

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ШЕПЕЛЕНКО ІГОР ВІТАЛІЙОВИЧ



УДК 621.787.4

**НАУКОВІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ АНТИФРИКЦІЙНИХ
ПОКРИТТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ**

Спеціальність 05.02.08 – Технологія машинобудування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі експлуатації та ремонту машин
Центральноукраїнського національного технічного університету
Міністерства освіти і науки України.

**Науковий
консультант:**

доктор технічних наук, професор
Посвятенко Едуард Карпович,
Національний транспортний університет,
професор кафедри виробництва, ремонту та
матеріалознавства.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Киричок Петро Олексійович,
Національний технічний університет
України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», директор
Навчально-наукового Видавничо-
поліграфічного інституту;

доктор технічних наук, професор
Пермяков Олександр Анатолійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри технології
машинобудування та металорізальних
верстатів;

доктор технічних наук, професор
Грушко Олександр Володимирович,
Вінницький національний технічний
університет, завідувач кафедри опору
матеріалів та прикладної механіки.

Захист відбудеться «21» грудня 2021 р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.11 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, навчальний корпус №1, аудиторія 214.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розіслано «09» листопада 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.С. Ганпанцурова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одна з найбільш важливих і актуальних проблем сучасного машинобудування – розробка і широке застосування нових, науково-обґрунтованих, екологічних, технічно та економічно доцільних технологій обробки деталей, які поліпшують якість їх робочих поверхонь за рахунок досягнення оптимальних експлуатаційних властивостей. До основних показників таких технологій слід віднести фізико-механічні та геометричні характеристики поверхневого шару, що формуються, як правило, на фінішних операціях технологічного процесу. Зростаючі вимоги до експлуатаційних властивостей робочих поверхонь деталей стимулюють розвиток методів модифікації поверхонь і нанесення захисних покриттів. Отже, одним із напрямків підвищення якості деталей при їх виготовленні та ремонті є модифікація робочої поверхні шляхом нанесення покриттів під час фінішних операцій.

Серед найбільш простих, ефективних та екологічно безпечних методів отримання покриттів слід виділити групу технологій фінішної антифрикційної безабразивної обробки (ФАБО), яка реалізується за рахунок фрикційної взаємодії обробного інструмента з поверхнею оброблюваної деталі. Використання даної технології дозволяє поліпшити характеристики робочої поверхні: зменшити час припрацювання і коефіцієнт тертя, підвищити несучу здатність деталі та з'єднання. Разом з тим, існуючі методи ФАБО характеризуються низькою продуктивністю, нерівномірністю покриття за товщиною, великими навантаженнями на інструмент, значним виділенням тепла та не забезпечують зміцнення поверхні деталей, а отже – зносостійкості на більш тривалий термін. Особливої ваги дане питання набуває при обробці та експлуатації виробів із малопластичних матеріалів, наприклад, гільз циліндрів двигунів внутрішнього згорання з графітовмісного чавуну, експлуатаційна стійкість яких багато в чому залежить від стану поверхневого шару, що визначається технологічними методами обробки.

Підвищити якість нанесення антифрикційних покриттів можливо за рахунок застосування нових технологій і схем здійснення ФАБО, а саме, поєднання ФАБО з методами поверхневого пластичного деформування (ППД). Для ефективного використання ФАБО спільно з методами ППД необхідне детальне вивчення питань механіки цих процесів, впливу ППД на стан покриття і на властивості поверхневого шару основного матеріалу, визначення можливості деформування малопластичного матеріалу та оцінки ресурсу залишкової пластичності обробленої поверхні. Вирішення цих питань дозволить створити технологію нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування для деталей з малопластичного матеріалу, що визначило актуальність роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалася на кафедрі експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету і пов'язана з тематикою науково-дослідної роботи кафедри на тему «Підвищення якості

поверхні й довговічності деталей вузлів тертя машин нанесенням антифрикційних покриттів комбінованими методами» (державний реєстраційний № 0116U001895); «Підвищення ефективності деформуючого протягування виробів із чавуну» (державний реєстраційний № 0121U111866) та «Розробка технологічних методів управління ресурсом пластичності малопластичних матеріалів» (державний реєстраційний № 0121U111867).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розроблення наукових основ технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням холодного пластичного деформування задля підвищення якості поверхонь тертя деталей з малопластичних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети сформульовані наступні задачі:

1. Розробити схему взаємодії інструменту з мікроступами поверхні при ФАБО, яка дозволяє визначити технологічні можливості процесу.

