

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет машинобудування та транспорту
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра галузевого машинобудування
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

**«Підвищення ефективності змінення циліндричних деталей машин
реверсивним вигладжуванням»**

08-62.МКР.02.000.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу, групи ІГМ-24м

спеціальності 133 – Галузеве машинобудування
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

ВЛАСОВ Михайло
(прізвище та ініціали)

Керівник: д. т. н., професор кафедри ГМ

СІВАК Роман
(прізвище та ініціали)

« 12 » грудня 2025 р.

Опонент: к. т. н., завідувач кафедри АТМ

ЦИМБАЛ Сергій
(прізвище та ініціали)

« 12 » грудня 2025 р.

Допущено до захисту

завідувач кафедри ГМ

д. т. н., проф. ПОЛІЩУК Леонід
(прізвище та ініціали)

« 12 » грудня 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 р.

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет машинобудування та транспорту
Кафедра галузевого машинобудування
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань – 13 Механічна інженерія
Спеціальність – 133 – Галузеве машинобудування
Освітньо-професійна програма – Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГМ

Леонід ПОЛІЩУК

«28» вересня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Михайлу ВЛАСОВУ

1. Тема магістерської кваліфікаційної роботи: «Підвищення ефективності зміцнення циліндричних деталей машин реверсивним вигладжуванням».

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи: д. т. н., проф. Роман СИВАК, затверджені наказом №313 від «24» вересня 2025 р.

2. Строк подання студентом магістерської кваліфікаційної роботи: 11.12.2025 р.

3. Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: 1) матеріал – сталь 45; 2) коефіцієнт Пуасона – 0,3; 3) границя текучості – 360 МПа; 4) модуль пружності – $2 \cdot 10^5$ МПа; 5) модуль зміцнення – $1,45 \cdot 10^3$ МПа; 6) коефіцієнт тертя – 0,1; 7) температура – 22°C ; 8) діаметр ролика - 30 мм; 8) приведений радіус ролика - 5 мм.

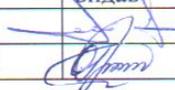
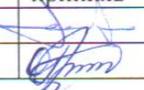
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1) вступ; 2) огляд досліджень щодо інтенсифікації напруженого стану при поверхневому пластичному деформуванні; 3) визначення напружено – деформованого стану зміцненого шару при реверсивному вигладжуванні; 4) оцінка якості циліндричних деталей зміцнених реверсивним вигладжуванням; 5) порівняння способів поверхневого пластичного деформування, оцінка експлуатаційних характеристик зміцнених деталей і технологічні рекомендації для оздоблювально-зміцнювальної обробки реверсивним вигладжуванням; 6) економічна частина.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1) визначення напружено – деформованого стану зміцненого шару при реверсивному вигладжуванні (6 пл. ф. А1); 2) оцінка якості циліндричних деталей зміцнених реверсивним вигладжуванням (1 пл. ф. А1); 3) порівняння способів поверхневого пластичного деформування, оцінка експлуатаційних характеристик зміцнених деталей (2 пл. ф. А1); 4) Висновки (1 пл. ф. А1).

6. Консультанти розділів магістерської кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Основний	д. т. н., проф. Роман СИВАК		
Економічний	к. т. н., доц. Ольга РАТУШНЯК		

7. Дата видачі завдання 30.09.2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів МКР	Примітка
1	Вступ	7.10.2025 р.	<i>виконано</i>
2	Огляд досліджень щодо інтенсифікації напруженого стану при поверхневому пластичному деформуванні	14.10.2025 р.	<i>виконано</i>
3	Визначення напружено – деформованого стану зміцненого шару при реверсивному вигладжуванні	21.10.2025 р.	<i>виконано</i>
4	Оцінка якості циліндричних деталей зміцнених реверсивним вигладжуванням	29.10.2025 р.	<i>виконано</i>
5	Порівняння способів поверхневого пластичного деформування, оцінка експлуатаційних характеристик зміцнених деталей	12.11.2025 р.	<i>виконано</i>
6	Технологічні рекомендації для оздоблювально-зміцнювальної обробки реверсивним вигладжуванням	26.11.2025 р.	<i>виконано</i>
7	Економічна частина	10.12.2025 р.	<i>виконано</i>
8	Підготовка ілюстративної частини МКР	11.12.2025 р.	<i>виконано</i>
9	Попередній захист на кафедрі	12.12.2025 р.	<i>виконано</i>

Студент  Михайло ВЛАСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи  Роман СИВАК
(підпис) (ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

УДК: 621.787

Власов М. В. Підвищення ефективності зміцнення циліндричних деталей машин реверсивним вигладжуванням. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 133 – галузеве машинобудування, освітня програма - галузеве машинобудування. Вінниця: ВНТУ, 2025. 127 с.

Укр. мовою. бібліогр.: 41 назв; рис.: 64; табл.: 15.

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено огляд досліджень щодо інтенсифікації напруженого стану при поверхневому пластичному деформуванні. Визначено напружено – деформований стан зміцненого шару при реверсивному вигладжуванні, включно з кінематичною схемою реверсивного вигладжування, побудовою та описом кінцево-елементної моделі реверсивного вигладжування, оцінкою впливу кінематики поверхневого пластичного деформування на напружено-деформований стан поверхневого шару, основних параметрів реверсивного вигладжування та геометрії робочого інструменту на напружено-деформований стан поверхневого шару, основних параметрів реверсивного вигладжування, геометрії робочого інструменту, кінематики робочого інструменту, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Здійснена оцінка якості циліндричних деталей зміцнених реверсивним вигладжуванням та порівняння способів поверхневого пластичного деформування, оцінка експлуатаційних характеристик зміцнених деталей і технологічні рекомендації для оздоблювально-зміцнювальної обробки реверсивним вигладжуванням.

Графічна частина складається з 10 плакатів за результатами дослідження.

Ключові слова: напружений стан, поверхнєве пластичне деформування, вигладжування, зміцнений шар, кінцево-елементна модель, фізико-механічні властивості.

ABSTRACT

Vlasov M. V. Increasing the efficiency of strengthening cylindrical machine parts by reverse smoothing. Master's qualification work in the specialty 133 - branch mechanical engineering, educational program - branch mechanical engineering. Vinnytsia: VNTU, 2025. 127 p.

In Ukrainian. Bibliography: 41 titles; Fig.: 64; Table: 15.

The master's qualification work reviews research on the intensification of the stress state during surface plastic deformation. The stress-strain state of the hardened layer during reverse smoothing was determined, including the kinematic scheme of reverse smoothing, construction and description of the finite element model of reverse smoothing, assessment of the influence of the kinematics of surface plastic deformation on the stress-strain state of the surface layer, the main parameters of reverse smoothing and the geometry of the working tool on the stress-strain state of the surface layer, the main parameters of reverse smoothing, the geometry of the working tool, the kinematics of the working tool, the physical and mechanical properties of the processed material. The quality of cylindrical parts hardened by reverse smoothing and comparison of methods of surface plastic deformation, assessment of the operational characteristics of hardened parts and technological recommendations for finishing and strengthening treatment by reverse smoothing were carried out.

The graphic part consists of 10 posters based on the results of the study.

Keywords: stress state, surface plastic deformation, smoothing, hardened layer, finite element model, physical and mechanical properties.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ІНТЕНСИФІКАЦІЇ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПРИ ПОВЕРХНЕВОМУ ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ	14
1.1 Циліндричні деталі, проблеми механічної обробки, шляхи підвищення якості	14
1.2 Поверхневий шар та його вплив на експлуатаційні властивості деталей машин	16
1.2.1 Характеристики та шляхи підвищення якості поверхневого шару.....	16
1.2.2 Вплив якості поверхневого шару на експлуатаційні властивості деталей машин	19
1.3 Дослідження напружено-деформованого стану поверхневого шару при поверхневій пластичній деформації	21
1.4 Способи подрібнення зернової структури металу під час механічної обробки	25
1.5 Аналіз кінематичних схем статичного поверхневого пластичного деформування та їх вплив на фізико – механічні властивості зміцнених деталей	27
2 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО – ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗМІЦНЕНОГО ШАРУ ПРИ РЕВЕРСИВНОМУ ВИГЛАДЖУВАННІ	31
2.1 Кінематична схема реверсивного вигладжування	31
2.2 Побудова та опис кінцево-елементної моделі реверсивного вигладжування	32
2.3 Вплив кінематики поверхневого пластичного деформування на напружено-деформований стан поверхневого шару	34
2.4 Вплив основних параметрів реверсивного вигладжування та	

геометрії робочого інструменту на напружено-деформований стан поверхневого шару	39
2.4.1 Вплив основних параметрів реверсивного вигладжування.....	39
2.4.2 Вплив геометрії робочого інструменту.....	43
2.4.3 Вплив кінематики робочого інструменту.....	45
2.4.4 Вплив фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу.....	48
2.5 Позаконтактна деформація при реверсивному вигладжуванні.....	50
2.6 Температура у осередку деформації при реверсивному вигладжуванні.....	57
3 ОЦІНКА ЯКОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ЗМІЦНЕНИХ РЕВЕРСИВНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ	60
3.1 Установка для реверсивного вигладжування	60
3.2 Вплив параметрів реверсивного вигладжування на шорсткість поверхневого шару	61
4 ПОРІВНЯННЯ СПОСОБІВ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ, ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗМІЦНЕНИХ ДЕТАЛЕЙ І ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ОЗДОБЛЮВАЛЬНО-ЗМІЦНЮВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ РЕВЕРСИВНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ	66
4.1 Порівняння методів поверхневого пластичного деформування з різною кінематикою робочих роликів	66
4.2 Оцінка зносостійкості зміцнених деталей	68
4.3 Визначення корозійної стійкості зміцнених деталей	69
4.4 Оцінка механічної жорсткості зміцнених деталей	71
4.5 Визначення раціональних режимів процесу реверсивного вигладжування	72
4.6 Розроблення технологічних рекомендацій для використання реверсивного вигладжування у виробничій практиці.....	77
5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	81

5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки.....	81
5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи.....	87
5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки.....	95
5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності.....	96
ВИСНОВКИ.....	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	102
ДОДАТОК А – ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	108
ДОДАТОК Б – ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА.....	115
ДОДАТОК В – ПРОТОКОЛ ПЕРЕРЕВІРКИ НА ПЛАГІАТ.....	127

ВСТУП

Актуальність теми. Машинобудування є найважливішою галуззю промисловості. Його продукція – машини різного призначення постачаються всім галузям промисловості, сільського господарства, транспорту, визначаючи рівень їх розвитку. Винятково важлива роль належить машинобудуванню у забезпеченні обороноздатності держави. При відкритій ринкової економіки розширення промислового виробництва неможливе без вирішення проблем підвищення якості і конкурентоспроможності машин. Однією з важливих задач при забезпеченні якості машин є підвищення якості поверхневого шару та експлуатаційних властивостей деталей машин.

Деталі типу валів і осей застосовуються в багатьох механізмах обладнання та працюють при різних видах тертя та навантаженнях. Вони виготовляються зазвичай з конструкційних середньовуглецевих (сталі 45, 40Г, 40ХН, 30ХГТ) та легованих сталей. При експлуатації на вали діють змінні навантаження, температура, сили тертя за різного ступеня наявності абразиву та різноманітні зовнішні фактори. Під їх дією вали в цілому та окремі їх поверхні схильні до деформації (вигину, скручування, зминання), різних видів зношування (утомного, окислювального, молекулярно-механічного, корозійно-механічного, абразивного тощо) і руйнувань.

У виробничій практиці підвищити якість поверхневого шару відповідальних деталей машин типу валів і осей можна фінішними і оздоблювально-зміцнювальними методами обробки, у тому числі поверхневим пластичним деформуванням, що дозволяє збільшити міцність поверхневого шару, згладити мікронерівності, сформувати в поверхневих шарах стискаючі залишкові напруження. Сутність процесу поверхневого пластичного деформування полягає в обробці поверхневого шару деталей деформуючим інструментом (кульки, ролики), при якій не утворюється стружка, а відбувається пластичне деформування тонкого поверхневого шару заготовки. В результаті деформаційної зміцнювальної обробки підвищується втомна

міцність, зносо- і корозієстійкість, знижуються сили тертя в зоні контакту пар тертя тощо.

У зв'язку з заходами щодо економії матеріальних ресурсів у машинобудівельних галузях стали проектувати та виготовляти деталі з меншими розмірами поперечних перерізів, наприклад, циліндри з більш тонкими стінками, вали та осі з меншими діаметральними розмірами, панелі з більш тонкими перегородками та ряд інших виробів, які отримали назву нежорстких деталей. Такі деталі зазвичай є нетехнологічними, тому що при обробці виникають проблеми щодо збереження їх форми та розмірів. Наприклад, при механічній обробці нежорстких валів вони легко згинаються, що не дозволяє забезпечити задану форму та розміри деталей. При обробці таких деталей поверхневим пластичним деформуванням складно отримати стабільну якість по довжині обробки - це стосується і твердості, і шорсткості, і залишкових напружень. Якщо знизити величину радіального навантаження, тобто зменшити величину радіального натягу робочого інструменту, то не вдається забезпечити задані показники якості поверхневого шару деталей машин.

Технічна ідея щодо вирішення зазначеної проблеми заснована на ускладненні кінематики технологічного процесу, яка дозволяє підвищити напружено-деформований стан в осередку пружно-пластичної деформації без зміни радіального натягу робочого інструменту. Дослідниками ведуться дослідження технологічних процесів поверхневого пластичного деформування, створених на основі нової кінематики деформуючих інструментів. Виявлено, що при більш складній кінематиці робочого інструменту, за інших рівних умов, вдається підвищити напружений стан в осередку деформації та залишкові напруження в готових деталях.

Незважаючи на ефективність цієї схеми навантаження, яка дозволяє посилити напружений стан в осередку пластичної деформації, залишається низка задач, які потребують вирішення. До таких задач відносяться: розробка кінцево-елементної моделі реверсивного вигладжування для визначення напружено-деформованого стану зміцненого металу в залежності від умов

навантаження, визначення якості поверхневого шару зміцнених деталей в залежності від технологічних параметрів реверсивного вигладжування, оцінка експлуатаційних властивостей зміцнених деталей та розробка рекомендацій для впровадження запропонованого процесу на виробництві. Відсутність такої інформації є стримуючим фактором для впровадження реверсивного вигладжування на промислових підприємствах та визначає актуальність даної роботи.

У зв'язку з вищевикладеним актуальність теми дослідження полягає в необхідності інтенсифікації напруженого стану в зоні деформації без збільшення сили зовнішнього впливу та підвищення якості поверхневого шару зміцнених деталей. Для вирішення поставленої задачі пропонується використовувати реверсивне вигладжування. Особливість даного способу полягає в новій кінематиці робочого інструменту, що реалізує реверсивний круговий рух тороїдального ролика.

Мета і завдання роботи. Метою є підвищення ефективності зміцнення циліндричних деталей машин шляхом інтенсифікації напружено-деформованого стану поверхневого шару реверсивним вигладжуванням.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. За результатами огляду літературних джерел виявити проблеми при механічній обробці циліндричних деталей типу валів та осей та встановити шляхи їх вирішення.

2. Розробити спосіб поверхневого пластичного деформування на основі реверсивного обертання робочого інструменту, що дозволяє підвищити якість поверхневого шару деталей машин типу валів і осей за рахунок підвищення напруженого стану в осередку пружно-пластичної деформації.

3. На основі методу кінцевих елементів і комп'ютерного моделювання побудувати модель реверсивного вигладжування, що дозволяє визначити вплив основних параметрів технологічного процесу на напружений стан в осередку деформації, температуру поверхневого шару, залишкові напруження, позаконтактну деформацію, глибину зміцнення.

4. За результатами експериментальних досліджень визначити якість циліндричних деталей, зміцнених реверсивним вигладжуванням і за допомогою комп'ютерної програми визначити раціональні параметри процесу реверсивного вигладжування.

5. Оцінити експлуатаційні характеристики зміцнених реверсивним вигладжуванням деталей. Розробити технологічні рекомендації для отримання необхідних характеристик якості поверхневого шару деталей, зміцнених реверсивним вигладжуванням.

Об'єкт дослідження. Нежорсткі циліндричні деталі типу валів, осей та штоків.

Предмет дослідження. Якість поверхневого шару деталей, зміцнених реверсивним вигладжуванням: стискаючі залишкові напруження; напружено-деформований стан; шорсткість; мікротвердість; позаконтактна пружнопластична деформація; температура на поверхні деталей.

Новизна одержаних результатів

1. Запропоновано нову кінематику оздоблювально-зміцнювальної обробки реверсивним круговим обертанням робочого інструменту, що забезпечує підвищення якості поверхневого шару та експлуатаційні властивості деталей машин типу валів і осей.

2. Розроблено кінцево-елементну модель процесу реверсивного вигладжування, що дозволяє визначити напружено-деформований стан в осередку деформації, стискаючі залишкові напруження поверхневого шару зміцнених деталей і величину температури в зоні деформації в залежності від основних технологічних параметрів реверсивного вигладжування.

3. На підставі експериментальних досліджень та чисельних розрахунків встановлено вплив основних технологічних параметрів реверсивного вигладжування на якість поверхневого шару зміцнених деталей. Теоретично обґрунтована та експериментально апробована технологія реверсивного вигладжування, що відрізняється локальним способом навантаження

поверхневого шару, що забезпечує високу мікротвердість з отриманням дрібнозернистої структури поверхневого шару зміцнених деталей.

4. Встановлені кореляційні залежності між мікротвердістю і середніми розмірами зерен зміцненого поверхневого шару, між стискаючими залишковими напруженнями і температурою в зоні контакту робочого інструменту з оброблюваною поверхнею.

1 ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО ІНТЕНСИФІКАЦІЇ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПРИ ПОВЕРХНЕВОМУ ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ

1.1 Циліндричні деталі, проблеми механічної обробки, шляхи підвищення якості

У сучасному машинобудуванні все більш широке поширення набувають нежорсткі циліндричні деталі, виконавчі поверхні яких працюють при підвищених температурах, в умовах знакозмінних навантажень і агресивних середовищ [1]. До нежорстких циліндричних виробів прийнято відносити деталі типу валів, осей і труб із співвідношенням довжини до діаметра понад 12 [2]. Нежорсткі деталі широко застосовуються в багатьох галузях промисловості, таких як автомобілебудування, авіація, сільськогосподарське машинобудування, будівництво, видобуток корисних копалин, видобуток нафти і газу, енергетика. До нежорстких циліндричних деталей відносяться болти, осі, вали, трансмісійні вали, колінчасті вали, поворотні вали, торсіони, напрямні стрижні.

Диспропорції в конструктивних параметрах нежорстких деталей викликають технологічні труднощі у виробництві [3]: значні пружні деформації на всіх стадіях обробки, збирання та експлуатації деталей; низька вібростійкість технологічної системи; різна податливість елементів технологічної системи; суттєвий вплив технологічної спадковості на надійність роботи технологічної системи; короблення деталей, викликане нерівномірними залишковими напруженнями, що створюються на всіх стадіях технологічного процесу; мінімальна термостійкість деталей.

Негативна дія перерахованих факторів при виготовленні нежорстких деталей призводить до порушення технологічних баз, похибок форми і розмірів деталі, обмеження режимів різання, точнісних характеристик верстатів і стійкості інструментів.

Аналіз виробничого досвіду обробки маложорстких деталей в індивідуальному та дрібносерійному виробництвах показав, що традиційні способи виготовлення таких деталей малоефективні для виробництва, тому на практиці питання їх виготовлення вирішують обмеженням режимів різання, введенням операцій ручного доведення тощо [4].

Головним напрямом науково-технічних програм є створення, освоєння та широке впровадження нової техніки та технологічних процесів, що забезпечують економію трудових і матеріальних витрат, підвищення якості випускається продукції [5]. У зв'язку з цим актуальними є питання дослідження методів зміцнення поверхонь деталей машин, що забезпечують їх високі експлуатаційні характеристики.

Для підвищення якості поверхневого шару деталей машин досить широко застосовують оздоблювально-зміцнювальну обробку поверхневим пластичним деформуванням, яка дозволяє знизити шорсткість, підвищити твердість і сформувати стискаючі залишкові напруження в поверхневих шарах деталей машин [6]. В даний час способи поверхневого пластичного деформування для обробки нежорстких циліндричних деталей використовуються для виготовлення різних видів осей (прецизійні; рухомі; нерухомі; східчасті), виготовлення вагонних осей, паразитних, приводних, черв'ячних, редукторних, ступінчастих, торсійних валів, виготовлення карданних, приводних валів, валів двигунів.

Процеси поверхневого пластичного деформування засновані на силовому впливі робочого інструменту у вигляді кульки, ролика, алмазного індентора та ін. на поверхню деталі. Малі пластичні деформації створюють наклеп поверхневого шару, що призводить до підвищення механічних властивостей матеріалу [7].

В даний час розроблено досить велику кількість різноманітних способів поверхневого пластичного деформування для вирішення конкретних виробничих задач, але при зміцненні циліндричних деталей типу валів і осей виникають проблеми, пов'язані з отриманням заданої форми. При

поверхневому пластичному деформуванні забезпечення стабільного якості по довжині обробки викликає ще більші труднощі. Проблема полягає в тому, що для забезпечення необхідної якості поверхневого шару потрібно прикласти до робочого інструменту силу, яка спрямована зазвичай перпендикулярно до поверхні деталі. Ця сила спільно з відцентровими силами, що виникають при обертанні заготовки, викликають її викривлення, що не дозволяє отримати стабільні механічні властивості по довжині заготовки. Для зниження викривлення заготовки можна знизити частоту її обертання або зменшити радіальний натяг інструменту, але при цьому знижується продуктивність обробки, а також неможливо отримати задані характеристики якості поверхневого шару, наприклад, ступінь зміцнення і величину шорсткості поверхні.

1.2 Поверхневий шар та його вплив на експлуатаційні властивості деталей машин

1.2.1 Характеристики та шляхи підвищення якості поверхневого шару

У сучасному машинобудуванні пред'являються все більш високі вимоги до експлуатаційних властивостей деталей машин. Розвиток машинобудування як найважливішої умови технічного переозброєння промисловості вимагає підвищення експлуатаційної надійності виробів, отримання на стадії їх виготовлення таких характеристик якості, які відповідають вимогам, що пред'являються до експлуатаційних показників робочих поверхонь, виключають утворення причин відмов і забезпечують формування заданих властивостей [8].

При виготовленні та експлуатації деталей машин на їх поверхнях утворюються нерівності та мікронерівності, а шар металу, безпосередньо прилеглий до поверхні, змінює структуру, фазовий і хімічний склад, в ньому

виникають залишкові напруження. Однією з найважливіших задач сучасного машинобудування є підвищення надійності та довговічності деталей машин в умовах безперервного форсування робочих процесів. Виконання зростаючих вимог до надійності та ресурсу досягається конструктивними та технологічними методами.

Експлуатаційні властивості деталей машин багато в чому залежать від стану поверхневого шару: фізико-механічних властивостей; мікрогеометрії; залишкових напружень.

Поверхневий шар деталі – це шар, у якого структура, фазовий та хімічний склад відрізняються від основного матеріалу, з якого виготовлено деталь. Під якістю поверхні деталей машин розуміється стан поверхневого шару, як результат впливу на нього одного або кількох послідовно застосовуваних технологічних методів. Якість обробленої поверхні визначається геометричними і фізико-механічними характеристиками поверхневого шару. Геометричні характеристики поверхні дають уявлення про похибки механічної обробки.

В обробленій поверхні розрізняють: макрогеометрію поверхні, що характеризується похибками форми, як, наприклад, опуклістю або увігнутістю плоских поверхонь і конусністю, бочкоподібністю, сідлоподібністю, овальністю і огранюванням циліндричних поверхонь; мікрогеометрію поверхні (шорсткість); хвилястість [9].

Фізико-механічні властивості поверхневого шару відрізняються від фізико-механічних властивостей основного матеріалу. Це пояснюється тим, що при обробці, наприклад, різанням поверхневий шар піддається впливу високих температур і значних сил, які викликають пружні та пластичні деформації. Якість поверхні надає значний вплив на експлуатаційні властивості деталей (зносостійкість; статична, тривала і втомна міцність; якість посадок деталей, що сполучаються тощо). Встановлено, що 80÷85% машин виходить із експлуатації внаслідок зношування деталей, і лише 15÷20% – з інших причин [10]. Формування поверхневого шару із заданими властивостями в процесі

виготовлення деталей є однією із найважливіших задач технології машинобудування, причому більш складною, ніж забезпечення точності.

Якість поверхонь деталей залежить, в основному, від методів та режимів проведення фінішних операцій. Вивчення способів підвищення якості поверхневого шару деталей машин проводилося в роботах [11].

Залежно від схеми силового впливу деформуючого елемента на поверхню оброблюваної деталі, класифікація способів поверхневого пластичного деформування представлена в роботі [12]. На основі аналізу літературних даних у роботі [13] було складено табл. 1.1, що дозволяє порівняти ефективність різних способів поверхневого пластичного деформування.

Таблиця 1.1 – Ефективність різних методів поверхневого пластичного деформування [28]

Способи поверхневого пластичного деформування	Ra, мкм	Глибина наклепу, мм	Залишкове напруження, МПа	Підвищення твердості, НВ (%)
Обкочування кульками	0,025÷0,40	1,0÷2,5	100÷500	8,5÷25
Обкочування роликками	0,04÷0,32	1,3÷2,5	100÷500	10÷20
Алмазне вигладжування	0,02÷0,08	0,3÷0,6	500÷1200	25÷40
Дробострумінна обробка	1,6÷2,5	0,5÷1,5	500÷800	20÷25
Ультразвукова обробка	0,16÷0,63	0,1÷0,25	200÷500	20÷30
Зміцнення щітками	0,16÷0,63	0,1÷0,3	600÷1100	15÷30
Відцентрова обробка	0,08÷0,32	0,3÷3,0	400÷800	30÷80
Віброобкочування	0,02÷0,16	0,1÷3,0	100÷450	10÷15
Ударне карбування	0,63÷1,25	0,2÷0,3	200÷300	30÷50

З табл. 1.1 випливає, що обробка різними способами поверхневого пластичного деформування забезпечує значний наклеп поверхневого шару і

формування в ньому стискаючих залишкових напружень, підвищення твердості, а також, як правило, малу шорсткість поверхні, що підвищує втомну міцність, зносостійкість, зносостійкість, контактну жорсткість з'єднань. Проте ефективність відомих способів поверхневого пластичного деформування неоднозначна. Це безпосередньо пов'язано з режимами обробки, кінематикою руху, видом матеріалу, що обробляється, а також конструкцією робочого інструменту.

1.2.2 Вплив якості поверхневого шару на експлуатаційні властивості деталей машин

Експлуатаційні властивості визначають здатність деталі виконувати своє службове призначення у конкретних, у більшості випадків, несприятливих умовах (фізико-хімічна характеристика навколишнього середовища: високі температури, вологість, тиск, запиленість тощо). Всі раніше представлені властивості поверхневого шару впливають на тривалість життєвого циклу деталей зокрема на тривалість їх експлуатації.

При конструюванні та процесі виготовлення деталей важливо знати, як впливають характеристики поверхневого шару деталей на їх експлуатаційні властивості. Це дає можливість правильно регламентувати вимоги до поверхонь деталей, уникнути необґрунтованих витрат на їх виготовлення та зменшити втрати від браку. Розглянемо вплив основних показників якості поверхневого шару на експлуатаційні властивості деталей машин.

Вплив шорсткості поверхні. Шорсткість поверхні є одним з основних параметрів якості поверхневого шару, що визначає багато експлуатаційних властивостей деталей машин [14].

Вплив шорсткості на роботу деталей машин різноманітний, збільшення висоти, кроку та загостреності нерівностей погіршує експлуатаційні властивості деталей [15]: збільшується величина приробіткового зношування. На зношування впливає форма мікронерівностей та їх напрямок.

Гостровершинні нерівності зношуються швидше за плосковершинні; знижується втомна міцність деталей, особливо працюючих при знакозмінних і ударних навантаженнях, оскільки западини мікропрофілю впливають на концентрацію напружень та утворення втомних тріщин; зменшується контактна жорсткість і герметичність з'єднання через зменшення фактичної площі контакту; при запресуванні деталей мікронерівності змінюються і зрушуються, послаблюючи натяг у з'єднанні і надійність роботи. Корозія деталей в атмосферних умовах виникає легше і йде швидше на грубо оброблених поверхнях. Корозійна стійкість декілька вище при заокруглених западинах мікронерівностей.

Вплив хвилястості поверхні. Форма та розміри хвилі залежать від причин, що викликають хвилястість поверхні: вібрації технологічної системи з відносно малою частотою коливань та великою амплітудою; неточність встановлення робочого інструменту; похибки у передачах верстатів (зубчастих коліс); обробка із застосуванням систем автоматичного регулювання; копіювання нерівностей заготовки; дія залишкових напружень у нежорстких заготовках тощо [16]. Зменшення хвилястості пов'язане з усуненням причин, що її викликають.

Хвилястість поверхні негативно впливає на експлуатаційні властивості деталей: збільшується швидкість зношування і знижується довговічність поверхонь; зменшується площа контакту сполучених поверхонь і контактна жорсткість; знижується герметичність з'єднання; знижується коефіцієнт корисної дії передачі через збільшення сили тертя; послаблюється натяг у з'єднаннях і, отже, їхня міцність; погіршується зовнішній вигляд [17].

Вплив мікротвердості. При поверхневому пластичному деформуванні у процесі тертя відбувається механічна (впровадження) і молекулярна (тяжіння, схоплювання) взаємодія поверхонь. Молекулярна взаємодія супроводжується механічним зношуванням, і ступінь їх відносного прояву залежить від конкретних умов зношування. Але для зниження зношування деталей необхідно зменшити взаємне впровадження поверхонь, щоб запобігти їх

схоплюванню. Тому підвищення мікротвердості при механічній обробці сприяє зменшенню впровадження і контактного схоплювання, а отже, збільшує зносостійкість поверхонь, що труться [18].

Вплив залишкового напруження. Ступінь і характер впливу залишкових напружень на зносостійкість залежить від умов контакту пари, який може бути пружним, пружнопластичним або пластичним. Як показано в роботах [19], при пружному контакті стискаючі залишкові напруження можуть підвищувати зносостійкість, а розтягуючі - знижувати її. При упругопластичному та пластичному контакті зношування не залежить від наявності залишкових напружень.

Таким чином, узагальнюючи вищевикладене, приходимо до висновку, що для сучасного машинобудування є актуальною задача з виготовлення деталей з необхідними експлуатаційними властивостями, необхідними параметрами якості поверхневого шару, здатними забезпечити максимальну тривалість експлуатації виробу.

1.3 Дослідження напружено деформованого стану поверхневого шару при поверхневій пластичній деформації

Визначення напружено-деформованого стану в осередку деформації при поверхневому пластичному деформуванні є важливою задачею для здійснення технологічного процесу і безпосередньо впливає на технологічну якість і експлуатаційні характеристики деталей машин і виробу в цілому [20]. Оцінка напружено-деформаційного стану поверхневого шару деталей машин є основою для висновку про його працездатність, безпечну експлуатацію та визначення залишкового ресурсу. Дослідження напружено-деформаційного стану в осередку деформації проводяться аналітичними, чисельними та експериментальними методами [21].

Аналітичні методи дослідження напружено-деформаційного стану базуються на відомій деталізації об'єкта дослідження, властивостей

конструкційних матеріалів, режимів експлуатації об'єкта. Вони не враховують зміну технічного стану об'єкта при експлуатації (старіння конструкційних матеріалів, при обробці, перерозподілу навантаження між елементами конструкції, корозію, зношування та інші процеси деградації), а також широку гаму режимів та умов експлуатації. Викликає певні труднощі розрахунок складнонапруженого стану об'єкта за наявності не завжди відомих граничних умов або їх зміни в процесі експлуатації, зміни режимів та умов роботи.

Чисельні методи - це прикладний розділ математики, що вивчає питання розробки та застосування методів для отримання рішення математичних задач за кінцеве число обчислень [22]. Такі розв'язки повинні без особливих труднощів доводитися до чисельного результату. Слід зазначити, що розв'язок задачі може бути, як в аналітичному вигляді, тобто у вигляді математичних виразів, так і в чисельному. Кінцева кількість обчислень гарантує принципову можливість довести аналітичне рішення до чисельного результату. Так само можна відзначити, що аналітичні рішення існують, але не завжди їх вдається виразити через відомі математичні функції, або вони можуть мати неприйнятно громіздкий вигляд, тому на практиці часто обходять задачу отримання аналітичного рішення, задовольняючись лише чисельними значеннями результату [23].

Основною перевагою чисельних методів є універсальність, застосовність для широкого класу випадків і відносна простота обчислень. Їх недоліком є великий об'єм обчислень, проте застосування електронно-обчислювальної техніки дозволяє його подолати і за достатньої надійності вихідних даних забезпечити точність рішень, достатню для практики [24]. Одним з чисельних методів є метод кінцевих різниць або метод сіток [25]. Загальний принцип цього методу полягає в тому, що розрахункова область покривається регулярною сіткою, а диференціальне рівняння для будь-якої точки замінюється певним рівнянням у кінцевих різницях. Це рівняння отримують шляхом заміни диференціального рівняння похідних та інших диференціальних операцій їх наближеними виразами через різницеві відносини або значення

функцій у вузлах сітки, що оточують розрахункову точку. В результаті рішення диференціального рівняння зводиться до розв'язання системи лінійних рівнянь алгебри.

Для експериментального визначення напружено-деформаційного стану матеріалу поверхневого шару розроблено спосіб мікрокоординатних сіток, в основі якого лежить принцип посилення контрастності зображення спотвореної сітки і на фоні деформованого металу, отриманого за реальних, нормативних умов обробки [26]. Спосіб використовує в технології нанесення сіток комбінацію методів надряпання і кернення в поєднанні з елементами люмінесцентної дефектоскопії. Перевагою способу мікрокоординатних сіток є відсутність вимог до вихідної однорідності структури досліджуваного матеріалу, враховуючи, що при різанні з випереджаючим пластичним деформуванням, як і при звичайному різанні, оброблюваний матеріал характеризується неоднорідністю властивостей по товщині зрізуваного шару, а отже і його структури [27].

Для визначення залишкових напружень широко використовують механічні (руйнівні), фізичні (неруйнівні) і непрямі (порівняльні) методи [28].

Механічні руйнівні методи досить добре розроблені і набули найбільшого поширення. Руйнівним методом неможливо проводити суцільний контроль деталей, оскільки потрібно повне чи часткове їх руйнування. До руйнівних механічних методів відносяться: метод прямокутних стрижнів, метод смужок, метод кілець, метод обточування, метод циліндрів, метод повного руйнування, метод отвору та метод електротравлення. Ці методи застосовуються до різних об'єктів дослідження [29]. До недоліків цієї групи методів можна віднести складнощі, пов'язані з визначенням початку нелінійної діаграми, а також з необхідністю високочутливих реєструючих систем, здатних вловити початок течії в точці [30].

До неруйнівних підходів вимірювання залишкових напружень відносяться рентгенівський метод та ультразвуковий метод [31].

Рентгенівський метод дозволяє зробити оцінку залишкового напруження на локальних ділянках конструкції в шарі глибиною $20 \div 25$ мкм. Вимірювання проводиться у кількох точках і дозволяє виявити неоднорідність напруженого стану у площині виробу, визначити місця концентрації напружень. Похибка вимірювання залишкових напружень для різних сплавів різна і становить $10 \div 30\%$. Достоїнством рентгенографічного методу є те, що він дозволяє достовірно оцінити залишкові напруження II і III роду в поверхневому шарі деталі без її руйнування, визначати напруження в деталях складної геометричної форми, необмежених розмірів, досліджувати напруження на вельми малих ділянках поверхні зразка, вимірювати градієнти напружень, визначати миттєві напруження в деталях, що піддаються періодичним навантаженням. До недоліків слід віднести невисоку точність щодо залишкових напружень I роду. Це пояснюється тим, що рентгенівські промені, проникаючи у метал на глибину $3 - 50$ мкм, дають на рентгенограмах чи дифрактограмах усереднені по цій глибині значення залишкових напружень, крім того, знижену точність при роботі з сильнодеформованими і крупнозернистими матеріалами, неможливість одночасного виміру в декількох точках. Є обмеження з геометрії досліджуваних зразків. Значний вплив на результат може мати стан поверхневого шару (вплив шліфування, утворення окалини, кування, прокатки, корозії). Для рентгенографічного методу необхідне обладнання високої вартості.

Ультразвуковий спосіб застосовується для труб великого діаметра та плоских виробів. Він може використовуватися для конструкцій, виготовлених з різних матеріалів: металів, кераміки, пластмаси, композитних матеріалів. Ультразвук застосовують для аналізу неоднорідності напруженого стану у зварювальних та заклепувальних з'єднаннях [32]. Цей метод дозволяє визначити усереднене залишкове напруження по перерізу виробу. Похибка вимірювання становить $15 \div 17\%$ для неоднорідного напруженого стану і $2 \div 3\%$ при рівномірному розподілі залишкових напружень по деталі. Локальність вимірювання залишкових напружень становить $5 \div 10$ мм. Ці методи

застосовують у промисловому виробництві для контролю якості продукції та стабільності технологічного процесу.

Кожен із описаних вище методів має свої переваги та недоліки найбільш вірогідні механічні методи. Однак вони вимагають "руйнування" або порушення цілісності конструкції. Крім того, механічні методи вимірюють конкретні значення напружень у конкретній області. Визначення полів напружень з різними величинами в залежності від координати вимагає проведення цілого ряду вимірювань.

1.4 Способи подрібнення зернової структури металу під час механічної обробки

З кінця минулого століття і по теперішній час отримало розвиток використання дрібнозернистих структур у конструкційних матеріалах з унікальними механічними властивостями. Такі матеріали поєднують високу міцність і пластичність, які можна досягти в металах і сплавах із субмікросталічною та нанокристалічною структурою [33].

Для сплавів з дрібними зернами характерні вищі механічні властивості (міцність, пластичність і ударна в'язкість), проте прогартування у них менше. Найбільший вплив величина зерна надає на ударну в'язкість. Величина зерна залежить від складу і технологічного процесу виготовлення сплаву (умов виплавки, розливання, обробки тиском, термічної обробки) і може бути неоднаковою в різних плавках одного і того ж складу, тому в багатьох випадках необхідне експериментальне визначення її розмірів. Величина зерен істотно впливає на механічні властивості металів: чим дрібніше зерна, тим міцніше метал. Зі збільшенням розміру зерна характеристики міцності, і особливо ударна в'язкість знижується, а збільшуються магнітні та електричні властивості і навпаки [34].

