

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»  
Кафедра Машинобудування, транспорту і зварювання

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

Підготовка фахівців машинобудівної галузі з розробки методики розрахунку  
міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості  
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 5 курсу, групи ДІТ-  
ПОМ23мг  
спеціальності: 015.34 «Професійна освіта  
(Машинобудування)»

(шифр і назва напрямку підготовки спеціальності)

 /Сергій ШИМКО

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Керівник  /Олександр НАЗАРКІН

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Рецензент  /Вікторія КНЯЗЄВА

(підпис)

(ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  /Олег ПОДОЛЯК

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Нормоконтроль  /Олег ПОДОЛЯК

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Секретар ЕК  /Валентина СКОРКІНА

(підпис)

(ім'я та прізвище)

Харків – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені В.Н. КАРАЗІНА

Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»  
Кафедра машинобудування, транспорту і зварювання  
Спеціальність 015.34 Професійна освіта (Машинобудування)  
Освітньо-професійна програма Професійна освіта (Машинобудування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МТіЗ

 О.Л. Подоляк

“ 12 ” 10 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу  
другого (магістерського) рівня вищої освіти  
студенту (ці) Сергію ШИМКО  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підготовка фахівців машинобудівної галузі з розробки методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості

затверджена наказом 4801-5/3345 від 12.10. 2024 р.

2. Термін здачі магістрантом закінченої роботи 5 грудня 2024р.

3. Вихідні дані до роботи: Зразки нерухомих з'єднань для обробки на верстатах токарної групи, нормативні документи, паспортні дані обладнання, каталоги, стандарти на засоби технічного оснащення..

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити): Вступ. Стан питання і постановка завдання дослідження. Розробка методики розрахунку жорсткості у контакті деталей двоякої кривизни розробка методики розрахунку жорсткості у пружнопластичного контакту шерхуватих поверхностей деталей близького твердості Методичний розділ. Висновки. Список джерел інформації. Додатки.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів: У вигляді презентації PowerPoint.

## 6. Консультант:

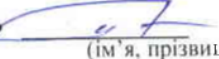
Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	
педагогічний	Лариса БАЧІЄВА			

7. Дата видачі завдання « 12 » 10 20 24 р.

Керівник  Олександр НАЗАРКІН  
(підпис) (ім'я, прізвище)Завдання прийняв до виконання  Сергій ШИМКО  
(підпис) (ім'я, прізвище)КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК  
виконання кваліфікаційної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1.	Вибір теми й обґрунтування проблеми дослідження. Визначення об'єкта, предмета, мети й завдань.		
2.	Складання плану роботи. Підбор літератури й інших джерел		
3.	Оформлення завдання проектування для затвердження теми кваліфікаційної роботи		
4.	Підготовка аналітичної частини		
5.	Підготовка теоретичної частини		
6.	Розробка дослідницької частини		
7.	Розробка методичного розділу		
8.	Підготовка графічного матеріалу		
9.	Доробка проекту по зауваженнях наукового керівника		
10.	Доробка проекту по зауваженнях консультантів		
11.	Оформлення кваліфікаційної роботи. Підготовка до захисту.		
12.	Захист кваліфікаційної роботи		

Здобувач вищої освіти

 Сергій ШИМКО  
(підпис) (ім'я, прізвище)Нормоконтроль  (підпис) (ім'я, прізвище)

Олег ПОДОЛЯК

Додаток 2 до Порядку проведення перевірки наукових праць, навчально-методичних видань та дипломних робіт (проектів) працівників та здобувачів вищої освіти на наявність запозичень з інших документів (нова редакція)

Введено в дію:

наказ ректора № 0204 -1/088 від 27.02.2020 р.

### Протокол контролю оригінальності дипломної роботи (проекту)

Підготовка фахівців машинобудівної галузі з розробки методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості

(назва роботи)

студента

ШИМКО Сергій Володимирович

(прізвище, ім'я та по батькові)

науковий керівник

Назаркін Олександр Анатолійович

(прізвище, ім'я та по батькові)

В результаті перевірки роботи в антиплагіатній інтернет-системі Strikeplagiarism.com встановлено наступні значення Коефіцієнтів Подібності

Коефіцієнт Подібності 1: 0,48,

Коефіцієнт Подібності 2: 0,00 ,

Сигнал „Тривога!":  – немає;  – є, кількість разів у тексті \_\_\_\_.

Вченою радою факультету (навчально-наукового інституту) затверджено наступні показники оригінальності (за значенням коефіцієнту K1):

не більше 20% – оригінальна робота,

від \_\_% до \_\_% – задовільно оригінальна робота,

від \_\_% до \_\_% – умовно оригінальна робота,

більше \_\_% – неоригінальна робота.

Відповідно до цього, робота може бути класифікована як:

оригінальна,

задовільно оригінальна,

умовно оригінальна,

неоригінальна.

#### Висновок:

робота може бути допущена до захисту,

необхідно провести розгляд Повного Звіту Подібності із залученням фахівців із тематики дипломної роботи (проекту).

#### Примітки Системного Оператора про виявлені запозичення:

---

---

---

Системний Оператор

(підпис)

Скоркін А.О.

(прізвище та ініціали)

26.11.24

(дата)

## ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1 Актуальність професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі	8
2 Стан питання та завдання дослідження.	16
3. Розробка методики розрахунку жорсткості у контакті деталей двоїх кривизни	24
4 Розробка методики розрахунку жорсткості пружопластичного контакту шерхуватих поверхностей деталей близької твердості	41
5.	51
Розділ 6 Розробка дидактичного проєкту факультативного заняття на тему «розробка методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості» для фахівців машинобудівної галузі	60
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75

Реферат магістерської кваліфікаційної роботи з теми “ Підготовка фахівців машинобудівної галузі з розробки методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості ”

**РЕФЕРАТ**

Робота містить 74с., 44 рис., 29 табл., 24 джерел.

Кваліфікаційна робота (дипломний проєкт) присвячений науковому обґрунтуванню та вдосконаленню системи підготовки фахівців машинобудівної галузі з розробки методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості.

У першому розділі розглянуто актуальність професійної підготовки фахівців машинобудівної галузі з розробки методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості.

У другому розділі виконано огляд досліджень та публікацій з розробки методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості.

У третьому розділі викладено розробку методики розрахунку жорсткості у контактні деталі двоїх кривизни.

У четвертого розділі виконано розробку методики розрахунку жоркості пругопластичного контакту шерхуватих поверхностей деталей близької твердості.

У п'ятому розділі виконано розробку методики розрахунку міцності нерухомих сполуків з обліком контактної жорсткі деталей близької твердості.

Запропонована методика може бути покладена в основу інноваційних технологій під час навчання для отримання кваліфікованих фахівців машинобудівної галузі.

**Ключові слова:** професійна підготовка, машинобудівна галузь, фахівець, високошвидкісне різання, контактна жорсткість, сталь, методика практичного заняття.

Abstract of the master's qualification work on the topic “Training of specialists in the mechanical engineering industry in the development of a methodology for calculating the strength of fixed joints taking into account contact stiffness”

### **ABSTRACT**

The work contains 74 pages, 44 figures, 29 tables, 24 sources.

The qualification work (diploma project) is devoted to the scientific substantiation and improvement of the system of training specialists in the mechanical engineering industry in the development of a methodology for calculating the strength of fixed joints taking into account contact stiffness.

The first section considers the relevance of professional training of specialists in the mechanical engineering industry in the development of a methodology for calculating the strength of fixed joints taking into account contact stiffness.

The second section reviews research and publications on the development of a methodology for calculating the strength of fixed joints taking into account contact stiffness.

The third section presents the development of a methodology for calculating stiffness in the contact of parts of two curvatures.

In the fourth section, a methodology for calculating the hardness of the elastoplastic contact of rough surfaces of parts of close hardness has been developed.

In the fifth section, a methodology for calculating the strength of fixed connections taking into account the contact hardness of parts of close hardness has been developed.

The proposed methodology can be used as the basis for innovative technologies during training to obtain qualified specialists in the machine-building industry.

**Keywords:** professional training, machine-building industry, specialist, high-speed cutting, contact hardness, steel, practical training methodology.

## ВСТУП

Міцність нерухомих з'єднань багато в чому залежить від контактної жорсткості. двоякої кривизни.

В даний час для визначення міцності та контактної жорсткості з'єднань деталей використовують залежності, справедливі для впровадження або сплющування мікровиступів. Насправді у часто виявляється, що твердості матеріалів контактуючих поверхонь близькі, тобто відрізняються менш як 2 рази. У такому випадку мікровиступи контактуючих поверхонь деталей одночасно сплющуються і впроваджуються в поверхню, що сполучається. Методику розрахунку міцності з урахуванням контактної жорсткості для зазначеного випадку контакту деталей недостатньо розроблено. У зв'язку з цим актуальним завданням є розробка методик визначення міцності та контактної жорсткості з'єднань вузлів деталей машин у разі близьких твердостей матеріалів деталей, що сполучаються.

# РОЗДІЛ 1

## АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ФАХІВЦІВ МАШИНОБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ

Розглянемо специфіку професійної діяльності бакалаврів машинобудування.

Бакалавром машинобудування є спеціаліст, який володіє знаннями в галузі сучасної техніки та технологій, що знає економіку та організацію машинобудівного виробництва, що володіє навичками використання сучасних інформаційно-технічних засобів для вирішення професійних завдань, що має спеціальну культуру, яка проявляється у здібності до творчості. Перехід на дворівневу систему освіти зумовив появу кваліфікації «бакалавр машинобудування» як результат перетворення раніше існуючої у вишах кваліфікації «інженер-механік».

Інженерами спочатку називалися творці військових машин, згодом - винахідники різних пристроїв, а з кінця XVIII - початку XIX століття, у період розвитку великого машинного виробництва, в Західній Європі з'являється професія інженера, що відбиває сучасне значення слова «інженер».

Зміна назви кваліфікації та системи професійної підготовки не вплинула на кваліфікаційні вимоги до випускників: галузі професійної діяльності бакалавра машинобудування в цілому аналогічні до областей професійної діяльності інженера.

Постійне вдосконалення обладнання підприємств машинобудування та впровадження інновацій призводить до необхідності вирішення проблеми забезпеченості кадрами, здатними до швидкої адаптації до нових умов, до освоєння нового обладнання та технологій, до самостійного здобуття знань та аналізу інформації, до безперервного підвищення своєї кваліфікації.

Збільшені вимоги до кваліфікації, компетентності та особистісних

характеристик працівників підприємств машинобудування є причиною необхідності підготовки в ЗВО фахівців з певним набором компетенцій, що володіють здібностями самостійної освітньої діяльності

Сучасному бакалавру машинобудування необхідно мати глибокі знання в галузі техніки та технологій, основ конструювання, мати цілісне уявлення про способи управління виробничими ситуаціями та їх ефективного вирішення, про сутність, тенденції розвитку сучасних виробництв. Також фахівцю важливо постійно підвищувати свою кваліфікацію та вибудовувати свій власний напрямок професійного руху, що дозволяє швидко адаптуватися на підприємствах в умовах модернізації та впровадження інновацій та забезпечити можливості руху кар'єрними сходами.

Для відповідності всім вимогам бакалавр повинен мати високий рівнем сформованості спроможності до самоосвітньої діяльності. Сучасному молодому фахівцю, необхідно бути мобільним та вміти швидко адаптуватися до змінних умов сучасного суспільства, що характеризується високим ступенем інформатизації, збільшенням кількості та швидкості поширення інформації, що наводить до необхідності формування в нього навичок та умінь підтримувати на рівні та удосконалювати свої професійні навички. Отже, наявність сформованої готовності до самоосвітньої діяльності серед якісних характеристик спеціаліста вказує на соціальну та професійну зрілість його особистості.

Вивчаючи проблему професійної підготовки майбутніх бакалаврів машинобудування, насамперед, звернемося до аналізу його професійної діяльності та спробуємо визначити її специфіку. Інженер-конструктор та інженер-технолог - це основні інженерні професії машинобудування, якими можуть мати бакалаври машинобудування. Актуальність та затребуваність професії інженера-конструктора обумовлені розвитком науки та техніки, а також потребою людини у різних технічних пристроях, що полегшують його працю.

Діяльність інженера-конструктора також пов'язана з розробкою проектів

виробів та механізмів машинобудування та має винахідницький характер. Діяльність інженера-технолога - це, в першу чергу, розробка та організація процесу виробництва виробів машинобудування.

Специфікою професійної діяльності бакалаврів машинобудування є інженерна спрямованість, що виявляється у всіх видах діяльності і полягає в вирішенні професійних завдань на основі виробничих систем та технологій.

В державному освітньому стандарті вищої освіти напряму підготовки «Конструкторсько-технологічне забезпечення машинобудівних виробництв» відзначаються такі види професійної діяльності майбутнього бакалавра машинобудування: проектно-конструкторська, виробничо-технологічна, організаційно-управлінська, науково-дослідна та сервісно-експлуатаційна.

Застосування функціонального підходу при розгляді професійної структури діяльності дозволило виявити функції видів діяльності майбутнього бакалавра машинобудування. Проектна функція реалізується через сукупність видів робіт, що належать до проектно-конструкторську діяльність. Технологічна функція проявляється у застосуванні сучасних технологій при проектуванні та виготовленні виробів машинобудування.

Перетворювальна функція реалізується при розробці нових або модернізації існуючих об'єктів машинобудівного виробництва. Управлінська функція передбачає вирішення комплексу управлінських завдань: формулювання цілей, розробка стратегії дії, складання необхідних планів та програм тощо. буд. Пізнавальна функція простежується у всіх видах професійної діяльності бакалавра машинобудування, так як необхідність вивчення та освоєння нових знань та технологій характерна для будь-якої людської діяльності; результатом цього є самовдосконалення індивіда.

Ефективному впровадженню нових технологій сприяють ініціативність, винахідливість та творче мислення працівників машинобудівного виробництва.

Інженерна діяльність передбачає насамперед прояв творчих здібностей

фахівця, що обумовлює наявність у бакалавра машинобудування навичок самоосвіти для ефективної реалізації всіх видів своєї професійної діяльності

Таким чином, виявляється основна особливість професійної діяльності бакалаврів машинобудування, що полягає у здатності до самоосвітньої діяльності. Висока ступінь інформатизації сучасного суспільства разом із модернізацією машинобудівного виробництва зумовлюють необхідність формування майбутнього бакалавра машинобудування здібностей до вдосконалення своїх професійних навичок. Отже, наявність сформованих навичок самоосвітньої діяльності серед якісних характеристик фахівця вказує на його соціальну та професійну зрілість як особистості.

Під самоосвітньою діяльністю ми розуміємо цілеспрямовану самостійну діяльність з набуття знань у певній галузі, мотивовану в основі внутрішнім бажанням розвитку, вдосконалення та підвищення освіченості або необхідністю підвищення професійної компетентності. Самоосвітня діяльність передбачає позитивну мотиваційну активність, цілеспрямованість та самоорганізованість, а також високий рівень інтелектуального розвитку, висока самостійність та наявність адекватного рівня самооцінки. Слід зазначити, що більшість фахівців не мають навичок набуття знань без сторонньої допомоги внаслідок недостатньої уваги у процесі професійної підготовки майбутніх спеціалістів в ЗВО до формування здібностей, у сукупності складових готовність до самоосвітньої діяльності є укорінена звичка до систематичної розумової праці, що складається поступово. Важливий момент, що спонукає - зміна ставлення студента до себе і до своєї діяльності, «усвідомлення здатності виходити за межі заданого, творчо перетворювати себе».

Інженерна спрямованість як специфіка професійної діяльності майбутніх бакалаврів машинобудування, що передбачає, у свою чергу, наявність здібностей до самоосвітньої діяльності, що зумовлює модернізацію процесу професійної підготовки бакалаврів машинобудування у технічному ЗВО. Рівні здатності до

самоосвітньої діяльності дозволять майбутнім фахівцям підвищити свою конкурентоспроможність на ринку праці, успішно освоювати нові технології та обладнання на виробництві, пристосовуватися до умов роботи, що змінюються, і без певних труднощів підвищувати свою кваліфікацію. Отже, завдання формування у майбутніх бакалаврів машинобудування готовності до самоосвіти з урахуванням їх специфіки професійної діяльності має стати невід'ємною частиною процесу професійної підготовки у технічному ЗВО.

Проблем підготовки інженерів-механіків не приділялося належної уваги протягом Перше десятиліття XXI століття.

Україна за останні двадцять років катастрофічно впало в галузі у подальшому розвитку економіки України, створення умов для модернізації її виробничого апарату та переходу на інноваційний шлях розвитку що в даний період відбувається розвиток та зростання випуску продукції машинобудівного виробництва, обладнання підприємств модернізується, відбувається велика комп'ютеризація виробництва, отже, підприємствам потрібні висококваліфіковані кадри з розвиненими вміннями в галузі інформаційних технологій та здібностями до самостійного освоювання нового обладнання.

У підготовці інженерів-механіків необхідно дослідити питання змісту підготовки фахівців машинобудівних напрямів, формування базових умінь, професійно значимих якостей спеціаліста, таких як готовність до проектно-конструкторської, творчої діяльності та професійної мобільності випускників, питання використання інформаційних технологій та розвиток інформаційної культури студентів. Необхідно торкатися питань переходу до дворівневої системи підготовки фахівців, та розглядати зміст підготовки бакалаврів-механіків.

Активізація діяльності з підготовки спеціалістів машинобудівного профілю необхідна, у зв'язку з остаточним переходом до системи підготовки бакалавр-магістр та, відповідно, із застосуванням як основа компетентнісного підходу при

організації освітнього процесу.

Враховуючи встановлену на сьогоднішній день в українській системі освіти моделі дворівневої підготовки та застосування компетентнісного підходу при оцінці результату навчання, найбільш актуальними є дослідження формування та розвитку різних компетенцій бакалаврів машинобудування.

На сьогоднішній день можемо помітити, що найбільша увага педагогами приділяється питанням формування професійних компетенцій. При цьому упускаються складові професійної компетентності, що виявляється досить масштабним набором здібностей, що визначають випускника як висококваліфікованого фахівця даного профілю.

Отже, до питання формування професійних компетенцій слід підходити глибше, використовуючи різні способи та методи їх формування, враховуючи присутність їх різноманітність.

Незважаючи на різноманітність засобів формування професійних компетенцій, підданих аналізу, практично у всіх різних дослідженнях відзначається як педагогічних умов реалізація особистісно-орієнтованого та діяльнісного підходів; застосування у навчальному процесі інформаційних та телекомунікаційних технологій; застосування як репродуктивних методів навчання, а й продуктивних, зокрема частково-пошукових, дослідницьких та творчих.

