієнта тертя. Зростання μ збільшує частку осьового стиску, що може призводити до локального потовщення в зоні виходу з осередку деформації [2]. З іншого боку, зменшення тертя сприяє більш рівномірному розподілу товщини, але може знижувати стабільність процесу через недостатній контроль течії металу.

Кут нахилу робочої поверхні інструмента φ також визначає характер перерозподілу. При малих значеннях φ переважає радіальна складова деформації, що може викликати надмірне потоншення. При великих значеннях – посилюється осьовий стиск і формується потовщення. Таким чином, оптимальний інтервал кута забезпечує мінімізацію градієнта товщини [8]:

$$\frac{\partial S}{\partial x} \rightarrow \min \quad (15)$$

З точки зору забезпечення якості доцільно вводити безрозмірний показник стабільності товщини:

$$\chi_S = \frac{\Delta S}{S_{\text{ср}}}, \quad (16)$$

де $S_{\text{ср}}$ – середня товщина стінки в горловині.

Умова забезпечення високої якості може бути сформульована як:

$$\chi_S \leq \chi_{\text{доп}} \quad (17)$$

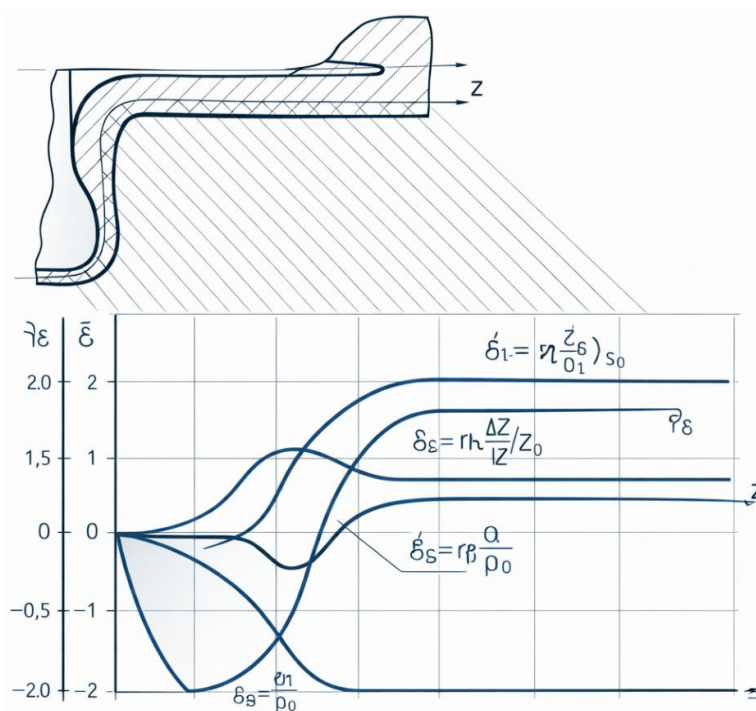
Таким чином, стабільність товщини стінки є не наслідком випадкового збігу параметрів, а результатом узгодженого керування кінематикою та контактною взаємодією. Оптимізація повинна бути спрямована на мінімізацію просторового градієнта накопиченої пластичної деформації:

$$\nabla \varepsilon_{\Sigma} \rightarrow 0. \quad (18)$$

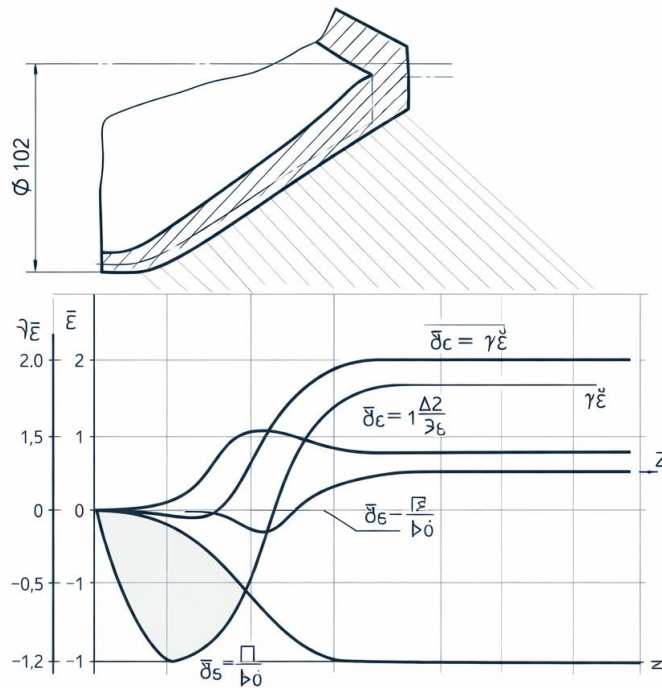
Саме рівномірність розподілу накопиченої деформації забезпечує однорідність механічних властивостей і, відповідно, стабільність експлуатаційних характеристик.

Таким чином, товщина стінки є інтегральним показником механічної узгодженості процесу. Її стабільність визначається балансом радіальних, осьових і тангенціальних компонент деформації та є одним із ключових критеріїв оптимізації якості.

Механічні умови забезпечення взаємозамінності. Взаємозамінність порожнистих виробів, сформованих із труб методом ротаційної обкатки, є наслідком відтворюваності механічного стану процесу формування [3]. На відміну від процесів різання, де кінцевий розмір визначається жорсткою геометрією інструмента та кінематичною точністю обладнання, у пластичному формуванні остаточні параметри виробу формуються під дією напружено-деформованого стану, який залежить від комплексу силових, кінематичних і термічних факторів. Тому взаємозамінність у даному випадку має механічну природу [4,8].