Зменшення розмірів частинок, що складають об'єкт, надає йому загалом нові властивості. Це викликано: по-перше, впливом розвинених границь,

оскільки приграничні умови відрізняються від внутрішньозеренних; а по-друге, відсутністю всередині зерна умов, що проявляються у великому об'ємі. Тому нанорозміри зерен здатні надати при хімічному складі, що зберігається, суттєво нові якості тому самому сплаву [35].

Недоліками найбільш поширених методів інтенсивної пластичної деформації (кручення під високим тиском, рівноканальне кутове пресування та його варіації) є [36]: низька продуктивність і складність їх застосування для заготовок великих розмірів; використання нестандартного дорогого обладнання, що вимагає великої точності виготовлення; використання для отримання нанорозмірних заготовок порошкових матеріалів, виробництво яких є тривалим і дорогим процесом, що позначається на їх ціні; складність утримання отриманої нанорозмірної структури.

В даний час розроблено новий підхід до подрібнення вихідної зеренної структури інтенсивною пластичною деформацією. Запропонований підхід реалізований як технологія наноструктуруючого вигладжування при фінішній обробці поверхонь деталей ковзним індентором на верстатах з ЧПК та обробних центрах. Наноструктуруюче вигладжування здійснюється сферичним або циліндричним індентором і забезпечує одночасно із зміцненням матеріалу згладжування вихідного профілю поверхні до мікро-і нанорельєфу [37].

Дослідження [38] показали, що ультрадрібнозернисті метали, утворені при інтенсивній пластичній деформації, мають складну комплексну мікроструктуру, і їх мікроструктурні характеристики залежать від особливостей проведення інтенсивної пластичної деформації. Отримуваний в конструкційних матеріалах стабільний ультрадрібнозернистий стан дає можливість завдяки підвищенню рівня механічних, експлуатаційних і спеціальних властивостей, удосконалити різні машинобудівні конструкції, значно покращити технічні характеристики машинобудівних виробів.

Крім методів інтенсивної пластичної деформації, в даний час для подрібнення зеренної структури деталей машин в механічній обробці досить широко застосовують оздоблювально-зміцнюючі методи обробки поверхневим

пластичним деформуванням. Вони забезпечують формування низької шорсткості, задану глибину і ступінь зміцнення поверхневого шару, залишкові напруження стиснення в поверхневих шарах, дрібнозернистість структури та інші показники якості поверхневого шару оброблених деталей [39]. Аналіз ступеня зменшення розмірів зерен після зміцнення за різних способів поверхневого пластичного деформування представлений у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Ступінь зменшення розмірів зерен залежно від різних методів поверхневого пластичного деформування [40]

Способи поверхневого пластичного деформування	Ступінь зменшення розмірів зерен (%)
Обкочування тороїдальним роликом	20÷25
Охоплююче поверхнєве пластичне деформування	25÷28
Осцилююче вигладжування	30÷45
Орбітальне вигладжування	35÷60
Обкочування обертовим двохрадіусним роликом	65÷75

З табл. 1.2 випливає, що ступінь зменшення розмірів зерен після зміцнення залежить від кінематики руху та конструкції робочого інструменту. Чим складніша кінематика руху та конструкція робочого інструменту, тим вище ступінь зменшення розміру зерен у поверхневих шарах деталей.

1.5 Аналіз кінематичних схем статичного поверхневого пластичного деформування та їх вплив на фізико – механічні властивості зміцнених деталей

В даний час способи обробки металу на основі поверхневої пластичної деформації (способи поверхневого пластичного деформування) матеріалу посіли головне місце в механічному виробництві [1, 2, 23, 32]. Причина, по якій

обробка поверхневим пластичним деформуванням стала важливою технологією, що швидко розвивається, полягає в тому, що вона має істотні переваги, а саме: економію матеріалу (безстружкова обробка), високу продуктивність, без порушення цілісності і об'єму заготовки. За рахунок пластичної деформації можна поліпшити якості металу, такі як підвищення твердості та зносостійкості поверхневого шару, підвищеної границі текучості і особливо границі втомної міцності матеріалу і ряд інших експлуатаційних властивостей деталей машин [1, 2].

Найбільш ефективно деформаційне зміцнення металів може бути реалізовано шляхом цілеспрямованих технологічних впливів на структуру металів для збільшення щільності дислокацій та створення дислокаційної субструктури, що збільшує опір зсуву. Таким чином, шляхи підвищення властивостей міцності металів полягають у розробці зміцнювальних технологій, що забезпечують формування такого структурного стану матеріалу, при якому максимально реалізуються основні принципи дислокаційної теорії зміцнення. Інтенсифікація напруженого стану може бути підвищена, якщо буде посилено деформаційне викривлення зерен матеріалу.

Залежно від схеми силового впливу деформуючого елемента на поверхню оброблюваної деталі, методи поверхневого пластичного деформування поділяють на статичні та динамічні [1, 10].

Найбільшого поширення набули статичні методи поверхневого пластичного деформування, до яких відносяться накочування, поверхнєве дорнування, вигладжування, при яких здійснюють безперервну контактну взаємодію інструменту із заготовкою у процесі їх взаємного переміщення [1]. Статичні методи поверхневого пластичного деформування набули найбільш широкого поширення внаслідок відносної простоти їх реалізації та стабільності перебігу процесу обробки.

Статичні методи поверхневого пластичного деформування характеризуються стабільністю форми і розмірів осередку деформації завдяки стаціонарному контакту інструменту та заготовки [10]. Статичні методи

поверхневого пластичного деформування за характером кінематичної взаємодії інструменту з поверхнею або за видом тертя в контакті можна розділити на способи контакту ковзання і способи контакту кочення [1, 2, 9]. Суть цих способів полягає в тому, що в результаті тиску поверхневі шари металу, контактуючи з інструментом високої твердості, виявляються в стані всебічного стиску і пластично деформуються. При цьому заготовці надають обертальний рух відносно власної поздовжньої осі, а робочому інструменту, що створює тиск на поверхню оброблюваної заготовки, надають поздовжню подачу. Зміцнення за схемою ковзання значно рідше використовують на практиці, оскільки тертя ковзання по поверхні оброблюваної заготовки викликає виділення тепла в зоні контакту, що в свою чергу призводить до зниження величини формованих стискаючих залишкових напружень, а самі робочі інструменти інтенсивно зношуються. Однак, якщо оцінити ці дві схеми зміцнення з точки зору механіки процесу і можливості деформаційного викривлення мікроструктури, то обробка по схемі ковзання повинна бути більш ефективною.

У роботах [5, 6, 12] технічна ідея щодо інтенсифікації напруженого стану в осередку деформації полягає у зміні кінематики робочого інструменту, яка посилює викривлення зеренної структури матеріалу. Новий спосіб поверхневого пластичного деформування зовнішніх циліндричних поверхонь деталей машин відрізняється тим, що деформуючий елемент інструменту є індентором з двома робочими профільними радіусами. При цьому робочому інструменту додатково надають обертальний рух відносно осі, що проходить через площину, що з'єднує два ролика і розташовану перпендикулярно до осі заготовки.

У роботах [5-7] автори представляли нову схему навантаження робочого інструменту - орбітальне навантаження. Сутність орбітального навантаження полягає в тому, що деформуючий інструмент, що має стрижневу форму зі сферичним наконечником, здійснює обертальний рух під певним кутом α , що утворює просторовий конус, вісь якого перпендикулярна осі заготовки.

Недоліками цих 2 способів є зниження якості поверхні заготовки через прослизання ролика або кульки в той момент, коли вісь його обертання збігається з напрямом осі деталі. Обертання робочого інструменту в одному напрямку викликає слабе викривлення зерної структури матеріалу, що знижує ступінь та глибину зміцненого шару.

Аналіз впливу вищевикладених методів поверхневого пластичного деформування на фізико – механічні характеристики зміцнених деталей представлений у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 - Вплив орбітального навантаження кулькою і обкочування дворадіусним роликом на фізико - механічні властивості зміцнених деталей [28]

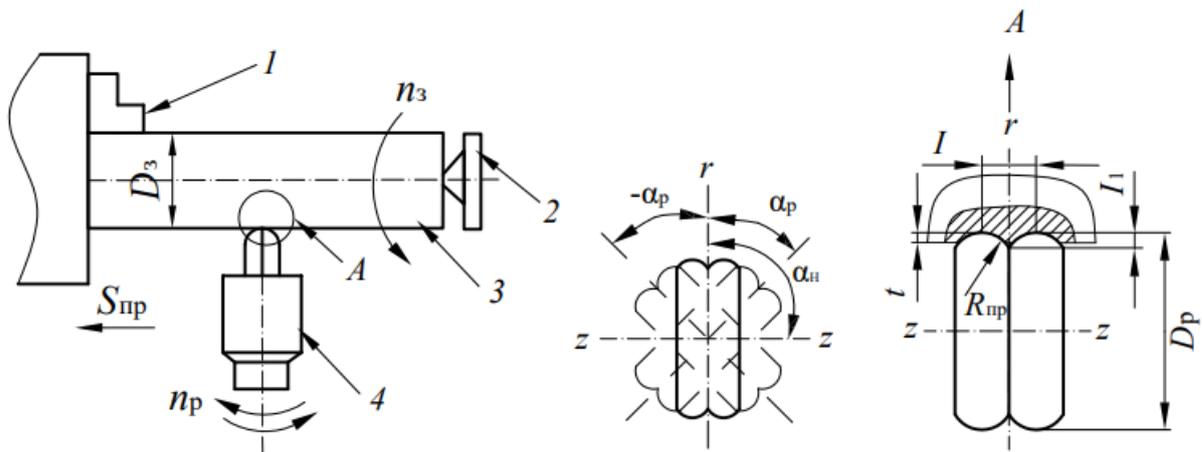
Способи поверхневого пластичного деформування	Ra, мкм	Глибина наклепу, мм	Підвищення залишкових напружень, %	Підвищення твердості, НВ (%)
Орбітальне вигладжування кулькою	0,30÷0,32	до 1,5	8÷12	7÷11
Обкочування дворадіусним роликом	0,25÷0,30	до 1,2	8÷10	19÷21

Із табл. 1.1 і 1.3 випливає, що чим складніше кінематика руху робочого інструменту, тим вища якість поверхневого шару деталей машин.

2 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО – ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗМІЦНЕНОГО ШАРУ ПРИ РЕВЕРСИВНОМУ ВИГЛАДЖУВАННІ

2.1 Кінематична схема реверсивного вигладжування

Схема реверсивного вигладжування циліндричної заготовки представлена на рис. 2.1 де показана конструкція деформуючого елемента і схема зміцнення циліндричної заготовки за запропонованим способом.



1 – трикулачковий патрон; 2 – задня бабка; 3 – заготовка; 4 – робочий інструмент

Рисунок 2.1 – Схема реверсивного вигладжування дворадіусним роликом (а), схема реверсивного обертання робочого інструменту (б) та робочої зони (в)

Особливість даного способу полягає в тому, що деформуючий елемент виконаний у вигляді дворадіусного ролика, вершини якого розташовуються відносно один одного на деякій відстані l , при цьому вісь обертання деформуючого елемента розташована паралельно осі заготовки, а робочому інструменту повідомляють реверсивне обертання деформуючого елемента та перпендикулярної осі заготовки, з круговою амплітудою кута α_p (див. рис. 2.1, в).

Робочий інструмент (див. рис. 2.1, б) містить деформуючий елемент у вигляді двох деформуючих роликів, вершини яких розташовуються одна відносно одної на відстані l . У процесі обробки перший деформуючий ролик

частково працює в зоні осередку деформації, створюваної другим деформуючим роликком. При реверсивному обертанні роль деформуючих роликків постійно змінюється, відбувається посилений зсув кристалів у різних напрямках, що сприяє зростанню дислокацій, викривленню структури, що призводять до підвищення механічних характеристик металу в поверхневому шарі виробу. В результаті впровадження робочого інструменту з реверсивним обертанням метал поверхневого шару деталі при обробці перебуває в умовах складного напруженого стану, зазнає пластичну деформацію з накопиченням великої кількості викривлень.

2.2 Побудова та опис кінцево-елементної моделі реверсивного вигладжування

Розв'язок поставленої задачі із застосуванням методу скінчених елементів зводиться до кількох основних етапів [19]:

Етап 1. Побудова моделі для процесу реверсивного вигладжування. На даному етапі відбувається введення інформації геометричних параметрів деталі та умови контакту між моделями. У нашому випадку, побудова геометричної моделі виконана в програмній системі (рис. 2.2).

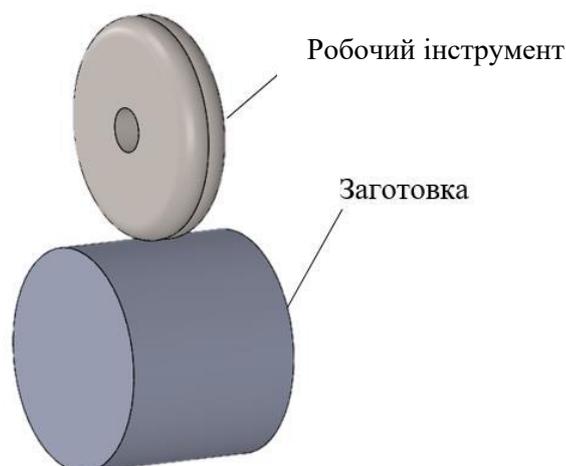


Рисунок 2.2 – Геометрична модель процесу реверсивного вигладжування у програмній системі

Етап 2. Вибір типу аналізу та налаштування властивостей моделей.

Розв'язання підставленої задачі починається з вибору області, в якій вирішуватиметься та чи інша модель. Різні типи області призначені для вирішення різних типів задач. Наприклад, *explicit dynamics* дозволяє вирішувати завдання динаміки удару тіл в межах не більше півтори секунди. Для більш тривалих динамічних процесів необхідно використовувати модуль *transient structural*. Для вирішення задач механіки в статично лінійній або нелінійній постановці прийнято використовувати модуль *static structural*. Вибір області проводиться з лівого стовпця, де наводяться всі варіанти області.

Етап 3. Завдання контактних умов моделей. На цьому етапі необхідно вказати характеристики з'єднання моделей у дереві опцій розділ (Connections), у підрозділі (Contacts). Існує кілька типів контактів (Bonded, No Separation, Rough, Frictional, Frictionless).

Етап 4. Розбиття геометричних моделей на кінцеві елементи. Задача побудови розрахункової сітки полягає у знаходженні відображення, яке переводить вузли сітки з фізичної області в обчислювальну. Для отримання чисельного рішення необхідно виконати розбиття геометричних моделей на кінцеві елементи в розділі Mesh. Для цього правою кнопкою миші клацаємо на пункті Mesh в дереві проекту, в меню вибираємо Insert-Method. Новий метод з'явився у пункті Mesh. Прийнята просторова сітка – тетраедричні форми для валу. Вибрано спосіб Multizone для валу.

Етап 5. Завдання граничних умов моделей. Завдання граничних умов дозволяє виділити єдине рішення з багатьох рішень диференціальних рівнянь, що описують рух середовища. Для цього необхідно задати шукані (залежні) змінні на межах розрахункової області, наприклад, визначити потоки маси, моменту, енергії тощо у розрахункову область. Неправильно задані граничні умови не дозволять одержати коректне вирішення задачі.

Етап 6. Налаштування вирішувача. На даному етапі здійснюється вибір типу вирішувача: вибирається вирішувач для динамічних завдань, встановлюється кількість ітерацій, кроків за часом, загальний час розрахунку,

геометрична нелінійність (кінцеві деформації), вибирається вирішувач (Analysis Settings; Joint - Displacement; Joint - Velocity; Joint - Rotation; Joint – Rotation Velocity)

Етап 7. Запуск розв'язку. На даному етапі запуску на розрахунок виконується налаштування кількості використовуваних ядер, задаються параметри перезапуску розрахунку та інші характеристики. Перед тим, як запустити розв'язок, додаємо у гілку Solution зрізи для тих величин, які необхідно подивитися. Зрізи можна додавати після того, як розрахунки були проведені. Далі запускаємо розрахунок напружено-деформованого стану командою Solve контекстного меню гілки Solution чи Transient Structural. Задавав температуру за замовчуванням 22 ° C (Transient Structural → Options → Environment Temperature → 22 ° C).

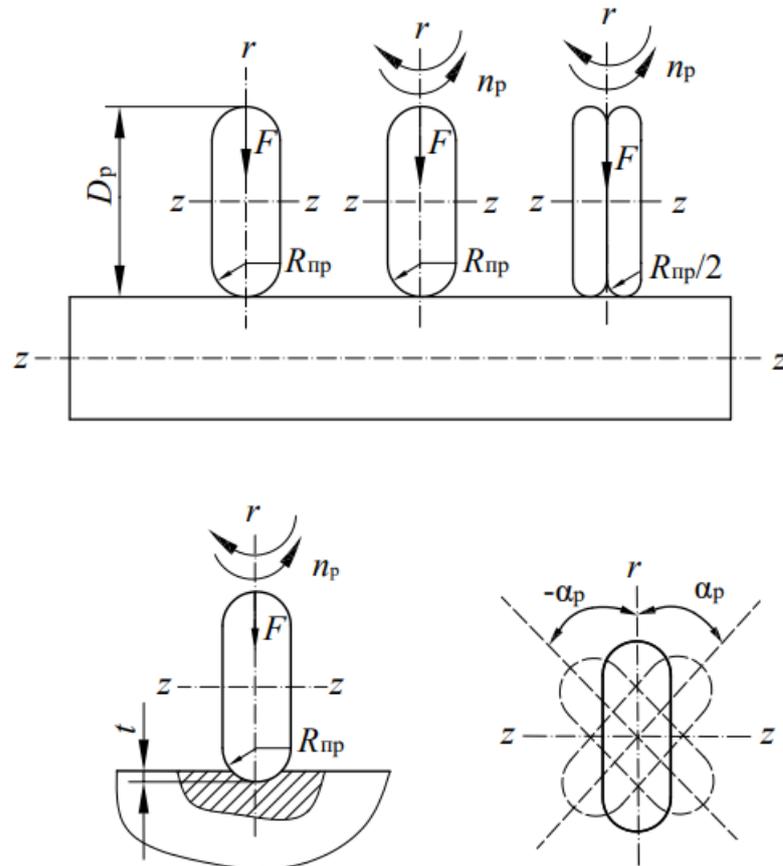
Етап 8. Аналіз результатів. На даному етапі вибравши в розділі (Solution Information) деформації (Total Deformations), можна оцінити деформації, інтенсивність напружень (Equivalent Stress), можна оцінити тимчасові і залишкові напруження. При цьому, залежно від задачі та вимог до результатів може виконуватися виведення результатів на екран, таблицю, у вигляді графіка, файл.

2.3 Вплив кінематики поверхневого пластичного деформування на напружено-деформований стан поверхневого шару

Для оцінки ефективності запропонованого способу поверхневого пластичного деформування попередньо було розглянуто кілька схем локального навантаження тороїдального ролика на циліндричну поверхню (рис. 2.3).

Параметри моделювання процесів навантаження. Для проведення розрахунків щодо визначення напружено-деформованого стану процесів навантаження прийняті такі умови та режими обробки: тип індентора – одне та дворадіусний ролик діаметром $D_p = 30$ мм з приведеним радіусом $R_{np} = 5$ мм і

вони вважаються абсолютно жорсткими; модуль пружності $E = 6 \cdot 10^5$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$; величина радіального натягу $t = 0,1$ мм; частота реверсу одно та дворадіусного ролика $n_p = 300$ об/хв; коефіцієнт тертя у зоні контакту робочого інструменту з циліндром $f = 0,1$; амплітуда кута реверсивного обертання $\alpha = \pm 15^\circ$.

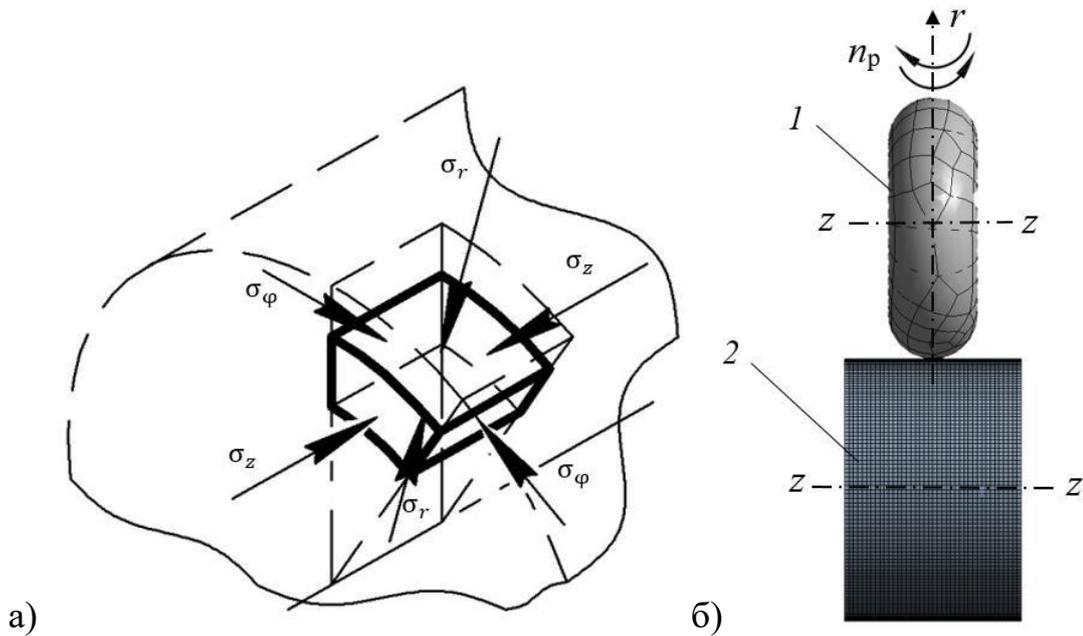


а – роль без обертання; б - однорадіусний ролик з реверсивним обертанням щодо осі z ; в – дворадіусний ролик з реверсивним обертанням щодо осі z ; г - схема реверсивного обертання тороїдального ролика

Рисунок 2.3 – Кінематичні схеми навантаження тороїдального ролика за різних умов контакту з циліндричною поверхнею

На рис. 2.4, а показані головні компоненти тензора напружень у циліндричній системі координат при локальному навантаженні: радіальні σ_r , тангенціальні σ_φ і осьові напруження σ_z , а на рис. 2.4, б показана кінцево-елементна модель зміцнення при реверсивному обертанні однорадіусного

ролика. Прийнята просторова сітка – тетраедрична форма для валу. Кінцево-елементна модель містить 38520 елементів та 180308 вузлів.



1 – однорадіусний ролик; 2 – циліндричний зразок

Рисунок 2.4 – Головні компоненти тензора напружень в циліндричній системі координат (а) та приклад кінцево-елементної моделі при навантаженні циліндричного зразка однорадіусним роликом (б)

Результати комп'ютерного моделювання. Напружений стан матеріалу при поверхневій пластичній деформації поділяється на тимчасовий та залишковий. При цьому, тимчасове напруження виникає при дії зовнішніх сил, а залишкові напруження залишаються в деталях після закінчення обробки [10, 12]. Тимчасові напруження впливають на енергосилові характеристики процесу і глибину зміцненого шару, тиск у зоні деформації, а також на міцність і зносостійкість деформуючого інструменту [6, 9]. Великий вплив на втомну міцність деталей надає наявність у поверхневих шарах залишкових напружень. При дії стискаючих залишкових напружень у поверхневих шарах втомна міцність деталей значно зростає [9].

На рис. 2.5 наведено поля розподілу інтенсивності тимчасових $\sigma_{\text{ітч}}$ та залишкових напружень $\sigma_{\text{ізал}}$ у поперечному перерізі циліндричних зразків за різних схем навантаження (див. рис. 2.3).

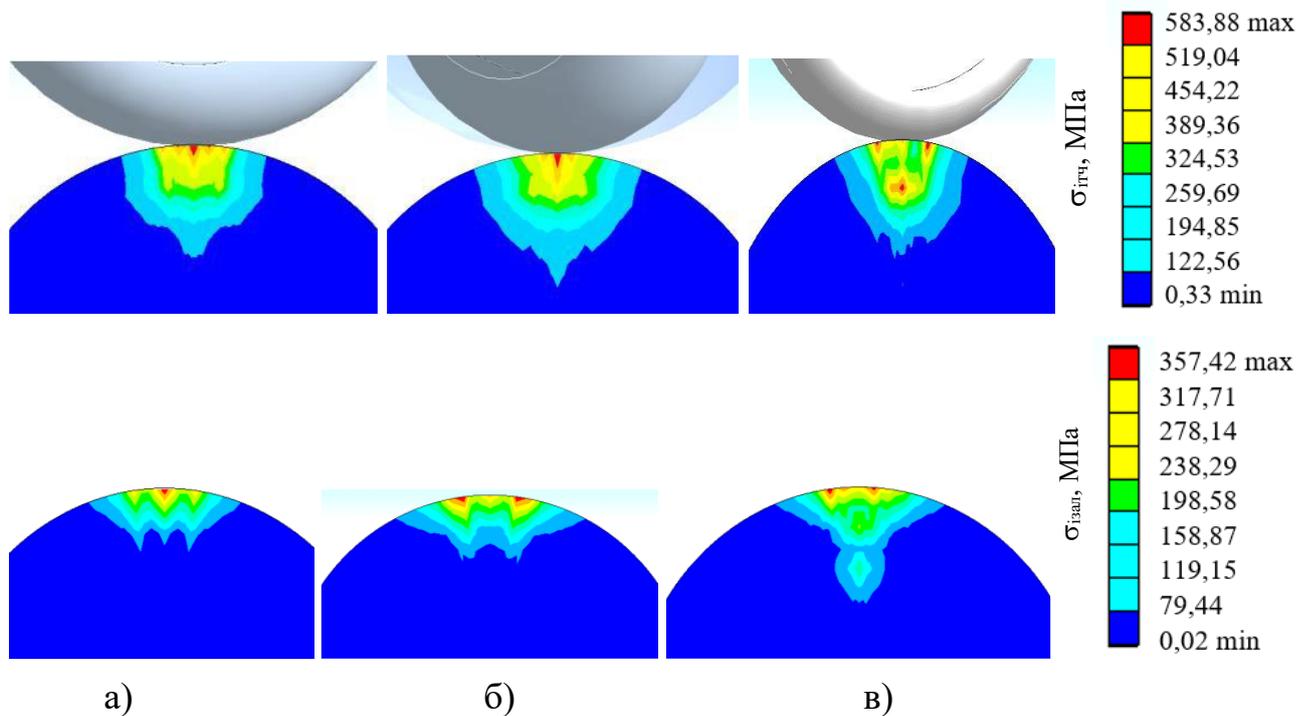


Рисунок 2.5 – Поля розподілу інтенсивності тимчасових $\sigma_{тгч}$ та залишкових напружень $\sigma_{ізал}$ у поперечному перерізі циліндричних зразків при різній кінематиці тороїдального ролика (див. рис. 2.3)

На рис. 2.6 представлено вплив кінематики тороїдального ролика на інтенсивність максимальних тимчасових та залишкових напружень.

Зміна в часі компонент тензора тимчасових напружень $\sigma_{rтч}$, $\sigma_{\phi тч}$, $\sigma_{zтч}$ при різних схемах навантаження тороїдального ролика представлено на рис. 2.7.

Глибина пластичної деформації. При обробці металів тиском створюються різні пластичні зони як за формою, так і за розмірами, які мають істотний вплив як на ступінь зміцнення, так і на руйнування металевих матеріалів і на опір розвитку тріщин. Глибина пластичної деформації є важливим параметром в оцінці фізико-механічних та експлуатаційних властивостей зміцнених деталей поверхневим пластичним деформуванням [9]. На рис. 2.8 показано результати визначення зони пластичної деформації після зміцнення дворадіусним роликом (див. рис. 2.3, в).

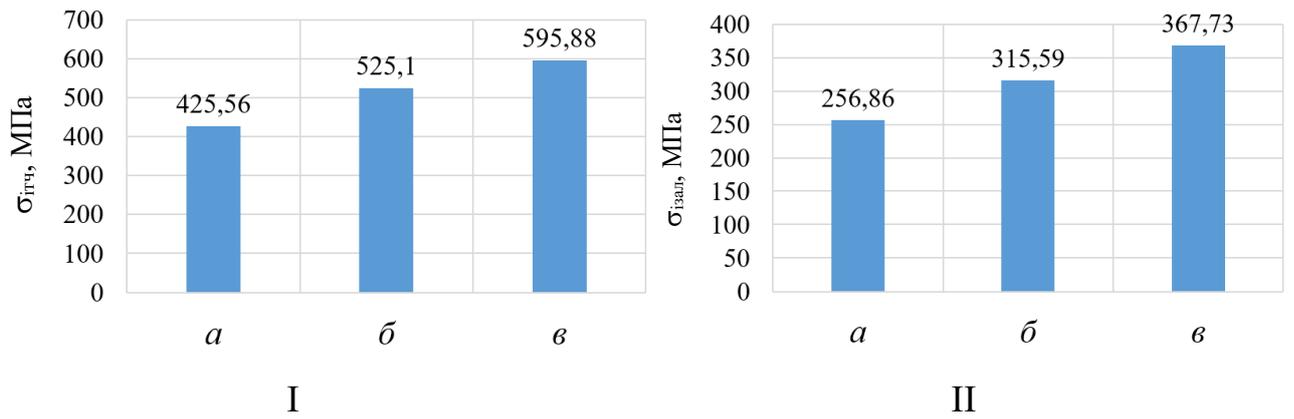


Рисунок 2.6 – Залежність інтенсивності максимальних тимчасових (I) та залишкових напружень (II) від різної кінематики тороїдального ролика (див. рис. 2.3)

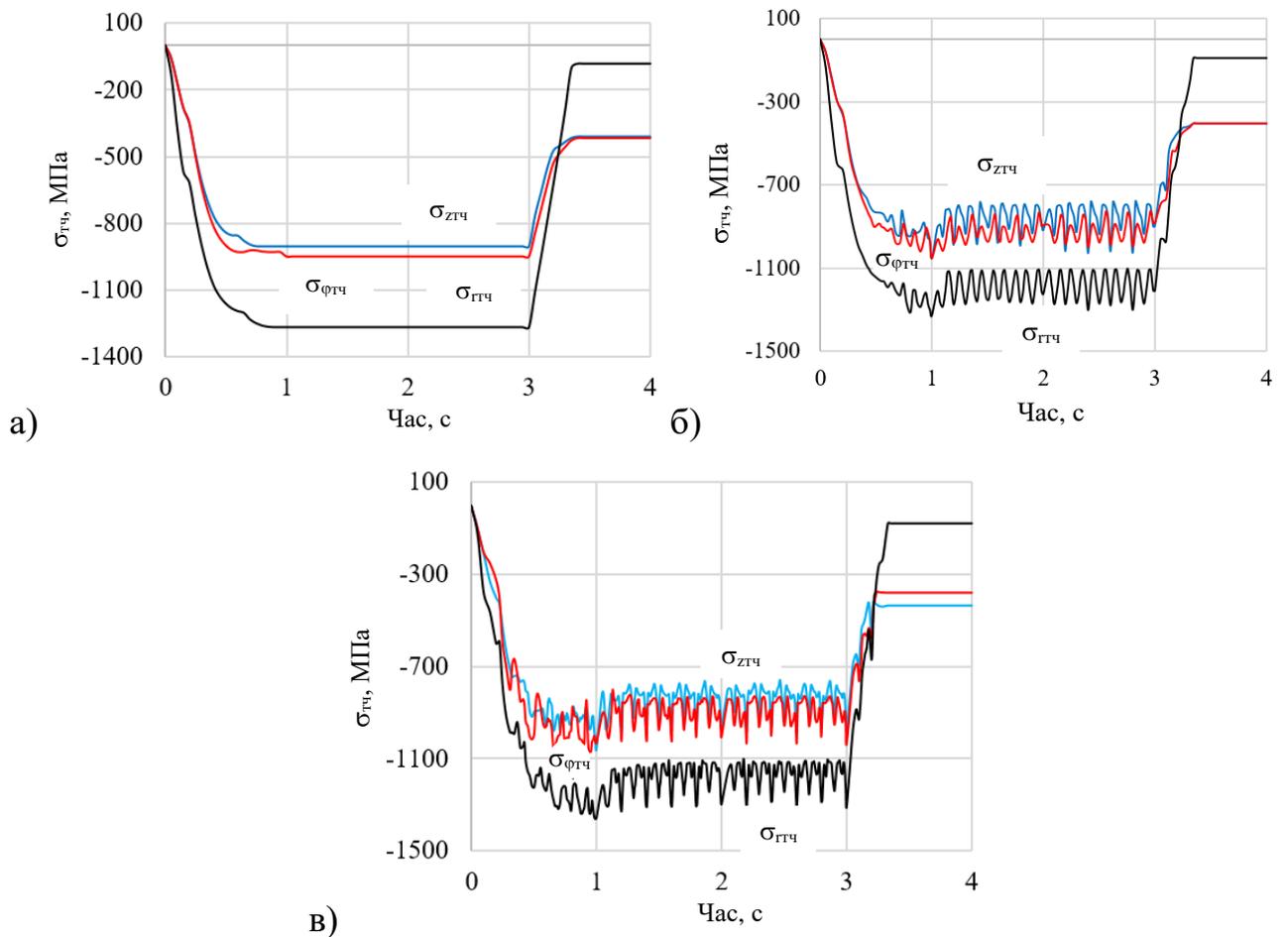


Рисунок 2.7 - Зміна в часі компонент тензора тимчасових напружень $\sigma_{гтч}$, $\sigma_{фгч}$, $\sigma_{зтч}$ при різних схемах навантаження (див. рис. 2.3)

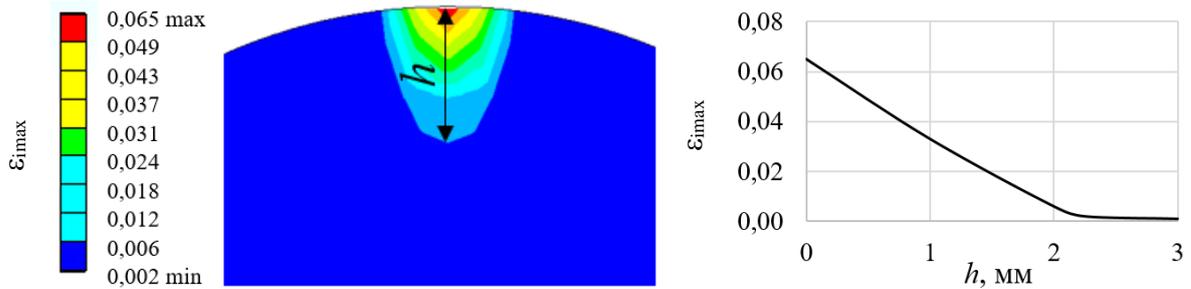
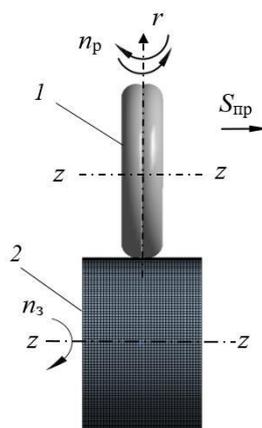


Рисунок 2.8 – Поля (а) та графік розподілу пластичної деформації (б) у поперечному перерізі зразка після зміцнення дворадіусним роликком (див. рис. 2.3, в)

2.4 Вплив основних параметрів реверсивного вигладжування та геометрії робочого інструменту на напружено-деформований стан поверхневого шару

2.4.1 Вплив основних параметрів реверсивного вигладжування

На рис. 2.9 показана кінцево - елементна модель реверсивного вигладжування дворадіусним роликком у програмному комплексі для визначення впливу основних параметрів реверсивного вигладжування на напружений стан в осередку пружно-пластичної деформації, залишкові напруження у зміцнених деталях і глибину пластичного шару.



1 – дворадіусний ролик; 2 – зразок

Рисунок 2.9 – Кінцево-елементна модель реверсивного вигладжування

Вплив поздовжньої подачі робочого інструмента. Поздовжня подача характеризує відносний рух між робочим інструментом та заготовкою. Величина подачі пов'язана зі стійкістю робочого інструменту, продуктивністю обробки та якістю зміцненої поверхні [23, 24]. Велика величина поздовжньої подачі збільшує продуктивність обробки, але погіршує якість поверхні (підвищується шорсткість). Мала величина поздовжньої подачі знижує продуктивність обробки, але забезпечує високу якість поверхні (низька шорсткість).

На рис. 2.10 показано вплив поздовжньої подачі дворадіусного ролика на максимальну інтенсивність тимчасових $\sigma_{i_{тч}}$ та залишкових $\sigma_{i_{зал}}$ напружень при реверсивному вигладжуванні.

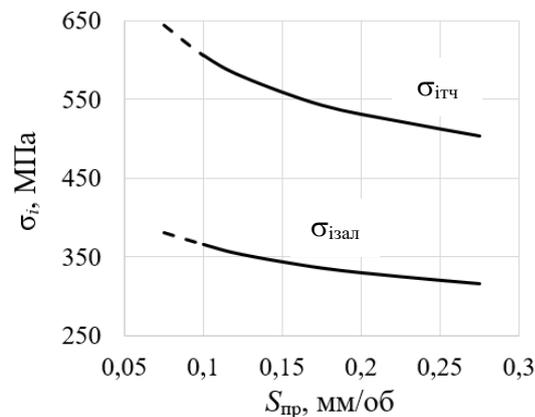


Рисунок 2.10 – Вплив поздовжньої подачі дворадіусного ролика на максимальну інтенсивність тимчасових $\sigma_{i_{тч}}$ та залишкових $\sigma_{i_{зал}}$ напружень при реверсивному вигладжуванні

Вплив частоти обертання заготовки. На рис. 2.11 представлено вплив частоти обертання заготовки на інтенсивність тимчасових $\sigma_{i_{тч}}$, залишкових $\sigma_{i_{зал}}$ напружень при реверсивному вигладжуванні.