Найбільш важливим при формуванні професійної грамотності фахівця можна вважати поєднання різних форм та методів навчальної діяльності, що орієнтують студентів на самостійне здобуття знань, підвищення пізнавального інтересу та внутрішньої мотивації до навчання.

Такий підхід до модернізації освітнього процесу не враховує одного чинника: більшість студентів стикаються з труднощами при проведенні дослідницьких або творчих робіт внаслідок відсутності в них навичок самостійної та самоосвітньої діяльності.

Варто звернути увагу на необхідність формування та загальнокультурності компетенцій, як необхідних «інструментів», основної бази, крім накопичених та засвоєних знань, на формування та розвитку професійних знань. І важливе значення має набути завдання формування у майбутніх бакалаврів машинобудування в процесі навчання в ЗВО здатності до самостійного набуття знань та умінь, здатність до організації своєї самостійної діяльності, високого рівня відповідальності та внутрішньої мотивації, що виражається у прагненні до самостійного рішення поставлених самим собі завдань. Формування цих здібностей є основним чинником розвитку готовності майбутнього випускника до самоосвіти.

Готовність студента до самоосвітньої діяльності ґрунтується на первісному прагненні студента розширити свій освітній потенціал, підвищити конкурентоспроможність ринку праці.

Незважаючи на високу наукову значущість педагогічних досліджень у галузі підготовки фахівців машинобудування, питання готовності студентів до самоосвітньої діяльності залишається маловивченим.

У разі розвитку сучасного машинобудування, повсюдної інформатизації суспільства та виробництва, модернізації обладнання, впровадження інновацій на підприємствах машинобудування виникає необхідність модернізації навчального процесу підготовки бакалаврів машинобудівних напрямків з урахуванням збільшених вимог підприємств машинобудування до випускників, перед вишами вибудовується завдання підготовки кваліфікованих фахівців, з розвиненими здібностями до освоєння нових знань та умінь, швидкої адаптації до умов праці, що змінюються, до підвищення своєї професійної кваліфікації. Таким чином, протягом навчання в ЗВО у бакалавра машинобудування має сформуватися готовність до самоосвітньої діяльності не лише під час навчання в ЗВО, а й у подальшій професійній діяльності. Внаслідок чого роль вищої школи в формуванні ціннісного ставлення випускників до самоосвітньої діяльності,

усвідомлення майбутніми фахівцями особливої значущості готовності до самоосвітньої діяльності для безперервного професійно-особистісного розвитку багаторазово зростає.

Необхідність вирішення проблеми формування готовності бакалаврів до самоосвітньої діяльності призводить до вирішення питань організації їх самостійної роботи, її вдосконалення та систематизації. Багато фахівців представляють процес формування готовності до самоосвітньої діяльності студентів ЗВО, як складний процес переростання самостійної роботи студента на самоосвіту.

Слід зазначити, що належним чином організована, методично правильно спланована, самостійна робота розвиває у студентів здатність до самостійного пошуку необхідних знань, самостійного визначення мети та постановки завдань та їх рішення, що і є основою готовності до самоосвітньої діяльності. Найважливішим умовою підвищення ефективності навчання є психологічна, теоретична та практична готовність студентів до самостійної роботи. Але, на жаль, досить часто рівень довузівської підготовки студентів незалежно від форми навчання дуже низький.

Отже, початковим завданням викладачів вишу є «доучування» першокурсників, які нещодавно випустилися школярів з певною базою знань, методами самостійної роботи шляхом формування культури навчальної праці, щоб дозволити майбутньому фахівцю надалі не лише адаптуватися до умов навчання в ЗВО, а й створити передумови постійного професійного зростання протягом трудової діяльності та саморозвитку протягом життя загалом. Складність розв'язання цього завдання вимагає від викладача постійного вдосконалення навчального процесу та, зокрема, постановки самостійної роботи студентів на наукову основу. Ефективним засобом організації самостійної роботи студентів є застосування інформаційних технологій. Професійна діяльність майбутніх бакалаврів машинобудування безперервно пов'язана з комп'ютерною

технікою, з використанням різного роду програмного забезпечення. І вивчити всі можливі програмні засоби у процесі навчання у вузі не є можливим, що обумовлюється і неможливістю повноцінного використання програмних продуктів через відсутність у вузах промислового обладнання, та скороченням термінів навчання спрямування бакалаврату. Звідси перед педагогами постає завдання навчити студентів навичкам роботи зі стандартними програмними засобами та сформувати у них здатність до самостійного освоєння нових програмних систем.

Таким чином, до процесу підготовки бакалаврів машинобудування слід підходити, враховуючи такі аспекти: професійна компетентність випускника складається не тільки зі сформованих та розвинених здібностей у галузі майбутньої професійної діяльності, а також із повноцінно сформованих загальнокультурних компетенцій, серед яких важливе значення має займати здатність до самоосвіти та саморозвитку; застосування інформаційних технологій є найефективнішим засобом формування не тільки професійних, а й загальнокультурних компетенцій студента, в тому числі та готовності студента до самоосвітньої діяльності; зі збільшенням ролі самостійної роботи студентів в освітньому процесі слід розглядати її питання модернізації з використанням сучасних інформаційних та педагогічних технологій, спрямованих на формування здібностей до самоосвітньої, рефлексивної та творчої діяльності.

Навчити студента самоосвіті складно, але можливо. Ці здібності він повинен придбати сам на підставі свого власного досвіду та аналізу своїх дій. У будь-якому випадку, немаловажне бажання. Завдання педагога має полягати у формуванні готовності студента до самоосвіти, організації допомоги студенту у набутті навичок самоорганізації та самоконтролю, підвищенню ціннісно-сміслової мотивації та розвитку у студента потреби у самоосвіті. Ця робота повинна починатися з перших днів навчання студента в ЗВО, тому що у першокурсників навички самоосвітньої діяльності присутні досить на низькому

рівні, а в деяких взагалі відсутні, у зв'язку з тим, що в школі, здебільшого, із «самостійного» лише домашня робота, і те, швидше за все за допомогою батьків, інтернету. При цьому останнім часом спостерігається досить низька мотивація студентів до самоосвітньої діяльності, низький рівень пізнавальної активності та взагалі прагнення до розвитку особистості. Необхідно зацікавити студентів, спонукати їх до самостійної пізнавальної діяльності, направити освітній процес з траєкторії формування готовності студента до самоосвітньої діяльності.

Питання в іншому, а чи самі викладачі зможуть?

Готовність до самоосвітньої діяльності, по суті, проявляється у вміннях та навички самовдосконалення, навички самостійної пізнавальної діяльності, метою якою виступає оновлення інтелектуального потенціалу відповідно до загальнокультурних та професійними запитами суспільства.

Серед чинників значимості готовності до самоосвітньої діяльності зазначити: забезпечення академічної мобільності студента, його готовності до освоєння програми вищої професійної освіти; мобільності випускника, що має здібності не тільки до подальшого розвитку своїх професійних навичок, а й готовність за необхідності змінити сферу своєї професійної діяльності, що у світлі останніх подій у світовій економіці є особливо актуальним; установи, що реалізує програму вищої освіти.

Сучасній людині, особливо молодому фахівцю, необхідно бути мобільним та вміти швидко адаптуватися до умов сучасного суспільства, що змінюються, характеризується високим ступенем інформатизації, збільшенням кількості та швидкістю поширення інформації, що призводить до необхідності формування в нього навичок та умінь підтримувати на рівні та вдосконалювати свої професійні навички.

Отже, наявність сформованої готовності до самоосвітньої діяльності серед якісних характеристик фахівця вказує на соціальну та професійну зрілість його особи.

Таким чином, сформована на достатньому рівні готовність майбутніх бакалаврів машинобудування до самоосвітньої діяльності дозволить студентам не лише ефективно освоювати курси дисциплін у процесі навчання в ЗВО, але й після отримання диплома підвищити свою конкурентоспроможність на ринку праці, успішно освоювати нові технології та обладнання на виробництві, пристосовуватися до умов роботи, що змінюються, і без певних труднощів підвищувати свою кваліфікацію. Отже, завдання формування готовності студентів до самоосвітньої діяльності має бути невід'ємною частиною освітнього процесу в ЗВО.

### **Висновки до розділу 1**

У першому розділі роботи було проведено дослідження якості освіти студентів Інституту нових матеріалів та технологій, кафедри Технології машинобудування.

Досвідчені дані, необхідно було визначити загальне поняття якості освіти, історію, методи та критерії оцінки, а також думки досвідчених людей, здатних дати оцінку. Було визначити, які фактори необхідно враховувати при формуванні визначення. Крім того, дуже важливо відзначити і інші фактори, що впливають на підготовку інженерів під час навчання в ЗВО. Провівши коротку оцінку можна зробити висновок, що досить широкий спектр факторів впливає на процес навчання майбутнього спеціаліста.

Крім того, у цій роботі було проаналізовано вимоги роботодавця, а також методи підготовки фахівців у галузі машинобудування, методи довузівської підготовки якісних кадрів.

На підставі проведених досліджень зроблено висновок про те, що для отримання якісних кадрів у галузі машинобудування необхідно переглянути методи вузівської та довузівської підготовки. Висловлено рекомендації та визначено шляхи вдосконалення.

## 2. СТАН ПИТАННЯ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Загальні положення

Міцність поєднання деталей за їх силової взаємодії, отже, і працездатність машини загалом багато чому визначаються контактної жорсткістю. Рівень контактної жорсткості залежить від зближення в контакті деталей з криволінійними поверхнями, параметрів шорсткості деталей, що контактують, фізико-механічних характеристик матеріалів деталей. Від зближення залежить і фактична площа контакту шорстких поверхонь, яка у свою чергу визначає зносостійкість, параметри тертя та міцність сполучення деталей на зсув, а також теплопровідність, герметичність, електропровідність стику деталей та ін.

Проте низка питань розрахункового визначення міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості до теперішнього часу не вирішено, зокрема у разі контакту деталей із матеріалів близької твердості.

Що ж до силового контактної взаємодії шорстких поверхонь, їх мікрориступи моделюють, зазвичай, сферами. Параметри одиничного контакту визначають з використанням пружної осесиметричної задачі про стиснення двох тіл. При цьому слід зазначити, що аналогічне завдання в умовах пружнопластичної контактної деформації повністю не вирішено. Залежно від поєднання характеристик міцності матеріалів контактуючих деталей в зонах фактичного контакту може відбуватися пружнопластичне сплющування мікрориступів або їх впровадження, а також одночасне сплющування і впровадження мікрориступів при сумірних твердостях (тобто відрізняються менш ніж в 2 рази) матеріалів деталей. В даний час, як правило, вважають, що параметри контактної взаємодії у зазначених випадках приблизно однакові. При суто пружної деформації в контакті справедливості такого підходу не викликає сумнівів, але при пружнопластичній деформації він не є очевидним і потребує додаткового дослідження. При цьому слід враховувати зміцнення матеріалу в процесі пластичного деформування.

Нехтування зближенням контактуючих деталей призводить до значної помилки у розрахунках на міцність нерухомих з'єднань. Так, наприклад, в циліндричному з'єднанні з натягом зазначена зневага може спричинити помилку при визначенні міцності (навантажувальної здатності), що досягає 40% [29]. Незважаючи на це, методики розрахунку з урахуванням зближення поверхонь, що контактують, ще недостатньо розроблені. Особливо це стосується випадку, коли твердості матеріалів, з яких виготовлені деталі, відрізняються менш ніж у 2 рази. При цьому контакт деталей близької твердості має широке поширення в машинобудівних конструкціях.

## 2.2 Аналіз методів визначення жорсткості пружнопластичного початково-точкового контакту тіл двоякої кривизни

Загальноприйнято, що з дослідженні контактної жорсткості шорстких поверхонь основу розгляду процесів контактної взаємодії лежать закономірності контакту окремого микровиступа поверхні.

Питання визначення параметрів контакту деталі, обмеженою поверхнею подвійної кривизни, із плоскою поверхнею іншої деталі є фундаментальними для теорії контактної взаємодії. Параметри спочатку точкового пружнопластичного контакту тіл двоякої кривизни (зближення в контакті, глибина і діаметр залишкового відбитка, фактична площа контакту, кривизна контактної поверхні) широко використовуються в інженерній, практиці та наукових дослідженнях для розрахунку силової взаємодії шорстких поверхонь, контактної жорсткості, тертя герметичність стиків, призначення режимів поверхневого пластичного деформування, визначення твердості тощо. п. [17, 24, 27, 39, 48, 82, 104]. За допомогою індентування можуть бути визначені такі фізико-механічні характеристики матеріалу як його твердість, межа плинності, тимчасовий опір, межа витривалості, модуль нормальної пружності і т.п. [48, 83, 84, 85, 86, 87, 89, 117, 125, 126]. Таким чином, дослідження питань контакту деталі, обмеженою поверхнею подвійної кривизни, з плоскою поверхнею деталі є актуальними і

продовжують вивчатися і зараз. У цьому слід зазначити, що у більшості робіт розглядається випадок застосування мікроступу в поверхню деталі. Випадки сплющування мікроступу, а також одночасного впровадження та сплющування недостатньо висвітлені в літературі.

Існує велика кількість робіт, присвячених дослідженням у цій галузі, у яких мікроступи шорсткої поверхні моделюються тілами різної форми: сферою, еліпсоїдом, циліндром, конусом, пірамідою, клином тощо. Порівняння параметрів контакту інденторів різної форми (залежно від умов контактної взаємодії) наведено у роботах вітчизняних [17] та зарубіжних авторів, наприклад J. Alcala [113], WC Oliver, GM Pharr [119].

В даний час найбільшого поширення набула практика моделювання мікроступів сферою.

$$\alpha_{y_{\text{зм}}} = \alpha_{\text{зм}} + \alpha_{y_{\text{п}}} = \frac{P}{2\pi R H B_1 W_2} + \frac{3}{8} J_1 W_1 \sqrt{\pi P H B_1 W_2},$$

де  $P$  – навантаження на сферичний індентор;

$R$  – радіус сферичного індентора;

$J_1$  - пружна постійна напівпростору,

$H B_1$  - твердість по Брінеллю покриття;

$W_1$  - функція впливу основи на пружні властивості покриття;

$W_2$  – функція впливу основи пластичні властивості покриття.

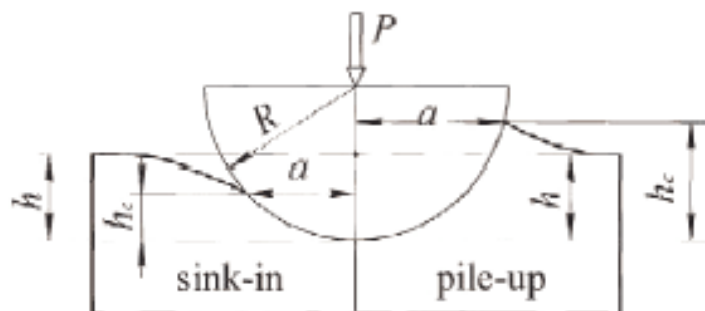


Рисунок 1.1 – Схеми ефектів пружного продавлювання матеріалу та видавлювання матеріалу навколо мікроступу

У роботі WC Oliver та GM Pharr [119] також було досліджено ефект

видавлювання матеріалу навколо індентора та його вплив на параметри пружнопластичного вдавлювання індентора. Також питання про бічне витріщення в контактні тіла було вивчено Д. Тейбором [112] та О.В. Сутягін [108].

Хоча сферична форма мікровиступу є найпоширенішою, у ряді випадків, наприклад, при торцевому точенні, фрезеруванні та деяких інших видах обробки поверхонь деталей, а також при описі хвилястості, найближчою до реальної може виявитися циліндрична форма. У зв'язку з цим вибір форми мікровиступу в кожному конкретному випадку залежить від способу обробки поверхні і повинен забезпечити найближчий збіг розрахунку параметрів контакту з експериментом.

Закономірності для пружнопластичного впровадження циліндричного індентора в плоску поверхню деталі вивчені значно менше, ніж для впровадження сферичного індентора. Багато в чому це пов'язано з тим, що при розгляді спочатку лінійного контакту тіл Г. Герц отримав вираз для пружного зближення у формі нескінченності логарифмічної, але пояснення цьому результату не дав. Таке положення стало підставою для багатьох дослідників продовжити рішення Г. Герца, оскільки очевидно, що зближення в контактні циліндричного індентора є величиною кінцевою і залежить не тільки від деформацій у зоні контакту, але й значною мірою обумовлено об'ємними деформаціями деталей, що контактують.

Слід підкреслити, що особливістю відомих до теперішнього часу залежностей [51], що описують зближення  $\alpha$ , є те, що вони визначають зближення твердих тіл при початковому контактні по лінії в інтегральній формі, тобто як суму переміщень, обумовлених і загальними деформаціями тіл, що взаємодіють, і, власне, контактними деформаціями. У той же час, для оцінки фактичної площі контакту поверхонь деталей, що сполучаються, з урахуванням шорсткості необхідно розташовувати даними саме про величину контактної деформації. Таке завдання також актуальне, наприклад, щодо місцевого сплюснювання прокатних валків, зубів механічних передач, при визначенні параметрів контакту

інструменту і деталі при поверхневому пластичному деформуванні.

Досліджено випадок контакту пружних тіл кінцевих розмірів при початковому торканні лінії. У цих роботах наведено залежності для визначення зближення та податливості для різних варіантів взаємодії пружних тіл з одного матеріалу, що контактують по лінії. Також автором описаний випадок, коли ролик знаходиться між плитами, виготовленими з одного матеріалу, у цьому випадку зближення двох стискаючих ролик плит розраховується за формулою

$$\alpha = 2 \frac{4q(1-\nu^2)}{\pi E} \ln \left[ 1,842 \sqrt{\frac{E \sqrt{C_1 C_2}}{q}} \right].$$

Таким чином, зближення в цьому випадку контакту не залежить від радіусу ролика, а залежить від товщини плит  $C_1$  та  $C_2$ , що також було підтверджено експериментальними даними інших авторів [110].

Контактна міцність з'єднань визначається величиною деформації у місцях сполучення деталей. Визначення контактної жорсткості та міцності з'єднань деталей машин нерозривно пов'язані із закономірностями контакту шорстких поверхонь.

### 2.3 Аналіз методів визначення міцності нерухомих сполук

Міцність нерухомих з'єднань (у тому числі плоских з'єднань та з'єднань з натягом) деталей машин характеризується контактною жорсткістю стику деталей.

Зазвичай, міцність (навантажувальну здатність) з'єднань з натягом розраховують при навантаженні осьювою силою і навантаженні моментом, що крутить, за наступними формулами [3, 90, 92]

$$F_{oc} = \frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot q \cdot f_{oc}}{n},$$

$$M_{xp} = \frac{0,5 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot l \cdot q \cdot f_{xp}}{n}$$

де  $d$  і  $l$  - Діаметр і довжина посадкової поверхні;

$q$  – середній тиск у стикі циліндричних поверхонь, що сполучаються;  $n$  – коефіцієнт запасу міцності;

$f_a$  і  $f_{кр}$  - коефіцієнти тертя в осьовому та окружному напрямках.