а) горловина відносно малого діаметра



б) конічне днище

Рис. 3 – Темплет та графіки розподілу результуючих логарифмічних деформацій уздовж твірної (δ_ϵ), інтенсивності деформації (ξ_i) та показника деформаційного стану (γ_ϵ).

Номінальний діаметр горловини дорівнює D_n , а фактичний – D_f . Умова взаємозамінності у геометричному сенсі має вигляд:

$$|D_f - D_n| \leq T_D, \quad (19)$$

де T_D – допуск.

Однак фактичний діаметр після розвантаження визначається сумою пластичної та пружної складових деформації:

$$D_f = D_p + \Delta D_{pr}, \quad (20)$$

де D_p – діаметр у момент максимального навантаження, ΔD_{pr} – величина пружного повернення.

Пружне повернення пропорційне рівню окружних напружень:

$$\Delta D_{pr} \sim \frac{\sigma R}{E}. \quad (21)$$

Отже, навіть при однаковому значенні пластичної деформації варіації контактного тиску або температури можуть призводити до різних величин пружного повернення, а відтак – до порушення взаємозамінності.

Механічною передумовою забезпечення взаємозамінності є стабільність напружено-деформованого стану у кожному циклі деформування [2,4]. Введемо відносну варіацію контактного тиску:

$$\delta_p = \frac{\Delta p}{p}. \quad (22)$$

З урахуванням залежності (21) можна показати, що варіація кінцевого діаметра приблизно пропорційна δ_p . Тому умова забезпечення розмірної стабільності має вигляд:

$$\delta_p \leq \delta_{p, \text{кр}}. \quad (23)$$

Другою складовою є кінематична відтворюваність. Часткове обтиснення за один оберт визначається відношенням подачі до кутової швидкості: $k_v = \frac{v}{\omega}$ [6,7,12]. Зміна цього співвідношення змінює величину накопиченої пластичної деформації:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta \varepsilon_i(k_v). \quad (24)$$

Тому для забезпечення однакової геометрії необхідно:

$$\frac{\Delta k_v}{k_v} \leq \delta_k. \quad (25)$$

Третім визначальним фактором є температурний режим. Опір деформації матеріалу залежить від температури:

$$k = k_0 e^{-\alpha T}. \quad (26)$$

Незначні коливання температури ΔT викликають зміну опору деформації, що змінює контактні напруження та накопичену пластичну деформацію. Відповідно, умова термомеханічної стабільності:

$$\Delta T \leq \Delta T_{\text{кр}}. \quad (27)$$

Крім того, необхідно враховувати стійкість оболонки. Перевищення критичного рівня окружних напружень:

$$\sigma_{\theta} \geq \sigma_{\text{кр}} = \frac{ES}{R} \quad (28)$$

призводить до локальних втрат стійкості, що унеможливорює взаємозамінність навіть за дотримання номінальних розмірів.

Таким чином, механічні умови забезпечення взаємозамінності можна сформулювати як систему обмежень [13]:

$$\begin{cases} \delta_p \leq \delta_{p, \text{кр}}, \\ \frac{\Delta k_v}{k_v} \leq \delta_k, \\ \Delta T \leq \Delta T_{\text{кр}}, \\ \sigma_{\theta} < \sigma_{\text{кр}}. \end{cases} \quad (29)$$

Таким чином, взаємозамінність у процесі ротаційного формування є не просто наслідком точності обладнання, а результатом стабілізації багатофакторної механічної системи. Тільки за умови синхронізації силових, кінематичних і термічних параметрів формується відтворюваний напружено-деформований стан, який забезпечує однаковий перерозподіл металу і мінімальне пружне повернення.

Отже, взаємозамінність є похідною від механічної стабільності процесу, а її досягнення потребує комплексного керування параметрами формування, що визначають еволюцію напружено-деформованого стану в кожному циклі деформації.

Критеріальна модель механічної оптимізації якості. Оптимізація якості порожнистих виробів, сформованих із труб методом ротаційної обкатки, повинна базуватися на системному підході, що враховує багатофакторний характер процесу формування [3,5]. Якість у цьому випадку не може розглядатися як наслідок мінімізації одного окремого параметра (наприклад, сили обкатки або величини обтиснення), оскільки геометричні, механічні та структурні характеристики виробу взаємопов'язані через напружено-деформований стан [1,2].

Введемо узагальнений функціонал якості:

$$Q = F(G, S, \sigma_{\text{зал}}, \varepsilon_{\Sigma}, T), \quad (30)$$

де G – показники геометричної точності; S – розподіл товщини стінки; $\sigma_{\text{зал}}$ – залишкові напруження; ε_{Σ} – накопичена пластична деформація; T – температурний режим процесу.

З практичної точки зору оптимізація полягає у мінімізації відхилень від номінальних значень [9]. Тому доцільно перейти до безрозмірної форми функціоналу:

$$\Psi = w_1 \frac{\Delta D}{TD} + w_2 \frac{\Delta S}{S_{\text{ср}}} + w_3 \frac{\sigma_{\text{зал}}}{\sigma_{\text{дон}}} + w_4 \frac{\Delta \varepsilon_{\Sigma}}{\varepsilon_{\Sigma}}, \quad (31)$$

де w_i – вагові коефіцієнти, що відображають значущість кожного показника. Метою оптимізації є:

$$\Psi \rightarrow \min$$

При цьому процес повинен задовольняти систему механічних обмежень:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &< \sigma_{\text{кр}}, \\ \varepsilon_{\Sigma} &< \varepsilon_{\text{гр}}, \\ T &< T_{\text{плав}}. \end{aligned} \quad (32)$$

Функціонал Ψ залежить від керованих параметрів процесу:

$$\Psi = \Psi \left(\frac{S_{\Sigma}}{D_0}, \varphi, \mu, \frac{v}{\omega}, T, E, \sigma_B \right). \quad (33)$$

Таким чином, задача оптимізації зводиться до вибору таких значень кута нахилу інструмента φ , відношення подачі до швидкості обертання v/ω , коефіцієнта тертя μ та температурного режиму T , при яких забезпечується мінімальне значення Ψ при виконанні обмежень (32).