Вплив величини радіального натягу. На рис. 2.12 показана залежність інтенсивності тимчасових $\sigma_{i_{тч}}$, залишкових $\sigma_{i_{зал}}$ напружень від величини радіального натягу t , а на рис. 2.13 представлена залежність максимальних осьових і тангенціальних стискаючих залишкових напружень ($\sigma_{фзал}$, $\sigma_{zзал}$) від величини радіального натягу t при реверсивному вигладжуванні.

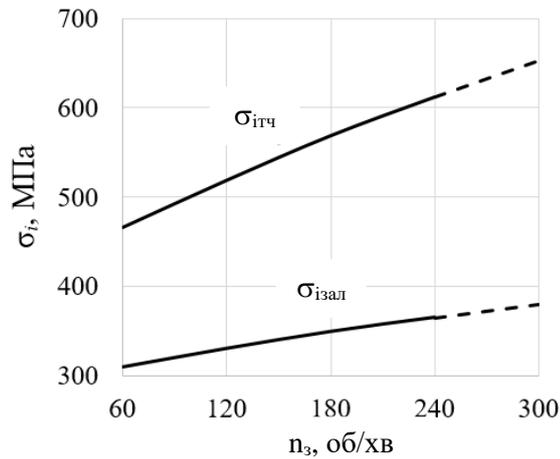


Рисунок 2.11 - Вплив частоти обертання заготовки на інтенсивність тимчасових $\sigma_{itч}$, залишкових $\sigma_{ізал}$ напружень при реверсивному вигладжуванні

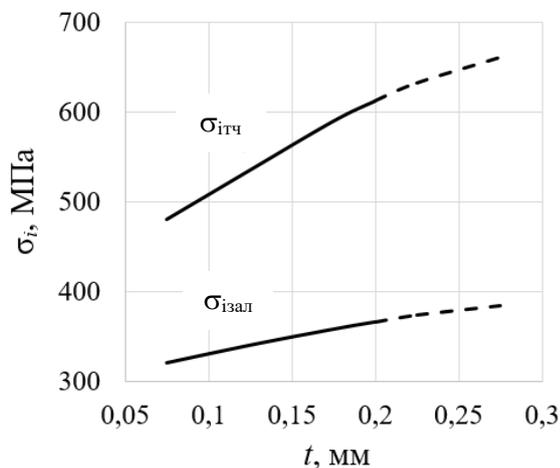


Рисунок 2.12 – Вплив величини радіального натягу t на інтенсивність тимчасових $\sigma_{itч}$, залишкових $\sigma_{ізал}$ напружень при реверсивному вигладжуванні

Глибина пластичної деформації. При обробці металів тиском створюються пластичні зони різні як за формою, так і за розмірами, які мають істотний вплив як на ступінь зміцнення, так і на руйнування металевих матеріалів, а також на опір розвитку тріщин. Глибина пластичної деформації є важливим параметром при оцінці фізико-механічних та експлуатаційних властивостей зміцнених деталей поверхневим пластичним деформуванням. На рис. 2.14 показані результати визначення інтенсивності відносної деформації після реверсивного вигладжування (при $S_{пр} = 0,07$ мм/об, $n_3 = 120$ хв⁻¹, $t = 0,15$ мм).

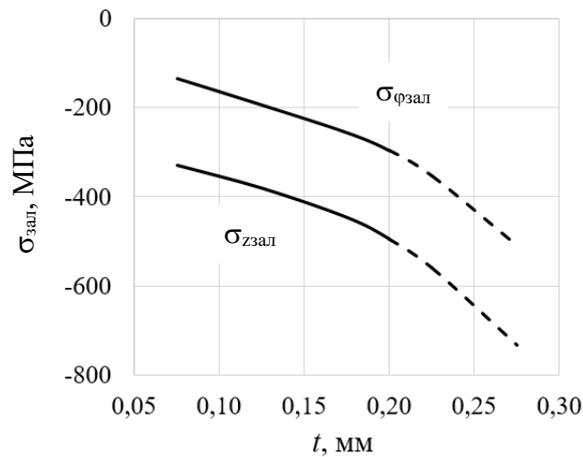


Рисунок 2.13 - Залежність максимальних осьових і тангенціальних залишкових напружень стиснення $\sigma_{\phi\text{зал}}$, $\sigma_{z\text{зал}}$ від величини радіального натягу t при реверсивному вигладжуванні

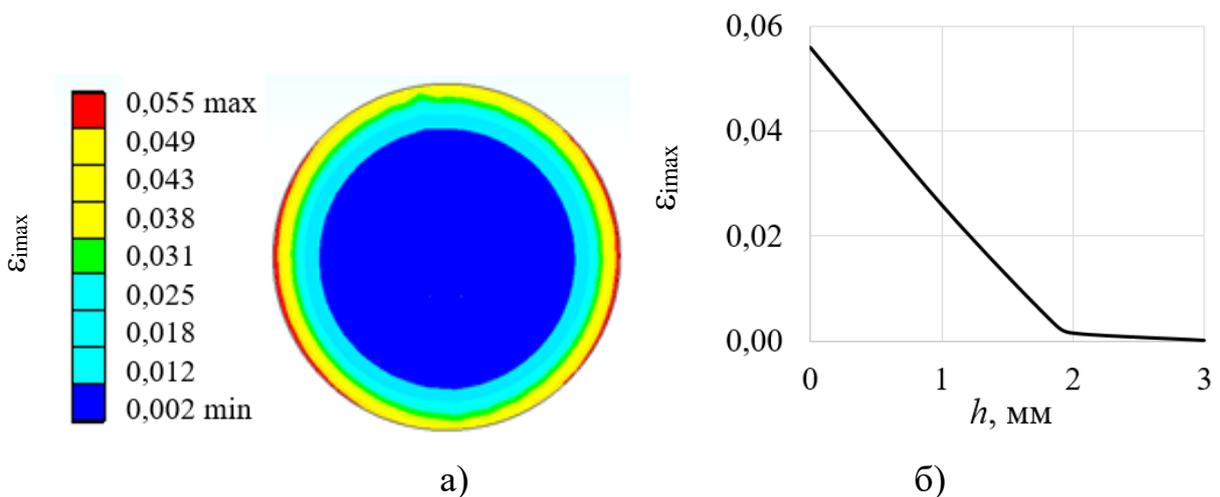
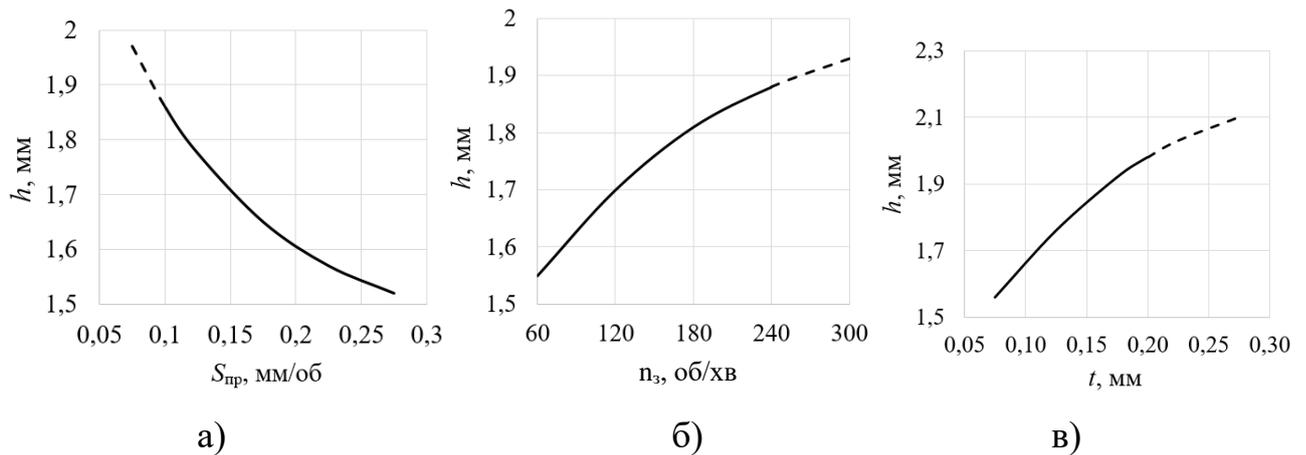


Рисунок 2.14 – Поля розподілу пластичної деформації у поперечному перерізі зразка (а) та крива розподілу відносної деформації (б) після реверсивного вигладжування дворадіусним роликком (при $S_{\text{пр}} = 0,1$ мм/об, $n_3 = 120$ хв⁻¹, $t = 0,15$ мм)

На рис. 2.15 показано вплив основних параметрів реверсивного поверхневого пластичного деформування на глибину пластичного шару.



а – поздовжня подача; б - частота обертання заготовки; в - величина радіального натягу

Рисунок 2.15 – Вплив основних параметрів реверсивного вигладжування на глибину пластичного шару

2.4.2 Вплив геометрії робочого інструменту

Для дослідження впливу геометрії робочого інструменту на напружено-деформований стан розглянуто 4 параметри – діаметр та профільний радіус тороїдального ролика, відстань між вершинами ролика, діаметр заготовки. Для розрахунків напружено-деформованого стану використовували такі параметри: робочий інструмент – дворадіусний ролик зі змінними параметрами: $D_p = 20 \div 60$ мм; $R_{пр} = 2 \div 5$ мм; $I = 1,5 \div 3$ мм та заготовку – циліндр змінним діаметром $D_z = 20 \div 60$ мм.

Вплив профільного радіусу ролика. На рис. 2.16 показано вплив профільного радіусу ролика на максимальну інтенсивність тимчасових і залишкових напружень.

Вплив діаметра ролика. На рис. 2.17 показано вплив діаметра ролика на інтенсивність тимчасових та залишкових напружень.

Вплив відстані між вершинами дворадіусного ролика. Інтенсивність максимальних тимчасових і залишкових напружень не тільки залежить від профільного радіусу та діаметра дворадіусного ролика, але і від відстані між вершинами дворадіусного ролика. На рис. 2.18 показано вплив відстані між

вершинами дворадіусного ролика на інтенсивність тимчасових і залишкових напружень.

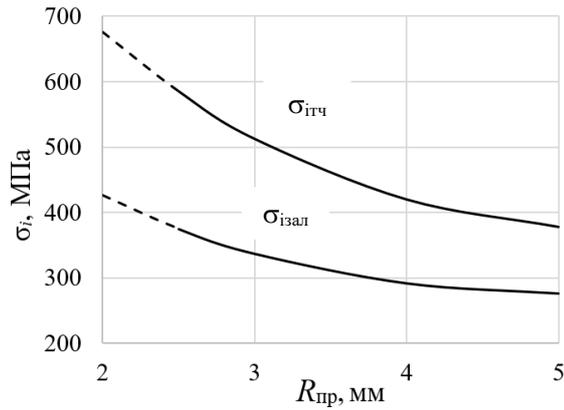


Рисунок 2.16 - Вплив профільного радіуса ролика на максимальну інтенсивність тимчасових і залишкових напружень

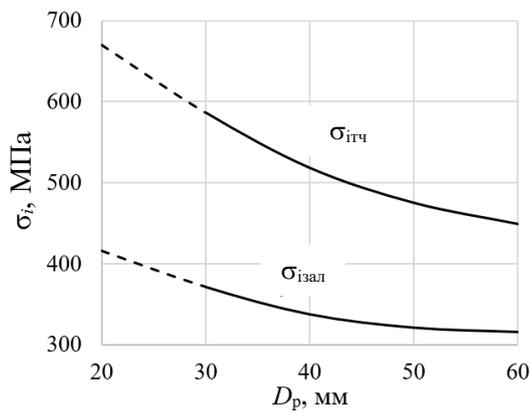


Рисунок 2.17 - Вплив діаметра ролика на інтенсивність тимчасових і залишкових напружень

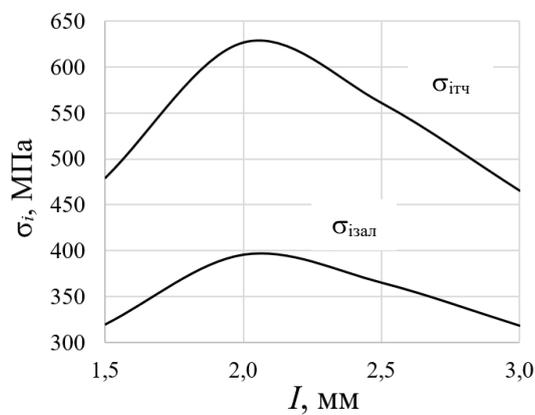


Рисунок 2.18 – Вплив відстані між вершинами дворадіусного ролика на максимальну інтенсивність тимчасових та залишкових напружень

Вплив діаметра заготовки. На рис. 2.19 показано вплив діаметра заготовки на інтенсивність тимчасових і залишкових напружень і головні компоненти максимальних залишкових напружень.

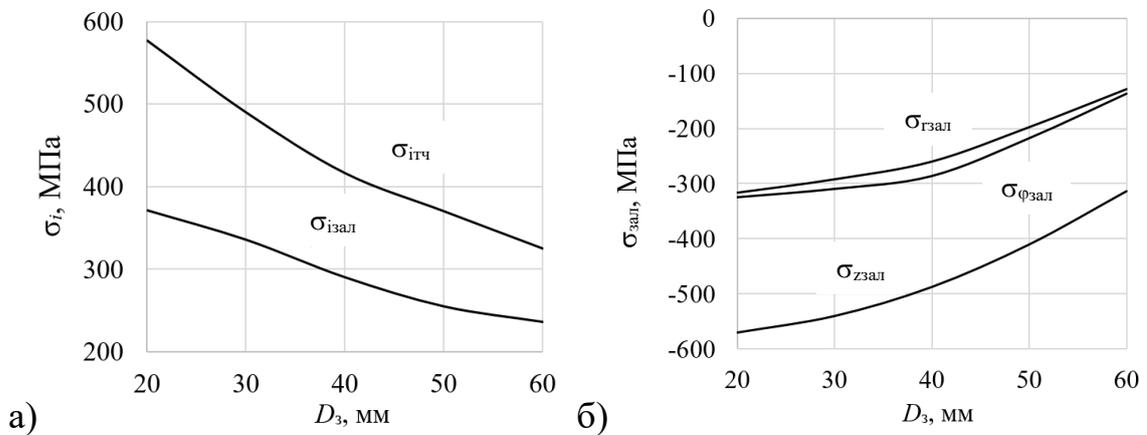
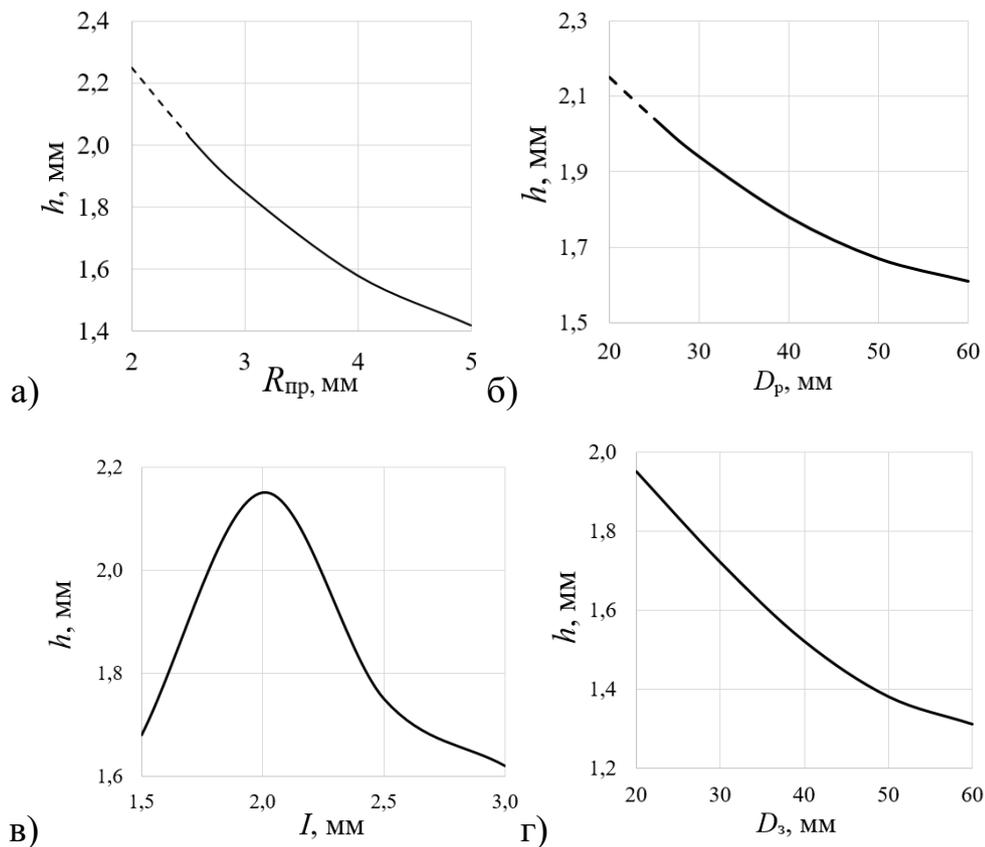


Рисунок 2.19 – Вплив діаметра заготовки на інтенсивність тимчасового та залишкового напруження (а) та головні компоненти максимального залишкового напруження (б)

Глибина пластичної деформації. На рис. 2.20 показано вплив геометрії робочого інструменту та діаметра заготовки на глибину пластичного шару.

2.4.3 Вплив кінематики робочого інструменту

Для дослідження впливу кінематичних параметрів робочого інструменту на напружено-деформований стан при реверсивному вигладжуванні розглянуті 3 параметри - реверсивна частота обертання робочого інструменту n_p , початковий кут установки робочого інструменту обертання робочого інструменту α_p . Для проведення розрахунків з визначення напружено-деформованого стану процесу прийняті наступні параметри та режими обробки: тип робочого інструменту: дворадіусний ролик з наступними змінними значеннями: реверсивна частота обертання робочого інструменту $n_p = 60 \div 300$ об/хв, початковий кут установки робочого інструменту $\alpha_n = 0 \dots 180^\circ$ обертання робочого інструменту $\alpha_p = 0 \div \pm 60^\circ$.



а – профільний радіус; б – діаметр ролика; в – відстань між вершинами ролика;
г – діаметр заготовки

Рисунок 2.20 – Вплив геометрії робочого інструменту та діаметра заготовки на глибину пластичного шару

Вплив реверсивної частоти обертання дворадіусного ролика. На рис. 2.21 показано вплив реверсивної частоти обертання дворадіусного ролика на максимальну інтенсивність тимчасових $\sigma_{iТч}$, залишкових $\sigma_{iЗал}$ напружень.

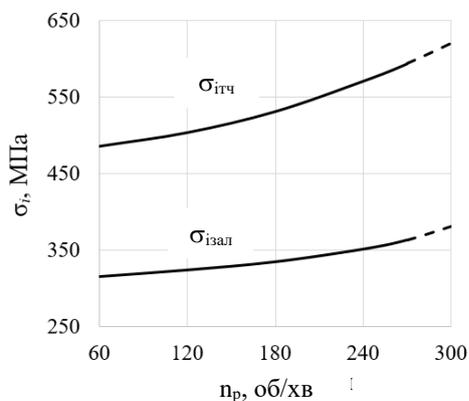


Рисунок 2.21 – Вплив реверсивної частоти обертання дворадіусного ролика на максимальну інтенсивність тимчасових, залишкових напружень

Вплив початкового кута налаштування робочого інструменту. На рис. 2.22 показано вплив величини початкового кута установки робочого інструменту α_n на інтенсивність тимчасових $\sigma_{i\text{тч}}$ та залишкових $\sigma_{i\text{зал}}$ напружень.

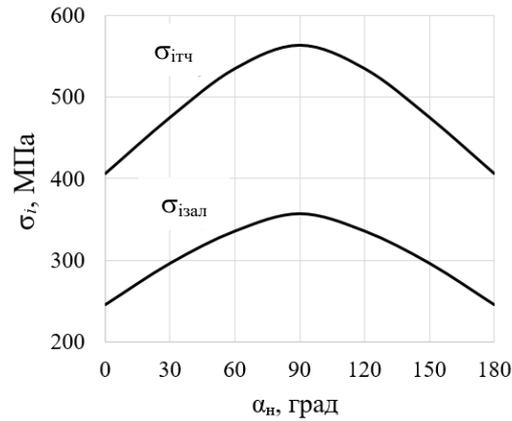


Рисунок 2.22 - Вплив початкового кута установки робочого інструменту на інтенсивність тимчасових і залишкових напружень

На рис. 2.23 показана залежність максимальних осьових і тангенціальних стискаючих залишкових напружень $\sigma_{\text{фзал}}$, $\sigma_{\text{zзал}}$ від початкового кута установки робочого інструменту.

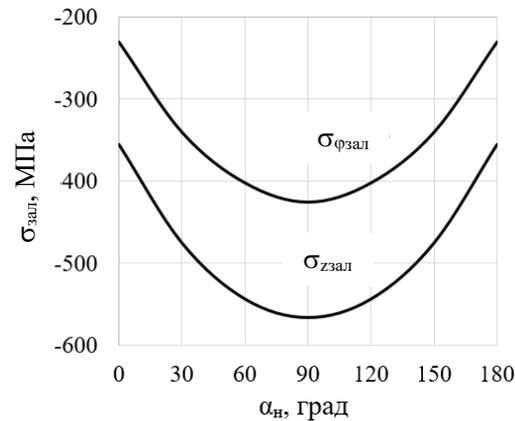


Рисунок 2.23 – Залежність максимальних осьових та тангенціальних залишкових напружень від початкового кута установки робочого інструменту

Вплив амплітуди кута реверсивного обертання дворадіусного ролика. На рис. 2.24 представлено вплив величини амплітуди кута реверсивного обертання ролика на інтенсивність тимчасових $\sigma_{i\text{тч}}$ та залишкових $\sigma_{i\text{зал}}$ напружень.

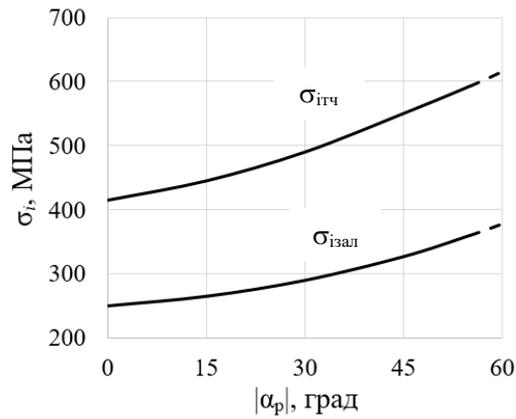
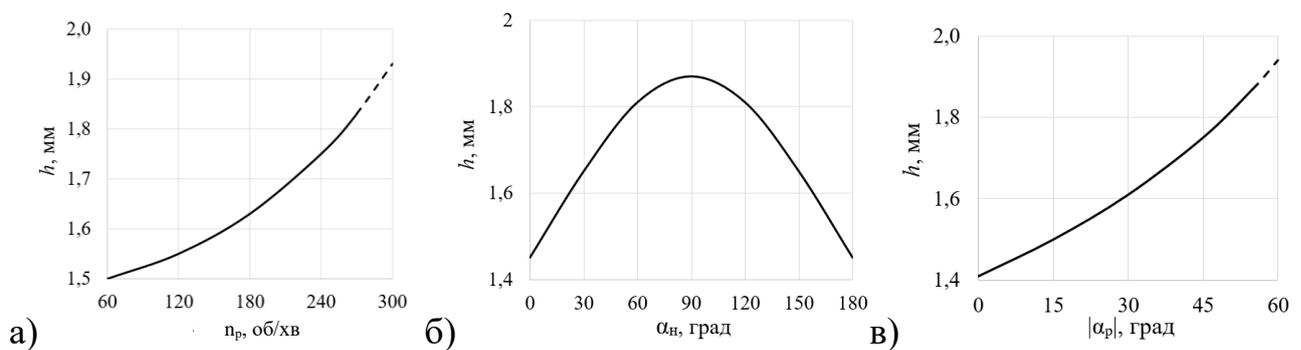


Рисунок 2.24 - Вплив амплітуди кута реверсивного обертання ролика на інтенсивність тимчасових і залишкових напружень

Глибина пластичної деформації. На рис. 2.25 показано вплив кінематичних параметрів робочого інструменту на глибину пластичного шару.



а – реверсивна частота обертання робочого інструменту; б – початковий кут установки робочого інструменту; в - величина кута реверсивного обертання робочого інструменту

Рисунок 2.25 – Вплив кінематичних параметрів робочого інструменту на глибину пластичного шару

2.4.4 Вплив фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу

Вплив марки матеріалів на інтенсивність тимчасових $\sigma_{itч}$ і залишкових $\sigma_{izал}$ напружень при реверсивному вигладжуванні представлені на рис. 2.26. З рис. 2.26 видно, що фізико-механічні властивості металу значно впливають на

напружено деформуючий стан поверхневого шару циліндричних зразків при реверсивному вигладжуванні. Максимальні інтенсивності тимчасових і залишкових напружень спостерігаються у матеріалів, що мають високу межу плинності (конструкційна середньолегована сталь 30ХГСА і титановий сплав ВТ6). Встановлено, що чим вище межа плинності матеріалу, тим більша інтенсивність тимчасових та залишкових напружень. Максимальна інтенсивність напружень формується при обробці титанового сплаву ВТ6, мінімальна утворюється при зміцненні нержавіючої сталі 08Х18Н10.

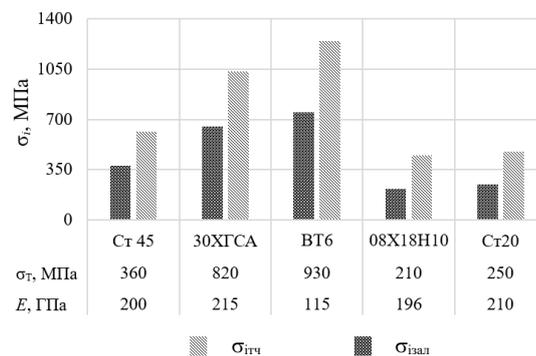


Рисунок 2.26 - Вплив марки матеріалів на інтенсивність тимчасових і залишкових напружень при реверсивному вигладжуванні

На рис. 2.27 показано вплив фізико-механічних властивостей матеріалу на глибину пластичного шару.

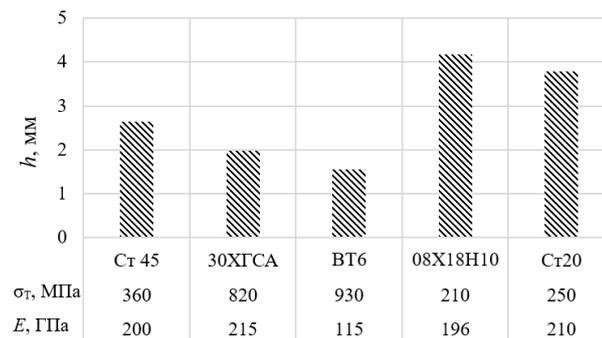
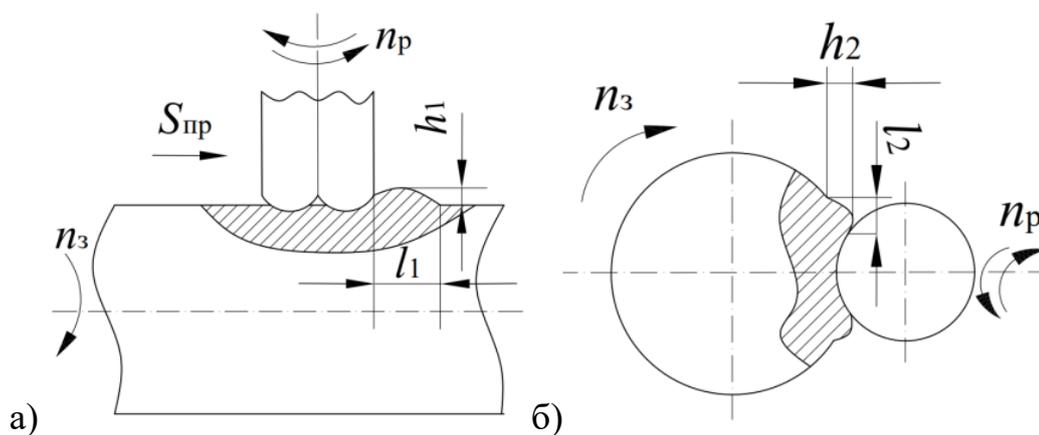


Рисунок 2.27 – Вплив марки матеріалів на глибину пластичного шару при реверсивному вигладжуванні

2.5 Позаконтактна деформація при реверсивному вигладжуванні

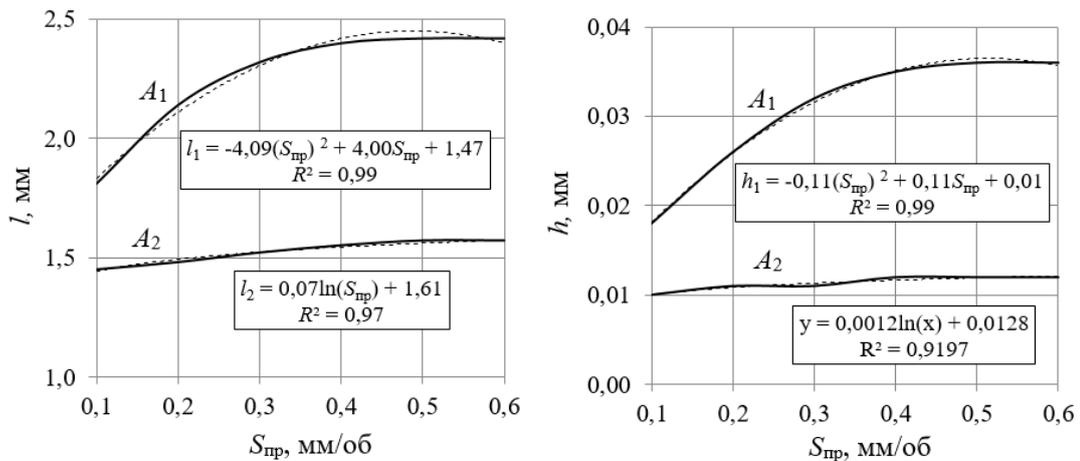
На рис. 2.28 показані форми пружнопластичних хвиль у напрямку подовжньої подачі A_1 та у напрямку головного руху A_2 . Слід зазначити, що під впливом дворадіусного ролика пружнопластичні хвилі, що утворюються в результаті реверсивного вигладжування, мають характерну конфігурацію. У напрямі головного руху навколо робочого інструменту створюються пружнопластичні хвилі A_2 , що мають практично однакову форму та розміри. При цьому в напрямку подовжньої подачі пружнопластичні хвилі A_1 , що утворюються в зоні, обробленої і необробленої поверхонь, мають різні геометрії і відрізняються від пружнопластичних хвиль A_2 великими розмірами висоти h_1 і довжини l_1 . Це пояснюється не лише наявністю подовжньої подачі, а й орієнтацією робочого інструменту при поверхневому пластичному деформуванні. Довжини пружнопластичних хвиль l_1 і l_2 визначали від точки перетину робочого інструменту з пружнопластичною хвилею до точки перетину пружнопластичної хвилі з горизонтальною лінією (для l_1) і з контуром деталі (для l_2), а висоти пружнопластичних хвиль h_1 і h_2 визначали від вершини пружнопластичної хвилі до горизонтальної лінії (для h_1) і до точки контакту пружнопластичної хвилі з контуром деталі (для h_2).



а - у напрямку подовжньої подачі A_1 ; б - у напрямку головного руху A_2

Рисунок 2.28 – Форма пружнопластичних хвиль при реверсивному вигладжуванні

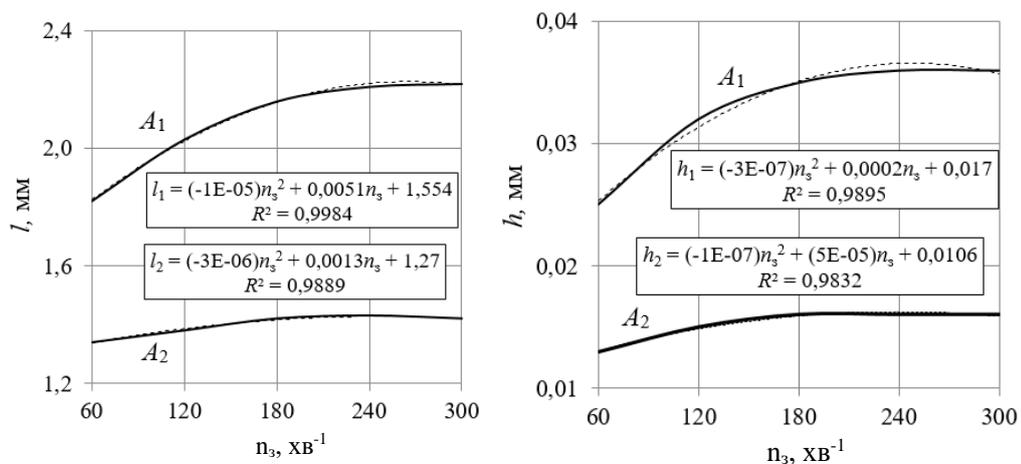
На рис. 2.29 представлені залежності розмірів пружнопластичних хвиль від поздовжньої подачі робочого інструменту.



A_1 – у напрямі поздовжньої подачі; A_2 – у напрямку головного руху

Рисунок 2.29 – Вплив поздовжньої подачі робочого інструменту розміри хвиль

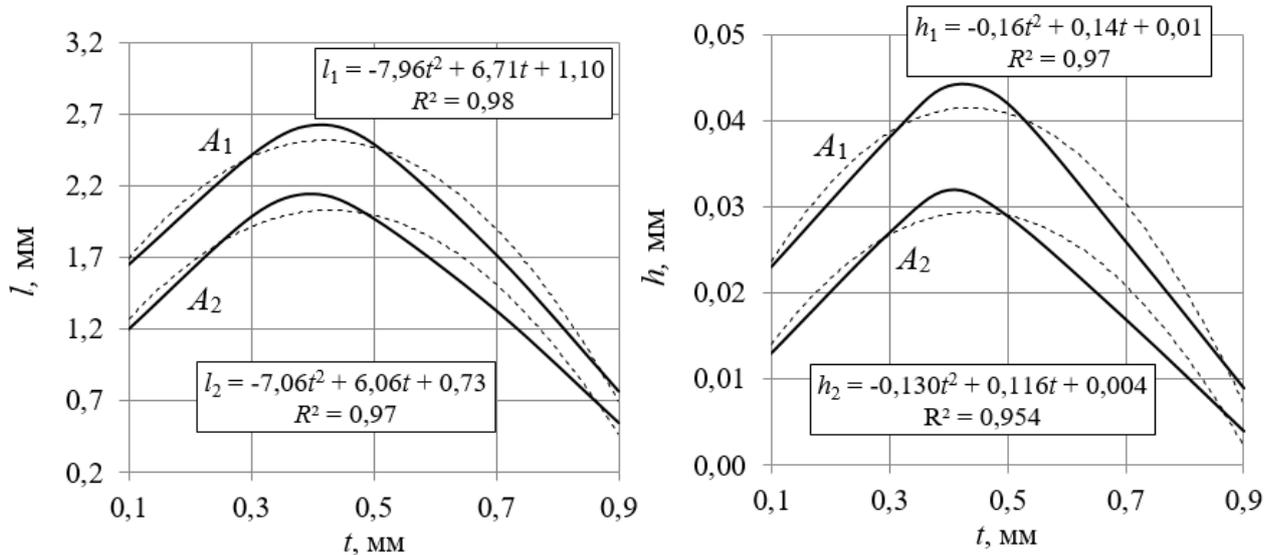
На рис. 2.30 представлені залежності розмірів пружнопластичних хвиль від частоти обертання заготовки. По рис. 2.30 можна відзначити, що зі збільшенням частоти обертання заготовки від 60 до 180 об/хв спостерігається зростання розмірів пружнопластичних хвиль у напрямку поздовжньої подачі, а при частоті понад 180 об/хв розміри пружнопластичних хвиль практично не змінюються. Зміна частоти обертання заготовки незначно впливає на розміри пружнопластичних хвиль у напрямку головного руху.



A_1 – у напрямі поздовжньої подачі; A_2 - у напрямку головного руху

Рисунок 2.30 – Вплив частоти обертання заготовки на розмір пружнопластичних хвиль

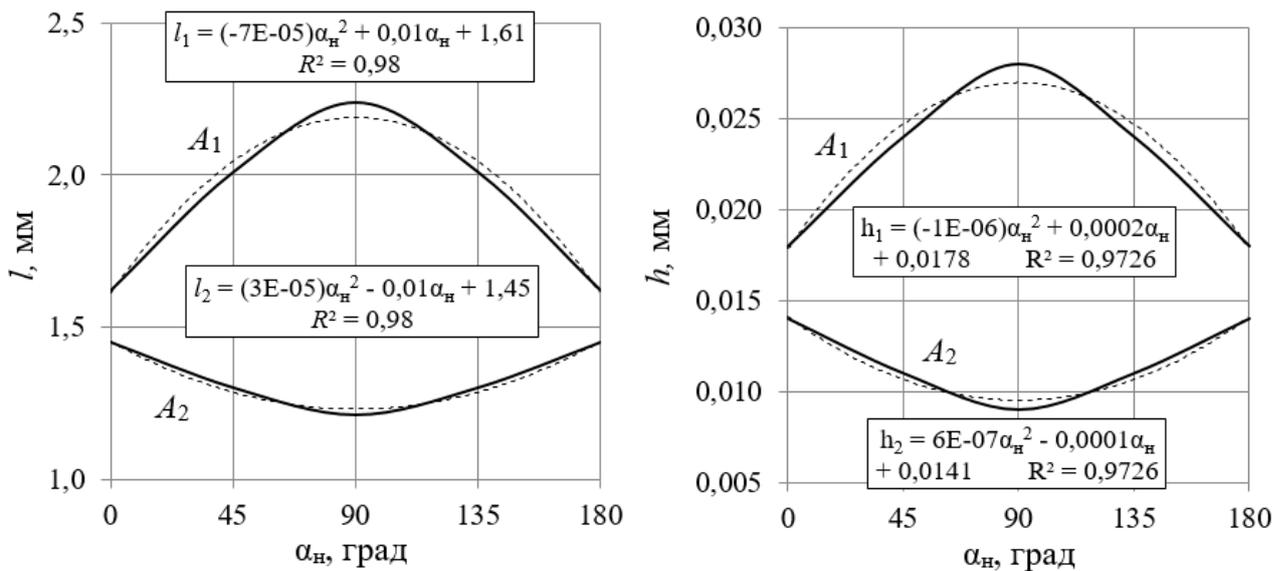
На рис. 2.31 показані залежності розмірів пружнопластичних хвиль від величини радіального натягу.