Для визначення натягу використовують рішення Ляме, справедливе лише для контакту абсолютно гладких циліндричних поверхонь.

$$\delta = q \cdot d \cdot \left( \frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right),$$

де  $q$  - Тиск у стикі деталей з'єднання;

$d$  – діаметр посадкової поверхні;

$E_1$  та  $E_2$  – модулі пружності матеріалів деталей,

$C_1$  та  $C_2$  – коефіцієнти Ляме:

$$C_1 = \frac{1 + (d_1/d)^2}{1 - (d_1/d)^2} - \mu_1,$$

$$C_2 = \frac{1 + (d/d_2)^2}{1 - (d/d_2)^2} + \mu_2,$$

де  $d$  – діаметр поверхні, що сполучається;

$d_1$  і  $d_2$  – відповідно внутрішній діаметр охоплюваної та зовнішній діаметр охоплює деталей;

$\mu_1$  і  $\mu_2$  – коефіцієнти Пуассона відповідно для деталей, що охоплюються і охоплюють.

Насправді на поверхні деталей завжди є шорсткості, що необхідно враховувати при оцінці дійсної навантажувальної здатності з'єднань з натягом. Шорсткості поверхні у традиційних розрахунках враховується поправкою [3, 22, 92]

$$u = 1,2 \cdot (R_{z_1} + R_{z_2}) \approx 5,5 \cdot (R_{a_1} + R_{a_2}),$$

Але численні дослідження показують, що в загальному випадку ця зміна занадто завищена.

Так, наприклад, на малюнку 1.2 наведена залежність поправки  $u$  від величини натягу за наступних умов експерименту: вал виконаний зі сталі 45, втулка - з олов'янистої бронзи Бр.ОЦС 4-4-2,5, спосіб обробки - точення. Як видно з малюнка, при малих натягах перевищення поправки, отриманої традиційним способом за формулою (1.16) (рисунок 1.2, лінія 2) над експериментальними даними [42] (рисунок 1.2, лінія 1) досягає 80%.

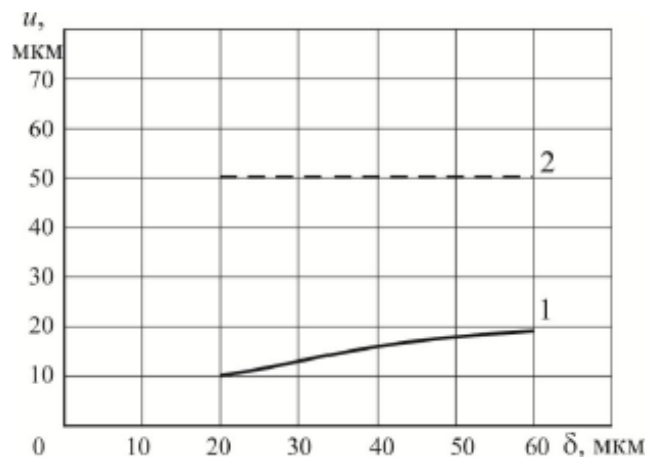


Рисунок 1.2 – Залежність поправки від величини натягу:

1 - експериментальні дані [42]; 2 – розрахунок за формулою

У зв'язку з цим багато авторів у своїх роботах намагалися врахувати щодо дійсного натягу вихідну шорсткість і твердість деталей сполуки.

При визначенні міцності з'єднань важливу роль відіграє величина коефіцієнта тертя, наприклад, у розрахунках на міцність з'єднань з натягом. Існують різні підходи до визначення величини коефіцієнта тертя.

В даний час загальноновизнаною є молекулярно-механічна теорія, згідно з якою коефіцієнт тертя має дві складові – механічну (деформаційну)  $f_d$  та молекулярну (адгезійну)  $f_a$ . Механічна складова залежить від деформації мікроступів контактуючих поверхонь деталей. Молекулярна складова виникає внаслідок молекулярної взаємодії контактуючих поверхонь між собою. Було проведено велику кількість досліджень [10, 18, 39, 106], присвячених визначенню

коефіцієнта тертя та його складових. В результаті цих досліджень були отримані залежності визначення коефіцієнта тертя, які можуть застосовуватися при розрахунках на міцність різних з'єднань деталей машин. Відповідно до існуючої практики при розгляді питань визначення сили тертя розглядають впровадження одиничного мікровиступу в контртіло.

Механічна складова коефіцієнта тертя  $f_d$  може бути розрахована за формулою

$$f_d = k \sqrt{\frac{h}{R}},$$

де  $k$  - Коефіцієнт, що залежить від форми мікровиступу (для сферичного мікровиступу  $k = 0,55$ );

$h$  – залишкова контактна деформація у контакті;

$R$  – радіус мікровиступу.

#### 2.4 Критерії переходу від пружної деформації до пружнопластичної

В даний час зазвичай розглядають дві стадії силової взаємодії кулі з напівпростором - пружну та пружнопластичну. Для кожної їх застосовують свої розрахункові залежності. Однак пропоновані різними авторами величини критичних навантажень, що характеризують перехід від однієї стадії до іншої, відрізняються у десятки разів [33]. У цих умовах встановити чітку межу: між пружною та пружнопластичною стадіями деформування практично неможливо.

У роботі [9] наводиться формула для максимального контактного тиску, при якому з'являється залишкова деформація

$$p_{0y} = K_y \cdot \sigma_y,$$

$K_y$  – числовий коефіцієнт;

$\sigma_y$  – межа плинності.

Відомо, що значення критичного навантаження пропорційні кубу межі плинності матеріалу напівпростору [23] при заданій величині діаметра сфери.

Однак, як межа плинності приймають умовну величину  $\sigma_{0,2}$ , яка перевищує межу плинності (пружності)  $\sigma_u$ , тобто напруга, при якому фіксується перша залишкова деформація зразка при розтягуванні. Насправді залишкова контактна деформація з'являється при напругах, значно менших «межі пружності», що визначається за допомогою точних приладів [46]. У зв'язку з цим визначення межі пружної та пружнопластичної деформації стає багато в чому умовним, а розбіжність між значеннями  $\sigma_{0,2}$  або  $\sigma_u$  не дозволяє точно зафіксувати появу залишкової контактної деформації.

Також, оскільки залишкова контактна деформація поступово розвивається (виникає на деякій глибині, далі поширюється на контур майданчика контакту, а потім з'являється і на поверхні деталі), то процес деформації в контакті слід розглядати як безперервно пружнопластичний.

### 3. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ЖОРСТКОСТІ У КОНТАКТІ ДЕТАЛІВ ДВОЇХ КРИВИЗН

#### 3.1 Загальні положення

Закономірності початково-точкового пружнопластичного контакту деталей, обмежених поверхнею подвійної кривизни, є основними при розгляді процесів, що відбуваються в зоні контакту шорстких поверхонь деталей, при поверхневому пластичному деформуванні, при контролі твердості. В даний час при дослідженні закономірностей первісно-точкового пружнопластичного контакту більшість авторів розглядають процес впровадження сферичної деталі в плоску поверхню. Випадок контакту деталей близької твердості, у якому відбувається одночасне використання і сплющивання сферичної деталі, вивчений недостатньо.

Необхідно відзначити, що при розгляді контактної взаємодії деталей подвійної кривизни (при впровадженні або сплющуванні) контакт деталей довільної форми може бути замінений контактом деталі, обмеженою сферичною поверхнею з наведеним радіусом  $R_{\text{пр}}$ , плоскою поверхнею іншої деталі. Величина наведеного радіусу  $R_{\text{пр}}$  чисельно дорівнює радіусу такої сферичної деталі, при впровадженні якої в плоску поверхню деталі величина залишкової контактної деформації  $h$  буде такою ж, як і в контакті реальних деталей, що розглядаються довільної форми і кривизни, якщо контактні навантаження і поєднання матеріалів контактуючих деталей в обох випадках однакові. Таким чином, при розгляді контакту деталей подвійної кривизни довільної форми в розрахункових формулах слід замінити величини радіуса  $R$  величини наведеного радіуса  $R_{\text{пр}}$ .

Наведений радіус розраховують так

$$R_{\text{пр}} = \frac{1}{n_p \cdot n_\sigma \cdot (A + B)},$$

де  $A$  і  $B$  – відповідно менша та більша з наступних двох сум

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{1,1}} \pm \frac{1}{R_{1,2}} \right),$$

$$B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{2,1}} \pm \frac{1}{R_{2,2}} \right),$$

знаки "+" і "-" відносяться відповідно до випадків контакту першої деталі, обмеженої опуклим контуром (знак "+"), з другою деталлю, переріз якої в даній площині кривизни обмежено опуклим (знак "+") або увігнутим контуром (знак "-");

$R_{1,1}$ ,  $R_{2,1}$  - радіуси кривизни першої деталі;

$R_{1,2}$ ,  $R_{2,2}$  - радіуси кривизни другої деталі в перерізах двома головними площинами кривизни;

$\nu$ ,  $\nu_{\sigma}$  - Коефіцієнти, що залежать від співвідношення основних кривизни  $A/B$  і наведені в роботі [24, 90].

У цій роботі представлені методики розрахунку параметрів пружнопластичного контакту, що передбачають можливість опису всіх випадків контакту, що ґрунтуються на понятті пластичної твердості НД (контактного модуля зміцнення матеріалу), що визначається за ГОСТ 18835 [12].

Пластична твердість може бути розрахована як

$$\text{НД} = \frac{F - F_0}{\pi D h},$$

де  $F - F_0$  – ефективне навантаження на індентор;

$h$  - глибина відновленого відбитка;

$D$  – діаметр індентора.

Перевагою пластичної твердості НД перед іншими числами твердості, заснованими на кульковій пробі (наприклад, твердості Брінеллю НВ), є те, що вона не залежить від навантаження і діаметра індентора, тобто не залежить від умов випробування. Вона визначає опір матеріалу деталі контактної деформації при впровадженні пружного сферичного індентора і є контактним модулем

зміцнення матеріалу. Крім того, пластична твердість НД дозволяє створити єдину шкалу твердості для всіх матеріалів - від м'яких до найтвердіших (в останньому випадку при випробуванні матеріалів з твердістю більшою НД 4500 МПа використовують кульки з твердого сплаву з твердістю не менше НВ 12000 МПа).

У таблиці 2.1 наведено залежності, які можуть бути використані для перекладу значень пластичної твердості НД інші числа твердості.

Таблиця 2.1 - Зв'язок пластичної твердості НД з іншими числами твердості

Числа міцності	Пластичная міцність НД, МПа
HRC (при HRC $\geq$ 32)	$3,57 \cdot 10^{-4} \cdot \text{HRC}^{4,05} + 3353$
HRB	$88300 / (130 - \text{HRB})$
HВ, МПа (при HВ $\leq$ 4000)	$0,468 \text{ HВ}^{1,124}$
HV, МПа (при HV 1000 ... 9200)	$0,5 \text{ HV}^{1,113}$

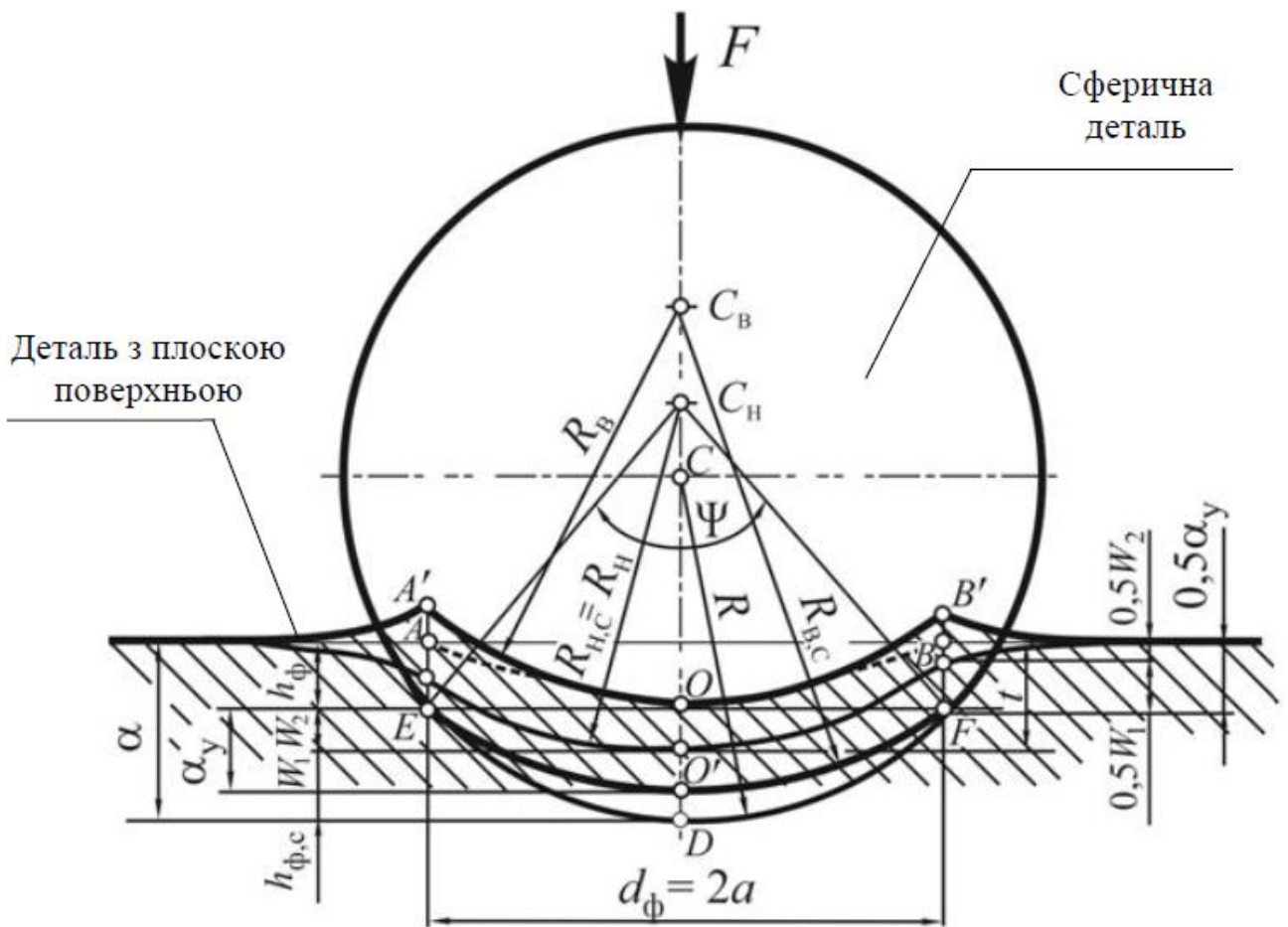
Зазначені фізичні властивості пластичної твердості роблять її зручною розрахунковою характеристикою, що призводить до простих співвідношень між силовими та деформаційними параметрами, що визначають протікання залишкової деформації у зоні контакту [24].

### 3.2 Розробка методики розрахунку зближення в контактi деталей двоякої кривизни

На малюнку 2.1 наведено схему [50] контакту деталі, обмеженою сферичною поверхнею, з плоскою деталлю у разі, коли твердості їх матеріалів близькі, тобто відрізняються менш ніж у 2 рази.

Як видно з малюнка 2.1, у цьому випадку повне зближення складається з трьох складових: оборотного пружного зближення  $\alpha_y$ , фактичної глибини  $h_f$  залишкового відбитка на поверхні плоскої деталі та фактичної величини залишкового сплюскування  $h_{f,c}$  з сферичної деталі (див. рис. 2.1), тобто

$$\alpha = \alpha_y + h = \alpha_y + h_f + h_{f,c}$$



Малюнок 2.1 – Схема контакту сферичної деталі з номінально плоскою поверхнею деталі за близьких твердостей їх матеріалів:

$R$  – радіус сферичної деталі;  $R_H = R_{Hc}$  - радіус кривизни поверхні контакту під навантаженням;  $h_\phi$  – глибина залишкового відбитка плоскої деталі;  $h_{\phi,c}$  – величина сплюснення сферичної деталі;  $W_1$  і  $W_2$  – пружне зминання сферичної деталі під навантаженням  $F$  та пружне відновлення плоскої деталі у центрі контакту після розвантаження;  $t$  - повна глибина відбитка під навантаженням;  $\alpha_y$  та  $\alpha$  – оборотна пружна частина та повне зближення в контакті;  $C$ ,  $C_H$ -центри кривизни недеформованої вихідної поверхні сферичної деталі та поверхні вм'ятини під навантаженням;  $d_\phi$  – діаметр відбитка.

Залежності визначення складових залишкового зближення  $h$  (глибина  $h_\phi$  залишкового відбитка лежить на поверхні деталі і величина залишкового сплюснення  $h_{\phi,c}$  з сферичної деталі) розробили і наведено у роботі [50]. Однак,

при вирішенні багатьох контактних завдань необхідно знати величину залишкового зближення, при цьому немає потреби у визначенні величини його складових. І тут методика визначення залишкового зближення у контакті, запропонована у роботі [50], стає незручною використання. У зв'язку з цим було поставлено завдання [62] розробки методики визначення величини залишкового зближення в контакті деталі, обмеженою сферичною поверхнею, з плоскою деталлю, яка була б справедлива для всього діапазону співвідношення твердостей контактуючих деталей, у тому числі для випадку близьких твердостей їх матеріалів.

Для визначення залишкового зближення  $h$  були проведені експериментальні дослідження, спрямовані на вивчення контакту кульки з плоскою поверхнею деталі для випадку близьких твердостей матеріалів (при співвідношенні твердостей кульки НДш і плоскої деталі НД в діапазоні  $0,5 < \frac{НДш}{НД} < 2$ ). З цією метою було використано пристрій (рисунок 2.2).