Принципово важливим є те, що параметри процесу впливають на різні складові функціоналу з різною інтенсивністю. Наприклад, збільшення кута φ може зменшувати розкид товщини стінки, але одночасно підвищувати рівень залишкових напружень. Зменшення коефіцієнта тертя сприяє рівномірності деформації, проте може погіршувати стабільність контакту. Отже, оптимізація має багатокритеріальний характер і потребує компромісного рішення.

Таким чином, ключовим інтегруючим параметром є стабільність накопиченої пластичної деформації:

$$\nabla \varepsilon_{\Sigma} \rightarrow 0. \quad (34)$$

Рівномірність розподілу ε_{Σ} уздовж утворюючої забезпечує одночасно: мінімізацію градієнта товщини; зниження залишкових напружень; стабільність геометрії після розвантаження; однорідність механічних властивостей.

Отже, оптимізація якості в процесі ротаційного формування повинна розглядатися як задача керування еволюцією напружено-деформованого стану, а не лише як підбір геометрії інструмента або режимів подачі.

Комплексний критерій (31) дозволяє формалізувати задачу та перейти до побудови алгоритмів оптимального керування процесом формування горловин із забезпеченням заданого рівня якості та взаємозамінності.

Узагальнена механічна концепція забезпечення оптимальної якості та взаємозамінності. Проведений аналіз показує, що забезпечення оптимальної якості та взаємозамінності порожнистих виробів, сформованих із труб методом ротаційної обкатки, є результатом керованої еволюції напружено-деформованого стану в умовах нестационарного локального пластичного формозмінення. Процес формування горловини слід розглядати як складну механічну систему, у якій взаємодіють три взаємопов'язані підсистеми: кінематична, силова та термомеханічна.

Кінематична підсистема визначає дискретність і траєкторію пластичної деформації. Відношення подачі до кутової швидкості, величина часткового обтиснення за один оберт, геометрія інструмента формують поле швидкостей і напрям течії металу. Невідповідність кінематичних параметрів призводить до нерівномірного накопичення пластичної деформації та формування просторового градієнта товщини стінки.

Силова підсистема характеризується розподілом контактного тиску, окружних і осьових напружень. Саме баланс цих складових визначає геометричну стабільність оболонки. Порушення силової рівноваги спричиняє овальність, конусність або локальну втрату стійкості. Механічна умова забезпечення якості може бути сформульована як мінімізація варіації контактного тиску: $\delta_p \rightarrow \min$.

Термомеханічна підсистема впливає на величину опору деформації та структуру металу. Температурні коливання змінюють характер пластичної течії та рівень залишкових напружень. Відповідно, стабільність температурного режиму є необхідною умовою відтворюваності процесу: $\Delta T \rightarrow 0$.

Інтеграція зазначених підсистем дозволяє сформулювати узагальнений механічний критерій якості:

$$Q = F\left(\varepsilon_{\Sigma} \nabla \varepsilon_{\Sigma} \sigma_{\theta} \delta_p \frac{v}{\omega} T\right). \quad (35)$$

У цій залежності ключовим інтегруючим параметром виступає накопичена пластична деформація ε_{Σ} та її просторовий розподіл. Рівномірність поля ε_{Σ} забезпечує: стабільність товщини стінки; мінімізацію залишкових напружень; зниження пружного повернення; відтворюваність геометричних параметрів.

Процес ротаційного формування доцільно розглядати як задачу синхронізації кінематичних і силових параметрів із урахуванням термомеханічної взаємодії. Забезпечення якості не є наслідком окремого оптимального значення

кута нахилу інструмента або швидкості подачі; воно досягається лише за умов узгодженості всіх факторів, що формують напружено-деформований стан.

Таким чином, оптимальна якість та взаємозамінність виробів є функцією механічної стабільності процесу. Досягнення цієї стабільності потребує:

- Керування величиною та розподілом контактного тиску;
- Підтримання сталого співвідношення кінематичних параметрів;
- Контролю температурного режиму;
- Забезпечення рівномірності накопиченої пластичної деформації.

Запропонована концепція створює методологічну основу для подальшої розробки математичних моделей керування процесом ротаційного формування з метою гарантованого забезпечення якості та взаємозамінності порожнистих виробів із труб.

Список використаних джерел

1. Wang C., Yu H., Tian W., Zhao C., Jiang L., Bai Q. Research on the integral forming process of thin walled and thick mouth seamless gas cylinders. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Art. 17021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44377-z>
2. Arai H., Gondo S. Oblique/Curved Tube Necking Formed by Synchronous Multipass Spinning. *Metals*. 2020. Vol. 10(6). Art. 733. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10060733>
3. Zheng J., Li Z., Shu X. Tube spinning process: Recent advances and challenges. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*. 2024. Vol. 4(4). Art. 2024014. DOI: <https://doi.org/10.51393/j.jamst.2024014>
4. Gao P. Deformation characteristics and process optimization in neck-spinning of variable-diameter tube. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*. 2025. Art. 2025007. DOI: <https://doi.org/10.51393/j.jamst.2025007>
5. Kwiatkowski L., Tekkaya A. E., Kleiner M. Fundamentals for controlling thickness and surface quality during dieless necking-in of tubes by spinning. *CIRP Annals*. 2013. Vol. 62(1). P. 299–302. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.054>
6. Kocabiçak A. C., Wang C., Han S., Nguyen-Xuan H., Kosec G., Wang L., Abdel Wahab M. A deep neural network approach to predict dimensional accuracy of thin-walled tubes in backward flow forming plasticity process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2025. Vol. 141. P. 59–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.02.044>
7. Guo Y., Wang Y., He Y., Zhang H. New technique of precision necking for long tubes with small radius and large reduction ratio. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2020. Vol. 27. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-019-0565-7>
8. Kulik T. O., Kulik O. M. Increasing the operational durability of the friction tool for spinning of necks. *Scientific Journal of Metinvest Polytechnic. Series: Technical Sciences*. 2024. No. 1. P. 166–169. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-57>
9. Yan X., Zhang Y., Wang Q., Liu Y. Dynamic optimization of die-less spinning process through time-varying forming law for processing parameters. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024. Vol. 112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.08.0XX>