A_1 - у напрямку поздовжньої подачі; A_2 – у напрямку головного руху

Рисунок 2.31 - Вплив величини радіального натягу на розмір пружнопластичних хвиль

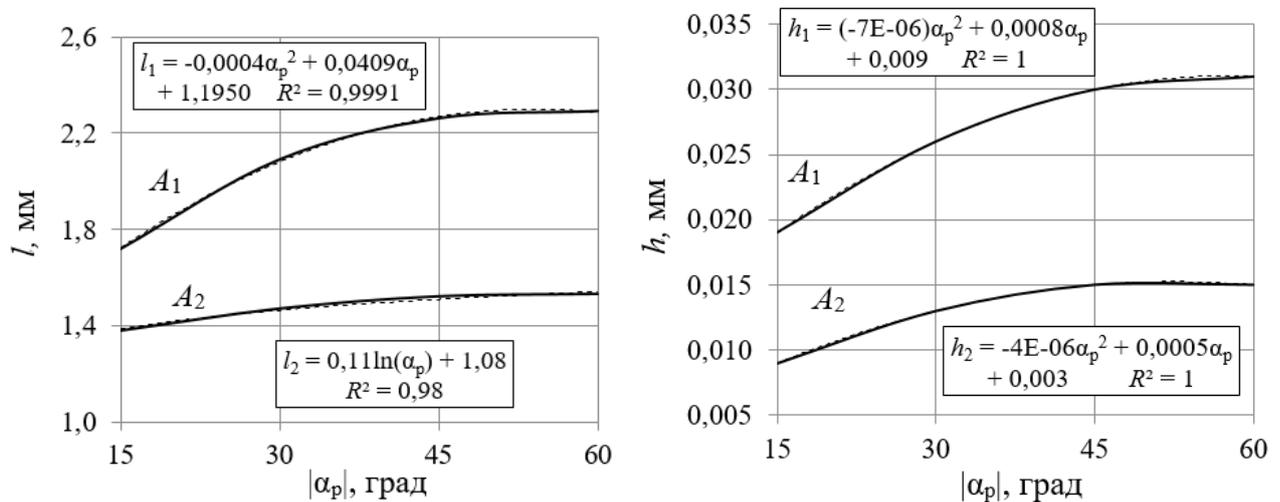
На рис. 2.32 представлені залежності розмірів пружно-пластичних хвиль від початкового кута установки робочого інструменту.



A_1 – у напрямку поздовжньої подачі; A_2 – у напрямку головного руху

Рисунок 2.32 – Вплив початкового кута встановлення робочого інструменту на розміри пружнопластичних хвиль

На рис. 2.33 показані залежності розмірів пружнопластичних хвиль від величини амплітуди кута реверсивного обертання робочого інструменту при реверсивному вигладжуванні.



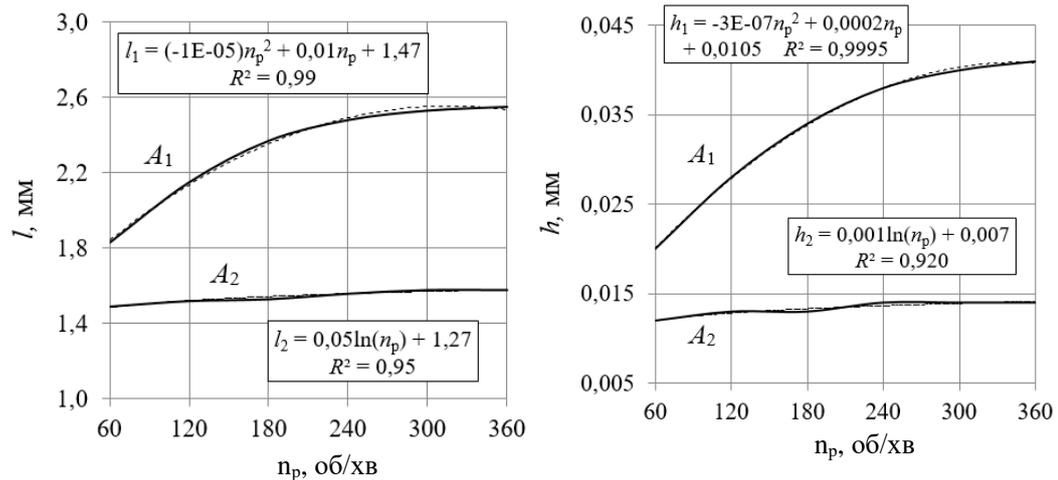
A_1 – у напрямку подовжньої подачі; A_2 – у напрямку головного руху

Рисунок 2.33 – Вплив амплітуди кута реверсивного обертання робочого інструменту на розміри пружно-пластичних хвиль

На рис. 2.34 представлені залежності розмірів пружнопластичних хвиль від реверсивної частоти обертання робочого інструменту. З рис. 2.32 видно, що зі збільшенням реверсивної частоти обертання робочого інструменту від 60 до 300 об/хв спостерігається зростання розмірів пружнопластичних хвиль в напрямку подовжньої подачі, а при реверсивній частоті обертання робочого інструменту понад 300 об/хв розміри пружнопластичних хвиль практично не змінюються. Зміна реверсивної частоти обертання робочого інструменту незначно впливає на розміри пружнопластичних хвиль у напрямку головного руху.

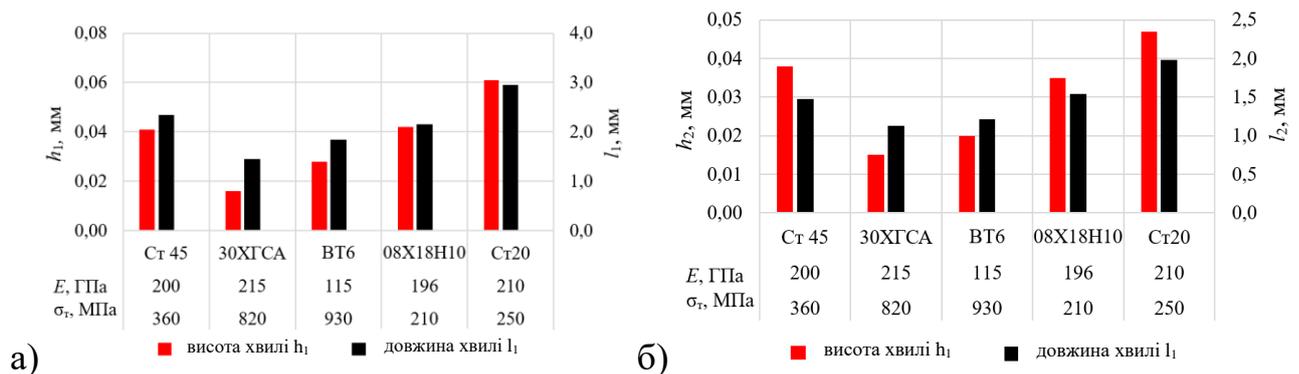
Вплив фізико-механічних властивостей матеріалу на розміри пружно-пластичних хвиль. З технологічної практики відомо, що чим пластичніше метал, тим більший ступінь деформації він дозволяє забезпечити. З високим ступенем ймовірності це справедливо і для позаконтактних деформацій. Для кількісного визначення впливу фізико-механічних властивостей матеріалу на розміри

пружнопластичних хвиль після реверсивного вигладжування, виконані розрахунки для деяких чорних металів та кольорових сплавів (рис. 2.35). Слід зазначити, що при реверсивному вигладжуванні з базовими режимами обробки перевищення розмірів пружнопластичних хвиль у напрямку подачі A_1 порівняно з розмірами пружнопластичних хвиль у напрямку головного руху A_2 справедливо не тільки для сталей, але і для деяких кольорових сплавів.



A_1 - у напрямку поздовжньої подачі; A_2 – у напрямку головного руху

Рисунок 2.34 - Вплив реверсивної частоти робочого інструменту на розміри пружнопластичних хвиль



а - у напрямку поздовжньої подачі A_1 ; б - у напрямку головного руху A_2

Рисунок 2.35 – Вплив фізико-механічних властивостей металів на розміри пружно-пластичних хвиль при реверсивному вигладжуванні

Напружений стан у пружнопластичній хвилі. Крім деформованого стану пружнопластичних хвиль, який залежить від основних параметрів реверсивного

вигладжування, напружений стан пружнопластичних хвиль в зоні позаконтактної деформації є теж важливою інформацією для оцінки якості обробленої поверхні поверхневим пластичним деформуванням.

Щоб не визначати інтенсивність напружень для досить великої номенклатури параметрів реверсивного вигладжування потрібно знати параметри, при яких виникають найбільші напруження у вершині пружнопластичної хвилі. Вище представлені результати розрахунків щодо визначення впливу параметрів процесу реверсивного вигладжування на геометричні розміри пружно-пластичної хвилі. Було зроблено припущення, що інтенсивність напружень в пружнопластичній хвилі пов'язана з її геометричними розмірами. На рис. 2.36 представлена така залежність для пружнопластичної хвилі в напрямку поздовжньої подачі.

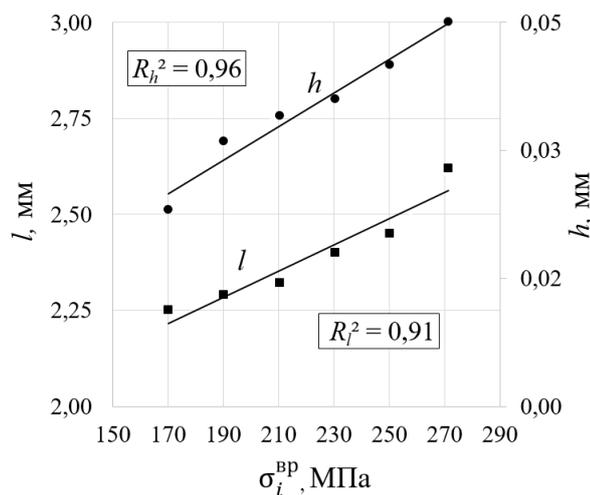
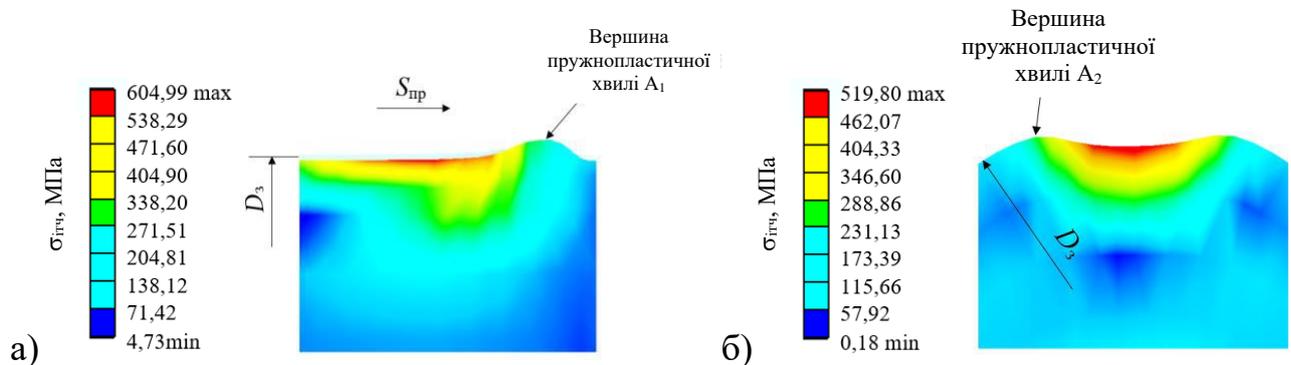


Рисунок 2.36 – Вплив максимальної інтенсивності тимчасових напружень у вершині хвилі на її розміри у напрямку поздовжньої подачі

З рис. 2.36 видно, що у напрямку поздовжньої подачі зі збільшенням розмірів пружнопластичної хвилі значення максимальної інтенсивності тимчасових напружень у вершині хвилі зростають. Розрахунки коефіцієнта кореляції показали досить високу пряму залежність $\sigma_{i\text{тч}}$ від розмірів пружнопластичної хвилі. Коефіцієнт достовірності апроксимації, що встановлює зв'язок максимальної інтенсивності напружень з висотою пружнопластичної хвилі склав 0,96, а з її довжиною - 0,91. Інтенсивність тимчасового напруження

у вершині хвилі досягає максимального значення при $l = 2,62$ мм і $h = 0,045$ мм (при $t = 0,4$ мм). Для цих розмірів пружнопластичної хвилі були визначені поля інтенсивності напружень, представлені на рис. 2.37.



а - у напрямку поздовжньої подачі A_1 ; б - у напрямку головного руху A_2

Рисунок 2.37 – Розподіл інтенсивності тимчасового напруження в пружнопластичній хвилі (при радіальному натягу $t = 0,4$ мм)

2.6 Температура у осередку деформації при реверсивному вигладжуванні

Вплив поздовжньої подачі робочого інструменту, частоти обертання заготовки та радіального натягу. На рис. 2.38 і 2.39 наведено температурні поля в осередку деформації заготовки (рис. 2.38) та дворадіусного ролика (рис. 2.39) по поперечному перерізу в залежності від величини поздовжньої подачі: а - $S_{пр} = 0,07$ мм/об; б - $S_{пр} = 0,28$ мм/об.

На рис. 2.40 показано вплив поздовжньої подачі робочого інструменту, частоти обертання заготовки та радіального натягу на максимальну температуру в осередку деформації при реверсивному вигладжуванні.

Вплив початкового кута установки, амплітуди кута реверсивного обертання та реверсивної частоти обертання робочого інструменту. З рис. 2.41, а видно, що максимальна температура в осередку деформації робочого інструменту із заготовкою досягає свого максимального значення при $\alpha_H = 90^\circ$, тобто вісь обертання робочого інструменту розташована паралельно осі заготовки. При збільшенні початкового кута установки робочого інструменту

від 0° до 90° максимальна температура в осередку деформації заготовки знижується симетрично першій ділянці кривої (рис. 2.41, а).

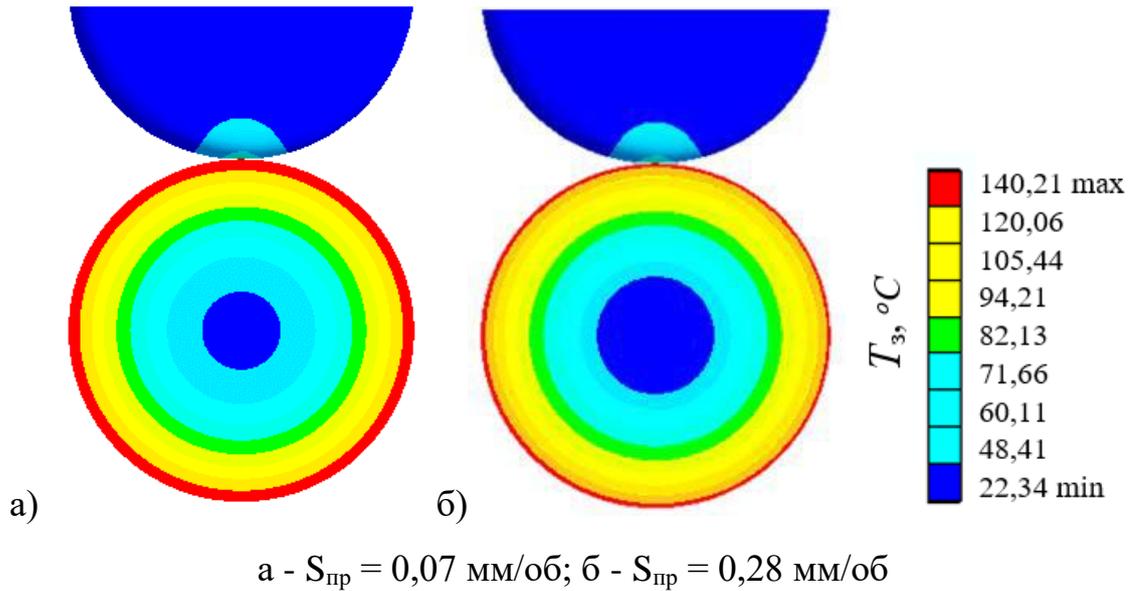


Рисунок 2.38 - Розподіл температурних полів по поперечному перерізу заготовки в залежності від величини поздовжньої подачі

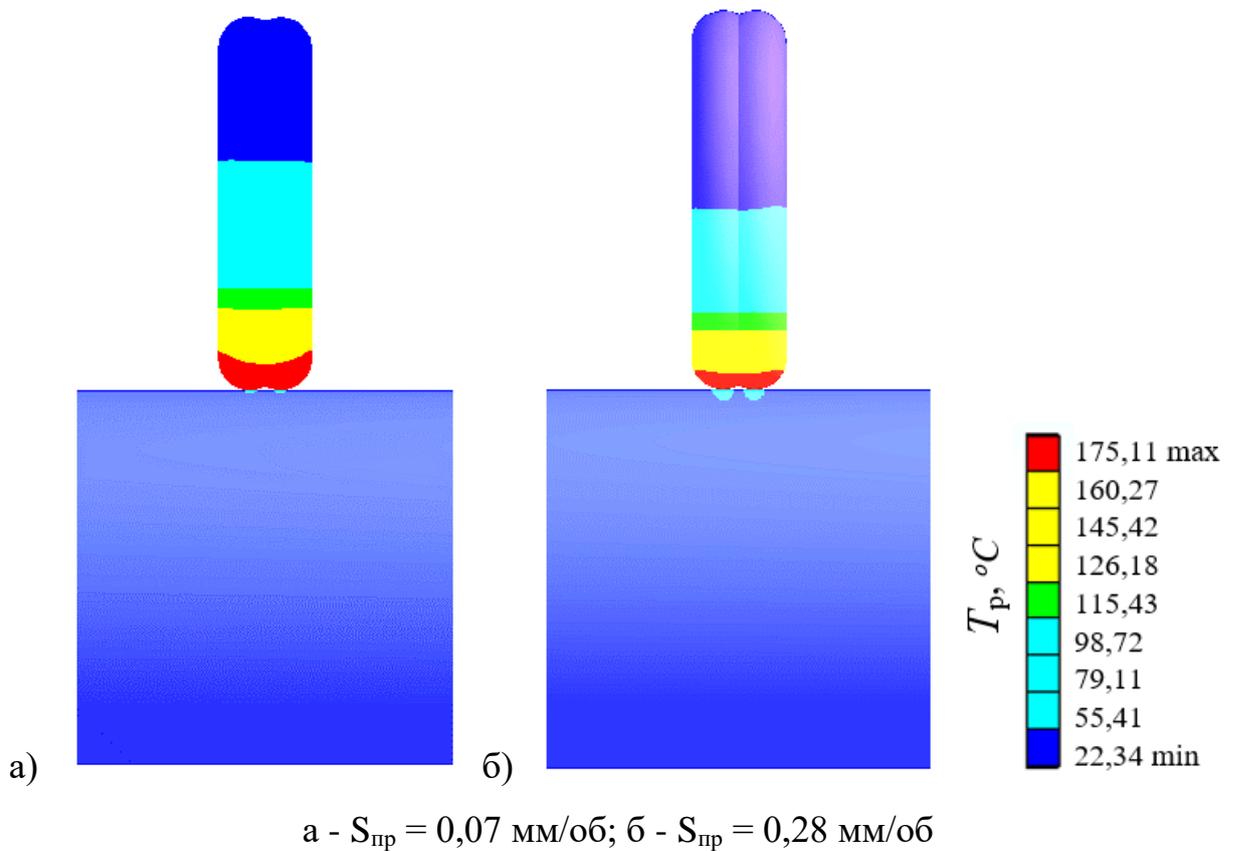


Рисунок 2.39 - Розподіл температурних полів по поперечному перерізу дворадіусного ролика в залежності від величини поздовжньої подачі

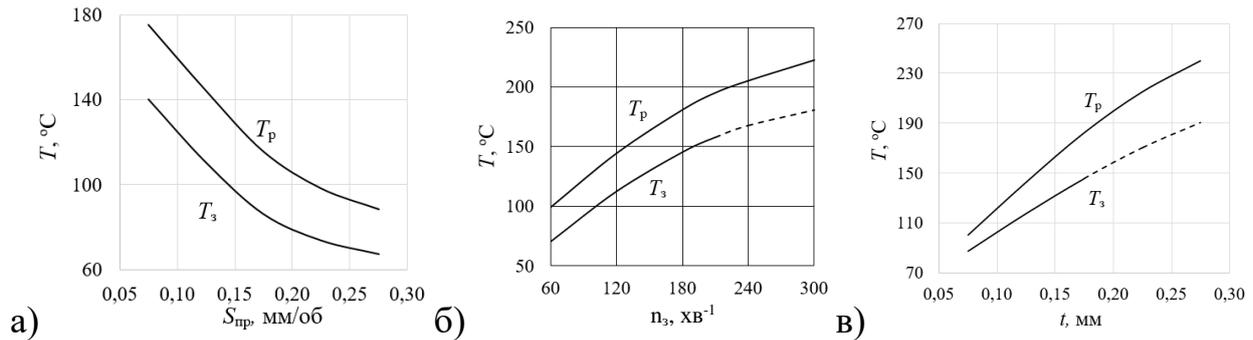


Рисунок 2.40 – Вплив поздовжньої подачі робочого інструменту (а), частоти обертання заготовки (б) та радіального натягу (в) на максимальну температуру в осередку деформації

Слід зазначити, що чим більше амплітуда кута реверсивного обертання робочого інструменту (рис. 2.41, б), тим вище максимальна температура в осередку деформації робочого інструменту із заготовкою. При збільшенні амплітуди кута реверсивного обертання робочого інструменту від 0° до 60° максимальна температура в осередку деформації заготовки збільшується в 2,2 рази, а в робочому інструменті в 2,1 раз. При амплітуді кута реверсивного обертання $\alpha_p \geq 55^\circ$ спостерігається істотне зростання максимальної температури в осередку деформації заготовки ($T_z > 155^\circ\text{C}$). Формування температури такої величини в процесі зміцнення є неприпустимим із зазначених вище причин.

З рис. 2.41, видно, що чим більша реверсивна частота обертання робочого інструменту, тим вище максимальна температура в осередку деформації. Зі збільшенням реверсивної частоти обертання робочого інструменту від 60 до 300 об/хв максимальна температура в осередку деформації заготовки збільшується в 2,9 разів, а в робочому інструменті в 2,8 разів.

Для того, щоб оцінити вплив максимальної температури при реверсивному вигладжуванні на інтенсивність тимчасових і залишкових напружень були виконані відповідні розрахунки, результати яких представлені на рис. 2.42.

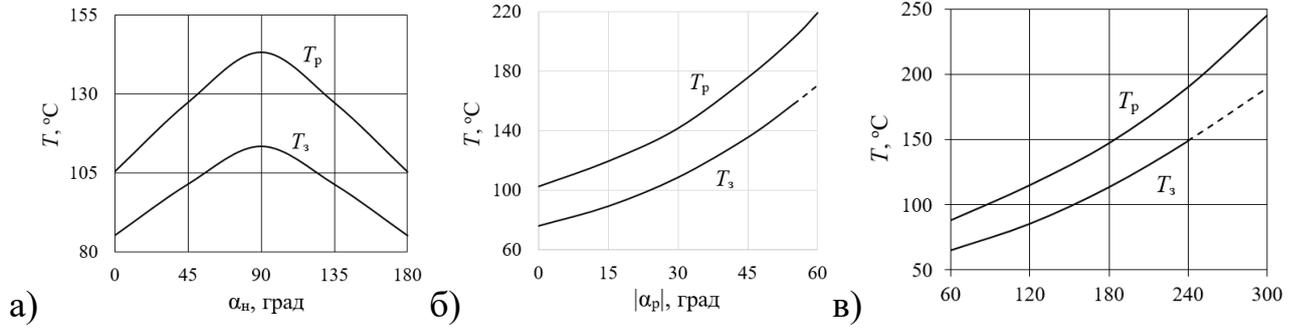


Рисунок 2.41 – Вплив початкового кута установки (а), амплітуди кута реверсивного обертання (б) та реверсивної частоти обертання робочого інструменту (в) на максимальну температуру в осередку деформації

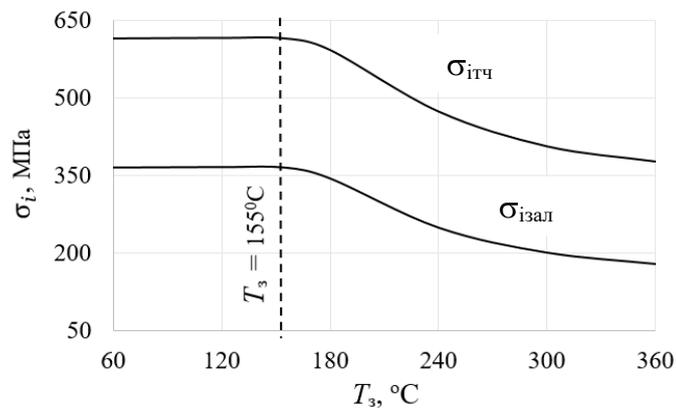
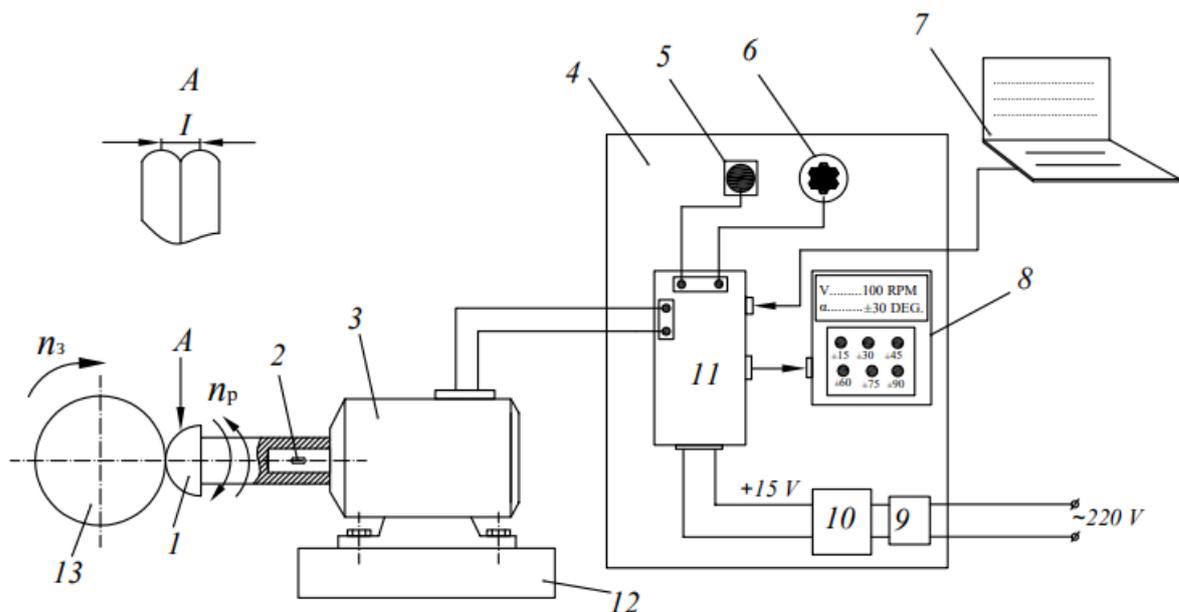


Рисунок 2.42 – Залежність максимальної інтенсивності тимчасових та залишкових напружень від величини максимальної температури при зміцненні сталі 45

3 ОЦІНКА ЯКОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ЗМІЩЕНИХ РЕВЕРСИВНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ

3.1 Установка для реверсивного вигладжування

Слід зазначити, деякі зазначені способи поверхневого пластичного деформування при реверсивному рухові робочого інструменту мають переривчастий контакт із заготовкою, що забезпечує однорідності деформування матеріалу. У технологічній практиці не відомі пристрої, що забезпечують круговий реверсивний рух робочого інструменту. У зв'язку з цим була розроблена конструкція, представлена на рис 3.1.



1 - робочий інструмент; 2 - шпонка; 3 – кроковий електродвигун; 4 – блок управління; 5 – кнопка запуску; 6 – регулятор швидкості реверсу; 7 – персональний комп'ютер; 8 - екран режимів обробки; 9 – автоматичний вимикач; 10 – трансформатор; 11 - програмований контролер; 12 – основа, 13 – заготовка

Рисунок 3.1 – Принципова схема пристрою створення реверсивного кругового руху робочого інструмента

Для оцінки якості поверхневого шару циліндричних деталей після реверсивного вигладжування використовували зразки середньовуглецевої сталі 45 діаметром 30 мм (рис. 3.2). Дослідні зразки розділені поперечними канавками на шість однакових ділянок по довжині і діаметру, які зміцнюються з використанням різних технологічних параметрів і режимів обробки. На кожному зразку випробовувався один параметр поверхневого пластичного деформування з п'ятьма різними режимами зміцнення, що дозволяло побудувати відповідні графіки. Одна з шести ділянок не оброблялася, і вона служила визначення вихідного параметра поверхні перед поверхневим пластичним деформуванням.

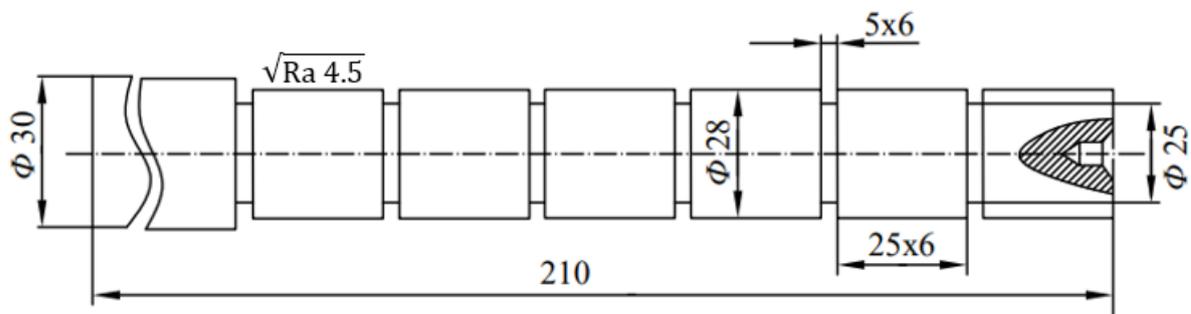


Рисунок 3.2 – Зразок для експериментальної оцінки якості поверхневого шару деталей після реверсивного вигладжування

3.2 Вплив параметрів реверсивного вигладжування на шорсткість поверхневого шару

Вплив подовжньої подачі. Аналіз експериментальних результатів на рис. 3.3 показав, що чим більше величина подовжньої подачі, тим вище параметри шорсткості. Збільшення подовжньої подачі від 0,07 до 0,28 мм/об висотні параметри шорсткості R_a , R_z збільшуються в 2,8÷3,7 разів, а кроковий параметр S_m збільшуються в 1,6 рази. Це пояснюється тим, що із збільшенням подовжньої подачі ступінь перекриття осередків деформації зменшується – шорсткість поверхні зростає, що сприяє утворенню частково нового профілю поверхні. Отримані результати якісно узгоджуються з результатами,

отриманими іншими способами поверхневого пластичного деформування [1, 10, 28].

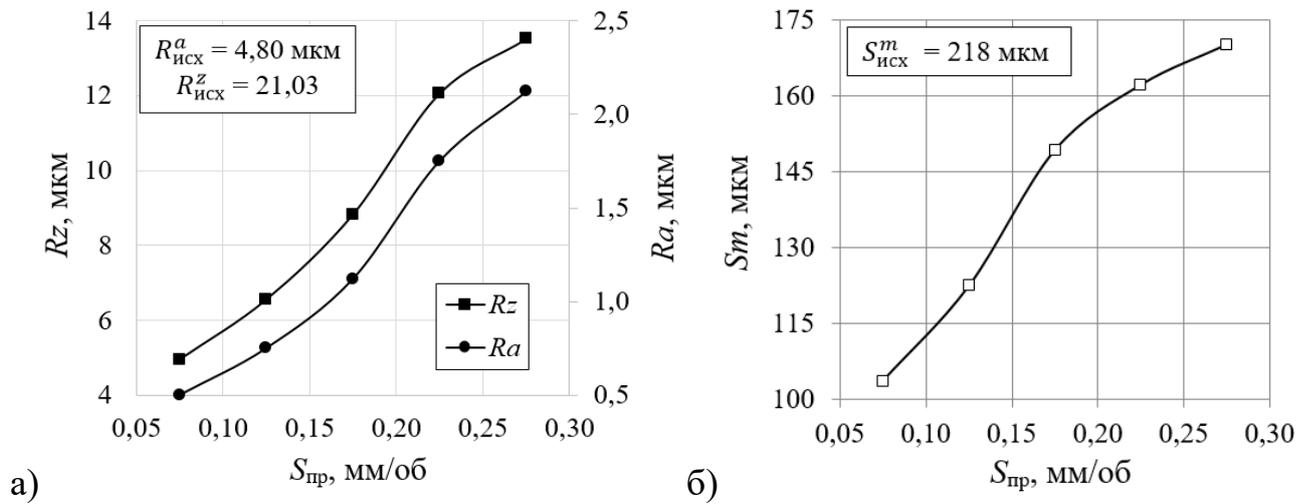


Рисунок 3.3 – Вплив поздовжньої подачі на параметри шорсткості Ra , Rz (а) та Sm (б) при зміцненні деталей реверсивним вигладжуванням

Вплив частоти обертання заготовки. На рис. 3.4 представлено вплив частоти обертання заготовки на параметри шорсткості зміцнених деталей при реверсивному вигладжуванні.

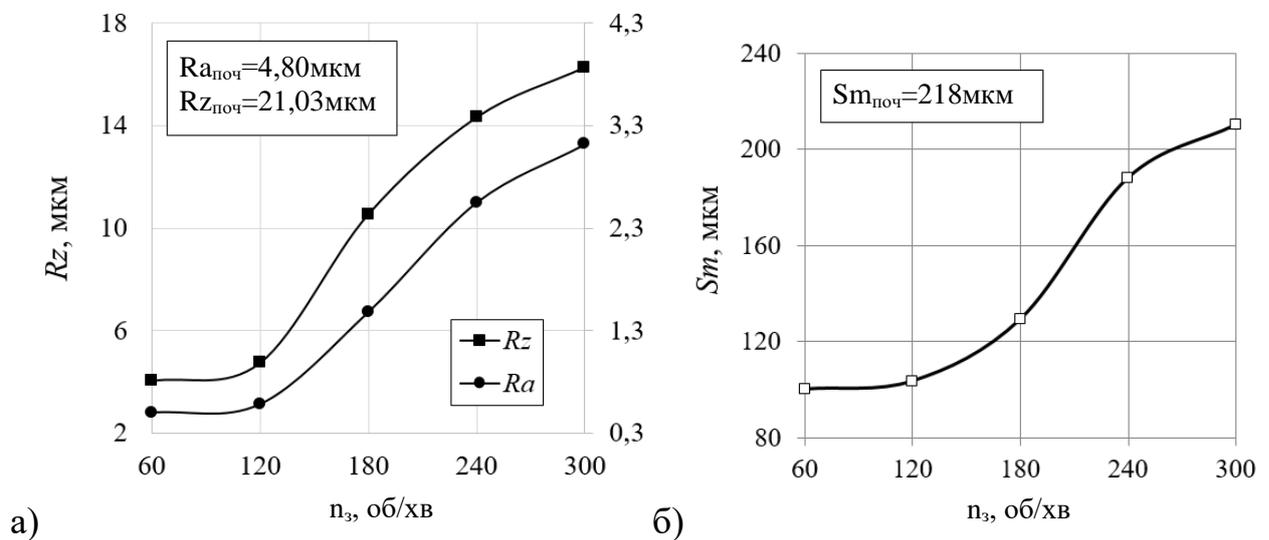


Рисунок 3.4 – Вплив частоти обертання заготовки на параметри шорсткості Ra , Rz (а) та Sm (б) при зміцненні деталей реверсивним вигладжуванням

Вплив радіального натягу. На рис. 3.5 представлено вплив радіального натягу на параметри шорсткості зміцнених деталей при реверсивному вигладжуванні.

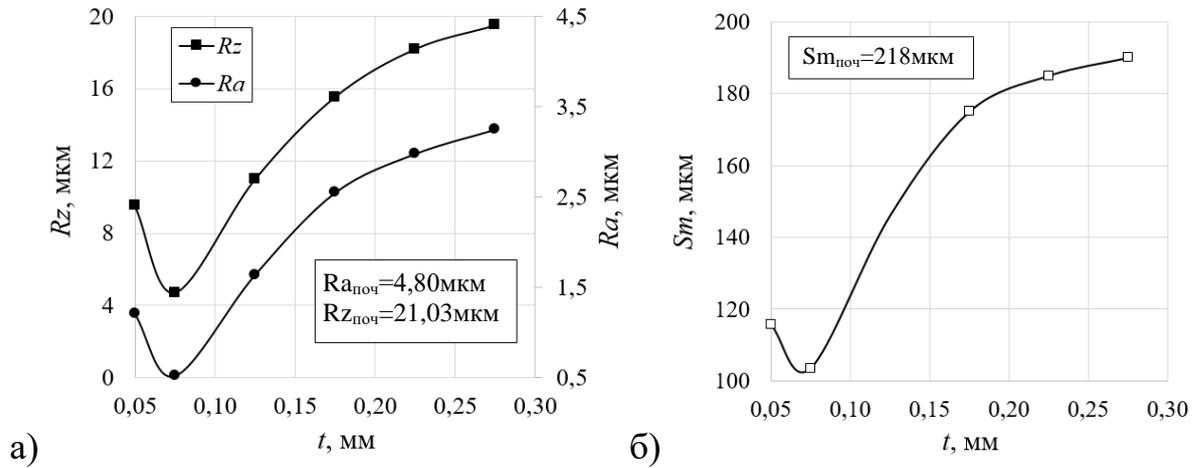


Рисунок 3.5 – Вплив радіального натягу на параметри шорсткості Ra , Rz (а) та Sm (б) при зміцненні деталей реверсивним вигладжуванням

Вплив початкового кута налаштування робочого інструменту. Результати експериментальних досліджень показали, що найменша шорсткість зміцнених деталей після реверсивного вигладжування досягається при $\alpha_n = 90^\circ$ (рис. 3.6), а найбільша при $\alpha_n = 0^\circ$. При збільшенні початкового кута установки робочого інструменту від 0° до 90° висотні параметри шорсткості (Ra і Rz) зменшуються в $3,4 \div 5,1$ раз, а кроковий параметр Sm в 2 рази.