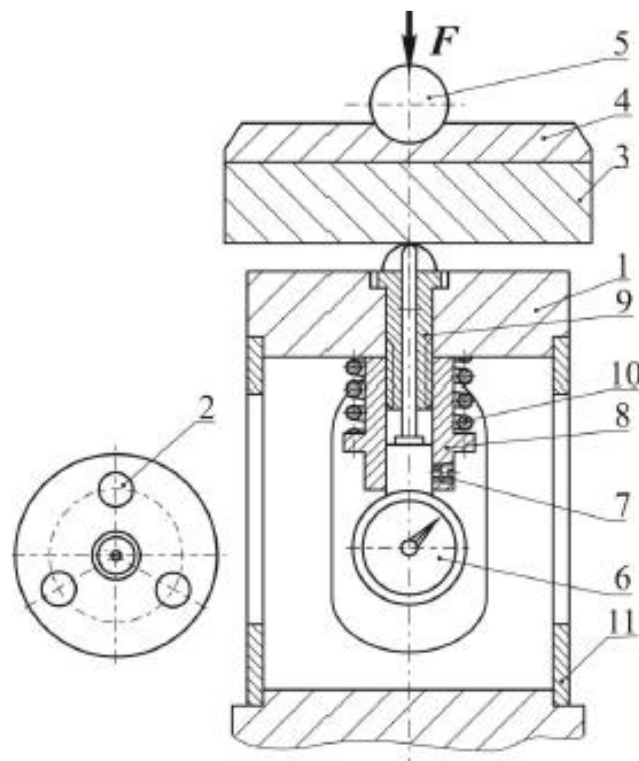


Рисунок 2.2 – Схема пристосування для вимірювання зближення у

контакті:

1 – основа; 2 – симетрично розташовані три сталеві сферичні сегменти; 3 – випробувана деталь (зразок); 4 – опорна шайба; 5 – центруюча кулька; 6 – індикатор годинного типу; 7 – гвинт; 8 – втулка; 9 – трубка для розміщення індикатора; 10 – пружина; 11 – корпус пристосування

Пристосування складається з основи 1, на поверхні якого симетрично розміщували три сферичні сегменти 2. Сегменти були виготовлені зі сталі ШХ15, мали твердість НДш 2430 або 3680 МПа та радіус  $R=2,5$  мм. В якості деталі 3 з плоскою поверхнею використовували сталеві плитки з різною твердістю в діапазоні НД 1600 ... 5300 МПа, що дозволило отримати співвідношення твердостей деталей, що контактують, в діапазоні НДш/НД 0,69...1,63. Навантаження  $F$ , прикладена до деталі 3, варіювалася в діапазоні 1839...29430 Н, тобто в контакті деталі з кожним сегментом навантаження змінювалася в діапазоні 613 ... 9810 Н. Навантаження прикладалися на пресі Брінелля ТШ-2 через шайбу 4 з центри кулькою 5.

Поверхні сферичних сегментів і основи 1 полірувалися і притиралися один до одного, а потім навантажувалися силою, значно перевищує робочу, при якій проводилися випробування. Це дозволило зменшити вплив зближення в контакті сферичних сегментів із основою.

Зближення вимірювали за допомогою індикатора 6 (з ціною розподілу 1 мкм), який був зафіксований гвинтом 7 у втулці 8. Шток індикатора розміщувався в трубці 9, закріпленої у втулці 8. Трубка з натягом, створюваним пружиною 10, упиралася в кільце.

Конструкція дозволяє виключити з відліку зближення опорної поверхні основи 1 і корпусу 11 і звести до мінімуму помилку, зумовлену пружною деформацією основи 1. Використання сферичних сегментів (висотою 0,15...0,2 діаметра сфери) замість сфер дозволило зменшити помилку, пов'язану з загальною деформацією сферичних деталей.

Додатково було визначено величини пружних деформацій деталей пристосування. Для цього було проведено експериментальне дослідження контакту сферичних сегментів із загартованою сталеву плиткою, а пружне зближення визначалося як різниця показань індикатора та величин контактних зближень, розрахованих за формулою Герца для суто пружного контакту. Проведене дослідження показало, що величина пружних деформацій деталей пристосування зневажливо мала порівняно з величинами зближення попередніх експериментах.

Для опису закономірностей пружнопластичного контакту деталей близької твердості запропоновано характеристику – наведену пластичну твердість  $H_{Дпр}$  контактуючих деталей

Наведена пластична твердість розраховується так:

$$\frac{1}{H_{Дпр}} = \frac{1}{k} \left( \frac{1}{H_{Дм}} + \frac{1}{HД} \right),$$

Звідки

$$H_{Дпр} = k \frac{H_{Дм} \cdot HД}{H_{Дм} + HД}.$$

Для визначення величини коефіцієнта  $k$  була використана умова, що полягає в тому, що величина наведеної пластичної твердості для випадків впровадження або сплющування повинна приймати значення твердості матеріалу деталі, яка деформується пружнопластично. Таким чином, наведена пластична твердість контактуючих деталей визначається наступним чином:

$$H_{Дпр} = \frac{1,5 \cdot H_{Дм} \cdot HД}{H_{Дм} + HД}.$$

Для випадків впровадження або сплющування (співвідношення твердостей  $H_{Дш}/HД=2$  і  $H_{Дш}/HД=0,5$  відповідно) наведена твердість набуває значення твердості матеріалу деталі, яка деформується пружнопластично. Тобто для випадку впровадження сферичної деталі  $H_{Дпр}=HД$ , а для випадку

сплющування сферичної деталі  $H_{Дпр}=H_{Дш}$ .

За результатами експерименту було встановлено, що залишкове зближення  $h$  може бути представлено у вигляді функції наступних факторів: наведеної пластичної твердості  $H_{Дпр}$  матеріалів сферичної та плоскої деталі, радіусу сферичної деталі  $R$  та ефективного контактного навантаження  $(F-F_0)$ .

Функціональний зв'язок між комплексами шукали у вигляді

$$h = a \cdot R \cdot \left( \frac{F - F_0}{H_{Дпр} \cdot R^2} \right)^b,$$

де  $R$  – радіус сферичної деталі,  $(F-F_0)$  – ефективне навантаження на кульку;  $a$  та  $b$  – коефіцієнти, що залежать від співвідношення твердостей сферичної та плоскої деталей  $H_{Дш}/H_{Д}$ .

Коефіцієнти  $a$  та  $b$  були визначені з використанням описаної вище методики експерименту. На малюнку 2.3 показані графіки залежності коефіцієнтів  $a$  та  $b$  від співвідношення твердостей  $H_{Дш}/H_{Д}$ . Аналіз побудованих графіків дозволив описати залежність цих коефіцієнтів від співвідношення твердостей сферичної та плоскої деталей  $H_{Дш}/H_{Д}$  такими формулами

$$a = \frac{0,057}{(H_{Дш}/H_{Д})^{1,72}} + 0,142, \quad b = 1,306 - 0,153 \cdot \left( \frac{H_{Дш}}{H_{Д}} \right).$$

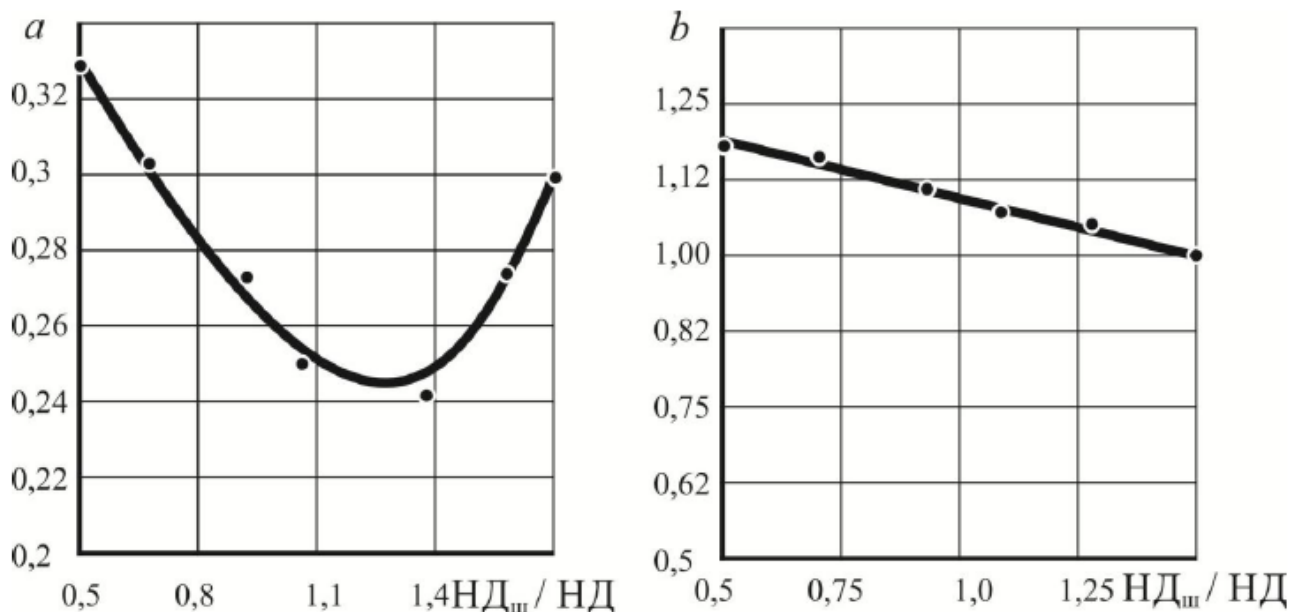


Рисунок 2.3 – Графіки залежності коефіцієнтів а та b від співвідношення твердостей контактуючих деталей НДш/НД

У разі коли твердість матеріалу сферичної та плоскої деталей відрізняються в 2 рази, перетворюється на відомі формули для розрахунку залишкового зближення  $h$  при впровадженні

$$h = \frac{F - F_0}{2\pi \cdot \text{НД} \cdot R}$$

та сплющуванні –  $h_c$

$$h_c = 0,33 \cdot R \cdot \left( \frac{F - F_0}{\text{НД}_ш \cdot R^2} \right)^{1,23} .$$

На малюнку 2.4 представлені результати розрахунку та експериментальні дані. З малюнка 2.4 можна отримувати дані, розбіжність яких із експериментальними значеннями перебуває у межах 5 - 10 %.

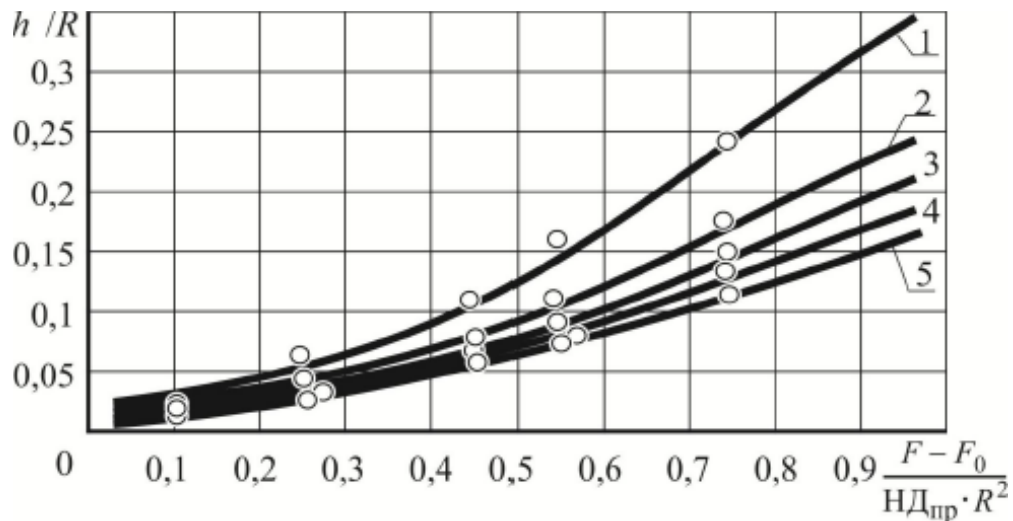


Рисунок 2.4 – Графіки залежності  $h/R$  від  $\frac{F - F_0}{H_{D_{пр}} \cdot R^2}$

Таким чином, розроблена методика дозволяє визначати величину повного зближення  $\alpha$  і його складових (пружного зближення  $\alpha_u$  і залишкового зближення  $h$ ) у всьому діапазоні співвідношення твердостей деталей, що контактують, у тому числі у випадку контакту деталей, виготовлених з матеріалів близької твердості.

### 3.3 Дослідження впливу співвідношення твердостей на величину зближення

Отримана залежність для визначення залишкового зближення в контакті і відома формула для визначення пружної деформації в контакті деталі зі сферичною поверхнею з плоскою деталлю були використані для аналізу впливу співвідношення твердостей деталей, що контактують на величину контактної жорсткості і зближення (пружного, залишкового і повного) в контакті [52]. Для прикладу було розглянуто контакт кульок радіусом  $R=2,5\text{мм}$  із плоскою поверхнею деталі з твердістю  $H_D=2800\text{ МПа}$ . Твердість кульки  $H_{Dш}$  варіювали в діапазоні  $1400\dots5600\text{ МПа}$ , тим самим одержуючи співвідношення твердостей  $H_{Dш}/H_D$  у діапазоні  $0,5\dots2$ . Ефективне навантаження  $(F-F_0)$  змінювали в діапазоні  $0\dots3500\text{ Н}$ .

На рисунках 2.5-2.7 представлені графіки залежностей повного (рисунок 2.5), залишкового  $h$  (рисунок 2.6) і пружного  $\alpha u$  (рисунок 2.7) зближень від прикладеного навантаження  $F$  при різних співвідношеннях твердостей. З графіків видно, що з переходу від сплющивання до застосування спостерігається зменшення величини повного зближення  $\alpha$  і залишкового зближення  $h$ , а пружного зближення  $\alpha u$  спостерігається зворотна залежність, тобто відбувається збільшення величини пружного зближення.

З малюнка 2.5 видно, що зі збільшенням навантаження, тобто зі збільшенням залишкової деформації в контакті, збільшується різниця між значеннями, що відповідають повному зближенню при впровадженні (НДш/НД, лінія 5) і повному зближенню у разі контакту деталей близької твердості (лінії 2,3,4). Зокрема, різниця між величиною повного зближення при співвідношенні твердостей НДш/НД=0,75 (лінія 2) і величиною повного зближення при співвідношенні твердостей НДш/НД=2 (впровадження, лінія 5) досягає 34% у дослідженому діапазоні навантажень.

З малюнка 2.6 видно, що різниця між величинами залишкового зближення  $h$  для випадків застосування та контакту деталей близької твердості виражена значно, ніж для повного зближення. Так, різниця між величиною залишкового зближення при співвідношенні твердостей НДш/НД=0,75 (лінія 4) та величиною залишкового зближення при співвідношенні твердостей НДш/НД=2 (впровадження, лінія 5) становить більше 80% у дослідженому діапазоні навантажень.

З малюнка 2.7 видно, що різниця між величинами пружного зближення  $\alpha u$  для випадків впровадження та контакту деталей близької твердості також зростає. Так, різниця між величинами пружного зближення при співвідношенні твердостей НДш/НД=2 (використання, лінія 5) і величинами пружного зближення при співвідношенні твердостей НДш/НД=0,75 (лінія 2) досягає 22% у дослідженому діапазоні навантажень.

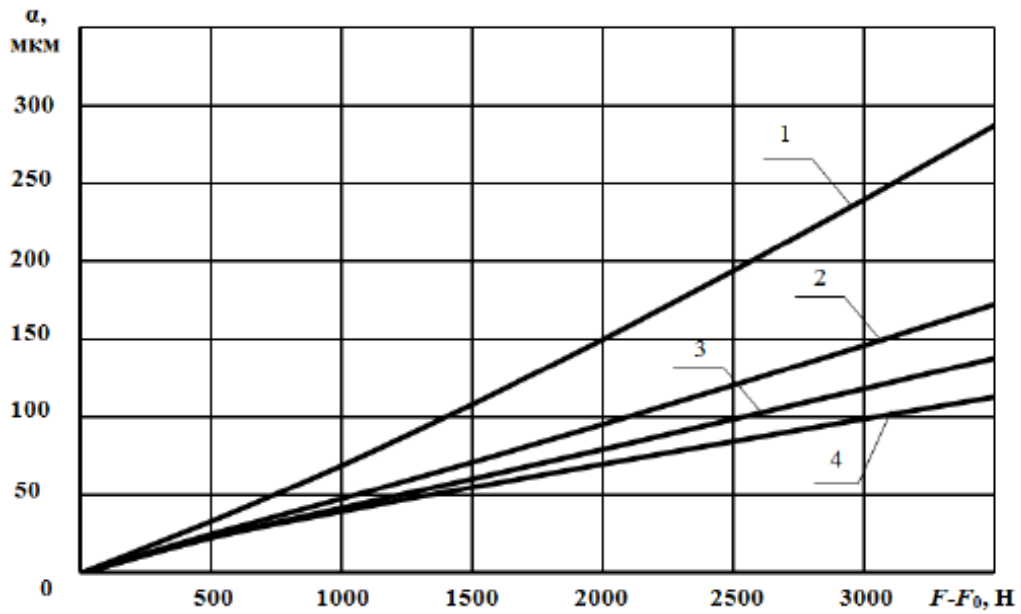


Рисунок 2.5 – Графіки залежності повного зближення від ефективного навантаження ( $F-F_0$ ) при різних співвідношеннях твердостей:

1 -  $H_{Dш} / H_D = 0,5$ ; 2 -  $H_{Dш} / H_D = 0,75$ ; 3 -  $H_{Dш} / H_D = 1$ ; 4 -  $H_{Dш} / H_D = 2$

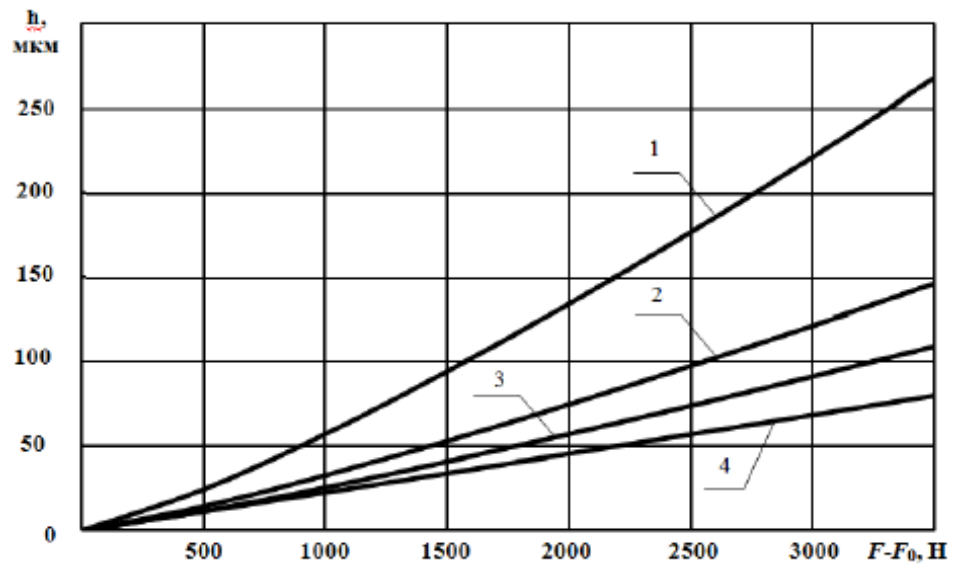


Рисунок 2.6 – Графіки залежності залишкового зближення  $h$  від ефективного навантаження ( $F-F_0$ ) при різних співвідношеннях твердостей:

1 -  $H_{Dш} / H_D = 0,5$ ; 2 -  $H_{Dш} / H_D = 0,75$ ; 3 -  $H_{Dш} / H_D = 1$ ; 4 -  $H_{Dш} / H_D = 2$

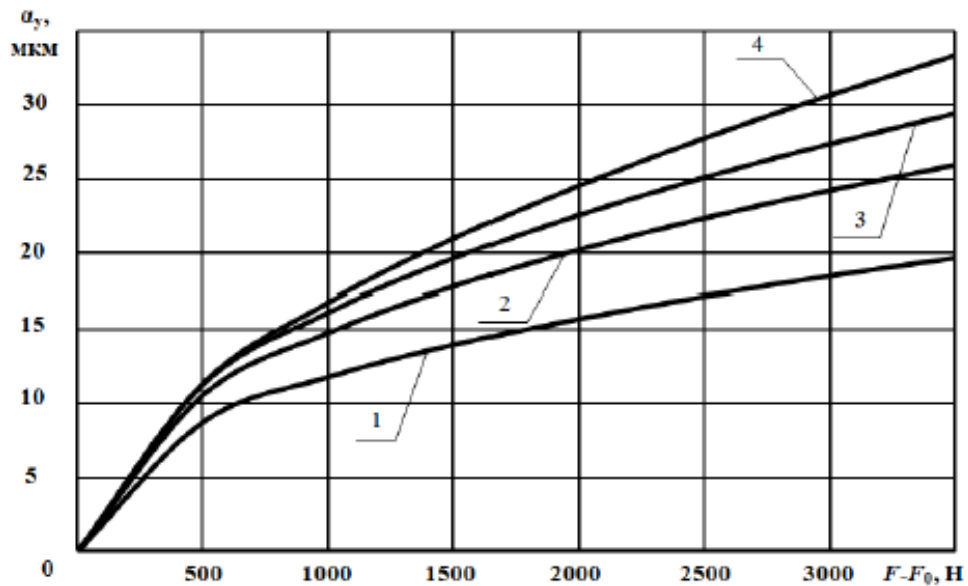


Рисунок 2.7 – Графіки залежності пружного зближення  $\alpha_u$  від ефективного навантаження  $(F-F_0)$  за різних співвідношень твердостей: 1 -  $H_{Dш} / H_D = 0,5$ ; 2 -  $H_{Dш} / H_D = 0,75$ ; 3 -  $H_{Dш} / H_D = 1$ ; 4 -  $H_{Dш}/H_D=2$

Таким чином, показано, що може виникати суттєва різниця між величиною повного зближення та його складових при різних явищах, що протікають в пружнопластичному контакті деталі, обмеженою поверхнею подвійної кривизни, з плоскою деталлю. У зв'язку з цим, існуюча практика застосування залежностей, що відповідають впровадженню, для всього діапазону співвідношення твердостей деталей, що контактують, може призводити до значної похибки (що досягає 80% і більше) при визначенні зближення і контактної жорсткості.

Додатково було проведено аналітичне дослідження впливу абсолютного значення твердості деталей, що контактують на величину зближення (пружного, залишкового і повного) в контакті і контактної жорсткості. Для аналізу вибрали співвідношення твердостей  $H_{Dш}/H_D=1$ , а величина твердостей змінювалася в діапазоні 1000...4000 МПа. На рисунках 2.8-2.10 представлені графіки залежності повного  $\alpha$ , залишкового  $h$  та пружного зближення  $\alpha_u$  від прикладеного навантаження при різних значеннях твердості контактуючих деталей.

Як очевидно з малюнка 2.8, зі збільшенням твердості контактуючих деталей величина повного зближення зменшується. При цьому зі збільшенням прикладеного навантаження вказане зменшення стає більш вираженим. Зокрема, зі збільшенням навантаження різниця між величинами повного зближення при значеннях твердості  $H_D=1000$  МПа (лінія 1) і  $H_D=4000$  МПа (лінія 5) досягає 71% у дослідженому діапазоні навантажень.

З малюнка 2.9 видно, що при збільшенні твердості деталей, що контактують величина залишкового зближення зменшується, проте зі збільшенням прикладеного навантаження різниця між величинами залишкового зближення не змінюється. Так, різниця між величинами залишкового зближення при значеннях твердості  $H_D = 1000$  МПа (лінія 1) та  $H_D = 4000$  МПа (лінія 5) становить близько 80%.

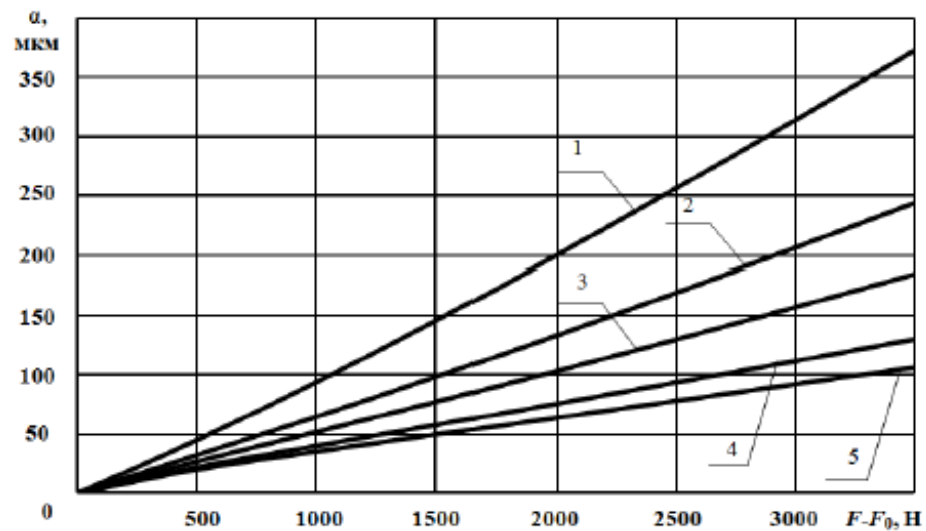


Рисунок 2.8 – Графіки залежності повного зближення від ефективного навантаження ( $F-F_0$ ) при співвідношенні твердостей  $H_{Dш}/H_D=1$  при різних величинах  $H_D$ : 1 -  $H_D=1000$  МПа; 2 -  $H_D = 1500$  МПа; 3 -  $H_D = 2000$  МПа; 4 -  $H_D = 3000$  МПа; 5 -  $H_D = 4000$  МПа

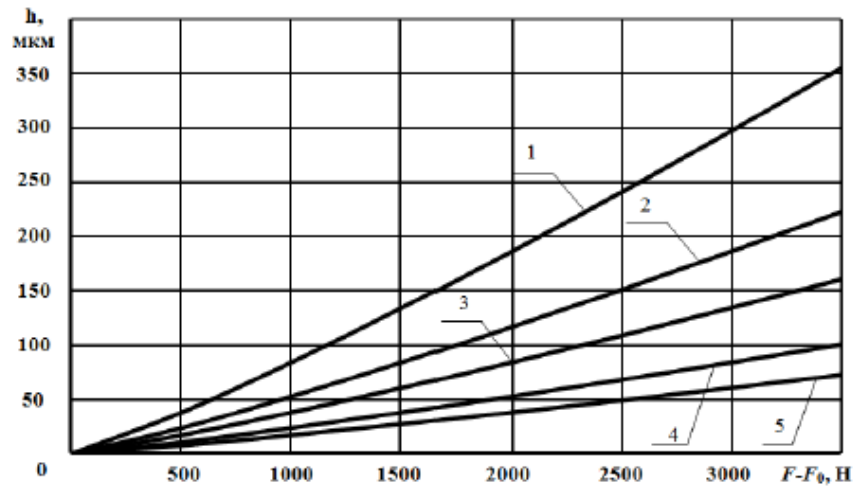


Рисунок 2.9 – Графіки залежності залишкового зближення  $h$  від ефективного навантаження ( $F-F_0$ ) при співвідношенні твердостей  $H_{Дш}/H_{Д}=1$  за різних величин  $H_{Д}$ : 1 -  $H_{Д}=1000$  МПа; 2 -  $H_{Д} = 1500$  МПа; 3 -  $H_{Д} = 2000$  МПа; 4 -  $H_{Д} = 3000$  МПа; 5 -  $H_{Д} = 4000$  МПа

З малюнка 2.10 видно, зі збільшенням твердості контактуючих деталей величина пружного зближення збільшується. При цьому зі збільшенням прикладеного навантаження вказане збільшення стає дещо більш вираженим. Так, різниця між величинами пружного зближення при значеннях твердості  $H_{Д}=1000$  МПа (лінія 1) та  $H_{Д}=4000$  МПа (лінія 5) досягає 50% у дослідженому діапазоні навантажень.

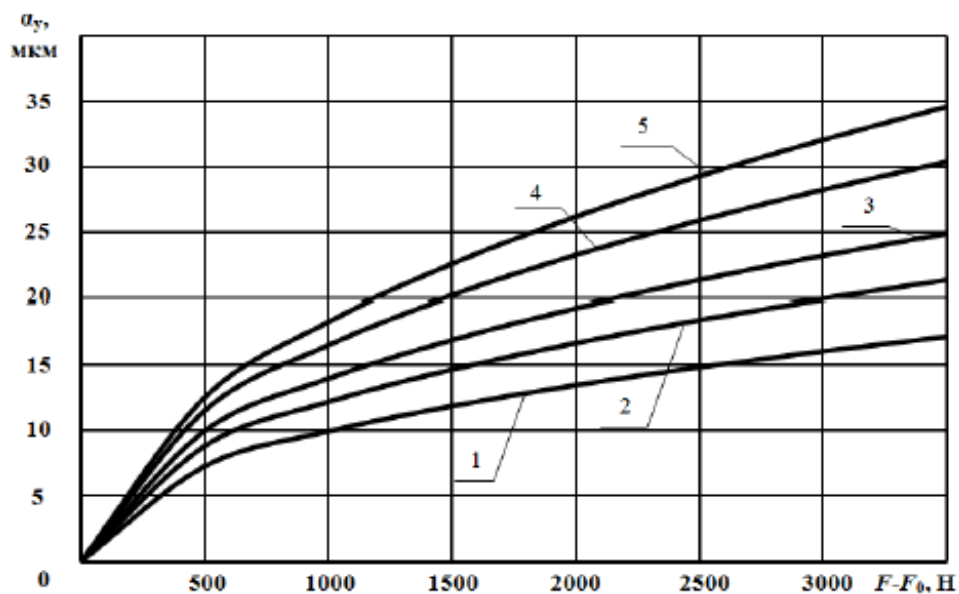


Рисунок 2.10 – Графіки залежності пружного зближення  $\alpha_y$  від

ефективного навантаження ( $F-F_0$ ) при співвідношенні твердостей  $H_{Dш}/H_D=1$  за різних величин  $H_D$ : 1 -  $H_D=1000$  МПа; 2 -  $H_D = 1500$  МПа; 3 -  $H_D = 2000$  МПа; 4 -  $H_D = 3000$  МПа; 5 -  $H_D = 4000$  МПа

## 4. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ЖОРКОСТІ УПРУГОПЛАСТИЧНОГО КОНТАКТУ ШЕРХУВАТИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ БЛИЗКОГО ТВЕРДОСТІ

### 4.1 Загальні положення

В основі контактної взаємодії мікровиступів шорстких поверхонь деталей лежать закономірності контакту одиничного мікровиступу (модельованого сферою, конусом, циліндром) з плоскою поверхнею деталі. Необхідно відзначити, що автором було досліджено закономірності контакту одиничної мікронерівності, що моделюється циліндром або конусом [56, 57]. Однак, оскільки в даний час найбільшого поширення набула практика моделювання мікровиступів сферою [16, 74, 75], для розробки методики розрахунку контактної жорсткості в контакті шорстких поверхонь плоских деталей близької твердості були використані наведені в розділі 2 залежності для визначення контактної жорсткості в контакті деталей, обмежених поверхнею подвійної кривизни.

При проведенні дослідження контакт двох деталей з шорсткими поверхнями був змодельований контактом деталей з шорсткою та номінально плоскою гладкою поверхнею шляхом введення поняття «еквівалентна шорстка поверхня» [16].

Для опису силового контакту шорсткості була використана запропонована у роботі [24] «однорівнева» модель, в якій всі мікровиступи шорсткої поверхні знаходяться на одному рівні і мають однаковий радіус кривизни. При цьому кожному зближенню відповідає свою розрахункову кількість мікровиступів, яку розраховують виходячи з рівності фактичних площ контакту в реальній поверхні та моделі.

### 4.2 Розробка методики розрахунку жорсткості пружнопластичного контакту шорстких поверхонь деталей близької твердості

У роботах [24, 63] були розроблені методики розрахунку зближення в контакті шорстких поверхонь плоских деталей для випадків впровадження та

сплющування мікровиступів, тобто коли твердість матеріалів контактуючих деталей різняться більш ніж у 2 рази. Аналогічно тому, як це зроблено в роботах [24, 63], була розроблена методика [64] розрахунку повного зближення в контакті шорстких поверхонь плоских деталей, справедлива у всьому діапазоні співвідношення твердостей, і, для різного характеру контактної взаємодії мікровиступів. Слід зазначити, що попередньо було досліджено окремі випадки контакту шорстких поверхонь, зокрема пластичний контакт деталей близької твердості [68] та пружнопластичний контакт деталей, виготовлених з матеріалів рівної твердості [69].

Нехай є реальна шорстка поверхня, яка притискається до номінально гладкої плоскої поверхні з силою  $F_N$ . При цьому виступи шорсткої поверхні мають радіус  $R$  і розташовані на різних рівнях  $N$  так, що відстань між рівнями однакова і дорівнює  $\alpha I/N$ .

Нехай також є модель шорсткої поверхні, яка притискається до номінально плоскої гладкої поверхні з силою  $F_M$ , при якій зближення та фактична площа контакту в реальному контакті та моделі рівні. При цьому виступи шорсткої поверхні мають радіус  $R$  і розташовані на одному рівні. Кількість виступів позначимо  $n$ .

Тоді співвідношення сил у реальному контакті та моделі може бути описано коефіцієнтом силової подоби  $k$  як

$$k = \frac{F_N}{F_M} = \frac{\sum_{j=1}^N n_j F_j'}{n F_1'}$$

де  $n_j$  і  $n$  – відповідно кількість виступів  $j$ -го рівня та «однорівневої» моделі;

Зближення на  $j$ -том рівні  $\alpha_j$  визначали як:

$$\alpha_j = \alpha_I - (j-1) \frac{\alpha_I}{N}$$

де  $\alpha_I$  – зближення першому рівні. Тоді

$$\frac{\alpha_I}{\alpha_j} = \frac{N}{N+1-j}.$$

Повне зближення  $\alpha$  в контактї включає пружне зближення  $\alpha_y$  і залишкове зближення  $h$ , що складається з впровадження і змінання нерівностей:

$$\alpha_j = \alpha_{y,j} + h_j.$$

Ці складові були визначені за формулами

$$\alpha_{y,j} = \sqrt[3]{\frac{9\pi^2 F_j'^2 (k_1 + k_2)^2}{16R \left[1 + \frac{2h}{\alpha_{y,j}}\right]}},$$
$$h_j = aR \left( \frac{F_j'}{H_{D_{mp}} R^2} \right)^b,$$

де  $k_1$  і  $k_2$  - коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу поверхонь,

$R$  – радіус мікровиступів,

$a$  та  $b$  – коефіцієнти, що залежать від співвідношення пластичної твердості матеріалу шорсткої (НДш) та гладкої поверхонь (НД) НДш/НД;

НДпр – наведена пластична твердість.

Слід зазначити, що тут НДш – пластична твердість деталі з шорсткою поверхнею, а НД – пластична твердість деталі з номінальною плоскою поверхнею.

Формула може бути перетворена на такий вид:

$$h_j = aR \left( \frac{F_j'}{H_{D_{mp}} \cdot R^2} \right)^{b-1,333} \left( \frac{F_j'}{H_{D_{mp}} \cdot R^2} \right)^{1,333}.$$

З наведених вище рівнянь видно, що зміна співвідношення твердостей

поверхонь контактуючих впливає на залишкову складову зближення і на числовий коефіцієнт  $t$  параметра  $m$ .

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнта  $t$  за різних співвідношеннях твердостей

НД <sub>ш</sub> /НД	0,75	1	1,25	1,5	1,75
$t$	0,166	0,154	0,155	0,166	0,184

Зроблені розрахунки показали (рисунок 3.1), що з кількості рівнів  $N \geq 20$  значення коефіцієнта силового подоби змінюється незначно і може вважатися постійним, тобто

$$k = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{F_N}{F_M} = \frac{F}{F_M} = const$$

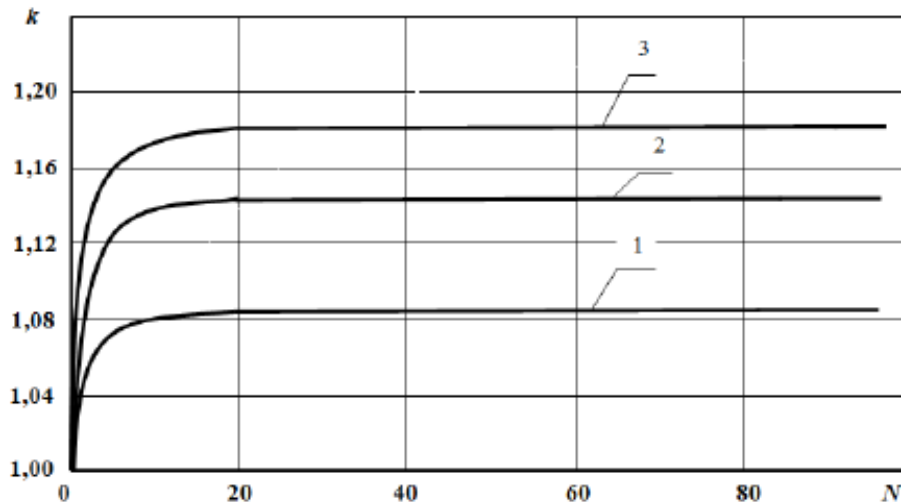


Рисунок 3.1 – Графіки залежностей коефіцієнта силової подібності  $k$  від числа рівнів  $N$  (для випадку НДш/НД = 1): 1 –  $v = 2$ ; 2 –  $v = 3$ ; 3 –  $v = 4$

Коефіцієнт силової подібності  $k$  може бути визначений з графіка на малюнку 3.2.