10. ISO 14405-1:2016. Geometrical product specifications (GPS) – Linear sizes – Part 1: General. Geneva: International Organization for Standardization, 2016.

11. ISO 1101:2017. Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out. Geneva: International Organization for Standardization, 2017.

12. Kulik T. Kinematic Analysis of Workpiece Rotation Effects on Pipe Neck Formation via Friction-Based Spinning. In: *Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference «Achievements of Science and Applied Research»* (April 7–9, 2025, Dublin, Ireland). European Open Science Space, 2025. P. 88–90. DOI: 10.70286/EOSS-07.04.2025

13. Kulik T. Defining the Technological Boundaries of Rotary Friction Spinning for Small-Diameter Neck Formation. In: *Литво. Металургія. 2025: Матеріали XXI Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Харків – м. Київ, 7–29 травня 2025 р.). 2025. P. 331–333.

ANNOTATION

CHAPTER 1. MODERN BASICS OF ECONOMICS, MANAGEMENT AND TOURISM

1.1. Olha Hirna OUTSOURCING AND EVOLUTION OF LOGISTICS PROVIDERS IN THE CONDITIONS OF SUPPLY CHAINS TRANSFORMATION: CURRENT TRENDS AND UKRAINIAN REALITIES

The essence of outsourcing and the evolution of 1PL–5PL logistics providers in the context of supply chain transformation are investigated. Modern trends in logistics development are analyzed. The role of 3PL–5PL providers in improving supply chain efficiency is revealed. The peculiarities of the Ukrainian logistics services market in the context of military challenges and integration into the European space are outlined. Key barriers to the development of logistics outsourcing and directions for overcoming them are identified.

Keywords: outsourcing, logistics providers, supply chain management, digitalization of logistics.

1.2. Olha Korytska FOREIGN TRADE OF LVIV REGION: STRUCTURAL TRANSFORMATIONS, GEOPOLITICAL CHALLENGES AND DIGITAL MONITORING TOOLS

The dynamics of the Lviv region's foreign trade in 2019–2025 are analyzed using digital statistical tools. The research examines the adaptability of domestic businesses to martial law conditions, specifically through enterprise relocation and the development of new logistics infrastructure. Structural changes in the export and import of goods are identified, alongside the prioritization of European Union markets for the Lviv region's trade. Strategic challenges for the sustainable development of the region are outlined.

Keywords: resilience, exports, imports, foreign trade, statistics, digital tools.

1.3. Yelyzaveta Mykhailova, Yevheniia Sribna ENERGY LOGISTICS AS A SYSTEMIC DETERMINANT OF ECONOMIC SECURITY

This research substantiates the role of energy logistics as a systemic determinant of economic security. Energy security is examined as an integral structural component of economic security that directly affects macroeconomic stability and long-term development. The evolution of logistics from a functional activity to an integrated flow-based management concept is analyzed. Particular attention is paid to the economic content and specific features of energy logistics, including continuity of energy flows, capital intensity, and infrastructural constraints. The research demonstrates that effective coordination of energy, information, and financial flows enhances the stability of the national energy system and strengthens economic resilience.

Keywords: energy logistics, economic security, energy security, flow-based management, system stability.

1.4. Kateryna Protsak PROFESSIONAL ADAPTATION OF WAR VETERANS: SKILL-GAP ANALYSIS AND TOOLS TO OVERCOME IT IN THE LABOR MARKET

The problem of professional adaptation of war veterans in the conditions of the transformation of the labor market of Ukraine and post-war socio-economic challenges

was studied. The focus is on the analysis of the skill-gap as a key barrier to the reintegration of veterans into civilian employment, driven by the non-recognition and non-recognition of military competencies. The peculiarities of skill-gap in traditional, non-standard employment and entrepreneurial activity of veterans are analyzed.

Keywords: reintegration, professional identity, employment, military personnel.

1.5. Olena Karpil, Nataliia Mykhailyk MARKETING RESEARCH AS A STRATEGIC INSTRUMENT FOR DEVELOPING COMPETITIVE STRATEGIES IN THE INTERNET SERVICE PROVIDER MARKET

The chapter examines the role of marketing research as a strategic instrument for shaping competitive strategies in the Internet service provider market. The importance of a systematic analysis of consumer needs and behavioral factors in managerial decision-making under conditions of intensified competition and economic digitalization is substantiated. Based on the results of an empirical consumer study, the structure of demand, brand awareness levels, key provider selection factors, and sources of information influence are analyzed. The study identifies directions for applying marketing insights to enhance the competitiveness of Internet service providers.

Keywords: marketing research, consumer behavior, competitive strategies, Internet service providers, service market, customer insights.