2. Установити закономірності впливу початкового мікрорельєфу оброблюваної поверхні на формування покриття.

3. Дослідити механіку деформуючого протягування виробів із чавуну та визначити ресурс залишкової пластичності.

4. Виявити пластичні властивості графітовмісного чавуну в умовах високих гідростатичних тисків і значних деформацій та побудувати діаграму пластичності.

5. Установити закономірності впливу технологічних факторів процесу ФАБО на якість нанесення антифрикційного покриття та з'ясувати механізм його формування.

6. Дослідити напружено-деформований стан антифрикційного покриття та розробити методіку прискорених зносостійких випробувань робочої поверхні гільз циліндрів, оброблених ФАБО та деформуючим протягуванням.

7. Розробити технологічні процеси нанесення антифрикційних покриттів, конструкції інструментів і пристосувань, що забезпечують ефективну обробку та експлуатацію виробів.

8. Виконати промислову апробацію і реалізацію результатів досліджень.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси нанесення антифрикційних покриттів фінішною антифрикційною безабразивною обробкою та деформуючим протягуванням.

Предмет дослідження – закономірності процесу холодного пластичного деформування при нанесенні антифрикційних покриттів фінішною антифрикційною безабразивною обробкою на вироби з малопластичних матеріалів.

Методи дослідження. У роботі використано загальнонаукову методологію, яка характеризується системністю, що уможливило вивчення проблеми забезпечення якості поверхонь тертя як створення систем знань, що включають теоретичні та експериментальні дослідження механіки процесів ФАБО та деформуючого протягування, які у свою чергу дозволили закласти основу для розробки технологічних процесів, дослідити напружено-деформований стан антифрикційних покриттів, а також експлуатаційні властивості оброблених деталей та реалізувати їх у конкретних технологічних та конструктивних рішеннях.

Дослідження базуються на використанні сучасних технологій статистичного, комп'ютерного моделювання методом скінченних елементів, теорії пластичності та пружності, диференційних та інтегральних розрахунків, статистичної обробки експериментальних даних, теорії подібності і розмірності, що в цілому забезпечило коректність постановки та вирішення задач, а також адекватність отриманих математичних та інтерполяційних моделей.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в створенні наукових основ технології нанесення антифрикційних покриттів на поверхні деталей з малопластичних матеріалів з використанням холодного пластичного деформування.

Вперше:

– виявлені закономірності контактної взаємодії одиничної мікронерівності у вигляді різця з оброблюваного матеріалу з поверхнею антифрикційного матеріалу, що дають можливість дослідити механіку мікрорізання з тонкими товщинами зрізу при ФАБО і встановити: геометричну самоорганізацію затупленої вершини різця, яка безпосередньо залежить від його переднього кута γ ; адгезійне налипання антифрикційного матеріалу на задній поверхні різця під впливом високих контактних тисків;

– запропоновано метод отримання значних пластичних деформацій для малопластичного матеріалу – графітомісного чавуну, який полягає в деформуванні збірного чавунного трубчастого зразка при його стисканні в умовах обмеженої окружної деформації по зовнішній поверхні в комбінації з іншими пластичними матеріалами;

– експериментально встановлено закономірності формування антифрикційних покриттів, які полягають: у нанесенні попереднього адгезійного шару; в утворенні суцільного шару покриття; у деформуючому протягуванні поверхні з антифрикційним покриттям, що дало можливість розробити технологію нанесення антифрикційних покриттів.

Удосконалені:

– теоретична модель мікрорізання при ФАБО, що дозволила встановити умови інтенсифікації процесу та підвищити якість антифрикційного покриття;

– метод розрахунку напружено-деформованого стану антифрикційного покриття на робочій поверхні деталей, що дав можливість встановити вплив на стійкість покриттів в зонах їх контакту двох процесів: адгезійного стирання і втомного руйнування під дією циклічних піків розтягуючих і стискаючих напружень на межах контактних ділянок.

Набули подальшого розвитку:

– закономірності взаємодії інструменту з деталлю при деформуючому протягуванні виробів із чавуну, які дозволили довести, що в осередку деформації, при наявності в зоні контакту критичних тисків, з'являються зони локального пластичного деформування у місцях сполучення позаконтактних зон з ділянкою контакту, які є місцем накопичення пошкоджень поверхневого шару матеріалу.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено способи: нанесення антифрикційних покриттів (патенти України на корисну модель №52699, 74630, 74723, 94809); визначення

пластичності малопластичних матеріалів (патенти України на корисну модель №120838, 145186); конструкції: пристроїв для фрикційно-механічного нанесення покриттів (патенти України на корисну модель №63315, 70146, 102038, 108429, 128740), деформуючих протяжок (патенти України на корисну модель №115761; 118919; 124157; 108429; 128740), а також поверхнево-активне середовище для ФАБО (патент України на корисну модель №41439).