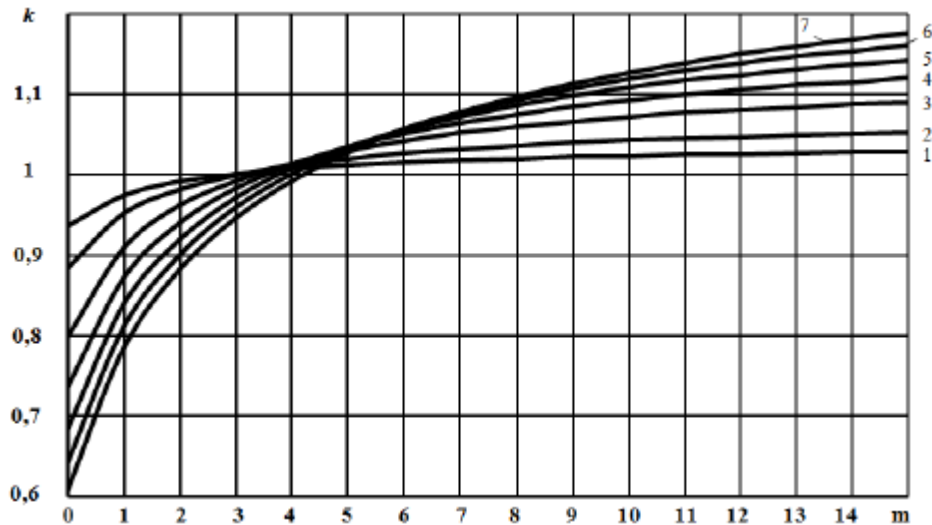


Рисунок 3.2 – Графік залежності коефіцієнта силової подібності  $k$  від параметра  $m$  за різних значень коефіцієнта  $\nu$ : 1-7 –  $\nu=1,25; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4$

Таким чином, отримана залежність для розрахунку повного зближення в контактi деталей з номінально плоскими шорсткими поверхнями, справедлива для всього діапазону співвідношення твердостей деталей, що контактують ( $0,5 \leq H_{Dш}/H_{Dд} \leq 2$ ), тобто для будь-якого характеру взаємодії мікрорівностей (впровадження або сплющування, випадку контакту деталей близької твердості). На основі розробленої методики було складено програму для ЕОМ для розрахунку параметрів контакту шорстких поверхонь [100].

Наведемо приклад розрахунку попередньо затягнутого болтового з'єднання з урахуванням контактної жорсткості стику. Розглянемо болтове з'єднання двох деталей, показане малюнку 3.3.

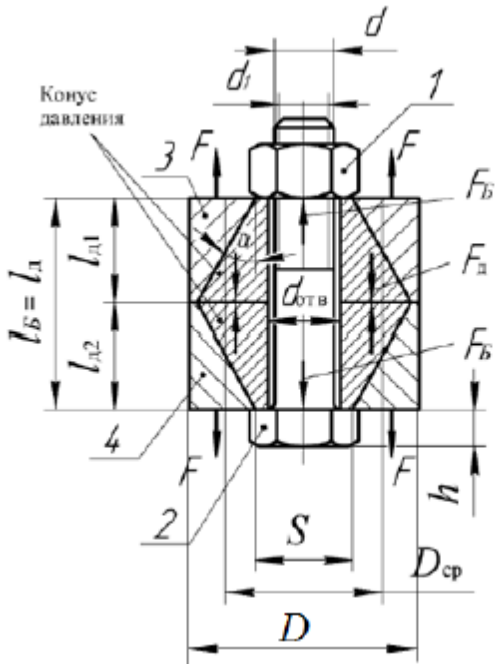


Рисунок 3.3 – Попередньо затягнуте болтове з'єднання:

1 – гайка; 2 – болт М20; 3,4 – сполучені деталі

Параметри з'єднання: сила затяжки  $F_{зат} = 20000$  Н; товщина деталей  $l_{Д1} = l_{Д2} = 10$  мм; довжина болта  $l_B = l_{Д} = 20$  мм; діаметр отвору  $d_{отв} = 21$  мм; діаметр деталей, що сполучаються  $D=30$  мм; параметри шорсткості:  $b = 0,4$ ;  $v = 2$ ;  $R=500$  мкм;  $R_{max} = 50$  мкм; твердості деталей  $H_{Д1} = H_{Д2} = 5000$  МПа; болт М20, діаметр болта  $d=20$  мм; діаметр нарізаної частини болта  $d_1 = 18$  мм; зовнішній діаметр опорної поверхні гайки (розмір під ключ)  $S = 30$  мм; висота головки гвинта  $h=13$  мм.

Зовнішня сила  $F_{кр}$  у момент розкриття стику розраховується як

$$F_{кр} = \frac{F_{зат}}{1 - \chi},$$

З використанням розробленої методики визначення зближення в контакті шорстких поверхонь деталей близької твердості було визначено величини зближень:  $\alpha_y=6,1$  мкм;  $h = 6,5$  мкм. Різьбові з'єднання є роз'ємними і зазнають повторного навантаження, тому для розрахунку жорсткості (або податливості) стику використовується тільки пружне зближення. Як показали експерименти,

величина пружного зближення практично не змінюється із збільшенням числа навантажень.

#### 4.3 Експериментальна перевірка методики розрахунку зближення в контактi шорстких поверхонь

Для експериментальної перевірки розробленої методики розрахунку залишкового зближення контактi плоских шорстких поверхонь було використано пристосування, зовнішній вигляд якого представлений малюнку 3.4.

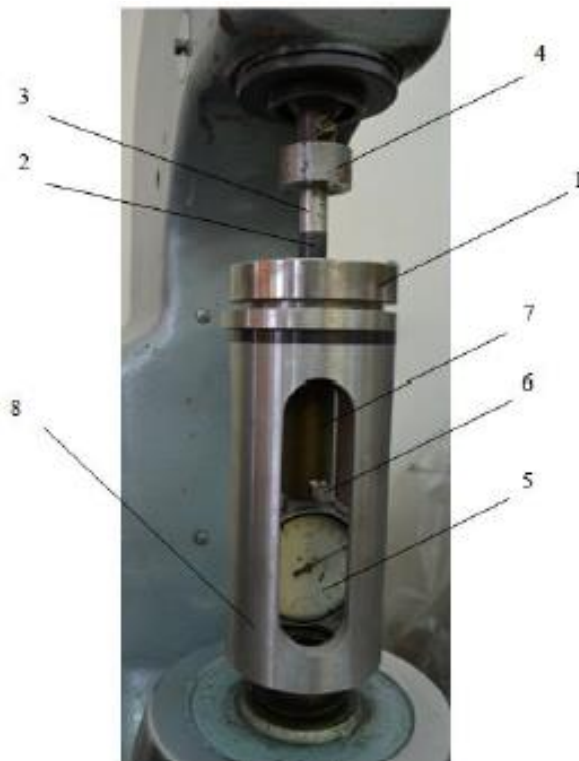


Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд пристрою для вимірювання зближення в контактi деталей з плоскими шорсткими поверхнями:

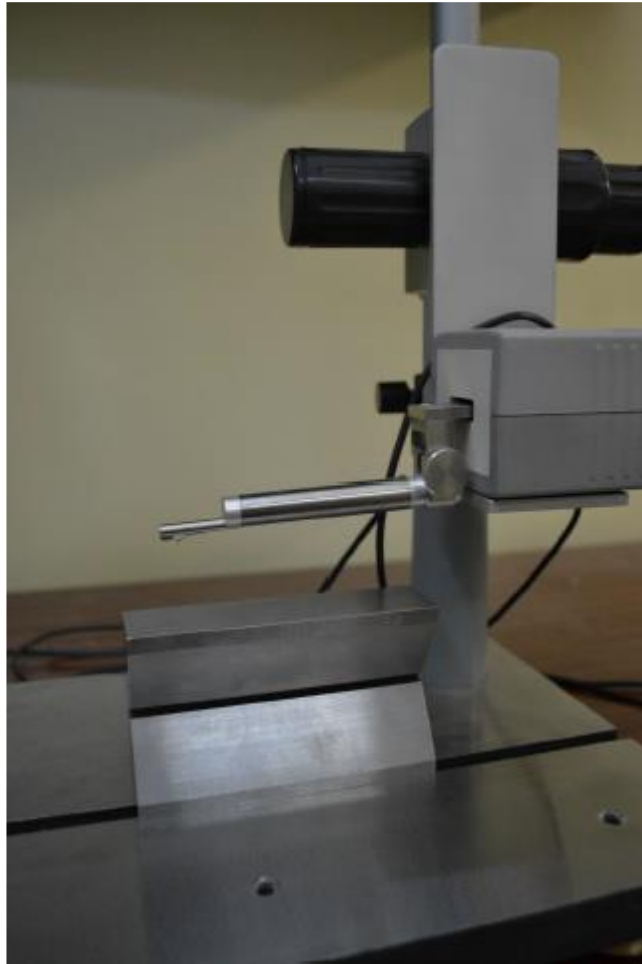
1 – основа; 2 – кільцевий зразок з полірованим торцем; повного  $\alpha$ , пружного  $\alpha_u$  та залишкового  $h$  зближень в контактi кільцевих зразків з торцями циліндричних зразків, виготовлених з матеріалів близької твердості.

Для експериментального дослідження було використано кільцеві зразки з полірованими торцями (рисунок 3.5), виготовлені зі сталі ( $H_D=1765$  МПа). Під час обробки торців для відсутності "завалювання" країв використовувалися свинцеві оправки. Кільцевий зразок поміщали всередину оправки свинцевої, а

після обробки зразок з оправкою нагрівали і видаляли оправку. Як шорсткувату поверхню використовувалися циліндричні зразки, торці яких були оброблені фрезеруванням. Параметри шорсткості поверхонь циліндричних зразків, визначених за допомогою профілометра модель 130 заводу «Протон-МІЕТ» (рисунок 3.6), і значення твердості матеріалу мали наступні значення:  $b=0,4$ ,  $\nu=1,7$ ;  $R=290$  мкм;  $R_{\max} = 50$  мкм;  $H_{Dш} = 2310$  МПа;  $\mu= 0,3$ ;  $E1 = E2 = 2,06 * 10^5$  МПа.



Рисунок 3.5 – Експериментальний сталевий кільцевий зразок з полірованим торцем



Малюнок 3.6 – Зовнішній вигляд профілактометра модель 130

Величину повного зближення  $\alpha$  вимірювали під навантаженням, величину залишкової складової зближення  $h$  вимірювали після зняття навантаження, а величину пружної складової розраховували як різницю повного зближення  $\alpha$  та його залишкової складової  $h$ :

$$\alpha_y = \alpha - h.$$

Проводили по 5 дослідів для кожного навантаження та співвідношення твердостей і розраховували середнє значення вимірюваної величини. Відхилення кожного виміряного значення середньої величини вбирається у 15%.

Додатково було визначено величини пружної осьової деформації кільцевого зразка, а також пружної деформації в контактї зразка з основою 1 (див. рис. 2.2). Для цього було проведено спеціальне експериментальне дослідження

контакту полірованого торця кільцевого зразка із загартованою сталеву плиткою. Отримані значення пружного зближення враховувалися щодо зближення в контакті шорсткої поверхні з гладкою кільцевою поверхнею зразка.

Експериментальні значення зближення були зіставлені зі значеннями, розрахованими за формулами. На малюнку 3.7 наведено залежності повного, залишкового та пружного зближення в контакті. Як бачимо, розбіжність експериментальних і розрахункових значень вбирається у 15%.

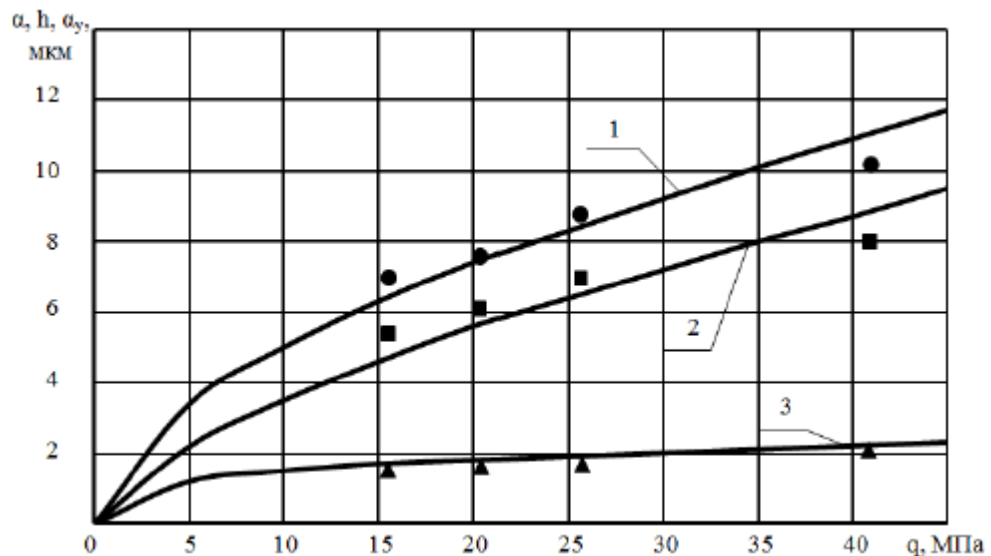


Рисунок 3.7 – Графіки залежності зближення від середнього тиску  $q$  в контакті сталевих шорсткої та полірованої поверхонь:

1 - повне зближення  $\alpha$ , 2 - залишкове зближення  $h$ , 3 - пружне зближення  $\alpha_y$ ; лінії – розрахунок за формулами, значки – експериментальні дані

Таким чином, експериментальна перевірка підтвердила достовірність розробленої методики розрахунку зближення і контактної жорсткості в контакті шорстких поверхонь у всьому діапазоні співвідношення твердостей матеріалів деталей, що контактують, тобто при різному характері контакту деталей (введення, сплющування, контакт деталей близької твердості).

## 5. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ НЕРУХОМИХ СПОЛУКІВ З ОБЛІКОМ КОНТАКТНОЇ ЖОРСТКІ ДЕТАЛЕЙ БЛИЗКОГО ТВЕРДОСТІ

Прикладом з'єднання з натягом, навантаженого осьювою силою, може бути з'єднання запірної втулки та півосі заднього моста автомобілів, зокрема ГАЗ 3110, ВАЗ 2107 та інших [8, 99]. Запірна втулка, зібрана тепловим способом з піввіссю, утримує підшипник півосі, при цьому максимальне осьове навантаження, яке має передавати з'єднання, становить 20000 Н [8].

Прикладом з'єднання плоских деталей, навантажених зсувною поперечною силою, є фланцеві муфти, що передають крутний момент. Прикладом такого з'єднання є різьбове з'єднання картера з кульовою опорою цапфи моста керованого повнопривідного вантажного автомобіля КамАЗ [32].

Закономірності, описані в главі 3, дозволили розробити методику визначення міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості деталей близької твердості, таких як циліндричні з'єднання з натягом і з'єднання плоских деталей, навантажених зсувною поперечною силою.

Для опису залежності міцності (граничної сили зсуву) від параметрів контакту деталей у нерухомих з'єднаннях використовували теорію розмірності [1, 24].

Як зразки були використані сталеві циліндри діаметром 16 мм і висотою 24 мм. Робочими були плоскі паралельні торцеві поверхні циліндра з однаковою шорсткістю. При цьому зазначені робочі поверхні обробляли фрезеруванням або круговим точенням або шліфуванням (рисунок 4.1).

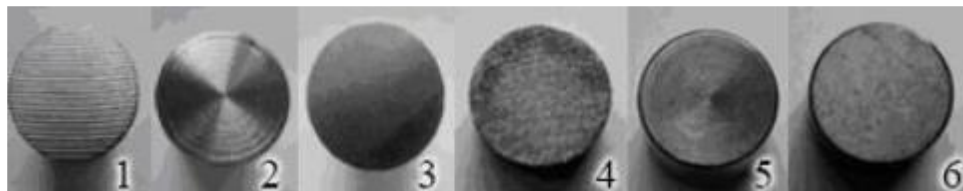
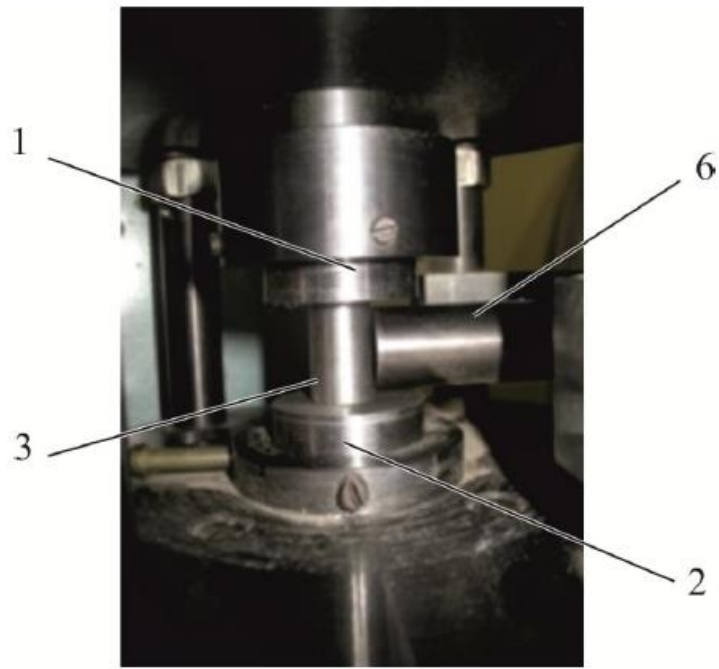


Рисунок 4.1 – Циліндричні зразки з різними видами обробки: цифри номери партій з'єднань

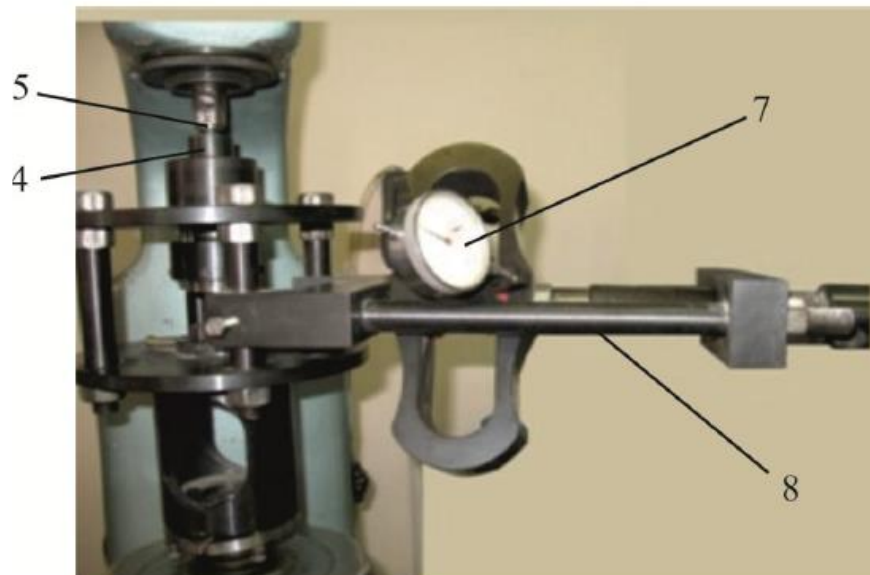
Зазначимо, що плоска малорозмірна кругова форма робочої поверхні зразка дозволила виключити вплив хвилястості поверхні і таким чином вважатимуться, що контурний тиск дорівнює номінальному; водночас такі зразки відповідають реальним виробам: фланцеві з'єднання ущільнювальних пристроїв, з'єднання деталей приладів, опорна поверхня гайки, шайби тощо.