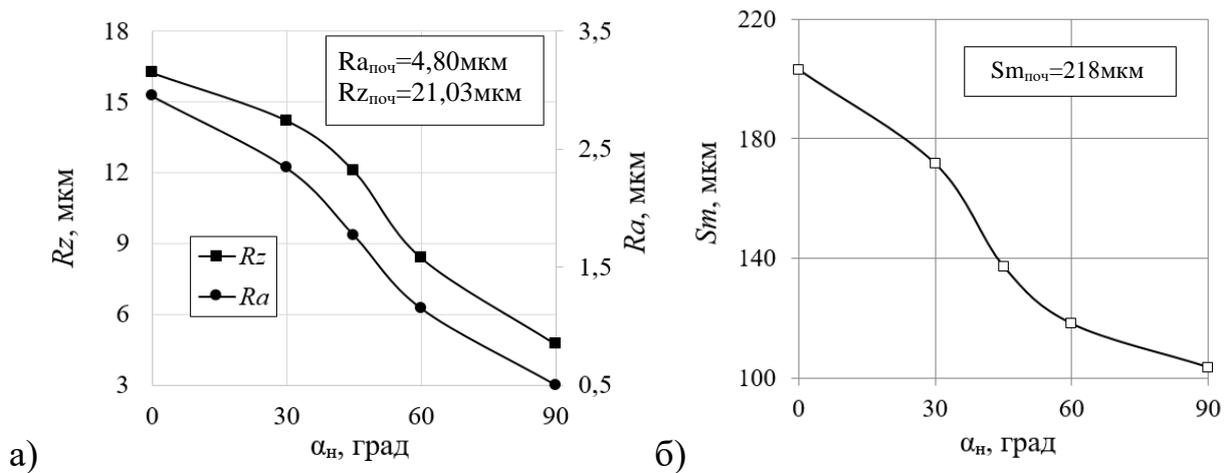


Рисунок 3.6 – Вплив початкового кута установки робочого інструменту на параметри шорсткості Ra , Rz (а) та Sm (б) при зміцненні деталей реверсивним вигладжуванням

Вплив амплітуди кута реверсивного обертання робочого інструменту.

На рис. 3.7 представлена залежність параметрів шорсткості зміцнених деталей від амплітуди кута реверсивного обертання робочого інструменту.

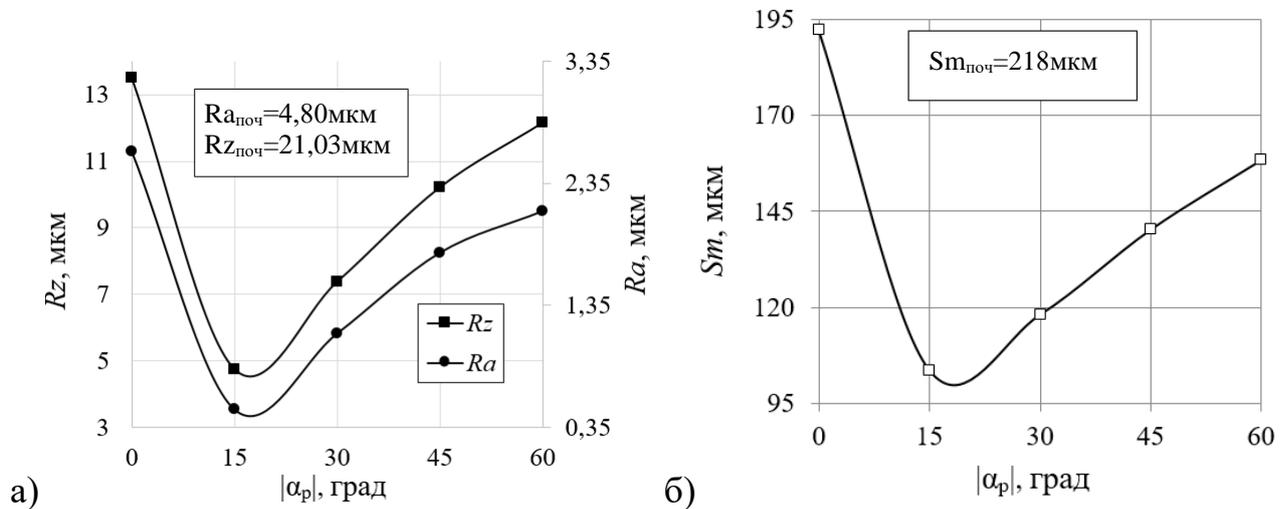


Рисунок 3.7 – Вплив амплітуди кута реверсивного обертання робочого інструменту на параметри шорсткості Ra , Rz (а) та Sm (б) при зміцненні деталей реверсивним вигладжуванням

Вплив реверсивної частоти обертання робочого інструмента. На рис. 3.8 представлена залежність параметрів шорсткості зміцнених деталей від реверсивної частоти обертання робочого інструменту. З рис. 3.8 випливає, що вплив реверсивної частоти обертання робочого інструменту на величину шорсткості поверхні є неоднозначною залежністю. При зміні n_p від 60 до 120 об/хв усі досліджувані параметри шорсткості знижуються. Це відбувається завдяки пластичній течії металу, при якому відбувається згладжування мікронерівностей поверхні. При $n_p > 120$ об/хв розглянуті параметри шорсткості Ra , Rz , Sm ростуть, причому досить інтенсивно. Це пов'язано з перенаклепом і крихкістю матеріалу поверхневого шару. Справа в тому, що реверсивне обертання робочого інструменту викликає зсувну знакозмінну деформацію локальних об'ємів матеріалу, що призводить до вичерпання запасу пластичності та пошкодження поверхневого шару матеріалу.

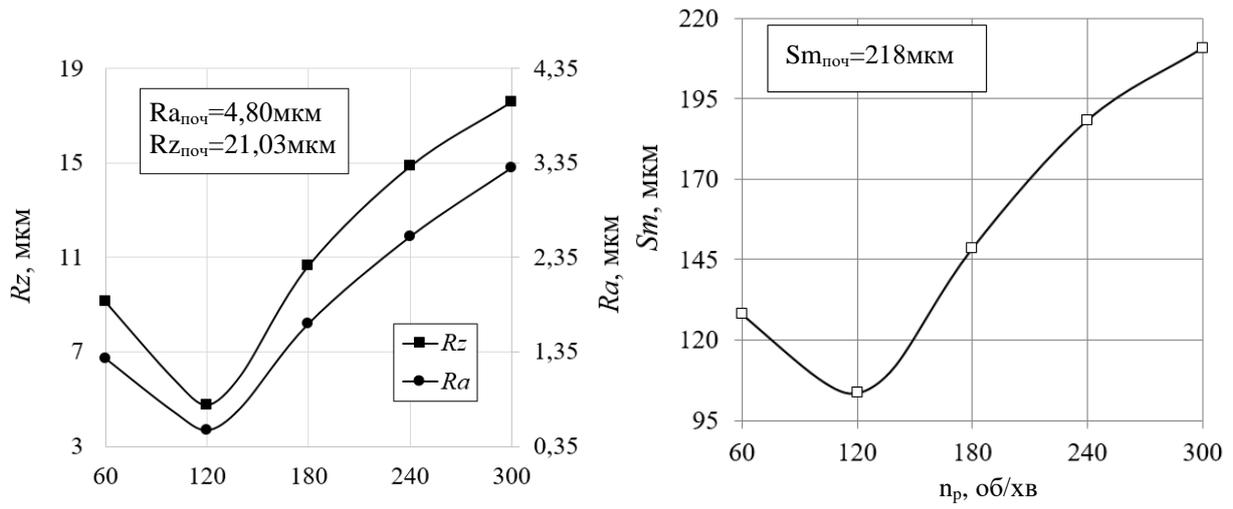


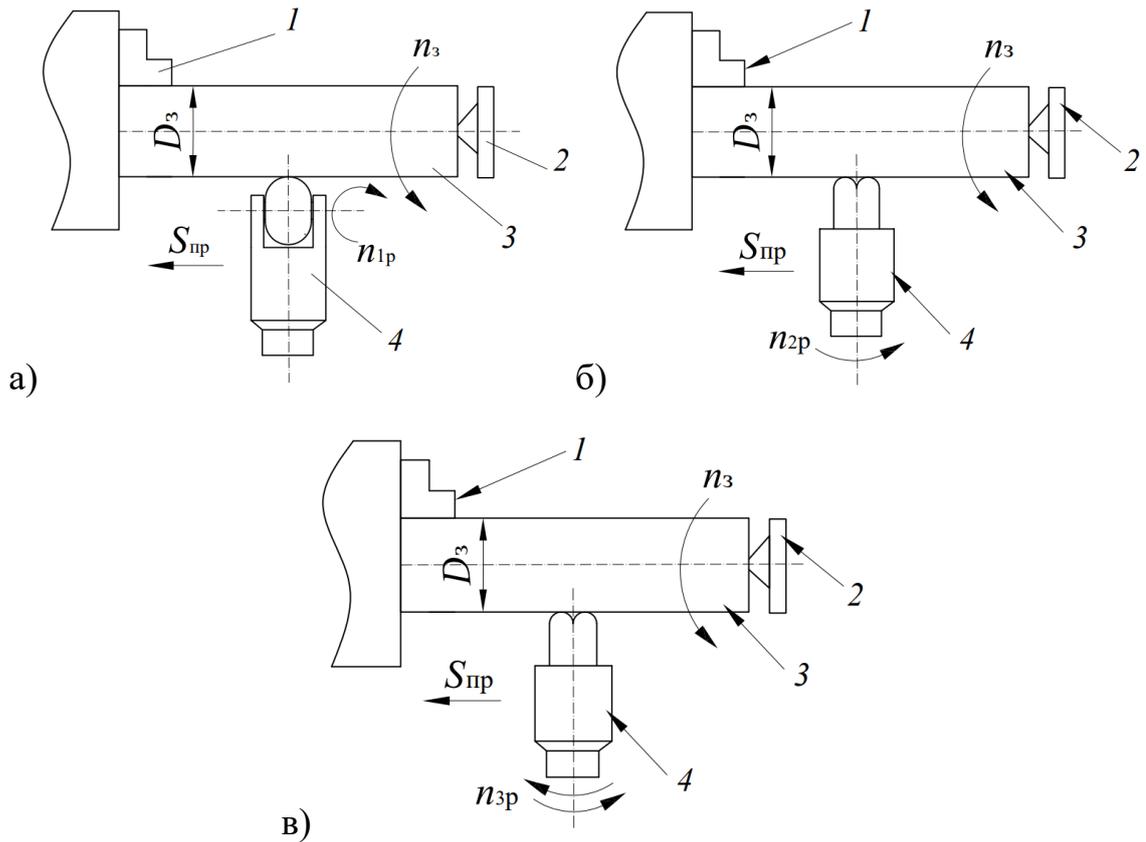
Рисунок 3.8 – Вплив реверсивної частоти обертання робочого інструменту на параметри шорсткості Ra , Rz (а) та Sm (б) при зміцненні деталей реверсивним вигладжуванням

4 ПОРІВНЯННЯ СПОСОБІВ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ, ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗМІЦНЕНИХ ДЕТАЛЕЙ І ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДЛЯ ОЗДОБЛЮВАЛЬНО-ЗМІЦНЮВАЛЬНОЇ ОБРОБКИ РЕВЕРСИВНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ

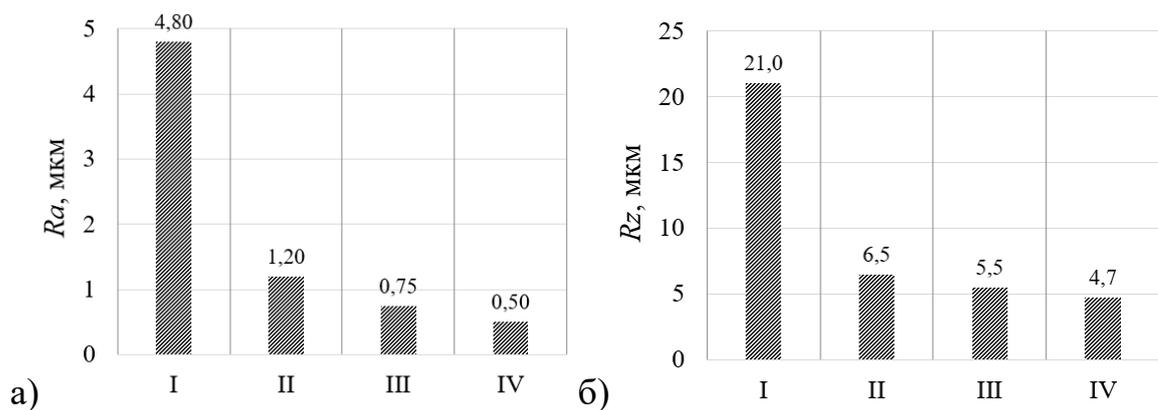
4.1 Порівняння методів поверхневого пластичного деформування з різною кінематикою робочих роликів

Кінематичні схеми поверхневого пластичного деформування. Для оцінки ефективності способів поверхневого пластичного деформування розглянуто три схеми зміцнення циліндричної поверхні. При обкатуванні тороїдальним роликом (рис. 4.1, а) заготовці надають обертальний рух відносно власної поздовжньої осі, а ролику, що чинить тиск на поверхню оброблюваної заготовки, надають поздовжню подачу. Сутність процесу обкатування тороїдальним роликом полягає в тому, що в результаті тиску тороїдального ролика, на оброблювану поверхню, що вільно обертається, метал деталі пластично деформується, відбувається згладжування шорсткостей, заповнення западин мікропрофілю і зміцнення поверхневого шару деталі [1, 2].

Шорсткість поверхневого шару. На рис. 4.2 показані величини показників шорсткості R_a і R_z залежно від різних способів поверхневого пластичного деформування. З рис. 4.2 випливає, що після обкочування тороїдальним роликом параметри шорсткості зміцнених деталей R_a та R_z зменшуються в 4,0 та 3,2 рази, відповідно. Після обкочування дворадіусним роликом, що обертається, параметри R_a і R_z зменшуються в 6,4 і 3,8 рази, відповідно. Найменшу шорсткість отримали при реверсивному вигладжуванні, причому параметри R_a і R_z зменшуються в 9,6 і 4,5 рази, відповідно. Експериментальні результати показують, що спосіб реверсивного вигладжування більш ефективно згладжує мікронерівності поверхні деталі, ніж інші аналогічні способи.



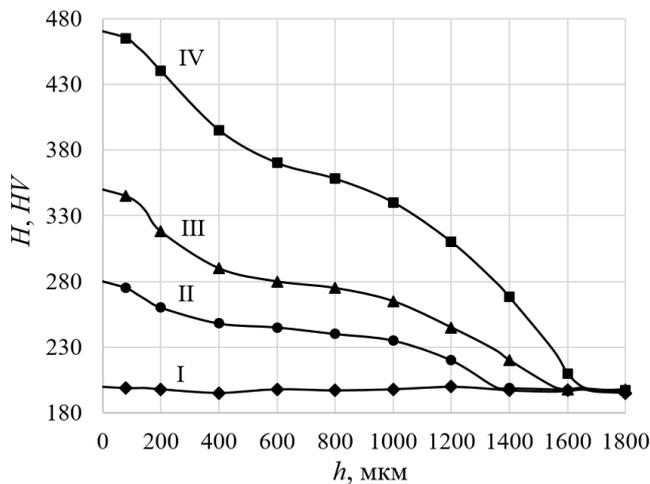
а – обкочування тороїдальним роликом; б - обкочування дворадіусним роликом, що обертається; в – реверсивне вигладжування; 1 – трикулачковий патрон; 2 – задня бабка; 3 – заготовка; 4 – робочий інструмент
Рисунок 4.1 – Кінематичні схеми поверхневого пластичного деформування



I - вихідна шорсткість поверхні; II - обкочування тороїдальним роликом; III - обкочування дворадіусним роликом, що обертається; IV - реверсивне вигладжування

Рисунок 4.2 - Залежність показників шорсткості Ra (а) та Rz (б) від різних способів поверхневого пластичного деформування

Мікротвердість поверхневого шару. На рис. 4.3 представлено розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару зміцнених деталей за різних способів поверхневого пластичного деформування.

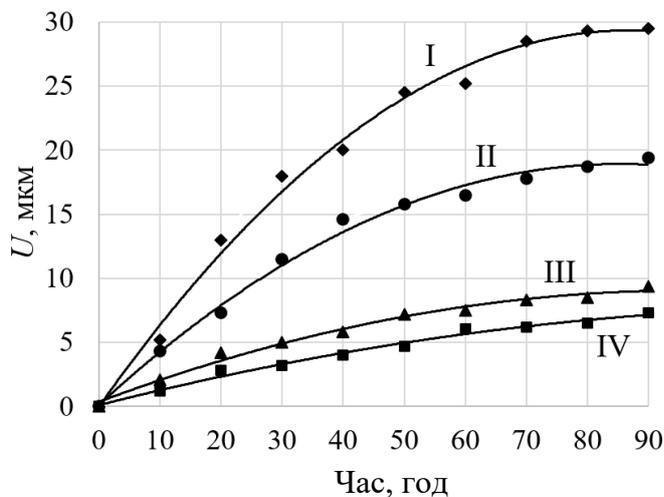


I - вихідна мікротвердість; II - обкочування тороїдальним роликком; III - обкочування дворадіусним роликком, що обертається; IV - реверсивне вигладжування

Рисунок 4.3 - Розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару зміцнених деталей в залежності від способів поверхневого пластичного деформування

4.2 Оцінка зносостійкості зміцнених деталей

На рис. 4.4 представлено вплив способів поверхневого пластичного деформування на корозійно-механічне зношування зміцнених деталей.



I - незміцнений зразок; II – обкочування тороїдальним роликком; III – обкочування дворадіусним роликком, що обертається; IV – реверсивне вигладжування

Рисунок 4.4 - Вплив способів поверхневого пластичного деформування на корозійно-механічне зношування зміцнених деталей

4.3 Визначення корозійної стійкості зміцнених деталей

Розглянемо вплив основних технологічних параметрів реверсивного вигладжування на корозійну стійкість зміцнених деталей. На рис. 4.5 представлена залежність інтенсивності корозії і шорсткості зміцненої поверхні від основних параметрів реверсивного вигладжування (величини радіального натягу і реверсивної частоти обертання робочого інструменту).

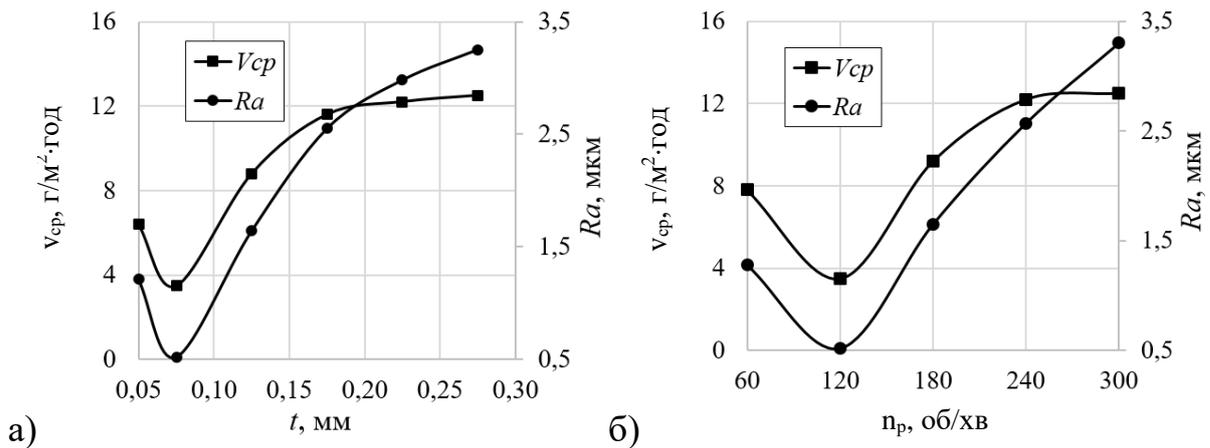


Рисунок 4.5 - Вплив величини радіального натягу (а) та реверсивної частоти обертання робочого інструменту (б) на шорсткість та швидкість корозії зміцненої поверхні деталі

На основі аналізу шорсткості та швидкості корозії від декількох основних технологічних параметрів реверсивного вигладжування побудована кореляційна залежність між висотним показником шорсткості та швидкістю корозії (рис. 4.6).

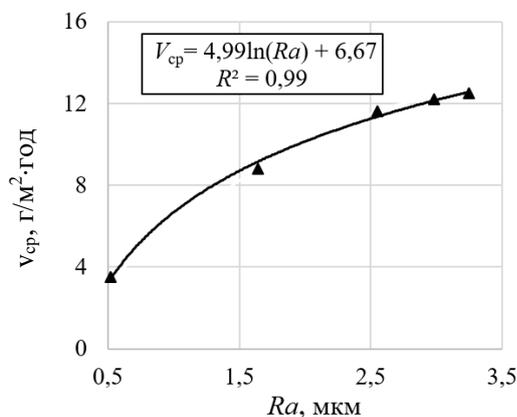
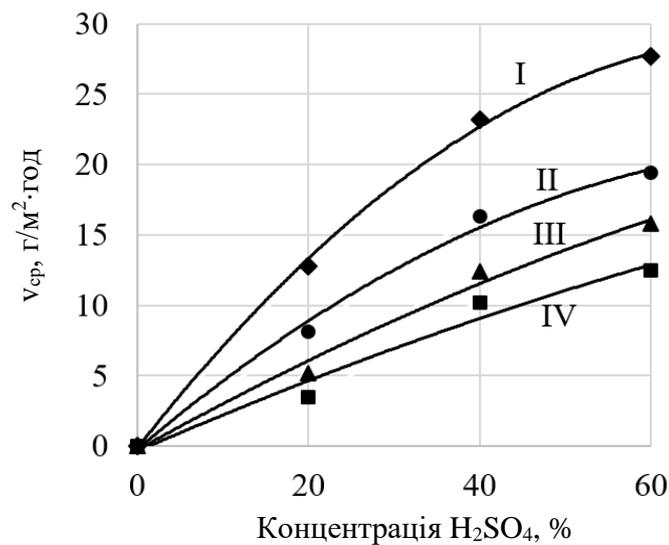


Рисунок 4.6 - Залежність швидкості корозії зміцнених поверхонь від шорсткості

На рис. 4.7 представлено вплив способів поверхневого пластичного деформування на швидкість корозії поверхні зміцнених деталей у сірчаній кислоті різної концентрації (при 25⁰C). З рис. 4.7 видно, що зі збільшенням концентрації сірчаної кислоти в розчині спостерігається прискорення швидкості корозії поверхні зміцнених деталей за всіх способів поверхневого пластичного деформування. Слід зазначити, що серед способів поверхневого пластичного деформування найменша швидкість корозії забезпечується при реверсивному вигладжуванні при цьому в порівнянні зі швидкістю корозії незміцненого зразка після обкочування тороїдальним роликком, обкатки дворадіусним роликком, що обертається, і реверсивного вигладжування швидкість корозії поверхні зміцнених деталей знижується приблизно на 34%; 51% і 64%, відповідно.



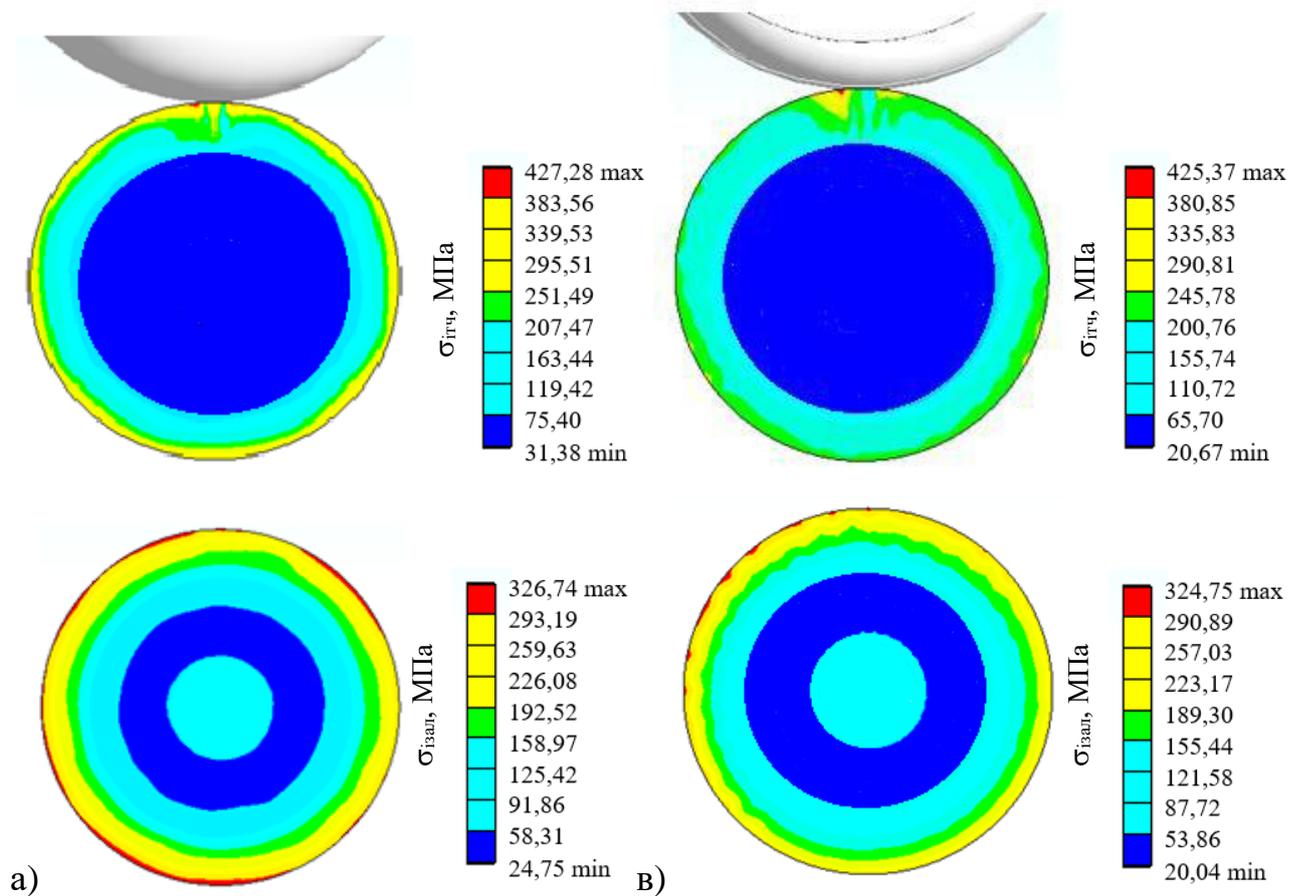
I - не-зміцнений метал; II - обкочування тороїдальним роликком; III - обкочування дворадіусним роликком, що обертається; IV - реверсивне вигладжування

Рисунок 4.7 - Вплив способів поверхневого пластичного деформування на швидкість корозії поверхні зміцнених деталей у сірчаній кислоті різної концентрації (при 25⁰C)

4.4 Оцінка механічної жорсткості зміцнених деталей

а) Чисельний розрахунок.

На рис. 4.8 наведено поля розподілу інтенсивності тимчасових $\sigma_{itч}$ та залишкових $\sigma_{iзал}$ напружень у поперечному перерізі циліндричних зразків при двох способах зміцнення.

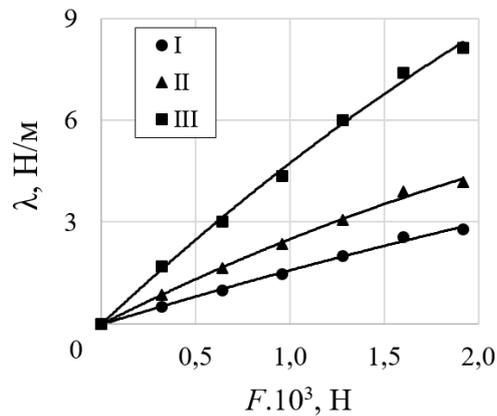


а – $t=0.1\text{mm}$; б - $t=0.07\text{mm}$

Рисунок 4.8 – Поля розподілу інтенсивності тимчасових та залишкових напружень у поперечному перерізі циліндричних зразків при різних способах поверхневого пластичного деформування

б) Експериментальні дослідження

Результати випробувань представлені на рис. 4.9 де показана згинальна жорсткість зразків, зміцнених обкочуванням тороїдальним роликком і реверсивним вигладжуванням.



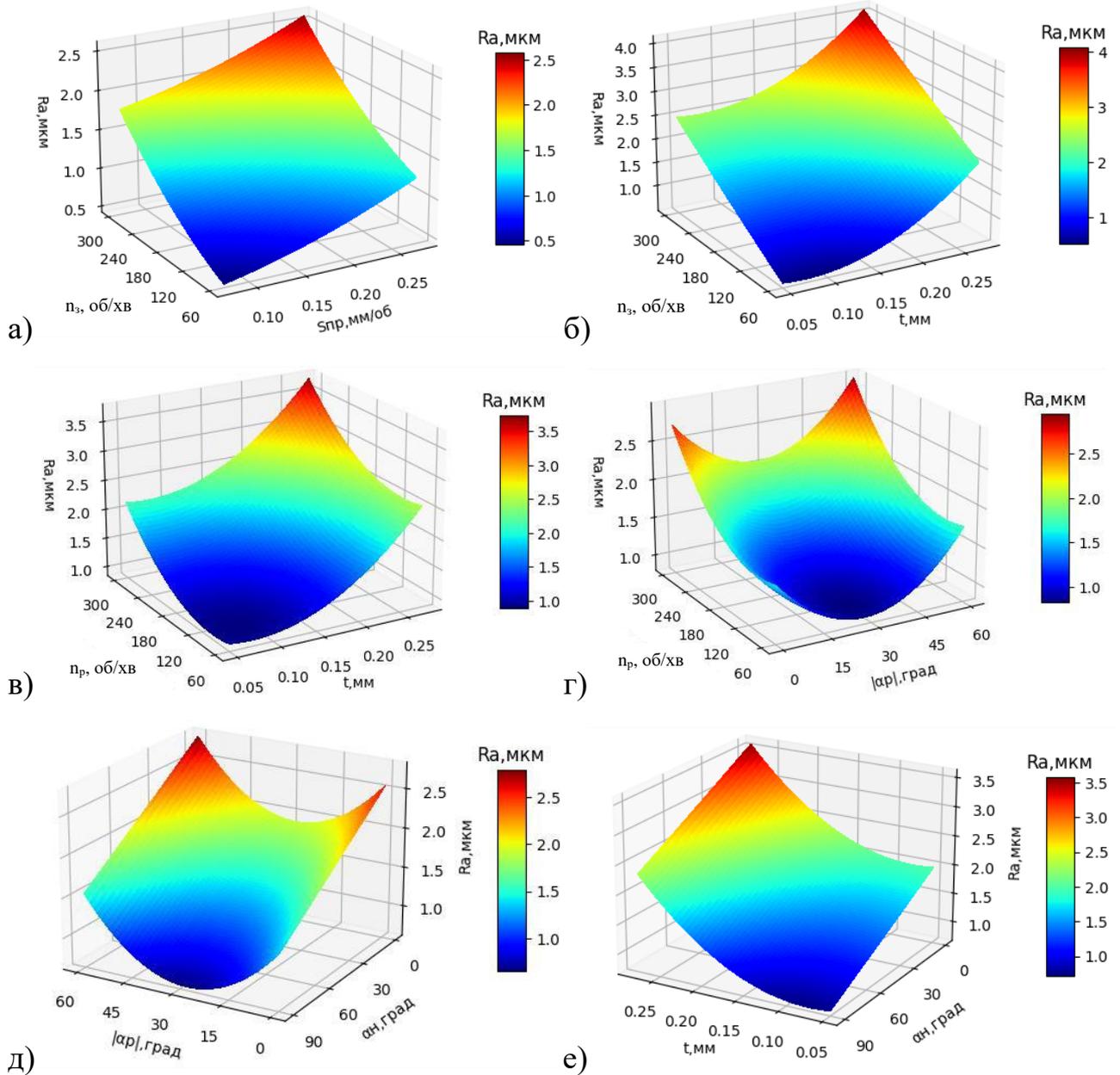
I - незміцнений метал; II - обкочування торіодальним роликком; III - реверсивне вигладжування

Рисунок 4.9 - Залежність коефіцієнту механічної жорсткості від способів поверхневого пластичного деформування

4.5 Визначення раціональних режимів процесу реверсивного вигладжування

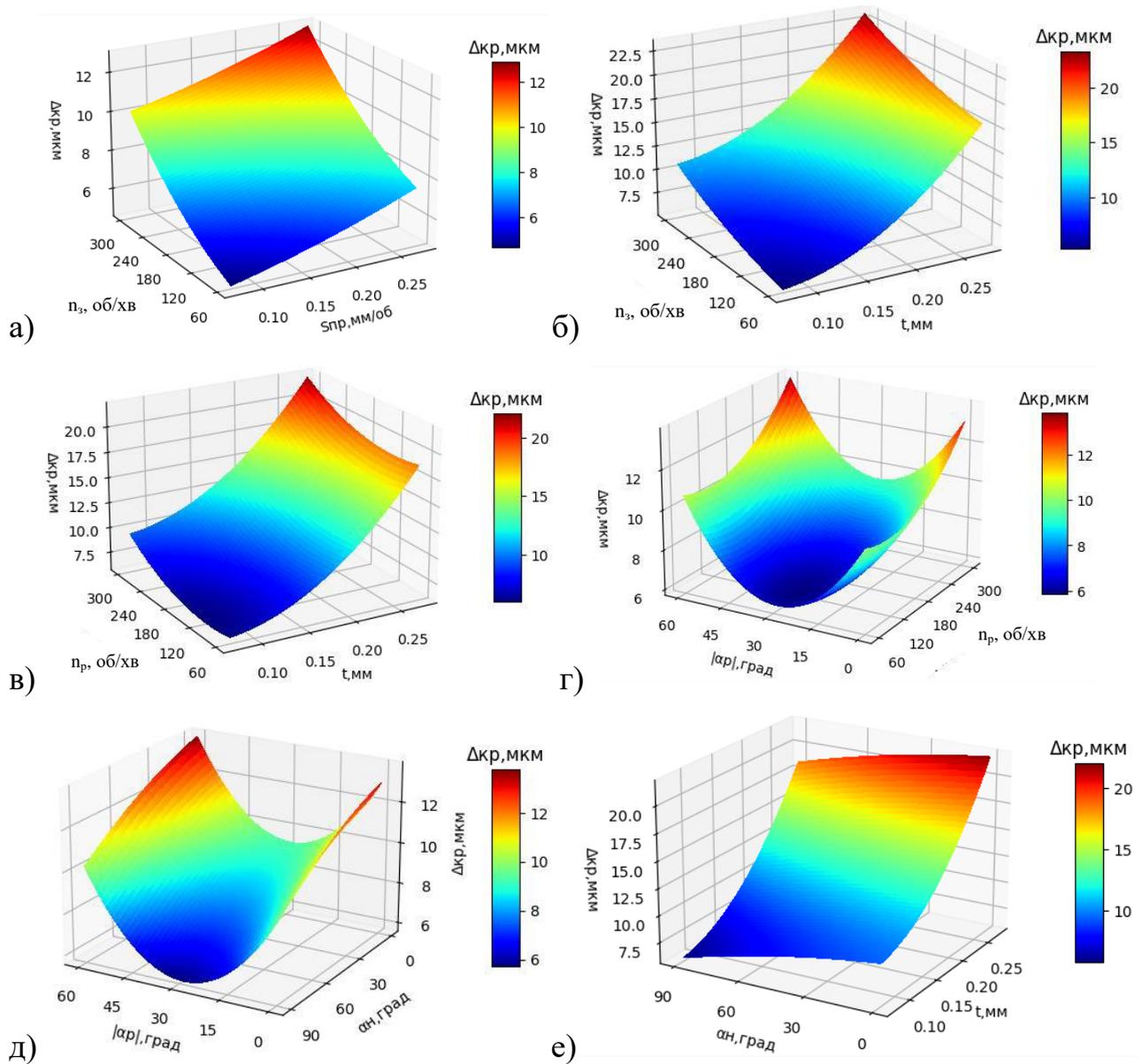
Процес реверсивного вигладжування є складним багатофакторним процесом з наступними параметрами: подовжня подача $S_{пр}$, частота обертання заготовки n_3 , радіальний натяг t , реверсивна частота обертання робочого інструменту n_p , початковий кут установки робочого інструменту α_n і амплітуда кута реверсивного обертання робочого інструменту α_p . Ці параметри надають неоднозначний вплив на характеристики якості деталей машин. Зменшення подовжньої подачі робочого інструменту, частоти обертання заготовок, величини радіального натягу і реверсивної частоти обертання робочого інструменту призводить до зменшення шорсткості поверхні.

Результати чисельного розрахунку. На рис. 4.10 і 4.11 представлено кілька прикладів статистичної обробки з визначення раціональних режимів зміцнення, що забезпечують отримання найменших значень шорсткості і відхилення від круглості поверхні зміцнених деталей, а на рис. 4.12 і 4.13 - максимальних стискаючих залишкових напружень і мікротвердості поверхневого шару зміцнених деталей.