1.6. Olha Podra, Nataliia Petryshyn PROACTIVE MANAGEMENT AS A FACTOR IN INCREASING THE COMPETITIVENESS OF ENTERPRISES IN FOREIGN MARKETS

The theoretical foundations of proactive management as a modern management concept aimed at ensuring the proactive adaptation of enterprises to dynamic changes in the external environment and increasing their competitiveness in foreign markets are studied. Scientific approaches to interpreting the essence of proactive management are considered, its key features are systematized, and the feasibility of implementation in conditions of increasing global uncertainty and competition is substantiated. Particular attention is paid to the process-oriented approach as an instrumental basis for implementing proactive management, its tools are studied, in particular, business process modeling, a system of key performance indicators, responsibility matrices, risk management tools, and BPM systems that ensure measurability, controllability, and continuous improvement of enterprise activities. It is substantiated that the integration of a process-oriented approach into the management system creates the prerequisites for increasing operational efficiency, reducing the risks of foreign economic activity, and forming sustainable competitive advantages of enterprises in foreign markets.

Keywords: proactive management, process approach, strategy, planning, foreign economic activity, competitiveness, risk.

1.7. Nataliia Petryshyn, Olha Podra FEATURES OF PRICING IN E-COMMERCE IN THE CONTEXT OF FOREIGN ECONOMIC ACTIVITY

The features of pricing in electronic commerce in the context of foreign economic activity of enterprises are studied. The relevance of the topic is due to the rapid development of information technologies and the globalization of entrepreneurship, which requires the abandonment of traditional approaches to pricing. The scientific

works of leading researchers are analyzed and it is established that the processes of pricing in the conditions of electronic commerce remain poorly studied. The advantages of electronic commerce for companies and consumers are systematized, the key principles and methods of pricing are determined. The criteria for setting prices and the main objectives of the pricing policy of enterprises engaged in foreign economic activity are characterized. The key problems of pricing are identified and a comprehensive approach to the formation of pricing policy is proposed. It is substantiated that an effective pricing strategy allows an enterprise to increase profits, improve competitiveness and ensure sustainable growth.

Keywords: pricing, electronic commerce, foreign economic activity, pricing strategy, competitiveness, risk, sustainable development.

1.8. Yevhenii Podakov MODERN FEATURES OF FORMING THE TOURIST IMAGE OF UKRAINE IN THE CONDITIONS OF GLOBAL TRANSFORMATIONS

The topic of the study is relevant and promising for Ukraine both during the full-scale invasion and in the post-war period. The state of the tourism industry affects the development of the tourism industry as a whole, the creation of tourist services, other key segments of the economy - transport, construction, communications, trade, etc. The formation of a positive tourist image proportionally affects the improvement of the investment attractiveness of the tourism industry and the increase, on this basis, in the volume of investment in the specified sector of the economy. The study examines and substantiates potential ways of forming the tourist image of Ukraine during the period of recovery from the crisis. The results of the study allow us to expand our understanding of the impact of crisis conditions on the tourism industry and develop more effective strategies for forming a tourist image.

Keywords: tourism; branding; image; problems; directions; state support.

1.9. Iryna Khoma MODERN BASICS OF STRATEGIC MANAGEMENT OF THE ENTERPRISE AT THE BIFURCATION POINT IN THE FACE OF BUSINESS CONFLICTS

The problem is considered, which in the conditions of modern foundations of economics and management is relevant and reveals the importance of strategic management of the enterprise at the point of decision-making in conditions of business conflicts. The mechanism of strategic management of an enterprise at a bifurcation point in conditions of uncertainty and the emergence of various conflict situations can be made more effective if it is structured according to clearly identified elements of the system.

Keywords: enterprise, strategic management, bifurcation point, business conflicts, decision-making.

CHAPTER 2. INNOVATIVE AND MODERN FOUNDATIONS OF PEDAGOGY AND PSYCHOLOGY

2.1. Nadiia Borysenko ETHNODESIGN AS A PREREQUISITE FOR THE FORMATION OF ENVIRONMENTAL COMPETENCE OF LEARNERS

The theoretical foundations of environmental education of students in profile secondary school and the role of the technological educational field in fostering an environmentally responsible personality are revealed. The significance of ethno- and

eco-design as a means of harmonizing human–nature relations, preserving national cultural heritage, and maintaining ecological traditions is analyzed. The pedagogical potential of studying the technique of weaving from pine roots in technology lessons and the results of a survey of technology teachers regarding the implementation of project-based activities in the educational process are highlighted.

Keywords: ethnodesign, environmental competence, profile secondary school, technology lessons, pine root weaving.

2.2. Nataliia Burchak, Vitalii Sheiko, Denys Sutormin HEALTH-SAVING TECHNOLOGIES AS A COMPONENT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE EDUCATIONAL PROCESS

Health-saving technologies are an integral part of the modern pedagogical system, which is determined by its ability to provide somatic and psychological comfort for all participants in the educational process. The problem of integrating health-saving technologies into the educational process as a sign of sustainable development of education is based on the principles of advocacy, professional development, implementation in the curriculum and involvement of communities, teaching staff and school institutions to create a favourable educational environment for the health and well-being of students.

Keywords: health-saving technologies, educational process, sustainable development, health and well-being of students, sustainable development of the educational process, age-specific characteristics of the schoolchildren's organism.