Для визначення міцності з'єднань плоских деталей на зсув було використано пристрій, загальний вигляд якого показаний на малюнку 4.2. Циліндричний зразок 3 встановлювали торцями між двома сталевими плитками 1 і 2 з полірованими робочими поверхнями, які закріплювали в захватах спеціального пристрою, розміщеного на предметному столику преса Брінелля (рисунок 4.2а). Перед установкою деталі, що сполучаються поверхні, очищали від жирових плівок промиванням в спирті. Було випробувано шість партій з'єднань з 15 циліндричних зразків у кожній партії.

кам, використаний механізм, що навантажує преса Брінелля; навантаження від шпинделя преса передавалася через кульову опору 5, вертикальний шток і верхнє захоплення 4 досліджуване з'єднання. Зсув циліндричного зразка у горизонтальному напрямку проводили за допомогою гвинта. Зсувна сила передавалася від гвинта до циліндричного зразка через зразковий динамометр 8, з індикатором 7 для фіксації навантаження (малюнок 4.2б) і горизонтальний шток 6 (малюнок 4.2а). Відзначимо, що оскільки циліндричний зразок своїми торцями взаємодіє з двома полірованими поверхнями плиток, його відносний зсув відбувається одночасно по двох площинах контакту. У зв'язку з цим, показання індикатора дорівнюють подвоєній силі тертя.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Досліджуване з'єднання (а) та експериментальна установка (б):

1 та 2 – опорні плитки; 3 – випробуваний зразок; 4-верхнє захоплення; 5 – кульова опора; 6 – горизонтальний шток; 7 – індикатор; 8 – зразковий динамометр.

Випробування на зсув проводили при різних навантаженнях (від 2452 до

19620 Н), стискаючих стик деталей, що відповідало середнім тиском 12-98 МПа. При цьому для зразків поверхонь, оброблених фрезеруванням і шліфуванням, випробування на зсув проводили поперек слідів обробки. Силу тертя спокою визначали як половину найбільшої сили, що зсуває, фіксованої індикатором в момент початку зсуву циліндричного зразка. При кожному рівні нормального тиску в стикі деталей було випробувано три зразки. За результатами випробувань кожної партії сполук будували (за методом найменших квадратів) графіки залежностей сил тертя спокою  $F_{тр}$  від нормальної сили  $F_N$ , стискає стик деталей. На малюнку 4.3 представлені графіки для партій з'єднань 1, 2, 3. На малюнку 4.4 представлені графіки, що відповідають партіям з'єднань 4, 5, 6. Максимальне відхилення експериментальних значень від відповідних ліній становило трохи більше 15%.

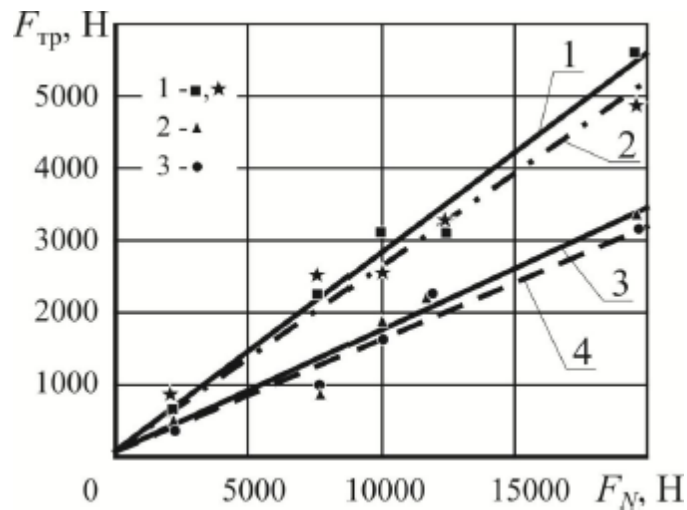


Рисунок 4.3 – Графіки експериментальних залежностей граничної сили зсуву спокою  $F_{тр}$  від нормальної сили  $F_N$ : лінії 1 та 2 – фрезерування при зсуві поверхонь уперек та вздовж слідів обробки; 3 – кругове точення; 4 – шліфування; значки – експериментальні дані

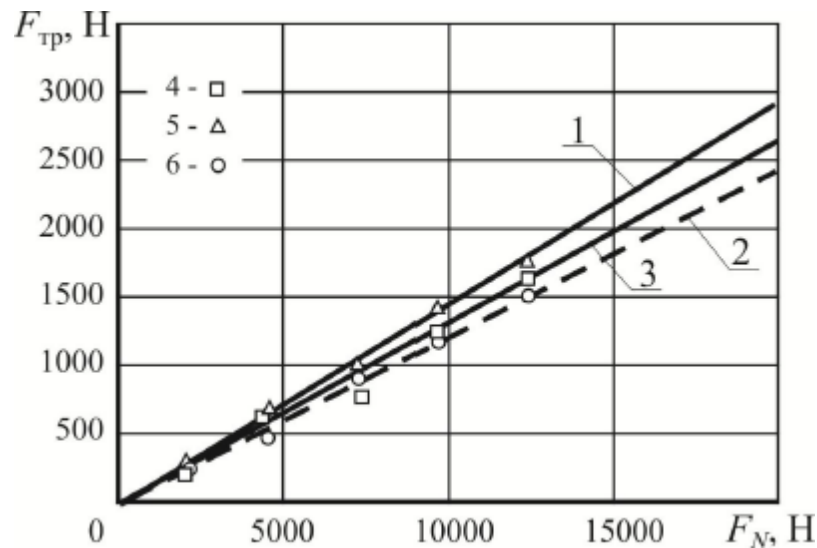


Рисунок 4.4 – Графіки експериментальних залежностей граничної сили зсуву спокою  $F_{тр}$  від нормальної сили  $F_N$ : 1 – фрезерування при зсуві поверхонь

Проведений аналіз показав, що відхилення експериментальних значень від значень з ймовірністю 95% не перевищує 20%, тобто запропонована формула може бути використана на практиці для розрахунку міцності плоских нерухомих сполук в умовах близької твердості матеріалів деталей, що сполучаються. Зазначимо, що формула (4.10) визначає найбільше значення сили, що зсуває; у практичних розрахунках з урахуванням зазначеної вище можливої похибки формули необхідно запроваджувати коефіцієнт запасу міцності не менше 1,2.

Випробування на міцність проводили через 24 години після складання на програмно-технічному комплексі для випробування матеріалів IP 5143200, показаному на малюнку 4.5. Навантаження до з'єднання прикладали через кульову опору. У процесі випробування фіксували зусилля зсуву (силу тертя спокою)  $F_{ос}$ , що відповідає початку осьового переміщення валу. Випробовували 3 партії з'єднань, по 10-12 з'єднань з різними натягами в кожній.

За результатами випробувань кожної партії сполук будували (за методом найменших квадратів) графіки залежностей сил тертя спокою  $F_{ос}$  від натягу  $\delta$  (рисунок 4.6). Максимальне відхилення експериментальних значень від

відповідних ліній становило трохи більше 15%.

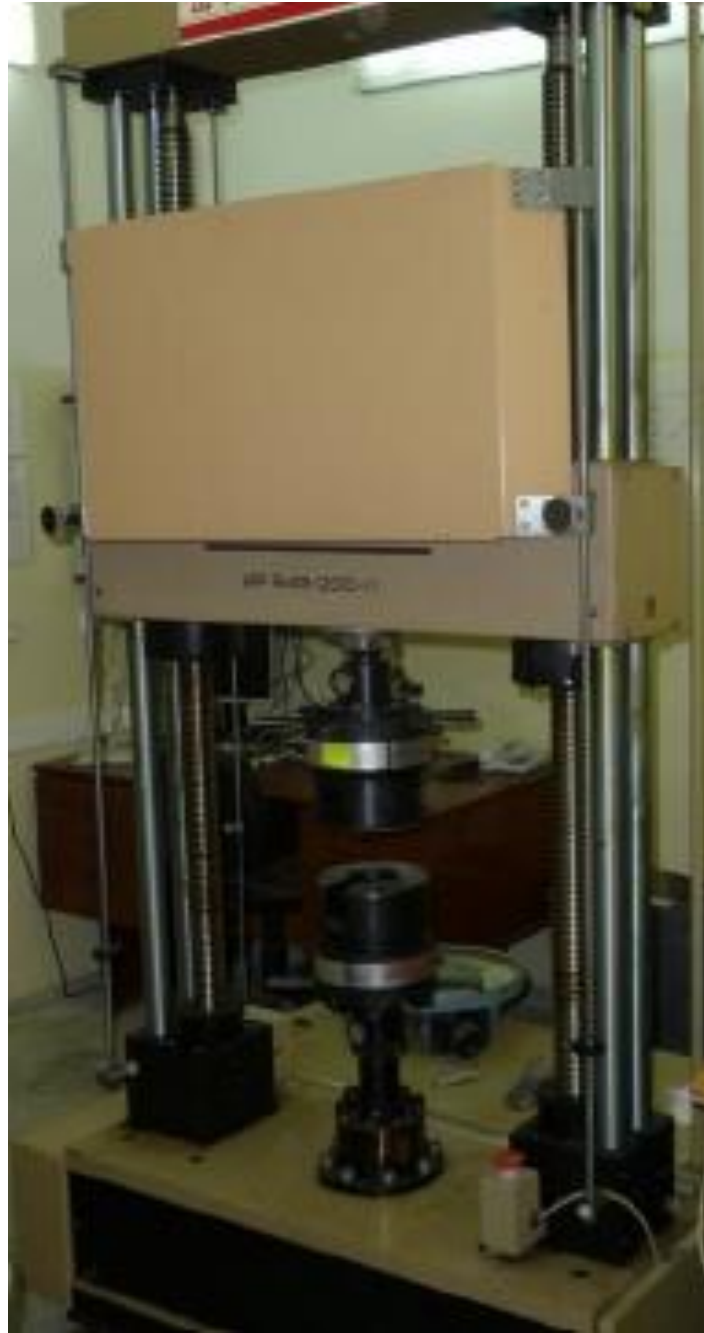


Рисунок 4.5 – Програмно-технічний комплекс для випробування металів

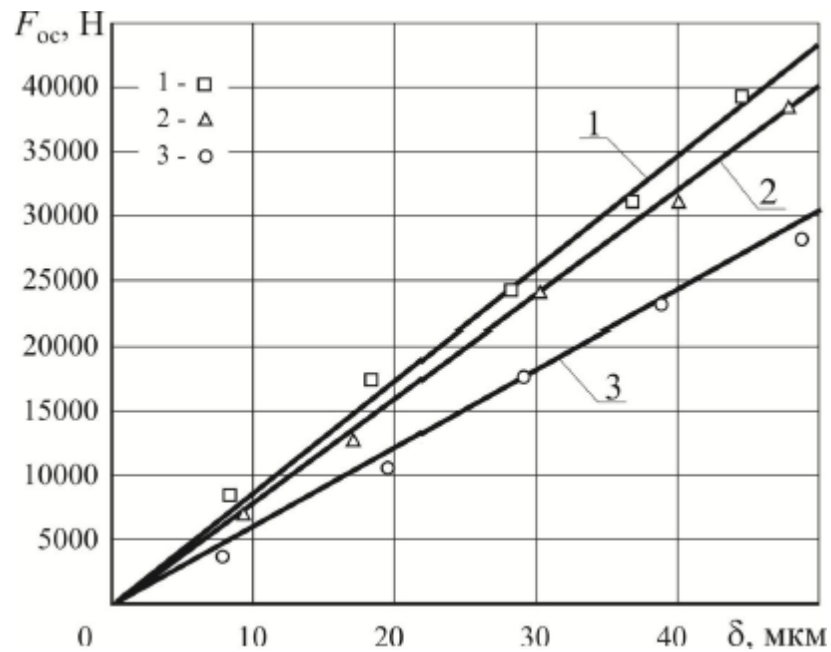


Рисунок 4.6 – Графіки залежності сили тертя спокою  $F_{ос}$  від початкового натягу: значки - експериментальні дані; лінії – їхня апроксимація; цифри – номер партії з'єднань

Проведений аналіз показав, що відхилення експериментальних значень від значень з ймовірністю 95% не перевищує 20%, тобто запропонована формула може бути використана на практиці для визначення міцності сполук з натягом, зібраних тепловим способом, в умовах близької твердості матеріалів деталей, що сполучаються.

Отримані залежності для розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості деталей, виготовлених із матеріалів близької твердості, лягли в основу алгоритму, розробленого для реалізації на ЕОМ.

Програма дозволяє вирішувати такі завдання:

Для циліндричних з'єднань із натягом.

За заданим значенням початкового натягу  $\delta$  визначити осьову силу  $F_{ос}$ , що передається з'єднанням.

За заданим значенням осьової сили, що зсуває (сили тертя спокою)  $F_{ос}$  визначити найменший початковий натяг  $\delta$ , що забезпечує міцність з'єднання.

Визначити допустиме значення осьової сили  $[F_{ос}]$ , виходячи з міцності

деталей з'єднання.

Для плоских з'єднань.

За заданим значенням середнього тиску  $q$  визначити найбільшу поперечну зсувну силу (силу тертя спокою)  $F_{тр}$ , що передається з'єднанням.

У верхній частині екрану є меню вибору необхідної задачі, в якому представлені всі можливі варіанти постановки задачі. Після вибору завдання на екран виводяться поле "Вихідні дані" (для з'єднань з натягом або плоских з'єднань), а також поле виведення даних. Користувач вводить дані про з'єднання, що розраховується, в тому числі геометричні розміри, параметри матеріалів деталей, параметри шорсткості, а також задані за умовою значення (або натягу, або осьової сили і т.д.).

Поле виведення в задачах для визначення міцності з'єднань з натягом містить інформацію про осьову зсувну силу (силу тертя спокою)  $F_{ос}$ , початковому натягу  $\delta$  і складових зближення в контакті деталей: залишковому зближенні  $h$  і пружному зближенні  $\alpha u$  (рисунок 4.7). У випадку, коли з'єднання не проходить перевірку на міцність деталей, на екрані виводиться напис "Не задовольняє умовам міцності".

Поле виведення в задачах для визначення міцності плоских з'єднань містить інформацію про осьову зсувну силу (силу тертя спокою)  $F_{тр}$ , середній тиск  $q$  і складових зближення в контакті деталей: залишкове зближення  $h$  і пружне зближення  $\alpha u$  (рисунок 4.8).

Таким чином, програма має нескладний інтерфейс і зрозуміла для будь-якого користувача. За допомогою розробленої програми значно прискорюється розрахунок міцності нерухомих з'єднань, зокрема з'єднань з натягом і плоских з'єднань, що дозволяє на ранньому етапі виробництва керувати параметрами з'єднання. Також програма дозволяє отримувати більш точні результати порівняно з ручними розрахунками, що також позитивно впливає застосування з'єднання у виробництві.

Form1

Соединения с натягом    Плоские соединения    Выход

Исходные данные:

Наружный диаметр $d_{\text{вн}}$ , мм	20	Наружная длина, мм	20000	Ступень	20000
Диаметр отверстия $d_{\text{отв}}$ , мм	7	Коэффициент Пуассона	0,3	Ступень	0,3
Наружный диаметр ступени $d_{\text{ст}}$ , мм	40	Твердость НД, МПа	4000	Ступень	2420
Диаметр сопоставления, мм	9	Плотность $\rho$ , МПа	520	Ступень	520
Запас прочности	1,2	Параметр шероховатости $R_a$	17,2	$\gamma$	2,33
Начальный натяг, мм	30	Резьба, мм	27	$R_f$ , мм	47

OK

Определение  $F_{\text{ос}}$  и  $T$  по натягу:

Осевая сила $F_{\text{ос}}$ , Н	16524,9
Крутящий момент $T$ , Н·мм	0
Начальный натяг, мм	30
Остаточное обжатие $\delta$ , мм	1,524
Упругое обжатие $\delta_{\text{уп}}$ , мм	0,429

а)

Form1

Соединения с натягом    Плоские соединения    Выход

Исходные данные:

Площадь контакта, мм <sup>2</sup>	221	Наружная длина, мм	20000	Ступень	20000
Коэффициент запаса прочности	1,2	Коэффициент Пуассона	0,3	Ступень	0,3
Среднее обжатие $\delta$ , мм	36,8	Твердость НД, МПа	1800	Ступень	2250
Параметры шероховатости $R_a$	0,08	$\gamma$	1,65		
Резьба, мм	27	$R_f$ , мм	38		

OK

Определение осевой силы  $F_{\text{ос}}$ :

Среднее обжатие, мм	36,8
Сила осевой силы $F_{\text{ос}}$ , Н	317,1
Остаточное обжатие $\delta$ , мм	3,564
Упругое обжатие $\delta_{\text{уп}}$ , мм	1,24

б)

Рисунок 4.12 – Пример розв'язання задач: а) визначення осової сили  $F_{\text{ос}}$  по заданому початковому натягу  $\delta$  у з'єднанні з натягом;

## РОЗДІЛ 6

### РОЗРОБКА ДИДАКТИЧНОГО ПРОЄКТУ ФАКУЛЬТАТИВНОГО ЗАНЯТТЯ НА ТЕМУ «РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ МІЦНОСТІ НЕРУХОМИХ З'ЄДНАНЬ З УРАХУВАННЯМ КОНТАКТНОЇ ЖОРСТКОСТІ» ДЛЯ ФАХІВЦІВ МАШИНОБУДІВНОЇ ГАЛУЗІ

#### 6.1. Постановка цілей факультативного заняття (оперативних цілей)

В таблиці 6.1 наведено оперативні цілі з теми.