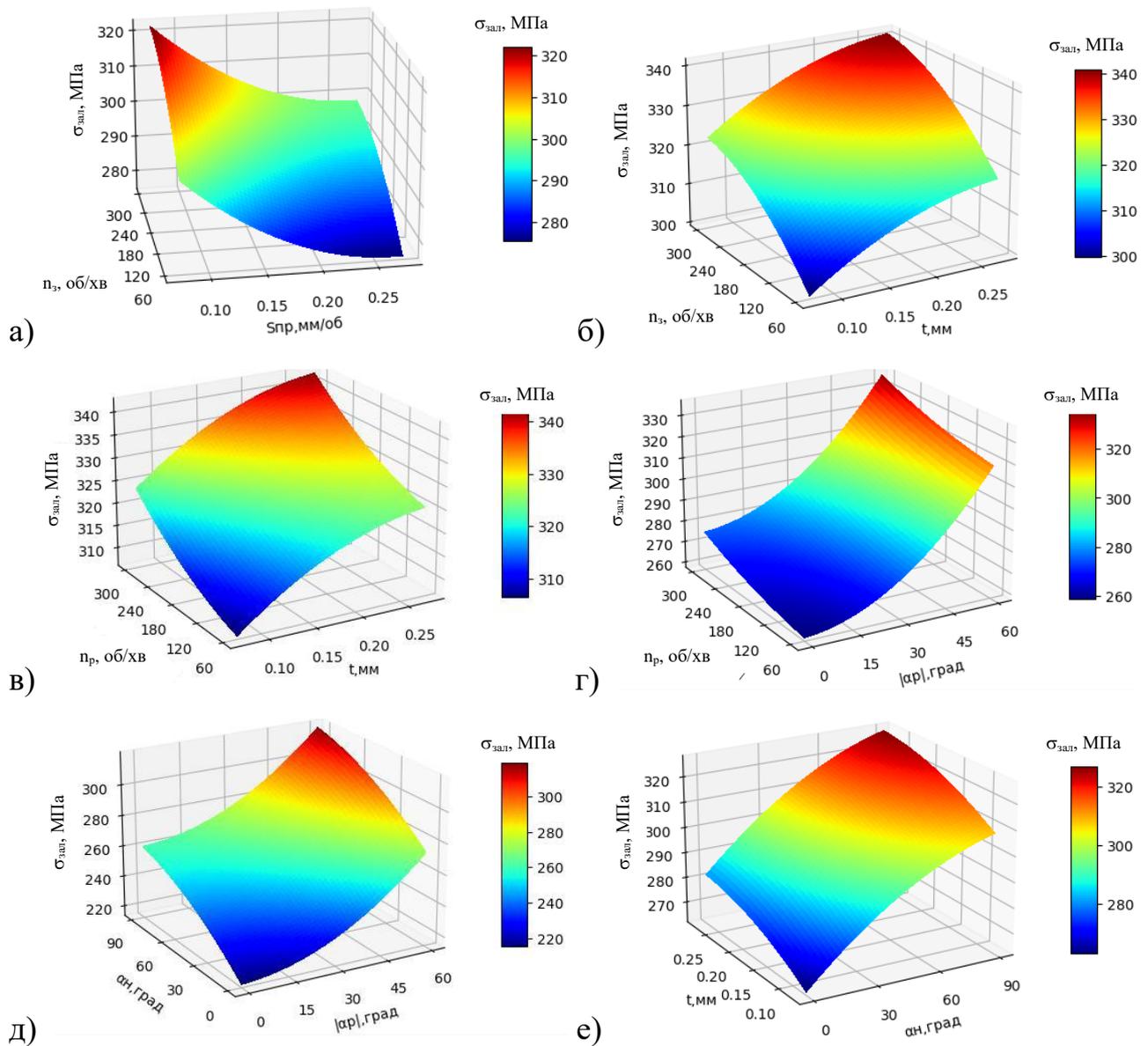
а – залежно від повздовжньої подачі та частоти обертання заготовки; б – залежно від частоти обертання заготовки та величини радіального натягу; в – залежно від величини радіального натягу та реверсивної частоти обертання робочого інструменту; г – залежно від реверсивної частоти обертання та амплітуди кута реверсивного обертання робочого інструменту; д – залежно від амплітуди кута реверсивного обертання та початкового кута установки робочого інструменту; е – залежно від величини радіального натягу та початкового кута установки робочого інструменту

Рисунок 4.10 – Поверхні відгуку шорсткості циліндричної поверхні після реверсивного вигладжування



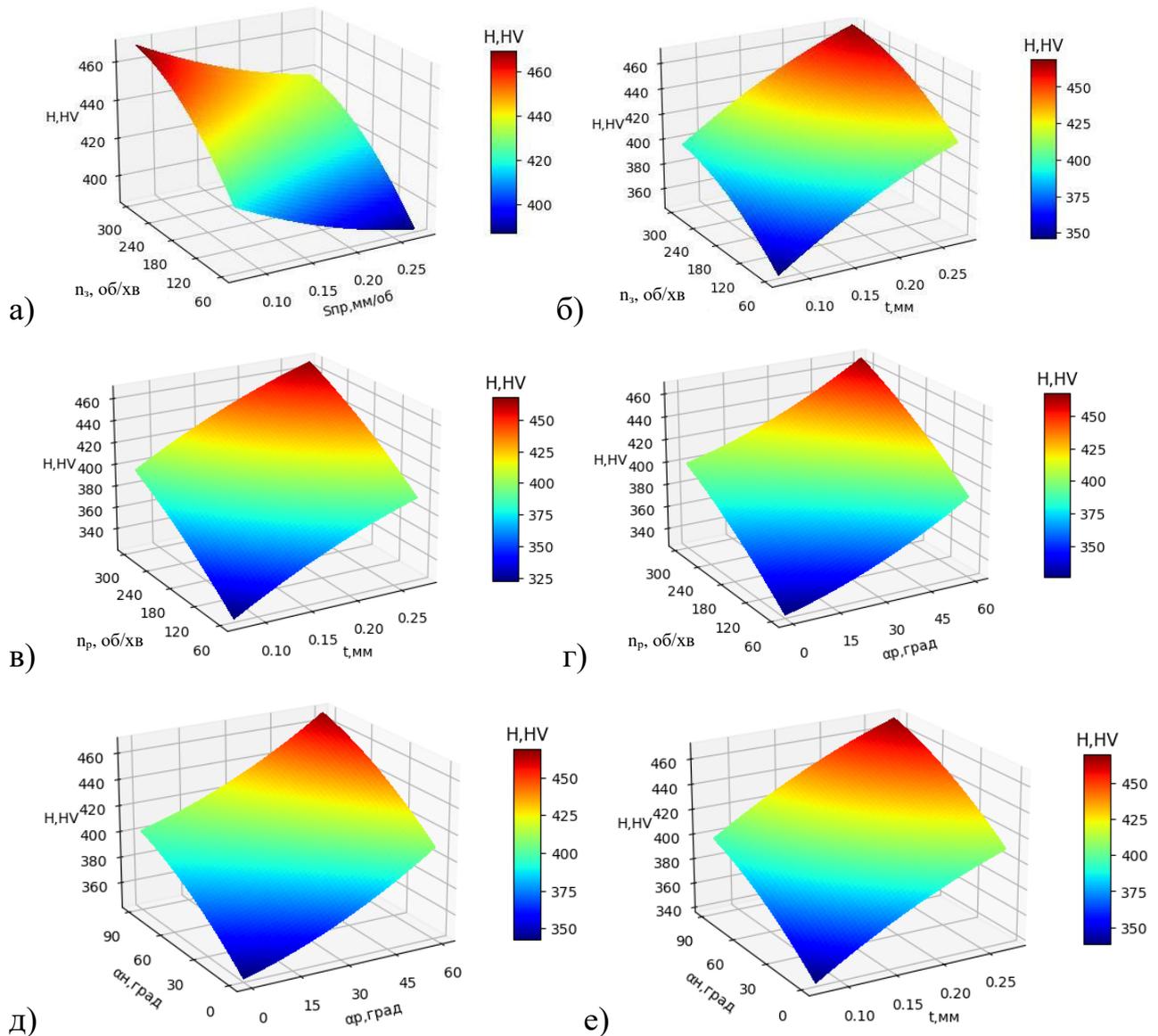
а - залежно від поздовжньої подачі та частоти обертання заготовки; б - залежно від частоти обертання заготовки та величини радіального натягу; в - залежно від величини радіального натягу та реверсивної частоти обертання робочого інструменту; г - залежно від реверсивної частоти обертання та амплітуди кута реверсивного обертання робочого інструменту; д - залежно від амплітуди кута реверсивного обертання та початкового кута установки робочого інструменту; е - залежно від величини радіального натягу та поздовжньої подачі

Рисунок 4.11 - Поверхні відгуку відхилення від круглості циліндричної поверхні після реверсивного вигладжування



а - в залежності від поздовжньої подачі і частоти обертання заготовки; б - в залежності від частоти обертання заготівлі та величини радіального натягу; в - в залежності від величини радіального натягу та реверсивної частоти обертання робочого інструменту; г - в залежності від реверсивної частоти обертання та амплітуди кута реверсивного обертання робочого інструменту; д - в залежності від амплітуди кута реверсивного обертання та початкового кута установки робочого інструменту; е - в залежності від величини радіального натягу та початкового кута установки робочого інструменту

Рисунок 4.12 - Поверхні відгуку стискаючих залишкових напружень поверхні деталей після реверсивного вигладжування



а - в залежності від поздовжньої подачі та частоти обертання заготовки; б - в залежності від частоти обертання заготівлі та величини радіального натягу; в - в залежності від величини радіального натягу та реверсивної частоти обертання робочого інструменту; г - в залежності від реверсивної частоти обертання та амплітуди кута реверсивного обертання робочого інструменту; д - в залежності від амплітуди кута реверсивного обертання та початкового кута установки робочого інструменту; е - в залежності від величини радіального натягу та початкового кута установки робочого інструменту

Рисунок 4.13 - Поверхні відгуку мікротвердості поверхневого шару деталей після реверсивного вигладжування

4.6 Розроблення технологічних рекомендацій для використання реверсивного вигладжування у виробничій практиці

Технологічне обладнання та оснащення. В якості технологічного обладнання для реверсивного вигладжування циліндричних деталей можна використовувати звичайні токарні верстати майже всіх типів включаючи і верстати з ЧПУ. Пристрій для створення реверсивного обертання робочого інструменту закріплюють на різцевій каретці супорта верстата за допомогою болтів і гайок. Деформуючий елемент налаштовують по центру осьової лінії заготовки. Установку заготовки, що обробляється, на токарному верстаті виконують за допомогою трикулачкового патрона і заднього центру.

Деформуючий інструмент. В якості деформуючого інструменту необхідно використовувати тороїдальний інструмент зі спеціальною формою деформуючого елемента, виконаного у вигляді двох деформуючих роликів. Характеристики деформуючого інструменту: дворадіусний ролик діаметром 20 30 мм, з профільним радіусом $2 \div 3$ мм та відстанню між вершинами дворадіусного ролика близько 2 мм; матеріал інструментальна сталь SKD 11 або аналоги X12M, X12MФ, X12Ф1.

Технологічне мастило. Для зниження коефіцієнтів тертя і забезпечення високої якості поверхні при реверсивному вигладжуванні в якості технологічного мастила використано індустриальне масло І-40А.

Заготовка. В якості заготовки крім сталі 45 можна застосувати реверсивне вигладжування для зміцнення нежорстких деталей типу валів та осей різних матеріалів: 20, 40Х, 50, 50Г2 або аналоги: С45, С45Е, С45R; 1045, НК1042, К1042.

Параметри та режими зміцнення. На основі результатів моделювання та експериментальних досліджень встановлено, що основні параметри процесу реверсивного вигладжування безпосередньо впливають на якість зміцнених деталей і ефективність зміцнення.

Поздовжня подача. Найменші параметри шорсткості, хвилястості і відхилення від круглості при реверсивному вигладжуванні досягаються при поздовжніх подачах від $0,07 \div 0,10$ мм/об, а в інтервалах від $0,07 \div 0,08$ мм/об досягаються найбільші значення стискаючих залишкових напружень і мікротвердості поверхневого шару. За подальшого збільшення поздовжньої подачі механічні властивості поверхневого шару деталі зменшуються, а геометричні параметри збільшуються. Це пояснюється тим, що зі збільшенням поздовжньої подачі ступінь перекриття осередків деформації зменшується - шорсткість поверхні зростає, що сприяє утворенню частково нового мікропрофілю поверхні.

Частота обертання заготовки. При збільшенні частоти обертання заготовки від 60 до 100 об/хв геометричні параметри поверхні деталі плавно і незначно збільшуються. У цьому інтервалі частоти обертання заготовки відбувається практично повне змінання нерівностей. Подальше збільшення частоти обертання заготовки призводить до зростання швидкості локального змінання мікрорельєфу поверхні, можлива поява вібрації в процесі реверсивного вигладжування, що призводить до збільшення шорсткості поверхні.

Величина радіального натягу. Цей параметр значно впливає на геометричні параметри поверхні та механічні властивості поверхневого шару деталей. Найменші геометричні параметри поверхні деталей після реверсивного вигладжування забезпечуються при величині радіального натягу $t = 0,07 \div 0,08$ мм, а найбільші значення стискаючих залишкових напружень і мікротвердості поверхневого шару досягаються при $t = 0,25 \div 0,28$ мм. Невелика величина радіального натягу ($t = 0,05$ мм) призводить до неповного деформування мікронерівностей, при цьому необхідний питомий тиск для повного згладжування мікронерівностей недостатній і занадто маленький радіальний натяг призводить до ковзання робочого інструменту по оброблюваній поверхні заготовки і відбувається переривчасте деформування, що призводить до незначного зниження початкової шорсткості поверхні. При великій величині

радіального натягу ($t \geq 0,15$ мм) спостерігається різке зростання питомого тиску в осередку деформації, шорсткість при цьому зростає і можливий перенаклеп, який зазвичай проявляється в луценні поверхні і відшаровуванні частинок металу. Крім того, велика величина радіального натягу призводить до збільшення вібрації в процесі поверхневого пластичного деформування, яка збільшує шорсткість поверхні.

Початковий кут встановлення робочого інструменту. При збільшенні початкового кута установки робочого інструменту від 0^0 до 90^0 геометричні параметри поверхні деталі зменшуються, а величини стискаючих залишкових напружень і мікротвердості поверхневого шару деталі збільшуються. Тому при встановленні робочого інструменту необхідно розташувати дворадіусний ролик так, щоб його криволінійна поверхня була перпендикулярна до заготовки.

Амплітуда кута реверсивного обертання робочого інструменту. Найменші геометричні параметри поверхні деталі після реверсивного вигладжування досягаються при $\alpha_p = \pm 10^0 \div \pm 20^0$, а найбільші значення стискаючих залишкових напружень і мікротвердості поверхневого шару досягаються при $\alpha_p = \pm 55^0 \div \pm 60^0$. Мала величина амплітуди кута реверсивного обертання призводить до зменшення орієнтації великої та малої осі відбитка робочого ролика, що знижує спотворення кристалічної структури матеріалу і при цьому знижується деформуюча здатність другого профілю робочого ролика. Крім того, якщо $\alpha_p = 0^0$, то в процесі зміцнення робочий ролик буде стикатися з поверхнею заготовки в двох точках і залишатися постійним протягом всього процесу. При цьому виникає велике тертя в зоні контакту робочого інструменту з поверхнею заготовки, тому робочий ролик швидше зношуватиметься, що призведе до зростання шорсткості поверхні.

Реверсивна частота обертання робочого інструмента. Частота реверсу є ефективним параметром зміцнення, що впливає на геометричні параметри поверхні та механічні властивості поверхневого шару деталі. Експериментальними результатами встановлено, що в діапазоні n_p від 115 до 125 об/хв всі геометричні досліджувані параметри поверхні досягають

мінімального значення. Це відбувається завдяки пластичній течії металу, при якому відбувається згладжування мікронерівності поверхні. При подальшому збільшенні частоти реверсу геометричні параметри поверхні зростають, причому досить інтенсивно. Це пов'язано з перенаклепом і крихкістю матеріалу поверхневого шару. Реверсивне обертання робочого інструменту викликає зсувну знакозмінну деформацію локальних об'ємів матеріалу, що призводить до вичерпання запасу пластичності та пошкодження поверхневого шару матеріалу. На основі отриманих експериментальних результатів після реверсивного вигладжування для підвищення механічних властивостей поверхневого шару без руйнування поверхні деталі можна рекомендувати n_p від 270 до 300 об/хв.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Оцінювання комерційного потенціалу розробки

Метою проведення комерційного та технологічного аудиту є підвищення ефективності зміцнення циліндричних деталей машин шляхом інтенсифікації напружено-деформованого стану поверхневого шару реверсивним вигладжуванням.

Для проведення технологічного аудиту було залучено 3-х незалежних експертів Вінницького національного технічного університету, кафедри галузевого машинобудування: Савуляк В. І., Шиліна О. П., Бакалець Д. В.

Для проведення технологічного аудиту було використано табл. 5.1 [1] в якій за п'ятибальною шкалою використовуючи 12 критеріїв здійснено оцінку комерційного потенціалу.

Таблиця 5.1 – Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Критерії оцінювання та бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри-терій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції:					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки):					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно	Експлуатаційні витрати дещо	Експлуатаційні витрати на рівні	Експлуатаційні витрати трохи	Експлуатаційні витрати значно

	вищі, ніж в аналогів	вищі, ніж в аналогів	експлуатаційних витрат аналогів	нижчі, ніж в аналогів	нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Таблиця 5.2 – Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів СБ, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0-10	Низький
11-20	Нижче середнього
21-30	Середній
31-40	Вище середнього
41-48	Високий

В табл. 5.3 наведено результати оцінювання експертами комерційного потенціалу розробки.

Таблиця 5.3 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії	Прізвище, ініціали, посада експерта		
	Савуляк В. І.	Шиліна О. П.	Бакалець Д. В.
	Бали, виставлені експертами:		
1	1	2	1
2	2	2	2
3	4	3	4
4	4	3	4
5	3	3	3
6	3	4	3
7	1	2	1
8	3	3	3
9	3	3	3
10	2	1	1
11	4	3	4
12	1	2	1
Сума балів	СБ ₁ =31	СБ ₂ =31	СБ ₃ =31
Середньоарифметична сума балів $\overline{СБ}$	$\overline{СБ} = \frac{\sum_1^3 СБ_i}{3} = \frac{31 + 31 + 31}{3} = 31$		

Середньоарифметична оцінка, отримана на основі експертних висновків, становить 31 бали, і згідно з табл. 5.2, це вказує на рівень вище середнього комерційного потенціалу результатів проведених досліджень.

Результати магістерської роботи можуть бути використані при розробленні технології зміцнення реверсивним вигладжуванням, що забезпечує

підвищення якості циліндричних деталей типу валів, осей, технологічних рекомендацій для впровадження реверсивного вигладжування на виробництві, для визначення раціональних режимів обробки для отримання мінімальної шорсткості поверхні та максимальних механічних властивостей зміцненого шару.

Результати магістерської роботи можуть бути корисними у виробничій практиці використовується для підвищення якості поверхневого шару відповідальних деталей машин типу валів і осей.

Проведемо оцінку якості і конкурентоспроможності нової розробки порівняно з аналогом.

В якості аналога для розробки було обрано цементацію (карбюризація), загартування поверхневого шару, яка створює твердий карбонізований шар; застосовується для відповідальних валів і шестерень.

Основними недоліками аналога є висока температура; деформації та короблення; тривалість і висока вартість; ризик дефектів цементованого шару.

Також до недоліків можна віднести обмеження за матеріалами; складність забезпечення точності; екологічні проблеми.

У розробці дана проблема вирішується шляхом інтенсифікації напружено-деформованого стану поверхневого шару реверсивним вигладжуванням. Також система випереджає аналог за такими параметрами як: втомна міцність; якість та чистоти поверхні; точність геометрії; стабільність розмірів; технологічність, швидкість та вартість; екологічність й надійність.

В табл. 5.4 наведені основні техніко-економічні показники аналога і нової розробки.

Проведемо оцінку якості продукції, яка є найефективнішим засобом забезпечення вимог споживачів та порівняємо її з аналогом.

Таблиця 5.4 – Основні параметри нової розробки та товару-конкурента

Показник	Варіанти		Відносний показник якості	Коефіцієнт вагомості параметра
	Базовий (товар-конкурент)	Новий (інноваційне рішення)		
1	2	3	4	5
Втомна міцність, МПа	250...450	120...220	2,05	30%
Шорсткість Ra, мкм	0,05...0,5	1.6...6.3	12,6	25%
Глибина зміцнюваного шару, мм	0.01 ... 0.1	0.5 ... 2	20	20%
Твердість НВ	450...550	600...800	1,45	15%
Похибка розмірів, мм	0.01...0,1	0.02...0.2	2	10%

Визначимо відносні одиничні показники якості по кожному параметру за формулами (5.1) та (5.2) і занесемо їх у відповідну колонку табл. 5.5.

$$q_i = \frac{P_{Hi}}{P_{Bi}} \quad (5.1)$$

або

$$q_i = \frac{P_{Bi}}{P_{Hi}} \quad (5.2)$$

де P_{Hi} , P_{Bi} – числові значення i -го параметру відповідно нового і базового виробів.

$$q_1 = \frac{450}{220} = 2,05;$$

$$q_2 = \frac{6,3}{0,5} = 12,6;$$

$$q_3 = \frac{2}{0,1} = 20;$$

$$q_4 = \frac{800}{550} = 1,45;$$

$$q_5 = \frac{0,2}{0,1} = 2.$$

Відносний рівень якості нової розробки визначаємо за формулою:

$$K_{\text{я.в.}} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \alpha_i, \quad (5.3)$$

$$K_{\text{я.в.}} = 2,05 \cdot 0,3 + 12,6 \cdot 0,25 + 20 \cdot 0,2 + 1,45 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,1 = 8,18$$

Відносний коефіцієнт показника якості нової розробки більший одиниці, отже нова розробка якісніший базового товару-конкурента.

Наступним кроком є визначення конкурентоспроможності товару. Конкурентоспроможність товару є головною умовою конкурентоспроможності підприємства на ринку і важливою основою прибутковості його діяльності.

Однією із умов вибору товару споживачем є збіг основних ринкових характеристик виробу з умовними характеристиками конкретної потреби покупця. Такими характеристиками найчастіше вважають нормативні та технічні параметри, а також ціну придбання та вартість споживання товару.

В табл. 5.5 наведено технічні та економічні показники для розрахунку конкурентоспроможності нової розробки відносно товару-аналога, технічні дані взяті з попередніх розрахунків.

Таблиця 5.5 – Нормативні, технічні та економічні параметри нової розробки і товару-виробника

Показники	Варіанти	
	Базовий (товар- конкурент)	Новий (інноваційне рішення)
1	2	3
<i>1. Нормативно-технічні показники</i>		
Втомна міцність, МПа	250...450	120...220
Шорсткість Ra, мкм	0,05...0,5	1.6...6.3
Глибина зміцнюваного шару, мм	0.01 ... 0.1	0.5 ... 2
Твердість HB	450...550	600...800
Похибка розмірів, мм	0.01...0,1	0.02...0.2
<i>2. Економічні показники</i>		
Ціна придбання, грн	80...600	400...2000

Загальний показник конкурентоспроможності інноваційного рішення (К) з урахуванням вищезазначених груп показників можна визначити за формулою:

$$K = \frac{I_{m.n.}}{I_{e.n.}}, \quad (5.4)$$

де $I_{m.n.}$ – індекс технічних параметрів; $I_{e.n.}$ – індекс економічних параметрів.

Індекс технічних параметрів є відносним рівнем якості інноваційного рішення. Індекс економічних параметрів визначається за формулою (5.5)

$$I_{e.n.} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Hei}}{\sum_{i=1}^n P_{Bei}}, \quad (5.5)$$

де P_{Hei} , P_{Bei} – економічні параметри (ціна придбання та споживання товару) відповідно нового та базового товарів.

$$I_{e.n.} = \frac{2000}{600} = 3,33;$$

$$K = \frac{8,18}{3,33} = 2,46.$$

Зважаючи на розрахунки, можна зробити висновок, що нова розробка буде конкурентоспроможніше, ніж конкурентний товар.

5.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи групуються за такими статтями: витрати на оплату праці, витрати на соціальні заходи, матеріали, паливо та енергія для науково-виробничих цілей, витрати на службові відрядження, програмне забезпечення для наукових робіт, інші витрати, накладні витрати.

1. Основна заробітна плата кожного із дослідників Z_0 , якщо вони працюють в наукових установах бюджетної сфери визначається за формулою:

$$Z_0 = \frac{M}{T_p} * t \text{ (грн)} \quad (5.6)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (інженера, дослідника, науковця тощо), грн.;

T_p – число робочих днів в місяці; приблизно $T_p \approx 21...23$ дні;

t – число робочих днів роботи дослідника.

Зведемо сумарні розрахунки до табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Заробітна плата дослідника в науковій установі бюджетної сфери

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату грн.
Керівник	16000	761,9	5	3810
Програміст	21000	1000,0	60	60000
Всього				63810

2. Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт розраховують за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.7)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника на виконання певної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.8)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи або мінімальної місячної заробітної плати (залежно від діючого законодавства), грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду;

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середня кількість робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21 \dots 23$ дні;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

Таблиця 5.7 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника, грн
1. Підготовчі	2	1	47,6	95,2
2. Монтажні	3	3	64,3	192,9
3. Інтеграційні	2	5	81,0	161,9
4. Налаштувальні	6	2	52,4	314,3
5. Випробувальні	3	4	71,4	214,3
Всього				978,6

3. Розрахунок додаткової заробітної плати робітників

Додаткова заробітна плата Z_d всіх розробників та робітників, які приймали участь в розробці нового технічного рішення розраховується як 10 - 12 % від основної заробітної плати робітників.

На даному підприємстві додаткова заробітна плата начисляється в розмірі 11% від основної заробітної плати.

$$Z_d = (Z_o + Z_p) * \frac{H_{\text{дод}}}{100\%} \quad (5.9)$$

$$Z_d = 0,11 * (63810 + 978,6) = 7126,69 \text{ (грн)}$$

4. Нарахування на заробітну плату $H_{ЗП}$ дослідників та робітників, які брали участь у виконанні даного етапу роботи, розраховуються за формулою (5.10):

$$H_{ЗП} = (Z_o + Z_p + Z_d) * \frac{\beta}{100} \text{ (грн)} \quad (5.10)$$

де Z_o – основна заробітна плата розробників, грн.;

Z_d – додаткова заробітна плата всіх розробників та робітників, грн.;

Z_p – основну заробітну плату робітників, грн.;

β – ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування, % .

Дана діяльність відноситься до бюджетної сфери, тому ставка єдиного внеску на загальнообов'язкове державне соціальне страхування буде складати 22%, тоді:

$$H_{3п} = (63810 + 978,6 + 7126,69) * \frac{22}{100} = 15821,25 \text{ (грн)}$$

5. Сировина та матеріали.

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби й предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за прямим призначенням згідно з нормами їх витрачання, а також витрачені придбані напівфабрикати, що підлягають монтажу або виготовленню й додатковій обробці в цій організації, чи дослідні зразки, що виготовляються виробниками за документацією наукової організації.

Витрати на матеріали (М) у вартісному вираженні розраховуються окремо для кожного виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{i=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{i=1}^n V_j \cdot C_{vj}, \quad (5.11)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

V_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{vj} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

Проведені розрахунки зведені в табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, шт	Вартість витраченого матеріалу, грн
Інструментальна сталь SKD11	250	0,5	125
Індустріальне масло	110	0,3	33
Сталь 45	100	10	1000
З врахуванням коефіцієнта транспортування			1273,8

6. Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі вироби (K_e), які використовують при дослідженні нового технічного рішення, розраховуються, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_e = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.12)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

Проведені розрахунки бажано звести до табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Шпонка	1	40	40
Відрізний диск	1	30	30
Затискний пристрій	1	100	100
Стіл	1	200	200
Витратні матеріали	10	40	400
Всього з врахуванням транспортних витрат			847,00

7. Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

Балансову вартість програмного забезпечення розраховують за формулою:

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inpz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (5.13)$$

де C_{inpz} – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{npz.i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

Отримані результати необхідно звести до табл. 5.10.

Таблиця 5.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
CAE / FEM (ANSYS, Abaqus)	1	420 000	420000
Всього з врахуванням налагодження			462000

8. Витрати на «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт»

Балансову вартість спецустаткування розраховують за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.}i} \cdot K_i, \quad (5.14)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.}i}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$); k – кількість найменувань устаткування.

Отримані результати необхідно звести до табл. 5.11

Таблиця 5.11 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Токарний верстат	1	200 000	200000
Вимірювальний комплекс для визначення шорсткості поверхні	1	20 000	20000
Цифровий аналізатор шумів	1	10 000	10000
Відрізний верстат	1	18 000	18000
Автоматичний прес	1	50 000	50000
Шліфувально-полірувальний верстат	1	22 000	22000
Всього			320000
Всього з врахування транспортних витрат			352000

9. Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, можуть бути розраховані з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{об}}{T_{е}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (5.15)$$

де $Ц_{об}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{е}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

Проведені розрахунки необхідно звести до табл. 5.12.

Таблиця 5.12 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Комп'ютер	25000	2	3	3125,00
Шаговий електродвигун	13 000	4	3	812,50
Трьохкулачковий патрон	7 000	4	3	437,50
Всього				4375,00

10. До статті «Паливо та енергія для науково-виробничих цілей» відносяться витрати на всі види палива й енергії, що безпосередньо використовуються з технологічною метою на проведення досліджень.

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yt} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{впi}}{\eta_i} \quad (5.16)$$

де W_{yt} – встановлена потужність обладнання на певному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

Ц_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн;

$K_{\text{впі}}$ – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{\text{впі}} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

Для написання магістерської роботи використовується персональний комп'ютер для якого розрахуємо витрати на електроенергію.

$$V_e = \frac{0,5 \cdot 250 \cdot 12,69 \cdot 0,5}{0,8} = 991,41$$

11. Службові відрядження.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуються як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$V_{\text{св}} = (Z_o + Z_p) * \frac{N_{\text{св}}}{100\%}, \quad (5.17)$$

де $N_{\text{св}}$ – норма нарахування за статтею «Службові відрядження».

$$V_{\text{св}} = 0,2 * (63810 + 978,6) = 12957,62$$

12. Накладні (загальновиробничі) витрати $V_{\text{нзв}}$ охоплюють: витрати на управління організацією, оплата службових відряджень, витрати на утримання, ремонт та експлуатацію основних засобів, витрати на опалення, освітлення, водопостачання, охорону праці тощо. Накладні (загальновиробничі) витрати $V_{\text{нзв}}$ можна прийняти як (100...150)% від суми основної заробітної плати розробників та робітників, які виконували дану МКНР, тобто:

$$V_{\text{нзв}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{N_{\text{нзв}}}{100\%}, \quad (5.18)$$

де $N_{\text{нзв}}$ – норма нарахування за статтею «Інші витрати».

$$V_{\text{нзв}} = (63810 + 978,6) \cdot \frac{100}{100\%} = 64788,09 \text{ грн}$$

Сума всіх попередніх статей витрат дає витрати, які безпосередньо стосуються даного розділу МКНР

$$B=63810+978,6+7126,69+15821,25+1273,8+847+462000+352000+4375+991,41+12957,62+64788,09=986968,96\text{грн}$$

Прогнозування загальних втрат ЗВ на виконання та впровадження результатів виконаної МКНР здійснюється за формулою:

$$ЗВ = \frac{B}{\eta}, \quad (4.19)$$

де η – коефіцієнт, який характеризує стадію виконання даної НДР.

Оскільки, робота знаходиться на стадії науково-дослідних робіт, то коефіцієнт $\beta = 0,7$.

Звідси:

$$ЗВ = \frac{986968,96}{0,7} = 1409955,66 \text{ грн.}$$

5.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки

У даному підрозділі кількісно спрогнозуємо, яку вигоду, зиск можна отримати у майбутньому від впровадження результатів виконаної наукової роботи. Розрахуємо збільшення чистого прибутку підприємства $\Delta\Pi_i$, для кожного із років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки, за формулою

$$\Delta\Pi_i = \sum_1^n (\Delta\Pi_o \cdot N + \Pi_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\nu}{100}\right) \quad (5.20)$$

де $\Delta\Pi_o$ – покращення основного оціночного показника від впровадження результатів розробки у даному році.

N – основний кількісний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році до впровадження результатів наукової розробки;

ΔN – покращення основного кількісного показника діяльності підприємства від впровадження результатів розробки:

Π_o – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки;

n – кількість років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від впровадження розробки:

l – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. Ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт $l = 0,8333$.

p – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту. $p = 0,25$;

x – ставка податку на прибуток. У 2025 році – 18%.

Припустимо, що ціна зростає на 500 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом першого року на 2800 шт., протягом другого року – на 2900 шт., протягом третього року на 3000 шт. Реалізація продукції до впровадження розробки складала 1 шт., а її ціна до 2000 грн. Розрахуємо прибуток, яке отримає підприємство протягом трьох років.

$$\begin{aligned}\Delta\P_1 &= [500 \cdot 1 + (2000 + 500) \cdot 2800] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 1195870,9 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\P_2 &= [500 \cdot 1 + (2000 + 500) \cdot (2800 + 2900)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) \\ &= 2434777,6 \text{ грн.}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\P_3 &= [500 \cdot 1 + (2000 + 500) \cdot (2900 + 2800 + 3000)] \cdot 0,833 \cdot 0,25 \\ &\cdot \left(1 + \frac{18}{100}\right) = 3715976,4 \text{ грн.}\end{aligned}$$

5.4 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

Розрахуємо основні показники, які визначають доцільність фінансування наукової розробки певним інвестором, є абсолютна і відносна ефективність вкладених інвестицій та термін їх окупності.

Розрахуємо величину початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки.

$$PV = k_{\text{інв}} \cdot ЗВ, \quad (5.21)$$

де $k_{\text{інв}}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію. Це можуть бути витрати на

підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо ($k_{\text{інв}} = 2 \dots 5$).

$$PV = 2 \cdot 1409955,66 = 2819911,31$$

Розрахуємо абсолютну ефективність вкладених інвестицій $E_{\text{абс}}$ згідно наступної формули:

$$E_{\text{абс}} = (ПП - PV) \quad (5.22)$$

де ПП – приведена вартість всіх чистих прибутків, що їх отримає підприємство від реалізації результатів наукової розробки, грн.;

$$ПП = \sum_1^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^t}, \quad (5.23)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої НДДКР, грн.;

T – період часу, протягом якою виявляються результати впровадженої НДДКР, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні; для України цей показник знаходиться на рівні 0,2;

t – період часу (в роках).

$$ПП = \frac{1195870,9}{(1 + 0,2)^1} + \frac{2434777,6}{(1 + 0,2)^2} + \frac{3715976,4}{(1 + 0,2)^3} = 4847828,27 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{абс}} = (4847828,27 - 2819911,31) = 2027916,96 \text{ грн.}$$

Оскільки $E_{\text{абс}} > 0$ то вкладання коштів на виконання та впровадження результатів НДДКР може бути доцільним.

Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій $E_{\text{в}}$. Для цього користуються формулою:

$$E_{\text{в}} = T_{\text{жс}} \sqrt{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{PV}} - 1, \quad (5.24)$$

де $T_{\text{жс}}$ – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_B = \sqrt[3]{1 + \frac{2027916,96}{2819911,31}} - 1 = 0,35 = 35\%$$

Визначимо мінімальну ставку дисконтування, яка у загальному вигляді визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (5.25)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2025 році в Україні $d = (0,14 \dots 0,2)$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05 \dots 0,1)$.

$$\tau_{\min} = 0,18 + 0,05 = 0,23$$

Оскільки $E_e > \tau_{\min}$ то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

Розрахуємо термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій за формулою:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_e} \quad (5.26)$$

$$T_{ок} = \frac{1}{0,35} = 2,9 \text{ роки}$$

Оскільки $T_{ок} \leq 3 \dots 5$ -ти років, то фінансування даної наукової розробки в принципі є доцільним.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано новий спосіб поверхневого пластичного деформування зовнішніх поверхонь тіл обертання при використанні деформуючого інструменту з реверсивною круговою кінематикою робочого руху, що забезпечує збільшення значень механічних характеристик зміцнюваного шару з підвищенням інтенсивності напруженого стану в осередку деформації та залишкових стискаючих напружень у поверхневому шарі деталей машин.

2. На основі методу кінцевих елементів з використанням програмного комплексу розроблено розрахункову динамічну модель процесу поверхневого пластичного деформування для різної кінематики робочого інструменту. Результати дослідження показали, що основні технологічні параметри реверсивного вигладжування надають значний вплив на напружено-деформований стан в осередку деформації, стискаючі залишкові напруження в поверхневому шарі і глибину пластичної деформації циліндричних деталей. Для інтенсифікації напружено-деформованого стану поверхневого шару визначено раціональні режими обробки реверсивним вигладжуванням: поздовжня подача ролика $0,10 \div 0,15$ мм/об, частота обертання заготовки $180 \div 240$ об/хв і величина радіального натягу $0,15 \div 0,20$ мм, реверсивна частота обертання робочого інструменту $250 \div 270$ об/хв, амплітуда кута реверсивного обертання робочого інструменту $\pm 50^\circ \div \pm 55^\circ$ і з початковим кутом установки робочого інструменту 90° .

3. Геометрія робочого інструменту значно впливає на напружено-деформований стан і глибину пластичної деформації циліндричних деталей при реверсивному вигладжуванні. Для інтенсифікації напружено-деформованого стану поверхневого шару рекомендується використовувати дворадіусний тороїдальний ролик діаметром $25 \div 30$ мм, з профільним радіусом $2,5 \div 3$ мм та відстанню між вершинами дворадіусного ролика близько 2 мм.

4. На основі комп'ютерного моделювання встановлено критичне значення температури в осередку деформації для деталей зі сталі 45 (за даних умов

обробки $T_{кр} = 155^{\circ}\text{C}$), перевищення якої призводить до зниження максимальної інтенсивності тимчасових і залишкових напружень. При реверсивному вигладжуванні та використанні технологічного мастила, температура на поверхні деталі при зміцненні варіюється від 42°C до 123°C .

5. Експериментальними результатами встановлено, що після реверсивного вигладжування в поверхневому шарі деталей формуються досить великі стискаючі залишкові напруження ($\sigma_{зал} \sim 340 \div 345$ МПа) в порівнянні з іншими способами поверхневого пластичного деформування. Отримані позитивні результати підтверджують технічну ідею щодо підвищення напруженого стану в осередку деформації за рахунок ускладнення кінематики процесу зміцнення.