2.3. Inna Marynchenko PEDAGOGICAL SKILLS OF A TEACHER OF TECHNOLOGICAL EDUCATION IN FORMING READINESS FOR TEACHING PROJECT ACTIVITIES WITH A MATHEMATICAL COMPONENT

The relevance of the topic is determined by the fact that the successful organization of project activities in the technological educational field requires a high level of mathematical competence from the teacher as a fundamental condition for planning, modeling and evaluating educational projects. The purpose of this work was to identify the key components of the mathematical competence of a teacher of the technological educational field, which are necessary for organizing project activities of students in general secondary education institutions, as well as to determine the level of readiness of teachers of this field for its implementation. At the ascertaining stage, arithmetic, geometric and modeling components were identified, which form a holistic system of mathematical readiness of a teacher of the technological educational field, combining computational skills, spatial thinking and modeling ability. 16 experts were involved in the study, who assessed the importance of mathematical skills necessary for organizing students' project activities. At the formative stage of the experiment, the sample consisted of 242 teachers of the technological and natural sciences. The arithmetic mean, Kendall's concordance coefficient, Spearman's coefficient, Wilcoxon-Mann-Whitney test and Pearson's χ^2 test were used to analyze the data, which provided an objective assessment and the ability to compare results in different groups of teachers. As a result of the study, key components of readiness were identified: cognitive (knowledge of methods and technologies), practical (ability to organize projects and apply digital technologies) and motivational-value (interest in developing students' creativity). The

teacher's mathematical competence includes arithmetic, geometric, modeling and analytical-statistical skills. According to the results of expert assessment, 16 key skills with a high average rating were identified. The concordance coefficient $W=0.872$ indicates the consistency of the experts. Assessment of the level of mathematical competence of teachers showed that most participants have a sufficient level of basic competence (79% overcame the 50% barrier). Correlation analysis of the arithmetic, geometric and modeling components demonstrated the absence of dependence between them. Analysis by work experience showed that teachers with more than 30 years of experience have a statistically higher level of mathematical competence, while the type of higher education does not affect the test results ($\chi^2=1.185 < \text{critical } 9.488$). The practical significance of the study is that the results obtained can be used as a scientific basis for improving the organization and content of in-service training programs for teachers in the technological education sector.

Keywords: educational measurements, pedagogical competence, testing, expert assessment, advanced training, differentiated learning, professional experience.

2.4. Iryna Pinchuk, Kyrylo Ponomarenko, Guo Yiqing SOCIAL-ORIENTED EDUCATION AS A MEANS OF DEVELOPING THE INNOVATIVE RECEPTIVITY OF FUTURE TEACHERS

The article reveals the theoretical and practical foundations of socially oriented learning as a factor in the development of innovative receptivity in future teachers. It substantiates the importance of social interaction, cooperation, and reflective activity in preparing future educators to implement educational innovations. The potential of socially oriented learning as an environment for the formation of innovative thinking, professional flexibility, and creative pedagogical activity is characterized.

Keywords: socially oriented learning, innovative receptivity, future teachers, professional training, educational innovations.

2.5. Serhii Pishun INNOVATIVE AND MODERN PRINCIPLES OF THE DEVELOPMENT OF PEDAGOGICAL SCIENCE

This article explores the innovative and contemporary principles of pedagogical science development within the context of educational transformation and social challenges. The article substantiates the role of innovations as a systemic factor in the modernisation of the pedagogical paradigm. The focus is on interdisciplinary integration, digitalisation, and the humanistic orientation of modern pedagogy. The influence of modern scientific concepts on educational practice is also discussed. The relationship between pedagogical theory and educational practice is emphasised.

Keywords: innovative principles, methodological basis, pedagogical science.

2.6. Roman Filiak STANDARDIZATION OF THE CONTENT OF ART SCHOOL ACTIVITIES AS A TOOL FOR ENSURING THE QUALITY OF PRIMARY ART EDUCATION

The article analyzes the role of standardization of educational content as a key mechanism for improving the quality of education in art schools. The structure of modern educational programs and their impact on the effectiveness of the educational process are considered. The author argues that the introduction of unified standards allows not only to unify the requirements for students' knowledge and skills, but also to

create a transparent system for assessing the quality of work of out-of-school art education institutions. Special attention is paid to the balance between regulatory requirements and the preservation of the teacher's creative individuality.

Keywords: art school, standardization, quality of education, primary art education, educational programs, competencies.

CHAPTER 3. SCIENTIFIC VIEWS ON LAW AND HISTORY

3.1. Oleh Morozov FROM THE HISTORY OF FISCAL ACTIVITIES OF CUSTOMS OFFICES IN UKRAINIAN PROVINCES (SECOND HALF OF THE XVIII – EARLY XX CENTURIES)

The purpose of the study is to conduct a comprehensive analysis of the fiscal activities of customs authorities in the Ukrainian provinces of the Russian Empire from the second half of the 18th to the early 20th century. The study examines the socio-economic and international legal aspects that influenced the performance of fiscal tasks by customs authorities during that period. Various factors that influenced the profitability of customs offices are analyzed. Elements of fiscal control are reconstructed, and the profitability of customs institutions is determined with the help of archival documents. The conclusions prove that the results of the fiscal activities of customs offices depended on the overall level of economic relations, the activity of entrepreneurs, and the development of the consumer market. The strategic importance of Ukraine in the foreign trade and customs policy of the empire is proven.

Keywords: customs revenues, foreign trade, customs tariff, customs duties, economy, transit, smuggling, international law.

CHAPTER 4. IMPROVEMENT OF SCIENTIFIC APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF PHYSICO-MATHEMATICAL AND TECHNICAL DIRECTIONS

4.1. Tetiana Kulik MECHANICS OF FORMING HOLLOW PRODUCTS FROM TUBES TO ACHIEVE OPTIMAL QUALITY AND INTERCHANGEABILITY: STRESS-STRAIN STATE AND KINEMATICS

A mechanical concept of neck formation in tubular workpieces by rotary friction spinning is formulated. The process is considered as a non-stationary thermomechanically coupled problem with a moving plastic deformation zone and a three-dimensional stress state. The regularities of contact stress formation are established taking into account friction, temperature, and accumulated plastic strain. The mechanism of wall thickness variation is substantiated and the conditions of technological stability of the process are determined.

Keywords: rotary friction spinning; neck formation; contact stresses; stress-strain state; thermomechanical processes; technological stability.