Таблиця 6.1

Постановка цілей факультативного заняття

Цілі факультативного заняття	Цілі формування різних рівнів засвоєння навчального матеріалу	Умови досягнення	Результат у вигляді дій здобувачів освіти
1	2	3	4
Сформувані вміння розробляти методику розрахунку контактної жорсткості первісно-точкового пружно-пластичного контакту деталі, обмеженою поверхнею подвійної кривизни, плоскою	I-IV рівень	Базові знання з дисципліни «Теорія різання та ріжучий інструмент»	Сформовані вміння у здобувачів освіти щодо розробки методики розрахунку контактної жорсткості первісно-точкового пружно-пластичного контакту деталі, обмеженою поверхнею подвійної кривизни, з плоскою поверхнею деталі при близьких твердостях їх матеріалів; розробка методики розрахунку

1	2	3	4
<p>поверхнею деталі при близьких твердостях їх матеріалів; розробка методики розрахунку жорсткості пружно-пластичного контакту шорстких поверхонь плоских деталей близької твердості; розробка методики розрахунку жорсткості пружно-пластичного контакту шорстких поверхонь плоских деталей близької твердості; розробка методики розрахунку жорсткості пружно-пластичного контакту шорстких поверхонь циліндричних деталей близької твердості у з'єднаннях з натягом; розробка методики розрахунку міцності з'єднання плоских деталей близької твердості, навантаженої силою, що зрушує; розробка методики розрахунку міцності циліндричного з'єднання з натягом деталей близької твердості; розробка програм для ЕОМ, призначених до розрахунку</p>			<p>жорсткості пружно-пластичного контакту шорстких поверхонь плоских деталей близької твердості; розробка методики розрахунку жорсткості пружно-пластичного контакту шорстких поверхонь циліндричних деталей близької твердості у з'єднаннях з натягом; розробка методики розрахунку міцності з'єднання плоских деталей близької твердості, навантаженої силою, що зрушує; розробка методики розрахунку міцності циліндричного з'єднання з натягом деталей близької твердості; розробка програм для ЕОМ, призначених до розрахунку міцності нерухомих з'єднань деталей машин.</p>

1	2	3	4
міцності нерухомих з'єднань деталей машин.			

## 6.2. Перелік літературних джерел з теми

1. Баланюк Г. В. Підвищення точності та якості багаторізевого розточування ступінчастих отворів на основі дослідження динаміки технологічної системи : автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук / Баланюк Ганна Василівна ; МОН України, Одеський нац. політехн. ун-т. – Одеса, 2018. – 23 с. 713825 К 621.9

2. Барандич К. С. Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей при їх токарному обробленні : автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук / Барандич Катерина Сергіївна ; МОН України, Нац. техн. ун-т України "КПІ імені І. Сікорського". – Київ, 2018. – 22 с. К 128902 621.7

3. Батигін Ю. В. Устаткування для практичної реалізації індукційного нагрівання в сучасних технологіях машинобудування / Ю. В. Батигін, О. С. Сабокар, В. А. Стрельнікова // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 4. – С. 70-74. – Бібліогр.: с. 73 (5 назв). Р/О126.

## 6.3. Конструювання дидактичних матеріалів: аналіз структури навчального матеріалу факультативного заняття

План викладення теми: «Розробка методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості».

1. Розробка методики розрахунку контактної жорсткості первісно-точкового пружнопластичного контакту деталі, обмеженою поверхнею подвійної кривизни, з плоскою поверхнею деталі при близьких твердостях їх матеріалів;
2. Розробка методики розрахунку жорсткості пружно-пластичного контакту шорстких поверхонь плоских деталей близької твердості;
3. Розробка методики розрахунку жорсткості пружно-пластичного контакту шорстких поверхонь циліндричних деталей близької твердості у з'єднаннях з натягом;
4. Розробка методики розрахунку міцності з'єднання плоских деталей близької твердості, навантаженої силою, що зрушує;
5. Розробка методики розрахунку міцності циліндричного з'єднання з натягом деталей близької твердості;
6. Розробка програм для ЕОМ, призначених до розрахунку міцності нерухомих з'єднань деталей машин.

#### **6.4. Аналіз базових умов навчання**

В таблиці 6.2 приведено вибір базових понять, визначення способів перевірки та формування базових знань.

Таблиця 6.2

Вибір базових понять, визначення способів перевірки та формування базових знань

Перелік базових понять, законів, способів дії	Назва дисциплін і тем, в яких формуютьс я базові знання і дії	Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості базових знань і способів дій	Способи актуалізації або поповнення базових знань і способів дій
1	2	3	4
Розрахунок з'єднань	Дисципліна «Прикладна	Метод – комбіноване опитування Форма – фронтальна	Нагадування основних

Перелік базових понять, законів, способів дії	Назва дисциплін і тем, в яких формуються базові знання і дії	Способи (методи, форми, засоби) перевірки рівня сформованості базових знань і способів дій	Способи актуалізації або поповнення базових знань і способів дій
1	2	3	4
деталей машин	механіка»	Засіб – контрольні питання. 1. Яку сполуку називають різьбовою, за якими ознаками її	моментів

Продовження табл. 6.2

1	2	3	4
		<p>можна відрізнити від інших сполук?</p> <p>2. Переваги та недоліки різьбових з'єднань.</p> <p>3. Класифікація різьбових з'єднань.</p> <p>4. Від чого залежить довжина кінця шпильки, що загвинчується?</p> <p>5. Типи різьблення, що застосовуються в нерухомих з'єднаннях.</p> <p>6. Якими параметрами має метричне різьблення?</p> <p>7. Чому необхідне стопоріння кріпильних різьблень?</p> <p>8. Які принципи використовуються при стопоренні різьбових з'єднань?</p> <p>9. Для яких різьбових виробів призначаються класи міцності, що входять до складу класу міцності?</p> <p>10. Які матеріали використовують для різьбових з'єднань?</p>	

## 6.5. Проектування мотиваційних технологій навчання

На рис. 6.2 представимо характеристику мотиваційних технологій навчання, а в таблиці 6.3 – текст мотивації до нашого заняття

Таблиця 6.3

### Визначення способів реалізації мотивації

Способи реалізації мотивації	Внутрішня мотивація
1	2
Вступна мотивація Приєм: віднесення	У машинобудуванні широко застосовуються нерухомі з'єднання деталей, що сполучаються поверхні яких характеризуються певною шорсткістю. До найбільш поширених відносяться з'єднання з натягом і різьбові з'єднання. У існуючих розрахунках цих сполук, як правило, не враховується контактна податливість поверхонь деталей, що сполучаються, що в ряді випадків призводить до втрати працездатності з'єднань. Так на практиці відмічені виникають з часом повертання бандажів щодо колісних центрів коліс рухомого складу, зниження вихідної точності машин (металорізальних верстатів, промислових роботів та ін), поява фреттинг деталей в з'єднанні (осі коліс рухомого складу, лопатки турбін). Більшість досліджень у галузі вивчення контактної податливості присвячено нормальній податливості. Дотична податливість та її взаємозв'язок із нормальною податливістю вивчені меншою мірою. При цьому характер розподілу навантаження в з'єднаннях з натягом і різьбових з'єднаннях, граничні навантаження, що передаються ними, і параметри, що впливають на фреттинг, залежать, як показують результати експериментів, від податливості контактної сфери в дотичному напрямку. Однак до теперішнього часу при розробці нового обладнання проектні та перевірені розрахунки нерухомих з'єднань деталей машин проводяться без урахування контактної податливості, що викликає необхідність тривалого доведення деяких конструкцій за результатами експлуатації, а також ремонтів, що підвищують витрати. Таким чином, тема магістерської роботи, присвяченої розробці методів розрахунку нерухомих з'єднань деталей машин, що враховують

Способи реалізації мотивації	Внутрішня мотивація
1	2
	податливість контактного шару, є актуальною.

## 6.6. Проектування технології формування орієнтовної основи діяльності на факультативному занятті

Вибір методів, форм та засобів формування ООД наведено в таблиці 6.4

Таблиця 6.4

Способи формування ООД на факультативному занятті

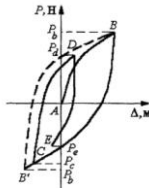
Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
I	Фронтальна	Майстер-класи – передача практичного досвіду від вчителя до учнів.	Презентаційні слайди з теми
II	Фронтальна	Інтерактивні вебінари – традиційна лекція разом із дискусією, розбором, демонстрацією слайдів чи фільмів.	плакати, інтерактивні дошки; інтерактивні приставки,
III	Фронтальна	Голосування, опитування — обговорення, під час якого учні активно входять у пошук істини, відкрито діляться думками і вчать аргументувати свою думку. Мозковий штурм - спільне генерування ідей та пошук нестандартних творчих рішень.	проектори, дисплеї комп'ютери та оргтехніку
IV	Фронтальна	Кейси – вирішення конкретної ситуації. Проекти - самостійна робота над поставленим завданням. Тренінги – спільний пошук вирішення проблеми з подальшим обговоренням.	

## 6.7 Проєктування технології формування виконавчих дій на факультативному занятті

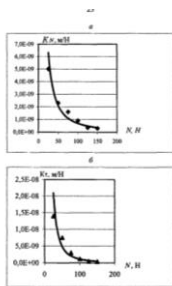
Вибір методів, форм та засобів формування виконавчих дій наведено в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5

Способи формування виконавчих дій з теми

Рівні засвоєння навчального матеріалу	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
I, II, III, IV	Фронтальна	Вправи, самостійна робота	<p>Завдання 1. Опишіть контакту сферичних відповідно рисунку.</p>  <p>Завдання 2. Опишіть залежність зближення від зусилля підібгання.            1 – пластичне деформування; 2 – пружне деформування;            3 – крива розфузки.</p> 

ис. 2. Зависимость сближения от усилия подбгате

1	2	3	4
			<p>Завдання 3. Опишіть змйну динамічної контактної нормальної (а) та дотичної (б) податливостей різьбового з'єднання за різного початкового тиску.</p> 

### 6.8 Проектування контрольних дій з теми

Вибір методів, форм та засобів формування контрольних дій наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 6.6

Засоби контролю з теми факультативного заняття

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
IV рівень	Фронтальна форма	Закріплююча бесіда	<p>Питання:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Проаналізуйте методи визначення міцності нерухомих сполук.</li> <li>2. Опишіть методику розрахунку контактної жорсткості</li> <li>3. Опишіть алгоритм розробки методики розрахунку зближення та жорсткості в контакті шорстких</li> </ol>

Рівні засвоєння навчального матеріалу теми заняття	Форми	Методи	Засоби
1	2	3	4
			поверхонь плоских деталей близької твердості.

Продовження табл. 6.6

1	2	3	4
			4. Опишіть алгоритм розробки методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань плоских деталей близької твердості

### 6.9 Розробка сценарію факультативного заняття

Сценарій заняття, його структура й зміст структурних елементів представлені у вигляді табл. 6.7.

Таблиця 6.7

Сценарій заняття з теми заняття «Розробка методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості»

№ з/п	Структурні елементи заняття	Зміст структурних елементів
1	2	3
1	Організаційний момент	Вітання, фіксація відсутніх, перевірка зовнішньої обстановки в аудиторії. Вітання викладача. Студенти підтверджують присутності у момент переключки, налагоджуються на здійснення навчальної діяльності.
2	Повідомлення теми і мети заняття	Повідомлення теми заняття: «Розробка методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості». Мета: сформувати вміння у здобувачів освіти щодо

		розробки методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості.
3	Мотивація мети	Повідомлення важливості вивчення даної теми: «Підвищення ефективності процесу високошвидкісного різання гарячого металопрокату шляхом перерозподілу теплових потоків». Текст для формування внутрішньої мотивації представлений в табл. 4.3.
4	Актуалізація базових знань	Проведення усного фронтального опитування. Метод – усне опитування. Форма – фронтальна.

Продовження табл. 6.7

1	2	3
		Засіб –питання. Перелік контрольних питань представлений в таблиці 4.2.
5	Формування ООД	Викладач викладає новий навчальний використовуючи методи традиційні – пояснення, бесіда, демонстрація та інноваційні – лекція-дискусія з елементами мозкового штурму відповідно за плану заняття, який представлений у п. 4.3.
6	Формування ВД	Викладач проводить закріплення навчального матеріалу за допомогою методу – рішення задач, видаючи кожному студенту картики-завдання з вправами. Приклад вправ представлений в табл. 4.5.
7	Формування КД	Викладач проводить студентам контрольні питання, які представлені в таблиці 4.6.
8	Підбиття підсумків, видача домашнього завдання	Узагальнення засвоєного шляхом нагадування в узагальненому вигляді основних питань, розглянутих на занятті Відновлення в пам'яті основних моментів матеріалу заняття. Видає домашнє завдання: Написати реферат по темі.

### Висновки до розділу 6

В четвертому розділі магістерської кваліфікаційної роботи було виконано розробку факультативного заняття з теми «Розробка методики розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості» для фахівців

в галузі машинобудування, а саме: сформульована дидактична мети практичного заняття, розроблений аналіз базових умов навчання, обраний тип мотивації та сформульований її текст, сформовані системи задач і завдань для вирішення і виконання на практичній роботі, розроблені способи формування орієнтовної основи діяльності та формування виконавчих дій, організація виконання завдань та рішення задач, контролю сформованих умінь та розроблений сценарій факультативного заняття.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальне завдання розрахунку міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості деталей, виготовлених із матеріалів близької твердості, з урахуванням впливу різних факторів. Розроблені методики були отримані з використанням контактного модуля зміцнення (пластичної твердості НД, ГОСТ 18835-73), а також нової характеристики контактної взаємодії - наведеної пластичної твердості НДпр, що дозволяє враховувати твердість обох деталей, зібраних в з'єднання. Використання зазначених понять дозволяє визначити жорсткість в контакті деталі, обмеженою поверхнею подвійної кривизни, з плоскою поверхнею деталі і в стику деталей з плоскими шорсткими поверхнями для випадку, коли твердості матеріалів деталей, що контактують, відрізняються менш ніж у 2 рази.

Розроблено методику розрахунку залишкової контактної деформації в контакті деталей, обмежених поверхнями двоякої кривизни, справедлива для всього діапазону співвідношення твердостей, і, отже, для будь-якого характеру взаємодії деталей (впровадження, сплющування, контакту деталей близької твердості). взаємодії – "наведена пластична твердість" НДпр, яка дозволяє враховувати як співвідношення твердостей матеріалів контактуючих деталей, так і абсолютне значення твердості. та контакту деталей близької твердості, що досягає 80%.

Обґрунтовано можливість використання безрозмірних комплексів параметрів, що характеризують міцність нерухомих з'єднань для випадку контакту деталей близької твердості. На основі експериментальних даних визначено коефіцієнти питомої міцності, що характеризують взаємозв'язок між безрозмірними комплексами для досліджених сполук. З використанням зазначених коефіцієнтів та безрозмірних комплексів розроблено методику розрахунку міцності плоских з'єднань та з'єднань з натягом з урахуванням контактної жорсткості деталей для випадку, коли деталі виготовлені з матеріалів

близької твердості. Розроблена методика дозволяє враховувати вплив основних факторів: параметрів шорсткості, наведеної твердості деталей, що контактують, геометричних розмірів деталей і характеру взаємодії мікрорівнів поверхонь деталей. Облік зазначених параметрів дозволяє уточнити значення коефіцієнта тертя для випадку контакту деталей близької твердості, що призводить до підвищення точності визначення здатності навантаження з'єднання і дозволяє зменшити габарити і металомісткість деталей з'єднання.

Отримані залежності визначення міцності нерухомих з'єднань з урахуванням контактної жорсткості деталей близької твердості лягли основою програми для ЕОМ визначення міцності плоских з'єднань і з'єднань з натягом деталей. З використанням розробленої програми було показано, що характер взаємодії деталей (використання мікрорівнів або контакт деталей близької твердості) суттєво впливає на здатність навантаження нерухомих з'єднань. Так, різниця здатності навантаження з'єднань з натягом для випадків впровадження і контакту деталей близької твердості може становити більше 30% у досліджених випадках. Для з'єднань плоских деталей зазначена різниця може становити у досліджених випадках понад 80%. Таким чином, облік співвідношення твердостей (характеру контактної взаємодії) дозволяє підвищити достовірність розрахунку зближення, контактної жорсткості деталей та, отже, міцності нерухомих сполук.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Головенкін В. П. Інженерна педагогіка [Електронний ресурс] : підруч. / В. П. Головенкін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. Режим доступу: [http://psy.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/02/Injenerna\\_pedagogika.pdf](http://psy.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/02/Injenerna_pedagogika.pdf)
2. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: дидактичне проектування: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УПА, 2019. – 204 с.
3. Коваленко О. Е., Брюханова Н. О., Корольова Н.В. Методика професійного навчання: основні технології навчання: Підручник для студентів інженерно-педагогічних спеціальностей. – Харків: УПА, 2019. – 174 с.
4. Лебедик Л.В., Стрельніков В.Ю., Стрельніков М.В. Сучасні технології навчання і методики викладання дисциплін: Навчально-методичний посібник для слухачів курсів підвищення кваліфікації педагогічних працівників закладів середньої, професійної (професійно-технічної), фахової передвищої та вищої освіти / Л. В. Лебедик, В. Ю. Стрельніков, М. В. Стрельніков. – Полтава : АСМІ, 2020. – 303 с.
5. Методика професійної освіти : навч. посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 015 «Професійна освіта» галузі знань 01 «Освіта / Педагогіка» / Д. О. Чернишев, К. І. Почка, Г. Л. Корчова, Ю. С. Красильник, М. В. Руденко. – Київ : Компринт, 2024. – 224 с.
6. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи для здобувачів освіти другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 015 Професійна освіта (за спеціалізацією) / Укр. інж.-пед. акад.; упоряд.: О. Е. Коваленко, Н. О. Брюханова, Н.В. Божко, Н.В. Корольова – Харків: УПА, 2024. – 82 с.

7. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» першого (бакалаврського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.

8. Освітньо-професійна програма «Професійна освіта (Машинобудування)» другого (магістерського) рівня. Затверджена вченою радою Української інженерно-педагогічної академії від 28.06.2024 року №13.

9. Семенова А.В. Професійна педагогіка: Підручник. / Авт. : О.В. Грабовський, Л.В. Коломієць, О.С. Савельєва, А.В. Семенова, В.Ф. Яні; за заг. ред. А.В. Семенової. – Одеса: Бондаренко М.О., 2020. – 575 с.

10. Сайт дистанційної освіти Університету – Режим доступу: <https://moodle.karazin.ua>

11. EdEra – студія онлайн-освіти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ed-era.com/>

12. Український освітній онлайн-портал для вчителів «На Урок» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://naurok.com.ua/>

13. «Освіторія Медіа» – онлайн медія про освіта та виховання [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://osvitoria.media/>

14. Освіта.UA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://osvita.ua>

15. Всеосвіта – освітня платформа для професійного зростання педагогічних працівників та підвищення їх педагогічної майстерності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vseosvita.ua/>