6. Реверсивне вигладжування сприяє підвищенню не тільки мікротвердості, але і глибини наклепу поверхневого шару циліндричних деталей, при цьому твердість і мікротвердість деталей підвищуються у середньому на 12 % і 45 % порівняно з величиною вихідної твердості і мікротвердості. Глибина наклепу поверхневого шару деталі досягає величини близько 1,65 мм, і при зміні режимів реверсивного вигладжування ступінь зміцнення поверхневого шару деталі варіюється в інтервалі 55÷80%.

7. Спосіб реверсивного вигладжування значно знижує мікрогеометричні параметри поверхні циліндричних деталей, при цьому параметри шорсткості R_a і R_z зменшуються в 8,3 і 4,4 рази, висота W_z і крок S_w нерівності поверхні зменшуються на 64% і 47%, відповідно відхилення від круглості поверхні.

8. За результатами множинної регресії визначено раціональні режими реверсивного вигладжування, що забезпечують найкращі показники якості поверхні деталей. Для зниження мікрогеометричних показників поверхні зміцнених деталей (шорсткість, хвилястість і відхилення від круглості) встановлені наступні режими зміцнення: $S_{пр} = 0,07 \div 0,10$ мм/об; $n_p = 60 \div 100$ об/хв; $t = 0,08 \div 0,10$ мм; $n_p = 115 \div 120$ об/хв; $\alpha_n = 90^{\circ}$ і $\alpha_p = \pm 10^{\circ} \div \pm 20^{\circ}$. Для підвищення стискаючих залишкових напружень і механічних властивостей поверхневого шару деталей рекомендуються такі режими зміцнення: $S_{пр} =$

$0,07 \div 0,10$ мм/об; $n_p = 280 \div 300$ об/хв; $t = 0,28 \div 0,30$ мм; $n_p = 290 \div 300$ об/хв; $\alpha_n = 90^\circ$ і $\alpha_p = \pm 55^\circ \div \pm 60^\circ$.

9. В результаті досліджень експлуатаційних показників деталей, зміцнених реверсивним вигладжуванням, встановлено, що в порівнянні з обкаткою тороїдальним роликком зносостійкість підвищується в 3,1 рази, швидкість корозії знижується на 47%, згинальна жорсткість підвищується на 47,5%.

11. Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на високий рівень комерційного потенціалу. У порівнянні з аналогічним виробом виявлено, що нова розробка вищої якості і більш конкурентоспроможна, як з технічних, так і економічних позначень. Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 2,9 роки. Загальні витрати складають 1409955,66 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dyl, T.; Rydz, D.; Szarek, A.; Stradomski, G.; Fik, J.; Opydo, M. The Influence of Slide Burnishing on the Technological Quality of X2CrNiMo17-12-2 Steel. *Materials* 2024, *17*, 3403. <https://doi.org/10.3390/ma17143403>.
2. Duncheva, G.; Maximov, J.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Anastasov, K.; Argirov, Y. Effect of Roller Burnishing and Slide Roller Burnishing on Fatigue Strength of AISI 304 Steel: Comparative Analysis. *Metals* 2024, *14*, 710. <https://doi.org/10.3390/met14060710>.
3. J. Kalisz, K. Żak, S. Wojciechowski, M.K. Gupta, G.M. Krolczyk, Technological and tribological aspects of milling-burnishing process of complex surfaces. *Tribology International*, 2021, Volume 155, 106770. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106770>.
4. Dataniya, Jayprakash & Patel, Utkarshkumar & Ashwinkumar, V & Patel, & Pranami, Nitin & Basia, Pradhumansinh & Goswami, Jigishkumar & Chandra, Dheeraj & Solanki, Amitkumar. (2024). Advanced Techniques in Burnishing Tools for Surface Finish Improvement: A Comprehensive Review. *Nanotechnology Perceptions*. 20. 1465-1474. 10.62441/nano-ntp.vi.1806.
5. Javanshour, F., et al. Modulating impact resistance of flax epoxy composites with thermoplastic interfacial toughening. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 150: 106628.
6. Kiakojour, F., Tavakoli, H.R., Sheidaii, M.R. *et al.* Numerical analysis of all-steel sandwich panel with drilled I-core subjected to air blast scenarios. *Innov. Infrastruct. Solut.* **7**, 320 (2022). <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00912-x>.
7. Erik Forke, Philipp Niederhofer, Mirko Albrecht, Verena Kräusel, Michael Gehde Wear Behavior of Roller-Burnished High Interstitial Austenitic Stainless Steel Parts in Glass-Reinforced Plastic Melt Volume 94, Issue 4, Special Issue: Highlights from Tooling 22, April 2023. <https://doi.org/10.1002/srin.202200458>.

8. Nguyen T-T, Dang X-B, Van A-L. Machine learning models-based optimization of burnishing operation in terms of power efficiency and surface properties. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2025; 0 (0). doi:10.1177/09544054251383682.
9. I. Aftanaziv, L. Shevchuk, O. Strogan, L. Strutynska, and I. Strogan, Increasing the durability of cylindrical parts of wheelcarms of railway, *Mech. Adv. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 136–145, Jun. 2021.
10. Dudnikov, A., Dudnikov, I., Kelemesh, A., & Gorbenko, O. (2019). Improving the technology of part machining by surface plastic deformation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (102)), 26–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183541>.
11. I. В. Віштак, М. М. Кудратов, «Аналіз способів зміцнення поверхневого шару деталей газових підшипників», *Вісник ВПІ*, вип. 2, с. 171–178, квіт. 2025.
12. Гагалюк А. В. Підвищення якості оброблення циліндричних поверхонь деталей машин з використанням спорядження з передавально-підсилюючими елементами. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.02.08 – технологія машинобудування / А.В. Гагалюк— Тернопіль, 2011. — 22 с.
13. Dyl, T., Starosta, R., Szala, M. Influence of Slide Burnishing on Technological and Surface Properties of Cylindrical Surfaces, *Materials*, 2024, volume 17, 14, p. 3403.
14. Zhou, Z. and Peng, X. and Li, Y. A Review of Surface Burnishing Techniques for Improving Surface Integrity, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, volume 113, p. 1-25.
15. Várdai, Róbert, et al. Impact modification of fiber reinforced polypropylene composites with flexible poly (ethylene terephthalate) fibers. *Polymer International*, 2021, 70.9: 1367-1375.

- 16.El-Tamimi, A. and El-Hossainy, T. Influence of Roller Burnishing Parameters on Surface Roughness and Hardness, *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, volume 242, pages 154-162.
- 17.Grzesik, W. Surface Integrity of Hardened Steels after Mechanical Burnishing, *Procedia CIRP*, 2018, volume 77, p. 376-379.
- 18.Sharma, P. and Singh, R., *Optimization of Roller Burnishing Parameters for Cylindrical Parts, Materials Today: Proceedings, 2020, volume 26, p. 2865—2870*
- 19.Aftanaziv, I. and Strogan, O. Increasing Durability of Cylindrical Machine Parts by Surface Plastic Deformation, *Mechanics and Advanced Technologies*, 2021, volume 93, 3, p. 45-52.
- 20.Mishra, S. and Sahoo, P., Residual Stress Analysis in Roller Burnished Steel Shafts, *Measurement*, 2019, volume 146, p. 69-78.
- 21.Dudek, A. and Madej, M., Tribological Properties of Burnished Cylindrical Surfaces, *Tribology International*, 2022, volume 169, p. 107450.
- 22.Kumar, D. and Schneider, Y. Deep Rolling and Burnishing of Cylindrical Components, *CIRP Annals*, 2016, volume 65, 1, p. 557-560.
- 23.Firooz, Soheil; Steinmann, Paul; Javili, Ali. Homogenization of composites with extended general interfaces: comprehensive review and unified modeling. *Applied Mechanics Reviews*, 2021, 73.4: 040802.
- 24.Lohar, D. and Patel, M. Effect of Roller Burnishing on Microhardness of Steel Shafts, *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, volume 58, p. 1044-1052.
- 25.Klocke, F. and Brinksmeier, E. Surface Layer Modification by Mechanical Finishing, *Production Engineering*, 2019, volume 13, p. 239-247.
- 26.Patel, V. and Deshpande, A. Surface Roughness Improvement of Cylindrical Parts Using Burnishing, *Procedia Manufacturing*, 2018, volume 20, p. 254-259.
- 27.Ali, M. and Hassan, A. Reverse Burnishing Technique for Enhanced Surface Integrity of Shafts, *Surface and Coatings Technology*, 2024, volume 475, p. 129984.

28. Wang, X.; Gao, Z.; Cheng, D.; Deng, X.; Yu, T.; Qin, Z.; Chu, F. Research on a Honeycomb Structure for Pyroshock Isolation at the Spacecraft–Rocket Interface. *Aerospace* 2024, *11*, 756. <https://doi.org/10.3390/aerospace11090756>.
29. Grewal, S. and Kaur, M. Machine Learning Based Prediction of Burnishing Outcomes, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2022, volume 33, p. 987--1001.
30. Madej, M. Fatigue Strength Improvement of Steel Shafts by Burnishing, *Materials Science*, 2020, volume 55, p. 689-696.
31. Singh, H. Optimization of Burnishing Parameters Using Taguchi Method, *Measurement*, 2017, volume 101, p. 1-9.
32. Szala, M. Wear Resistance of Burnished Cylindrical Surfaces, *Materials*, 2023, volume 16, p. 512.
33. Wang, Shuai, et al. Strength-ductility synergy of in-situ TiB/Ti6Al4V composites with tailored hierarchical TiB distributions. *Ceramics International*, 2022, *48.23*: 35069-35075.
34. Rahman, M. Burnishing of Hardened Steel Components, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, volume 27, p. 4060-4067.
35. Zhang, Y. Residual Stress Distribution in Burnished Cylindrical Parts, *Materials Characterization*, 2021, volume 176, p. 111112.
36. Wang, J., Xiong, S., Wen, Y., & Wang, Y. (2023). Numerical simulation of actuation processes and decoupling pyroshock of a pressure cartridge-type pin puller. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, *42*(3), 1363-1378. <https://doi.org/10.1177/14613484231161422>.
37. Hassan, A. Burnishing Process and Its Impact on Surface Integrity, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2015, volume 137, p. 041010.
38. Wang, X.; Liu, W.; Ding, J.; Sun, Y.; Dang, Y. Pyroshock Response Prediction of Spacecraft Structure in Wide Frequency Domain Based on Acceleration FRF. *Aerospace* 2022, *9*, 54.

- 39.Li, Shengpeng, et al. Effect of Composite-Region Fraction and TiCp Content on the Mechanical Properties of H13 Steel Matrix Composites with Honeycomb Architecture. *Materials*, 2025, 18.5: 1128.
- 40.Morales, J. Surface Plastic Deformation Techniques for Shafts, *Manufacturing Review*, 2020, volume 7, p. 18.
- 41.Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад.: В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А
(обов'язковий)

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗМІЦНЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ
МАШИН РЕВЕРСИВНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ГМ

д. т. н., професор Леонід ПОЛІЩУК,

(підпис)

« ____ » _____ 2025

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

Підвищення ефективності зміцнення циліндричних деталей машин
реверсивним вигладжуванням

Розробив студент

Спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

Михайло ВЛАСОВ

« ____ » _____ 2025 р.

Керівник: д. т. н., професор

Роман СИВАК

1 Найменування і область застосування

Найменування – циліндричні зовнішні поверхні, найпоширеніший об’єкт вигладжування для зміцнення - шийки валів; осі; пальці; штоки; плунжери; цапфи.

2 Підстава для виконання роботи

Підставою для розробки даної МКР є індивідуальне завдання на магістерську кваліфікаційну роботу та наказ ректора по ВНТУ про закріплення тем.

3 Мета і призначення дослідження

Мета: підвищення ефективності зміцнення циліндричних деталей машин шляхом інтенсифікації напружено-деформованого стану поверхневого шару реверсивним вигладжуванням.

Призначення розробки – методики можуть бути використані при розробленні технологія зміцнення реверсивним вигладжуванням, що забезпечує підвищення якості циліндричних деталей типу валів, осей; для визначення раціональних режимів обробки для отримання мінімальної шорсткості поверхні та максимальних механічних властивостей зміцненого шару; для проектування та виготовлення пристрою для реверсивного вигладжування циліндричних деталей типу валів, осей; для розробки нових конструкції інших пристроїв для реверсивного руху робочого інструменту.

4 Джерела розробки

Список використаних джерел розробки:

4.1 Dyl, T.; Rydz, D.; Szarek, A.; Stradomski, G.; Fik, J.; Opydo, M. The Influence of Slide Burnishing on the Technological Quality of X2CrNiMo17-12-2 Steel. *Materials* 2024, 17, 3403. <https://doi.org/10.3390/ma17143403>.

4.2 Duncheva, G.; Maximov, J.; Anchev, A.; Dunchev, V.; Anastasov, K.; Argirov, Y. Effect of Roller Burnishing and Slide Roller Burnishing on Fatigue Strength of

AISI 304 Steel: Comparative Analysis. *Metals* 2024, 14, 710.

<https://doi.org/10.3390/met14060710>.

4.3 J. Kalisz, K. Żak, S. Wojciechowski, M.K. Gupta, G.M. Krolczyk, Technological and tribological aspects of milling-burnishing process of complex surfaces. *Tribology International*, 2021, Volume 155, 106770. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106770>.

4.4 Dataniya, Jayprakash & Patel, Utkarshkumar & Ashwinkumar, V & Patel, & Pranami, Nitin & Basia, Pradhumansinh & Goswami, Jigishkumar & Chandra, Dheeraj & Solanki, Amitkumar. (2024). Advanced Techniques in Burnishing Tools for Surface Finish Improvement: A Comprehensive Review. *Nanotechnology Perceptions*. 20. 1465-1474. 10.62441/nano-ntp.vi.1806.

4.5 Javanshour, F., et al. Modulating impact resistance of flax epoxy composites with thermoplastic interfacial toughening. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 150: 106628.

5 Вихідні дані для розробки:

1	Матеріал	сталь 45
2	Коефіцієнт Пуасона	0,3
3	Границя текучості, МПа	360
4	Модуль пружності, МПа	$2 \cdot 10^5$
5	Модуль зміцнення, МПа	$1,45 \cdot 10^3$
6	Коефіцієнт тертя	0,1
7	Температура, °С	22
8	Діаметр ролика, мм	30
9	Приведений радіус ролика, мм	5

5.1 Технічні вимоги:

- квалітет точності після вигладжування - IT6 – IT7;
- допуск на діаметр для Ø30 мм - $\pm 0,010 \dots \pm 0,016$ мм;
- відхилення від круглості - $\leq 0,003 - 0,005$ мм;

- відхилення від циліндричності - $\leq 0,005-0,008$ мм;
- прямолінійність твірної - $\leq 0,004$ мм на 100 мм довжини;
- шорсткість після вигладжування - $Ra = 0,16...0,32$ мкм;
- мікротвердість поверхні - $HV_{0.05} = 240...280$;
- глибина наклепу - $0,15...0,40$ мм;
- максимальні залишкові напруження - $-200...-400$ МПа у поверхневому шарі;
- підвищення втомної міцності - на 30–60 %;
- зносостійкість - збільшення ресурсу у 1,5–2,5 рази.

5.2 Вимоги до надійності: довговічність – не менше 10 тис. год; безвідмовність – напрацювання на відмову – 1 тис. год; збереженість – повинна забезпечуватися працездатність деталі в режимі очікування, роботи, консервації; ремонтпридатність – деталь повинна відповідати вимогам експлуатації.

5.3 Вимоги до технологічності розробки, виробництва і експлуатації – повинна гарантувати надійну і безпечну роботу обладнання, витримувати інтенсивні динамічні навантаження.

5.4 Вимоги до рівня уніфікації і стандартизації, вимоги до використання стандартних, уніфікованих і запозичених складальних одиниць і деталей при розробці, показники рівня уніфікації – по можливості під час проектування оснащення для реверсивного вигладжування використовувати уніфіковані деталі, стандартні вироби та загальнодоступні матеріали і речовини.

5.5 Вимоги безпеки життєдіяльності – забезпечується безпека під час монтажу і ремонту. Допустимі рівні вібраційних і шумових навантажень, допустимі випаровування робочої рідини у відповідності з санітарними нормами. Повинні бути розроблені заходи, що забезпечують технічну безпеку під час монтажу, експлуатації і ремонту пристрою.

5.6 Конструкція повинна відповідати естетичним і ергономічним вимогам, повинна бути зручною в обслуговуванні та управлінні.

5.7 Матеріали, що використовуються для деталей слід вибирати відповідно до рекомендацій.

5.8 Умови експлуатації, вимоги до технічного обслуговування і ремонту:

–умови експлуатації, при яких повинно забезпечуватися використання продукції з заданими технічними показниками – продукція призначена для використання у середньоширотних кліматичних умовах;

–час підготовки продукції до використання після транспортування і зберігання – 10 год;

–вид обслуговування - періодичний;

–періодичність і орієнтовна трудомісткість технічного обслуговування і ремонту – 2 дні (один раз в три місяці);

5.9 Вимоги по транспортуванню і збереженню

–можливість транспортування на будь-якому виді транспортних засобів;

–захист від ударів під час завантаження і розвантаження;

–зберігання на складі готової продукції;

–зберігання у законсервованому вигляді;

- складування на стелажах.

6 Економічні показники:

- орієнтований термін окупності витрат на розробку – 1,3 роки,

- освоєння виробництва продукції – 1 місяць,

- економічна перевага розробленої продукції у порівнянні з кращими зразками – прогнозований прибуток 3 715 976,4 грн. за три роки.

7 Виконавці НДР: студент спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» Михайло ВЛАСОВ

8 Етапи НДР і терміни їх виконання:

- теоретичне дослідження проблематики теми МКР;

- патентно-інформаційний огляд по темі МКР

- підвищення ефективності зміцнення циліндричних деталей машин шляхом інтенсифікації напружено-деформованого стану поверхневого шару реверсивним вигладжуванням;
- проектні та перевірочні розрахунки елементів обладнання;
- техніко-економічне обґрунтування МКР;
- висновки.
- оформлення текстових документацій та ілюстративних матеріалів для захисту МКР.

9 Порядок контролю і прийомки

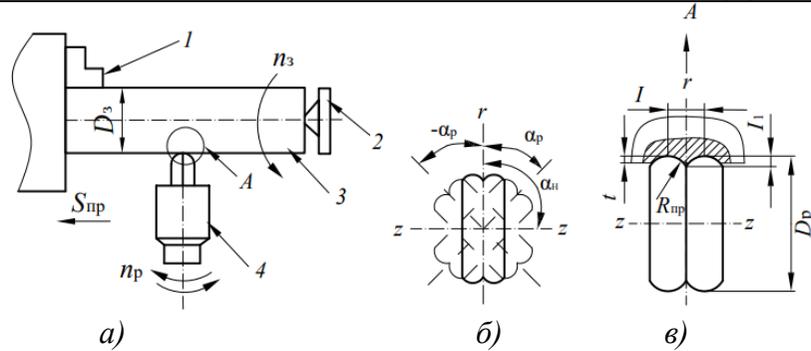
- попередній захист проекту
- захист проекту перед МКР

ДОДАТОК Б
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗМІЦНЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ
МАШИН РЕВЕРСИВНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО – ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗМІЩЕНОГО ШАРУ ПРИ РЕВЕРСИВНОМУ ВИГЛАДЖУВАННІ



1 – трикулачковий патрон; 2 – задня бабка; 3 – заготовка; 4 – робочий інструмент
 Рисунок 1 – Схема реверсивного вигладжування дворадіусним роликом (а), схема реверсивного обертання робочого інструменту (б) та робочої зони (в)

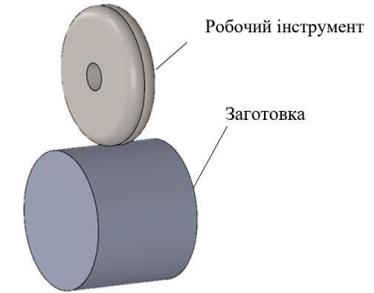
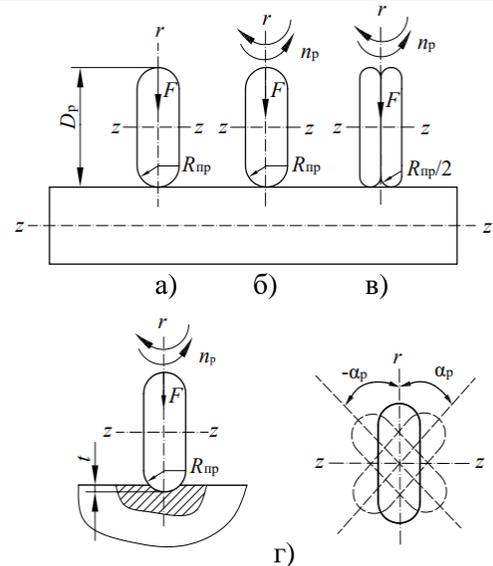
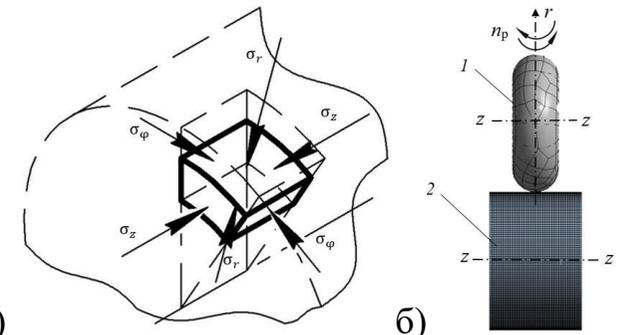


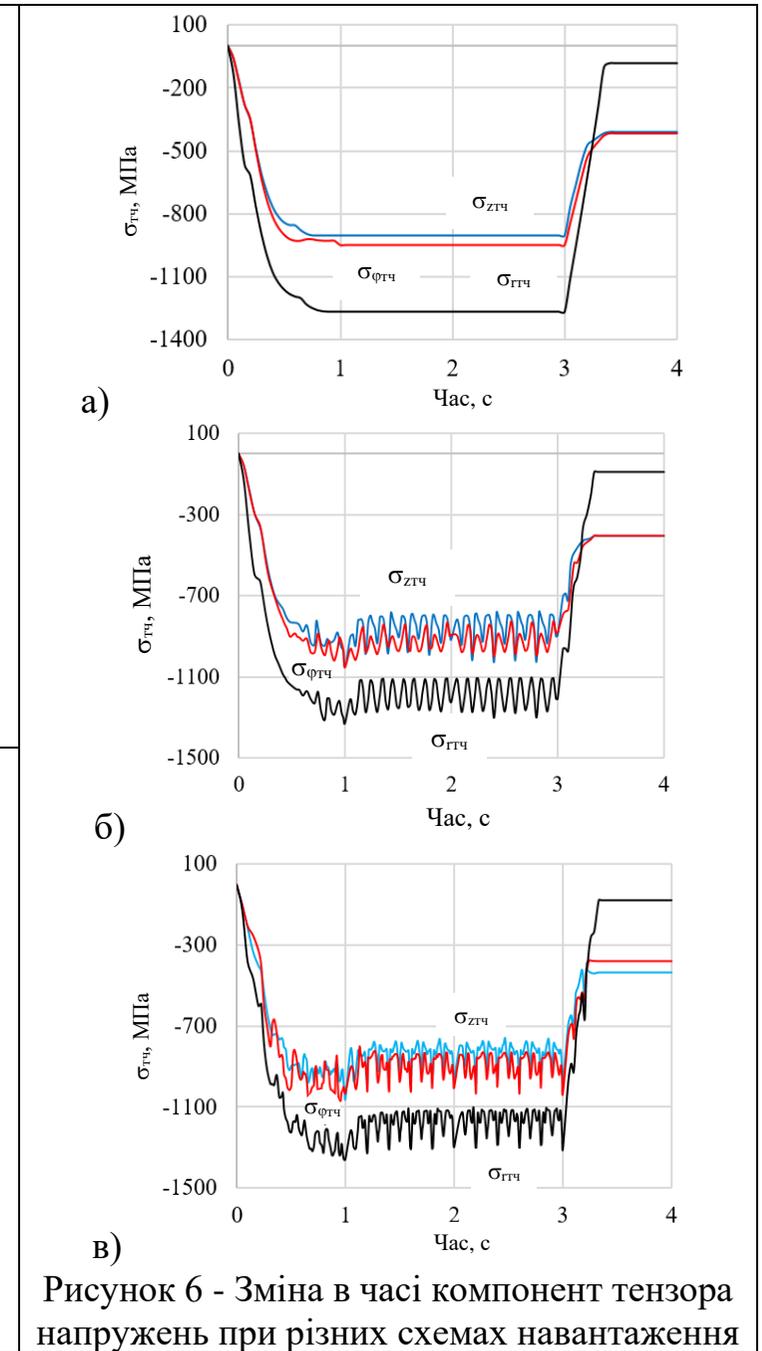
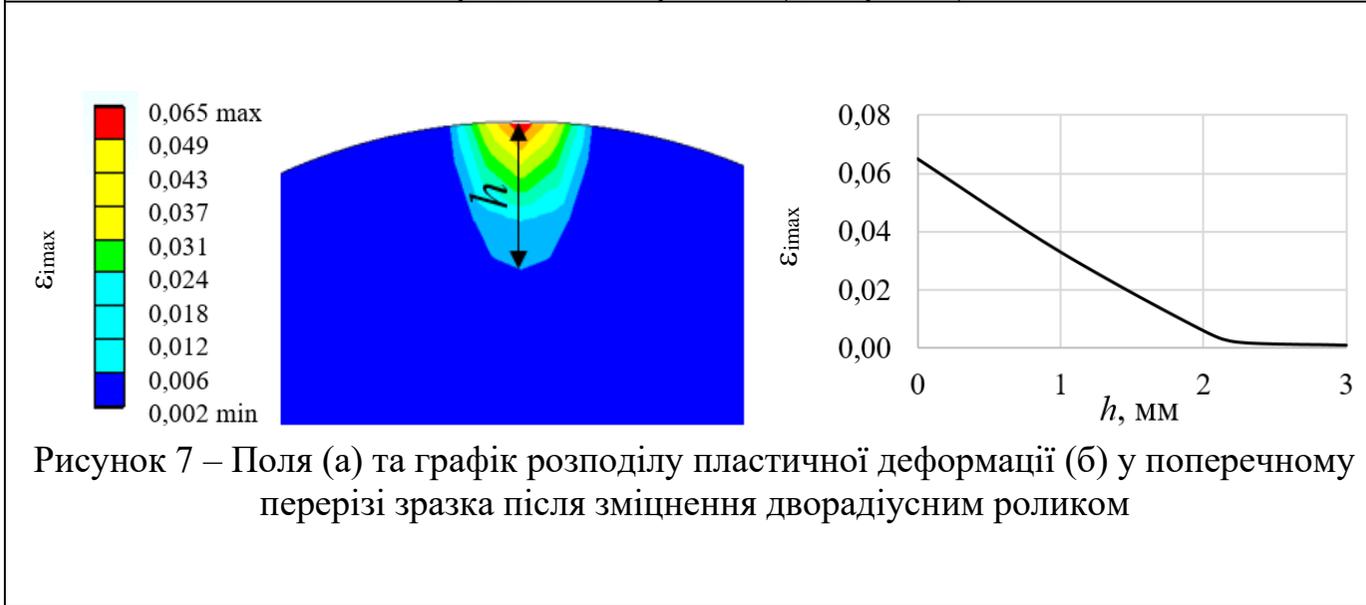
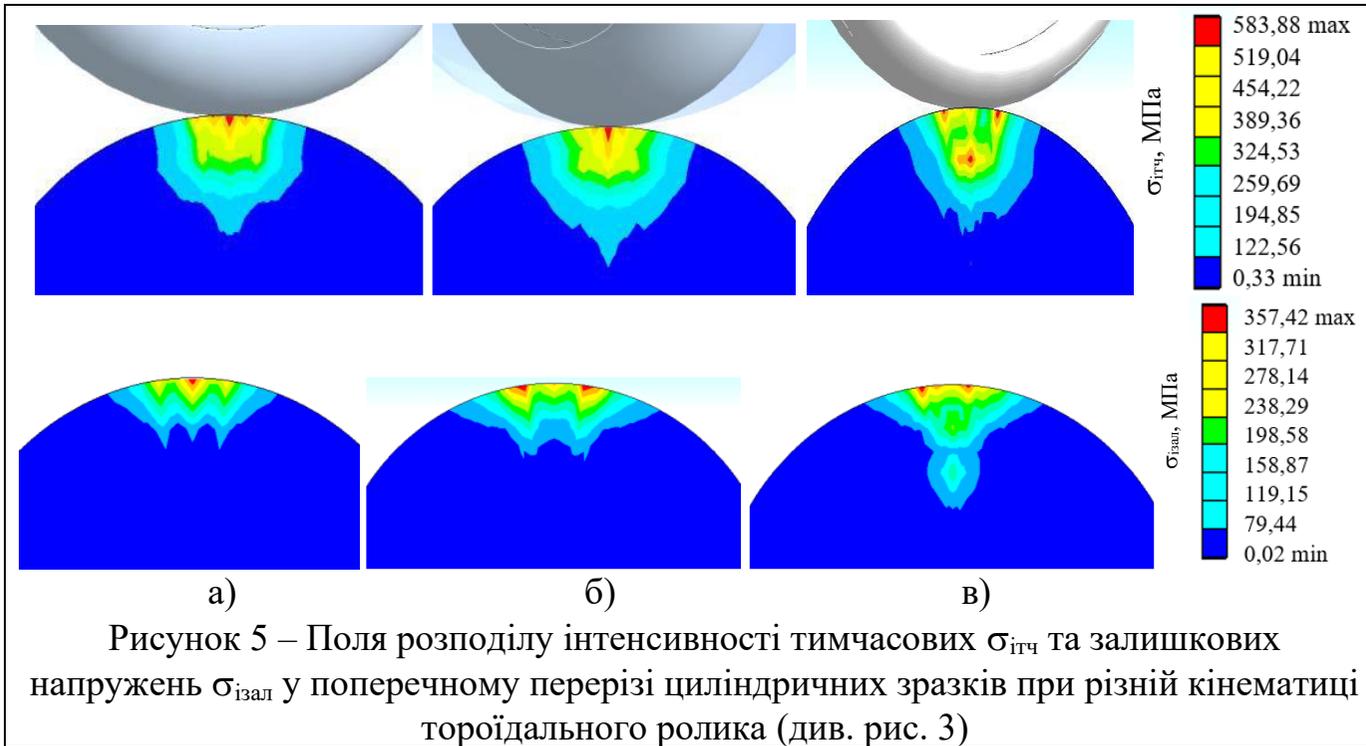
Рисунок 2 – Геометрична модель процесу реверсивного вигладжування створена у спеціалізованій програмній системі

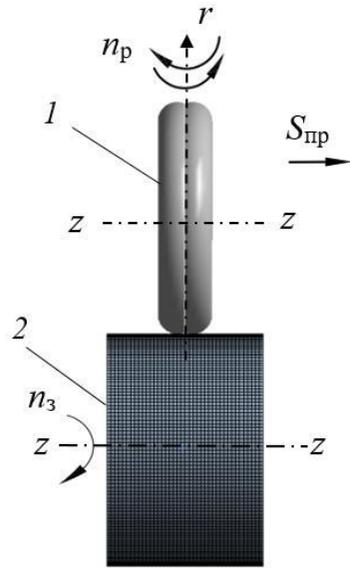


а – ролик без обертання; б - однорадіусний ролик з реверсивним обертанням щодо осі r; в – дворадіусний ролик з реверсивним обертанням щодо осі r; г - схема реверсивного обертання тороїдального ролика
 Рисунок 3 – Кінематичні схеми навантаження тороїдального ролика за різних умов контакту з циліндричною поверхнею



а) 1 – однорадіусний ролик; 2 – циліндричний зразок
 Рисунок 4 – Головні компоненти тензора напружень в циліндричній системі координат (а) та приклад кінцево-елементної моделі при навантаженні циліндричного зразка однорадіусним роликом (б)





1 – дворадіусний ролик; 2 – зразок

Рисунок 8 – Кінцево-елементна модель реверсивного вигладжування

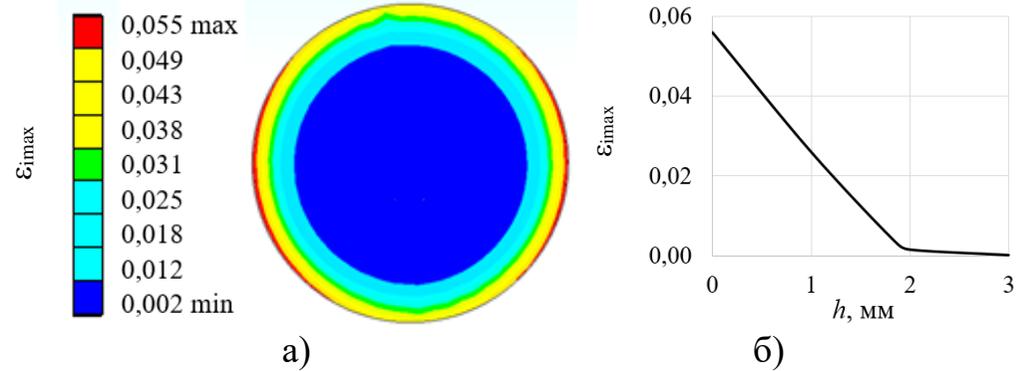
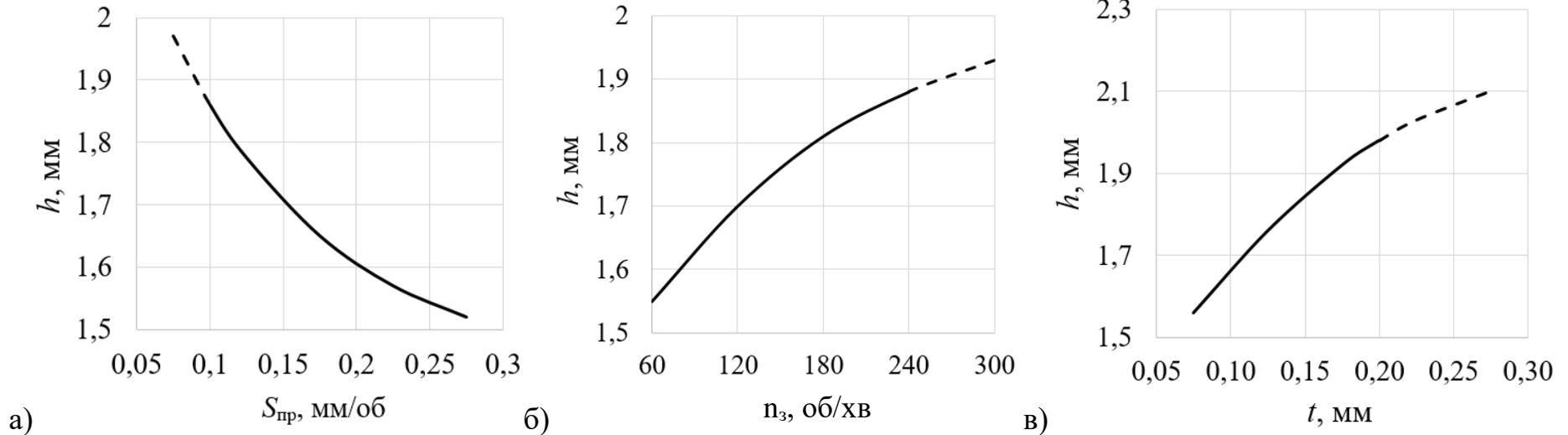
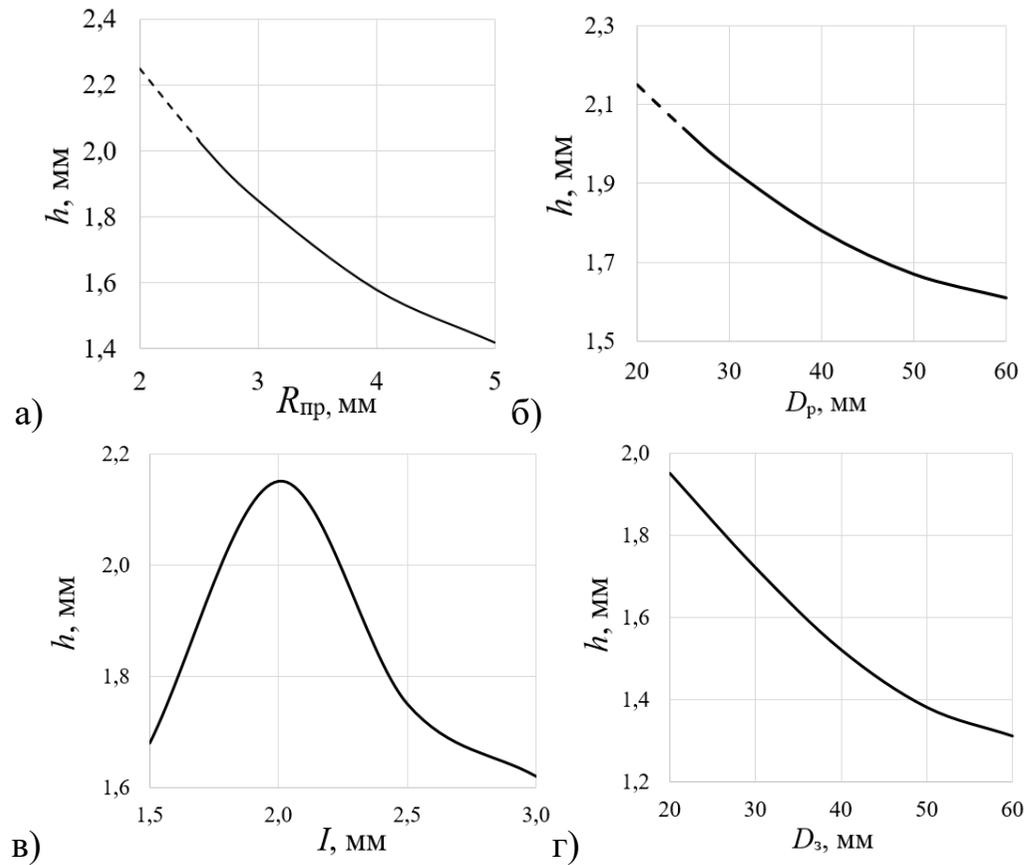