4.2. Tetiana Kulik MECHANICS OF FORMING HOLLOW PRODUCTS FROM TUBES TO ACHIEVE OPTIMAL QUALITY AND INTERCHANGEABILITY: MECHANICAL CONDITIONS FOR QUALITY OPTIMIZATION

The paper considers the mechanical prerequisites for ensuring geometric accuracy and interchangeability of hollow products manufactured from tubes by spinning forming. The decisive influence of the stress-strain state on the neck profile, wall thickness stability, and the level of residual stresses is demonstrated. The role of kinematic, force,

and thermomechanical parameters in quality formation is analyzed. A system of mechanical constraints for dimensional reproducibility is formulated.

Keywords: spinning forming; stress-strain state; geometric accuracy; wall thickness; interchangeability.

CHAPTER 5. THEORETICAL, METHODOLOGICAL AND HISTORICAL ASPECTS OF THE ATHLETE TRAINING SYSTEM

5.1. Tetiana Maleniuk HISTORICAL ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF GYMNASTICS IN THE WORLD AND IN UKRAINE (USING THE EXAMPLE OF KIROVOGRAD REGION)

The development of gymnastics began in the 8th century BC. National gymnastic systems had a powerful influence on the development of gymnastics. Men's gymnastics has been represented in the program of the Olympic Games since 1896, and women's gymnastics since 1928. Before the declaration of independence of Ukraine, Ukrainian gymnasts won 34 Olympic awards. Since 1996, Ukrainian gymnasts have won 13 Olympic awards. Gymnasts of Kirovograd region have won 7 Olympic awards of various kinds.

Keywords: artistic gymnastics, national gymnastic systems, Olympic sport, Ukraine, Kirovograd region, Olympic awards, medalist athletes.

5.2. Viktoriia Babalich MODERN APPROACHES TO THE PHYSICAL TRAINING OF VOLLEYBALL PLAYERS BASED ON CALISTHENICS

The paper substantiates the feasibility of using calisthenics in the training process of volleyball players. An experimental physical training program incorporating calisthenics elements was developed and tested, aimed at improving the physical capacities of volleyball players. The positive effect of the proposed experimental program on athletes' physical fitness indicators was demonstrated.

Keywords: calisthenics, physical training, volleyball players, physical qualities, training process.

5.3. Halyna Panchenko FORMATION OF TEAM COHESION AS A COMPONENT OF TRAINING OF YOUNG VOLLEYBALL PLAYERS AT THE STAGE OF PRELIMINARY BASIC TRAINING

The study is devoted to the problem of forming team cohesion. The key factors influencing the formation of team cohesion in sports are considered. The level of team interaction of young volleyball players aged 11-13 is determined. The program for forming team cohesion of young volleyball players aged 11-13 is presented.

Keywords: team cohesion, sociometric status, young volleyball players aged 11-13.

5.4. Sergiy Sobko FORMATION OF TECHNICAL SKILLS OF YOUNG FOOTBALL PLAYERS AT THE INITIAL STAGE OF MULTI-YEAR TRAINING

An analysis of the characterological features of the formation and development of technical skills of young football players at the initial stage of multi-year training was made. Using normalized scales, the levels of technical preparedness of young football players at the initial stage were determined. A program for the formation of technical skills of young football players at the initial stage of multi-year training was developed and its effectiveness was experimentally proven.

Keywords: technical skills, initial stage, young football players, training program.

5.5. Sobko Nataliya PROGRAMMING OF THE PRE-COMPETITION CYCLE OF ATHLETES OF SPECIALIZED BASIC TRAINING IN COMBAT SAMBO

An analysis of literary sources on the features of competitive activity and pre-competition training in martial arts was carried out. A program (pre-competition mesocycle) for training combat sambo athletes for the main competitions of the season was developed and implemented. The effectiveness of the specified program was proven by analyzing the results of their performance in competitions.

Keywords: athletes, pre-competition mesocycle, program, combat sambo.

CHAPTER 6. Serhii Onyshchenko THEORETICAL ASPECTS OF IMPLEMENTING CLOUD TECHNOLOGIES IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF TRAINING FUTURE ENERGY INDUSTRY SPECIALISTS

This section of the collective monograph examines digital educational technologies, which have taken an important place in modern society and have become one of the fundamental aspects of improving and optimizing the educational process of training future specialists in the energy industry. The emergence of new technical means has led to the emergence of new approaches in education, new forms and methods in teaching. The informatization of education has laid the foundation for the transition of the educational process to a new level. The main task of this process is to train specialists who will be in demand in the labor market, fluent in digital technologies, as well as ensuring continuous training and advanced training through e-learning. In the modern world, digital technologies act not only as a tool, but also as an environment that opens up new opportunities: learning at any convenient time, continuous education, the ability to create individual educational routes, as well as the transformation of consumers of electronic resources into their creators.

The most important tool in the educational process associated with digital technologies is cloud technologies. They are an environment for storing and processing information that combines hardware, licensed software, communication channels and technical support for users. These technologies are based on cloud computing, which is a form of distributed data processing, where computer resources and capabilities are provided to users in the form of Internet services.

Cloud technologies can be defined as a general term for data processing technologies that provide computer resources to Internet users in the form of online services. They create a convenient environment for storing and processing information. The use of "clouds" is aimed at reducing costs and increasing the efficiency of enterprises. One of the key characteristics of cloud technologies is their independence from the hardware platform and geographical location. It is the implementation of cloud technologies that can optimize the educational process of training future specialists in the energy industry, simplify the assessment of educational achievements and create conditions for self-assessment of applicants regarding the assimilation of educational material.

Keywords: digital technologies, cloud technologies, vocational education, digitalization, digital competence, multimedia tools, cloud services.

ABOUT THE AUTHORS

CHAPTER 1. MODERN BASICS OF ECONOMICS, MANAGEMENT AND TOURISM

1.1. Olha Hirna – PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management of Organizations, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

1.2. Olha Korytska – PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Management of Organizations, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

1.3. Yelyzaveta Mykhailova – D.Sc. in Economics, PhD in Philology, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Foreign Languages, National University of Water Management and Environmental Engineering, Ukraine

Yevheniia Sribna – PhD in Economics, Associate Professor of the Department of Enterprise Economics and International Business, National University of Water Management and Environmental Engineering, Ukraine

1.4. Kateryna Protsak – Doctor of Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Organization Management, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

1.5. Olena Karpil – PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Marketing and Logistics, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

Nataliia Mykhailyk – PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Marketing and Logistics, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

1.6. Olha Podra – PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Foreign Trade and Customs, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

Nataliia Petryshyn – PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Foreign Trade and Customs, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

1.7. Nataliia Petryshyn – PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Foreign Trade and Customs, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

Olha Podra – PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Foreign Trade and Customs, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

1.8. Yevhenii Podakov – Doctor of Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics, Hotel, Restaurant and Tourism Business, Bohdan Khmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University, Melitopol, Ukraine

1.9. Iryna Khoma – Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of Finance, Lviv Polytechnic National University, Ukraine

CHAPTER 2. INNOVATIVE AND MODERN FOUNDATIONS OF PEDAGOGY AND PSYCHOLOGY

2.1. Nadiia Borysenko – Candidate of Pedagogical Sciences (PhD), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technological and Professional Education, Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, Ukraine

2.2. Nataliia Burchak – Master's Student of the Faculty of Chemistry and Biology, Volodymyr Hnatyuk Ternopil National Pedagogical University, Ukraine

Vitalii Sheiko – Dr.Sc. (Biology), Professor, Professor of the Department of General Biology and Methods of Teaching Natural Sciences, Volodymyr Hnatyuk Ternopil National Pedagogical University, Ukraine

Denys Sutormin – Teacher of Chemistry and Biology, Kyiv Professional College with Enhanced Military and Physical Training, Ukraine

2.3. Inna Marynchenko – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technological and Vocational Education, Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, Ukraine

2.4. Iryna Pinchuk – Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor of the Department of Pedagogy and Psychology of Primary Education, Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, Ukraine

Kyrylo Ponomarenko – Postgraduate Student of the Third (Doctor of Philosophy) Level of Higher Education, 3rd year of the Specialty 073 Management, Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, Ukraine

Guo Yiqing – Postgraduate Student of the Third Level (Doctor of Philosophy) of Higher Education, 2nd year of the Specialty 011 Educational, Pedagogical Sciences, Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, Ukraine

2.5. Serhii Pishun – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Primary Education Pedagogics and Psychology, Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, Ukraine

2.6. Roman Filiak – Postgraduate Student, Mukachevo State University, Ukraine

CHAPTER 3. SCIENTIFIC VIEWS ON LAW AND HISTORY

3.1. Oleh Morozov – Doctor of Historical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of History and Theory of State and Law, University of Customs and Finance, Dnipro, Ukraine

CHAPTER 4. IMPROVEMENT OF SCIENTIFIC APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF PHYSICO-MATHEMATICAL AND TECHNICAL DIRECTIONS

4.1., 4.2. Tetiana Kulik – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, LLC Technical University “METINVEST POLYTECHNIC”, Zaporizhzhia, Ukraine

CHAPTER 5. THEORETICAL, METHODOLOGICAL AND HISTORICAL ASPECTS OF THE ATHLETE TRAINING SYSTEM

5.1. Tetiana Maleniuk – Candidate of Science of Physical Culture and Sport, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theory and Methods of Sports, Central Ukrainian State University named after Volodymyr Vinnichenko, Kropyvnytskyi, Ukraine

5.2. Viktoriia Babalich – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theory and Methods of Sports, Central Ukrainian State University named after Volodymyr Vinnichenko, Kropyvnytskyi, Ukraine

5.3. Halyna Panchenko – Candidate of Pedagogical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Theory and Methods of Sports, Central Ukrainian State University named after Volodymyr Vinnichenko, Kropyvnytskyi, Ukraine

5.4. Sergiy Sobko – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Sports Games and Mass Sports, Central Ukrainian State University named after Volodymyr Vinnichenko, Kropyvnytskyi, Ukraine

5.5. Nataliya Sobko – Candidate of Science of Physical Culture and Sport, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theory and Methods of Sports, Central Ukrainian State University named after Volodymyr Vinnichenko, Kropyvnytskyi, Ukraine

CHAPTER 6. THEORETICAL ASPECTS OF IMPLEMENTING CLOUD TECHNOLOGIES IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF TRAINING FUTURE ENERGY INDUSTRY SPECIALISTS

4.1., 4.2. Serhii Onyshchenko – PhD in Pedagogical, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Professional Education and Technologies, Berdyansk State Pedagogical University, Ukraine

Scientific Edition

Series of monographs Slovak Publishing House NES Nová Dubnica s.r.o.

Monograph 4

**European Vector of Modern Education,
Science and Production - 2026**

Collection of abstracts

*The authors are responsible for the selection, accuracy of the
facts, quotations and other information*

Publishing House NES Nová Dubnica s.r.o.
M.Gorkého 820/27, P.O.BOX
018 51 Nová Dubnica, Slovenská Republika
tel. +421-42-4401 209



NES NOVÁ DUBNICA S.R.O.

ISBN 988 – 963 – 8454 – 15 – 3 - 3S

Publishing House NES Nová Dubnica s.r.o.

M.Gorkého 820/27, P.O.BOX

018 51 Nová Dubnica, Slovenská Republika

tel. +421-42-4401 209