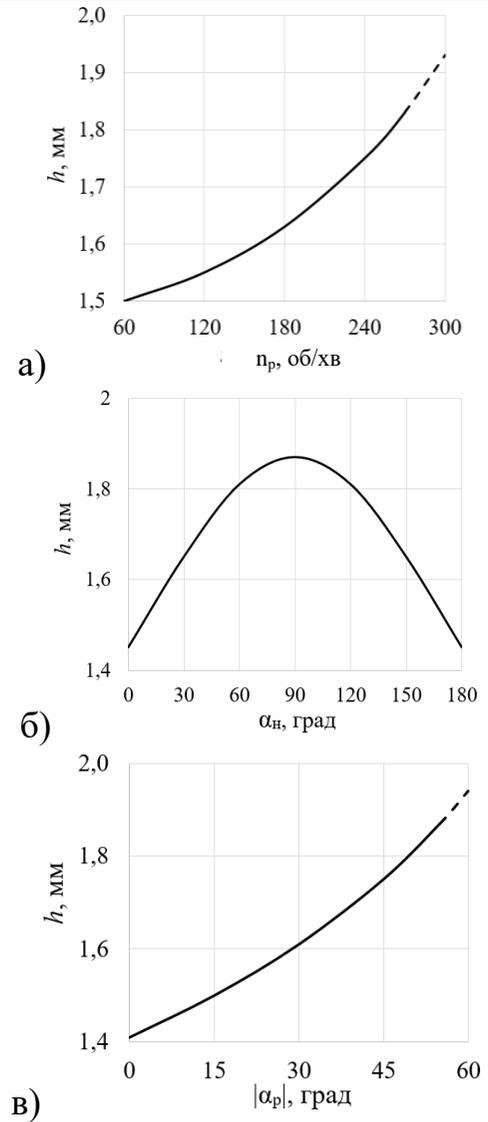
Рисунок 9 – Поля розподілу пластичної деформації у поперечному перерізі зразка (а) та крива розподілу відносної деформації (б) після реверсивного вигладжування дворадіусним роликом (при $S_{\text{пр}} = 0,1$ мм/об, $n_3 = 120$ хв⁻¹, $t = 0,15$ мм)



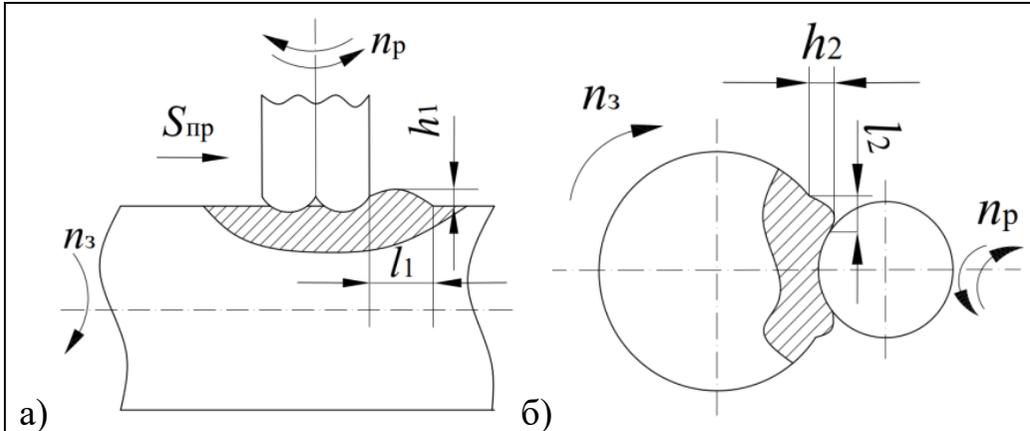
а – поздовжня подача; б - частота обертання заготовки; в - величина радіального натягу
Рисунок 10 – Вплив основних параметрів реверсивного вигладжування на глибину пластичного шару



а – профільний радіус; б – діаметр ролика; в – відстань між вершинами ролика; г – діаметр заготовки
 Рисунок 11 – Вплив геометрії робочого інструменту та діаметра заготовки на глибину пластичного шару

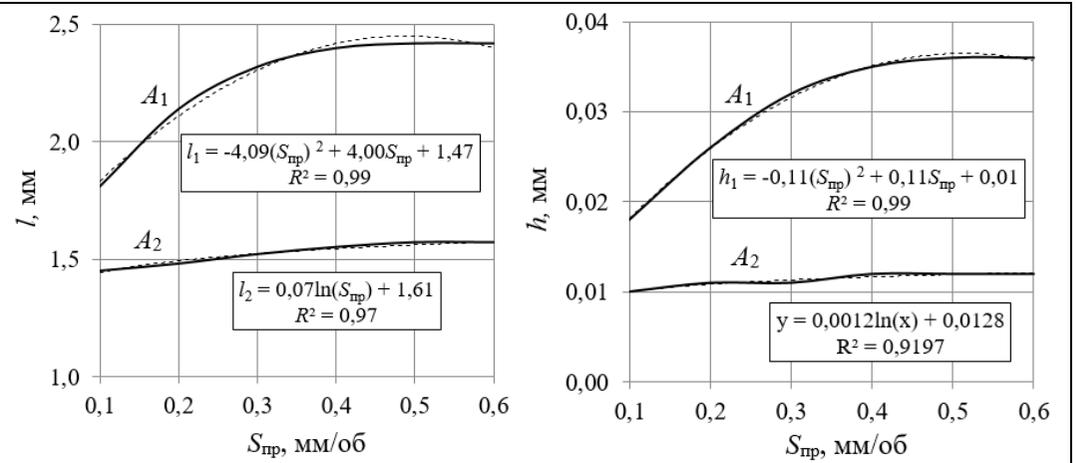


а – реверсивна частота обертання робочого інструменту; б – початковий кут установки робочого інструменту; в - величина кута реверсивного обертання робочого інструменту
 Рисунок 12 – Вплив кінематичних параметрів робочого інструменту на глибину пластичного шару



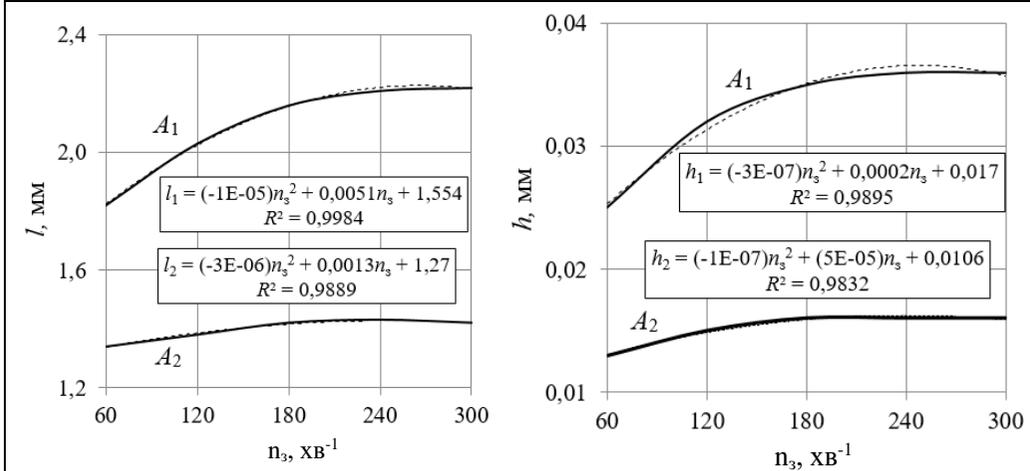
а) - у напрямку поздовжньої подачі A_1 ; б) - у напрямку головного руху A_2

Рисунок 13 – Форма пружнопластичних хвиль при реверсивному вигладжуванні



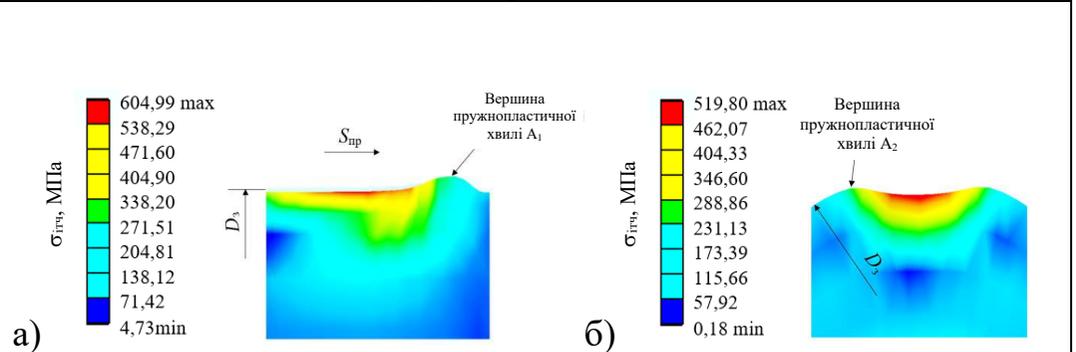
A_1 – у напрямку поздовжньої подачі; A_2 – у напрямку головного руху

Рисунок 14 – Вплив поздовжньої подачі робочого інструменту розміри хвиль



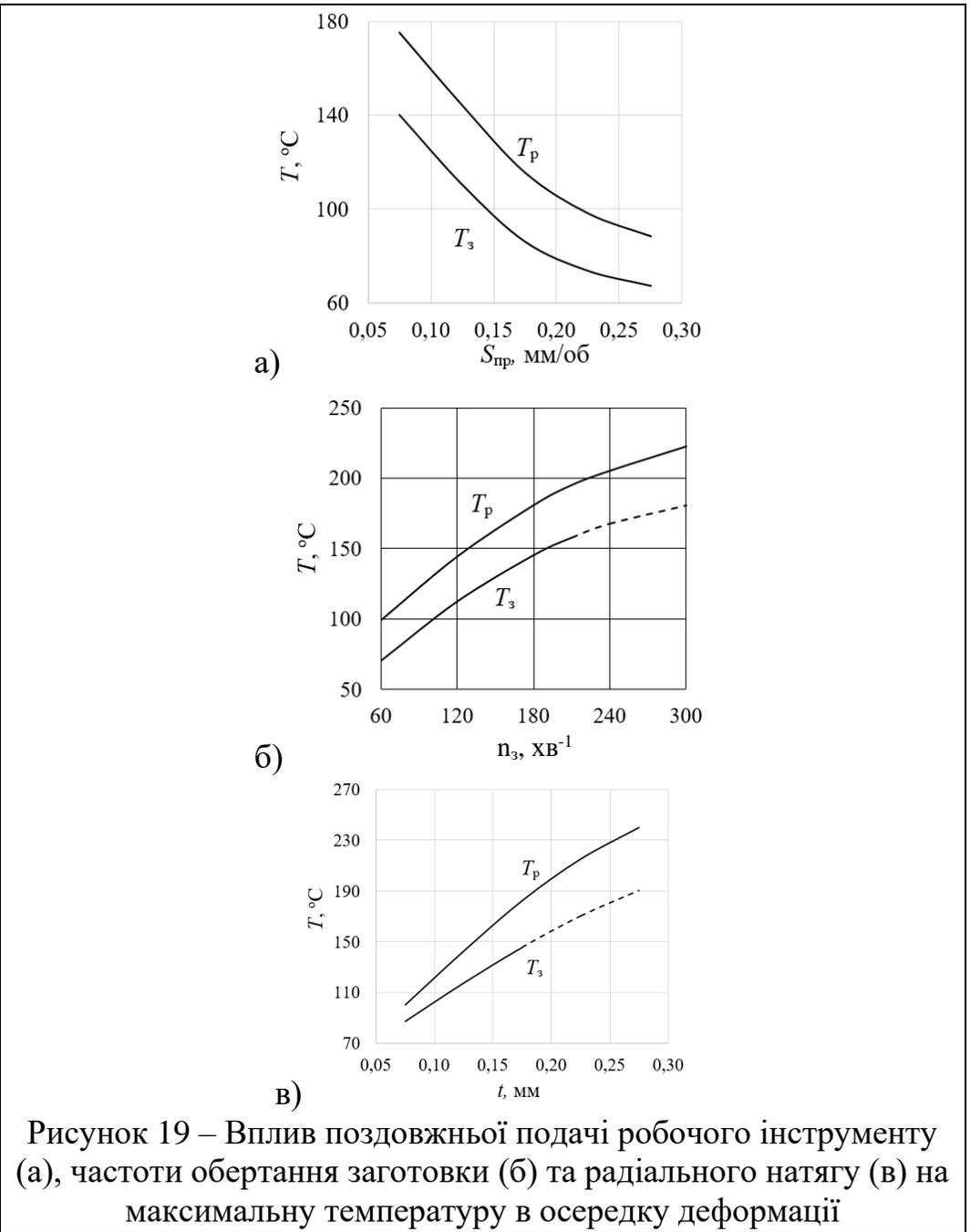
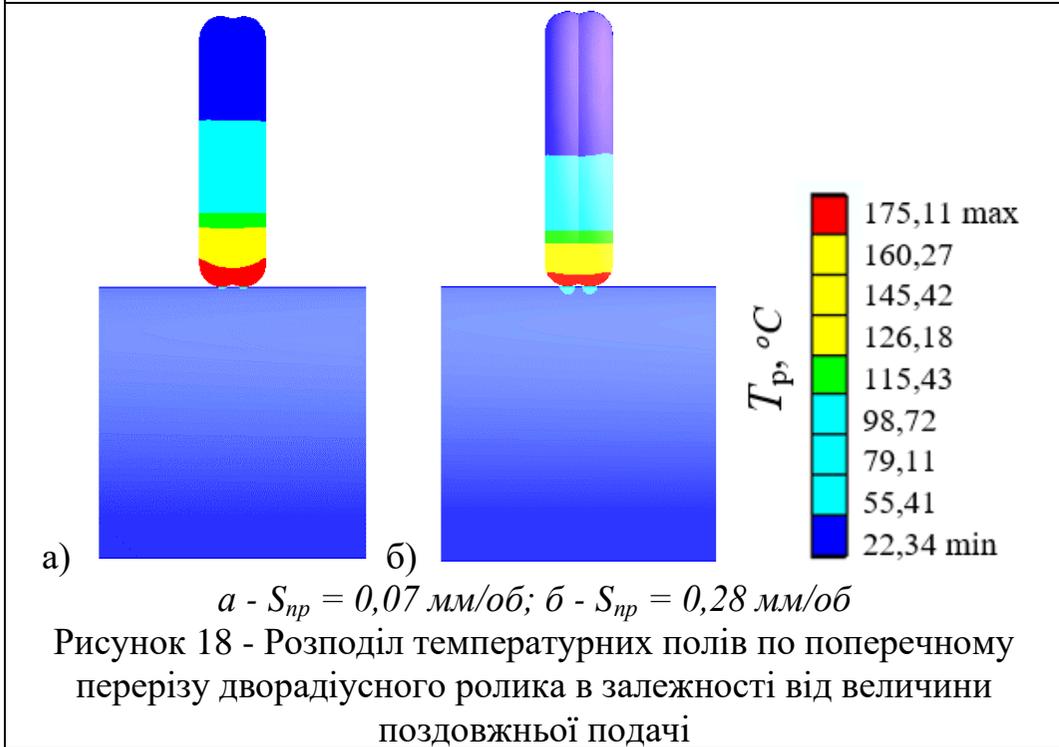
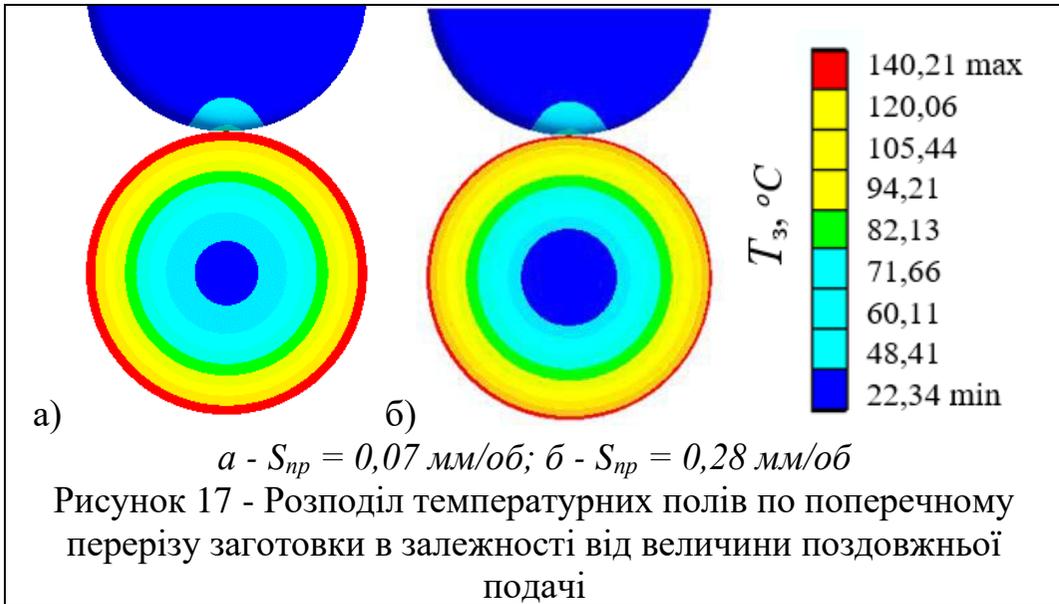
A_1 – у напрямі поздовжньої подачі; A_2 - у напрямку головного руху

Рисунок 15 – Вплив частоти обертання заготовки на розмір пружнопластичних хвиль

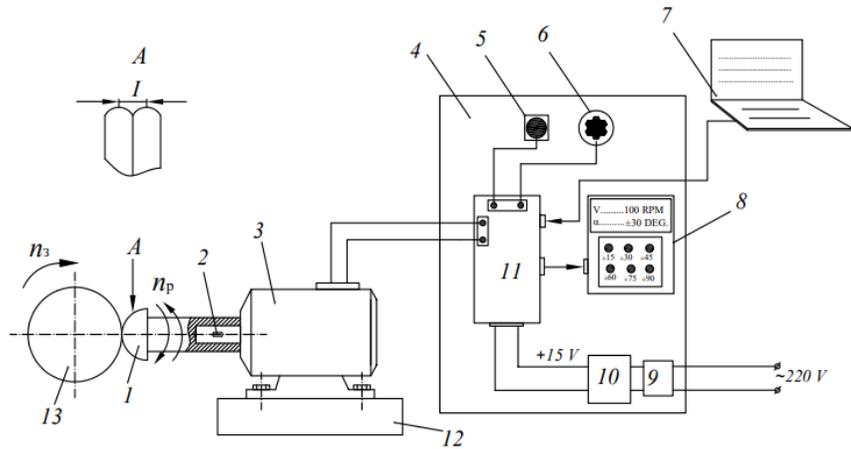


а) - у напрямку поздовжньої подачі A_1 ; б) - у напрямку головного руху A_2

Рисунок 16 – Розподіл інтенсивності напруження в пружнопластичній хвилі (при радіальному натягу $t = 0,4$ мм)



ОЦІНКА ЯКОСТІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ЗМІЦНЕНИХ РЕВЕРСИВНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ



1 - робочий інструмент; 2 - шпонка; 3 – кроковий електродвигун; 4 – блок управління; 5 – кнопка запуску; 6 – регулятор швидкості реверсу; 7 – персональний комп'ютер; 8 - екран режимів обробки; 9 – автоматичний вимикач; 10 – трансформатор; 11 - програмований контролер; 12 – основа, 13 – заготовка

Рисунок 20 – Принципова схема пристрою створення реверсивного кругового руху робочого інструмента

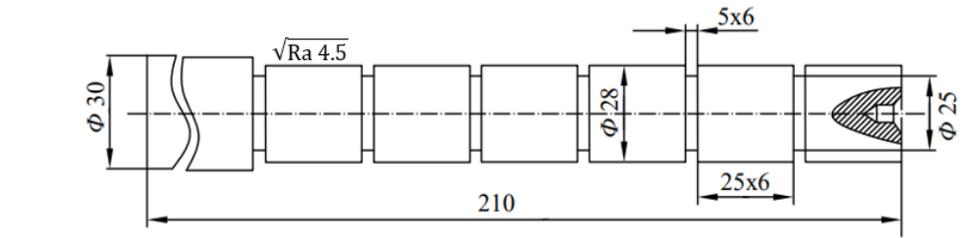


Рисунок 21 – Зразок для експериментальної оцінки якості поверхневого шару деталей після реверсивного вигладжування

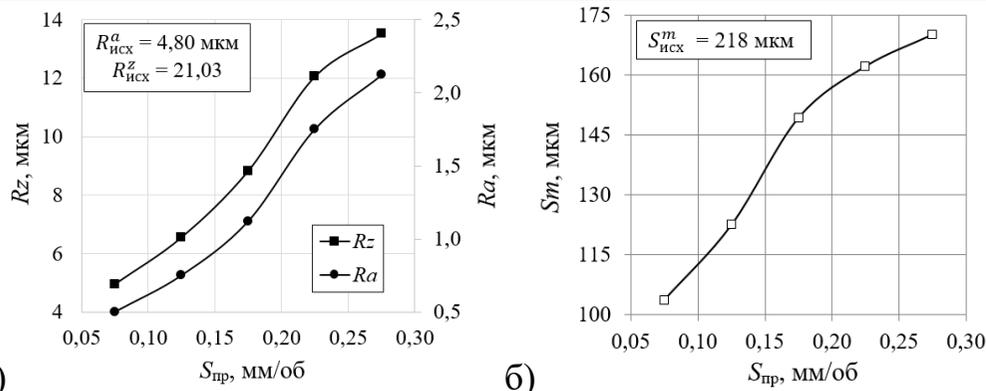


Рисунок 22 – Вплив поздовжньої подачі на параметри шорсткості Ra , Rz (а) та Sm (б) при зміцненні деталей реверсивним вигладжуванням

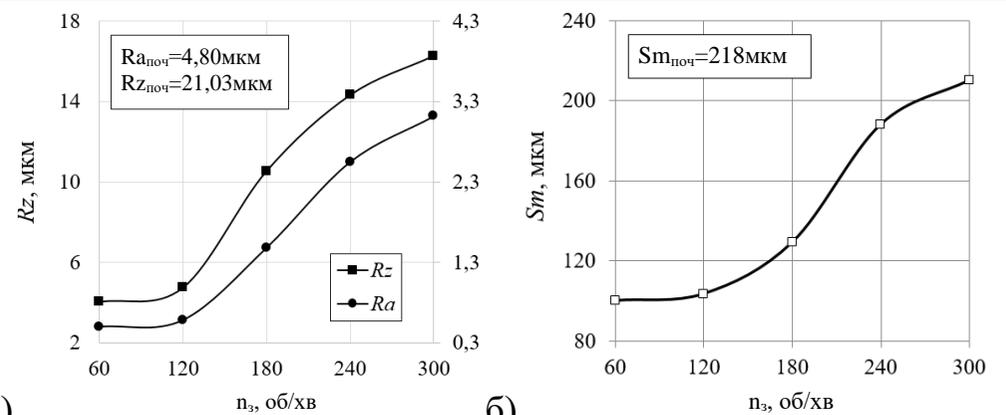
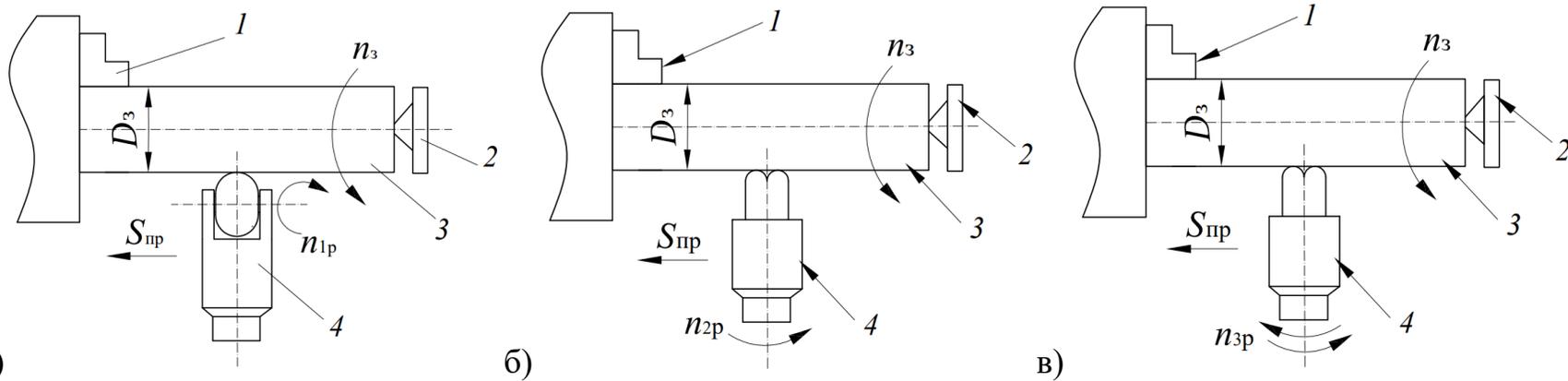


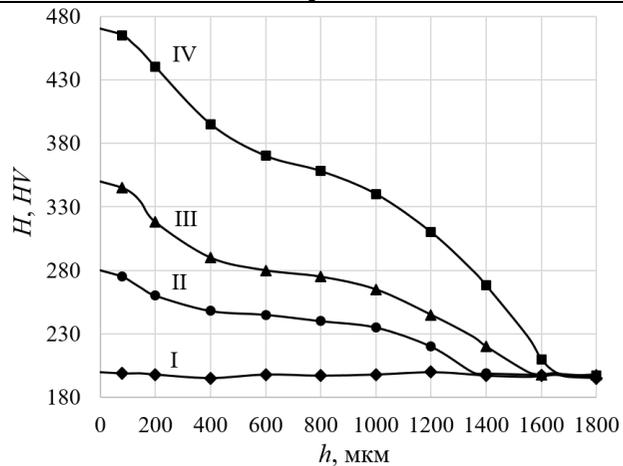
Рисунок 23 – Вплив частоти обертання заготовки на параметри шорсткості Ra , Rz (а) та Sm (б) при зміцненні деталей реверсивним вигладжуванням

ПОРІВНЯННЯ СПОСОБІВ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ, ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗМІЦНЕНИХ ДЕТАЛЕЙ



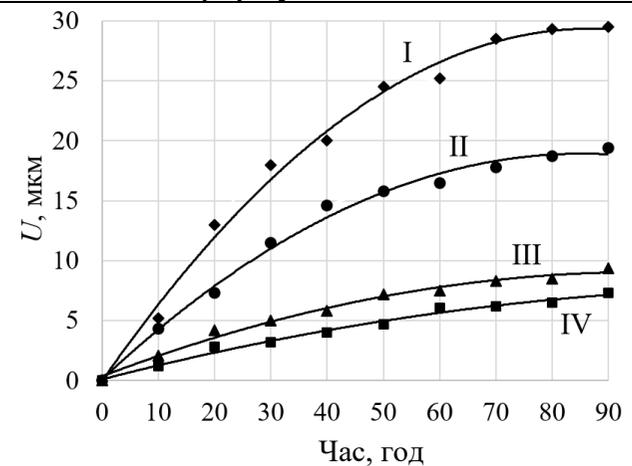
а – обкочування торіодальним роликом; б - обкочування дворадіусним роликом, що обертається; в – реверсивне вигладжування; 1 – трикулачковий патрон; 2 – задня бабка; 3 – заготовка; 4 – робочий інструмент

Рисунок 24 – Кінематичні схеми поверхневого пластичного деформування



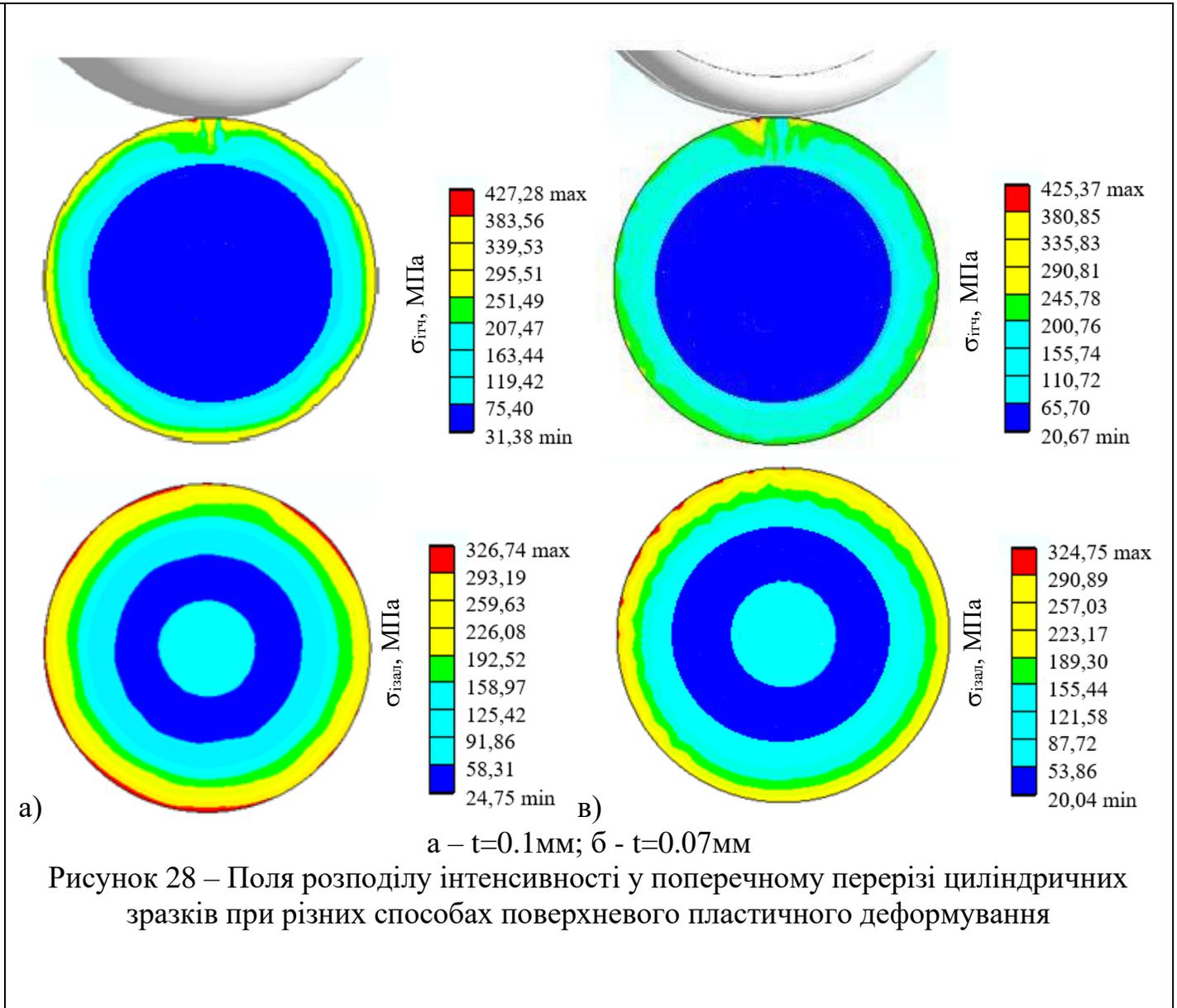
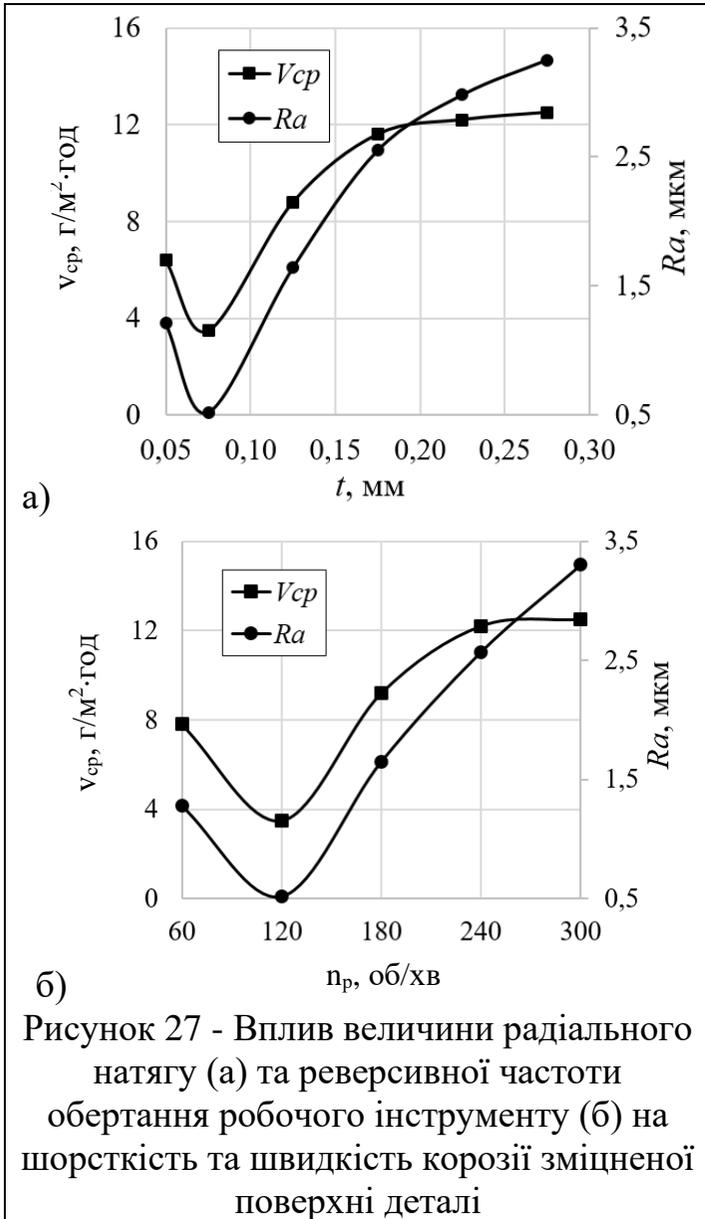
I - вихідна мікротвердість; II - обкочування торіодальним роликом; III - обкочування дворадіусним роликом, що обертається; IV - реверсивне вигладжування

Рисунок 25 - Розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару зміцнених деталей в залежності від способів поверхневого пластичного деформування



I - незміцнений зразок; II – обкочування торіодальним роликом; III – обкочування дворадіусним роликом, що обертається; IV – реверсивне вигладжування

Рисунок 26 - Вплив способів поверхневого пластичного деформування на корозійно-механічне зношування зміцнених деталей



ВИСНОВКИ

1. Запропоновано новий спосіб поверхневого пластичного деформування зовнішніх поверхонь тіл обертання при використанні деформуючого інструменту з реверсивною круговою кінематикою робочого руху, що забезпечує збільшення значень механічних характеристик зміцнюваного шару з підвищенням інтенсивності напруженого стану в осередку деформації та залишкових стискаючих напружень у поверхневому шарі деталей машин.

2. На основі методу кінцевих елементів з використанням програмного комплексу розроблено розрахункову динамічну модель процесу поверхневого пластичного деформування для різної кінематики робочого інструменту.

3. Геометрія робочого інструменту значно впливає на напружено-деформований стан і глибину пластичної деформації циліндричних деталей при реверсивному вигладжуванні.

4. На основі комп'ютерного моделювання встановлено критичне значення температури в осередку деформації для деталей зі сталі 45 (за даних умов обробки $T_{кр} = 155^{\circ}\text{C}$), перевищення якої призводить до зниження максимальної інтенсивності тимчасових і залишкових напружень.

5. Експериментальними результатами встановлено, що після реверсивного вигладжування в поверхневому шарі деталей формуються досить великі стискаючі залишкові напруження ($\sigma_{зал} \sim 340 \div 345$ МПа) в порівнянні з іншими способами поверхневого пластичного деформування.

6. Реверсивне вигладжування сприяє підвищенню не тільки мікротвердості, але і глибини наклепу поверхневого шару циліндричних деталей, при цьому твердість і мікротвердість деталей підвищуються у середньому на 12 % і 45 % порівняно з величиною вихідної твердості і мікротвердості.

7. Спосіб реверсивного вигладжування значно знижує мікрогеометричні параметри поверхні циліндричних деталей, при цьому параметри шорсткості R_a і R_z зменшуються в 8,3 і 4,4 рази, висота W_z і крок S_w нерівності поверхні зменшуються на 64% і 47%, відповідно відхилення від круглості поверхні.

8. В результаті досліджень експлуатаційних показників деталей, зміцнених реверсивним вигладжуванням, встановлено, що в порівнянні з обкаткою тороїдальним роликком зносостійкість підвищується в 3,1 рази, швидкість корозії знижується на 47%, згинальна жорсткість підвищується на 47,5%.

9. Результати здійсненого технологічного аудиту вказують на високий рівень комерційного потенціалу. У порівнянні з аналогічним виробом виявлено, що нова розробка вищої якості і більш конкурентоспроможна, як з технічних, так і економічних позначень. Вкладені інвестиції в даний проект окупляться через 2,9 роки. Загальні витрати складають 1409955,66 грн.

ДОДАТОК В

ПРОТОКОЛ ПЕРЕРЕВІРКИ НА ПЛАГІАТ

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗМІЦНЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ
МАШИН РЕВЕРСИВНИМ ВИГЛАДЖУВАННЯМ

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Підвищення ефективності зміцнення циліндричних деталей машин реверсивним вигладжуванням

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ: кафедра галузевого машинобудування, ФМТ, гр. 1ГМ-24м
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 6,37 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

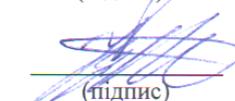
- Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

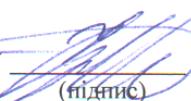
Експертна комісія:

Поліщук Л.К., зав. кафедри ГМ
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

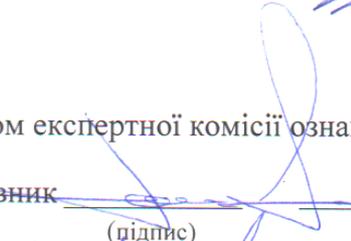
Шенфельд В.Й., доцент кафедри ГМ
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

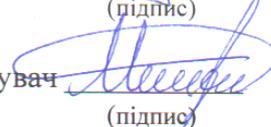
Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Шенфельд В.Й.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник 
(підпис)

Сивак Р.І., професор кафедри ГМ
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач 
(підпис)

Власов М.В.
(прізвище, ініціали)