2. Побудовано діаграму пластичності графітовмісного чавуну при значних від'ємних значеннях коефіцієнта жорсткості напруженого стану.

3. Запропоновано конструкції і методику оцінки конструкційної міцності збірних твердосплавних елементів великого діаметру, що дозволило ефективно їх експлуатувати і знизити витрати твердого сплаву на їх виготовлення.

4. Розроблено технологічний процес обробки робочої поверхні гільз циліндрів, який включає механічну обробку, деформуюче протягування і нанесення антифрикційного покриття, що забезпечує підвищення механічних та експлуатаційних характеристик.

5. Розроблено технологічний процес запресовування твердосплавних вставок у корпуси шарошкових доліт, який включає фінішну операцію нанесення антифрикційного покриття на робочу поверхню отвору, що забезпечує підвищення надійності з'єднання.

6. Розроблено технологічний процес обробки цапф шестерень гідронасосів ФАБО з накладенням вібрації, що дозволяє скоротити період припрацювання і підвищити технічний ресурс шестеренних насосів.

7. Запропоновано оригінальну конструкцію пристрою для випробування на зносостійкість робочої поверхні гільзи з антифрикційним покриттям, що забезпечує значне скорочення часу зносостійких випробувань.

8. Результати роботи пройшли промислову апробацію і лягли в основу розробки ресурсозберігаючих технологічних процесів, переданих для впровадження КАТП «Агробудавтосервіс», м. Кропивницький, ТОВ «Унібуртех», м. Дрогобич. Розроблені рекомендації і технічна документація на конструкцію деформуючого інструменту передані для впровадження: на підприємство ТОВ «Кіровоградський інструментальний завод «Лезо»»; на завод із виробництва рульової гідравліки науково-виробничого підприємства ПАТ НВП «Радій», м. Кропивницький.

9. Отримані результати роботи, методики і моделі використовуються в освітньому процесі Центральноукраїнського національного технічного університету при проведенні лекційних, практичних і лабораторних робіт з дисциплін: «Відновлення та зміцнення деталей», «Технологічні методи зміцнення та відновлення типових деталей», «Інженерія поверхонь деталей машин та механізмів», «Технології відновлення та зміцнення автомобільних деталей», та під час виконання здобувачами вищої освіти кваліфікаційних робіт.

Особистий внесок здобувача.

Автор безпосередньо брав участь у проведенні всіх експериментальних досліджень та у процесі обробки експериментальних даних. Постановка теоретичних задач та обговорення результатів експериментальних і теоретичних досліджень здійснювалися разом з науковим консультантом даної роботи.

Основні наукові результати, наведені в дисертації, були отримані автором самостійно. У наукових роботах, які опубліковані у співавторстві, особистий внесок автора наступний: [1, 2, 12, 19, 55, 58, 59, 65] – запропоновано використання деформуючого протягування у процесі нанесення антифрикційного покриття фрикційно-механічним методом; [3] – виконано розрахунок міцності збірного деформуючого елемента при обробці гільзи циліндрів; [4] – розроблено технологічний процес обробки отворів у корпусах шарошkových доліт з використанням деформуючого протягування; [7, 32] – визначено схеми контактної взаємодії інструменту з оброблюваною поверхнею на етапі мікрорізання; [8, 31, 53] – запропоновано схема нанесення антифрикційних покриттів з використанням деформуючого протягування; [9, 67] – виконано аналіз існуючих схем обробки гільз циліндрів; [10] – запропоновано комбіновану технологію фінішної обробки отворів; [11, 18, 35] – запропоновано алгоритм вибору складу технологічного середовища при нанесенні антифрикційного покриття; [13, 14] – запропоновано схему нанесення антифрикційних покриттів з використанням вібрації та встановлено її особливості; [15] – визначено вплив вихідної поверхні на якість антифрикційного покриття; [16, 17] – виконано аналіз методів та пристроїв для нанесення антифрикційного покриття; [20–22, 61] – досліджено антифрикційні властивості деталей з антифрикційними покриттями; [23] – запропоновано методику побудови діаграми пластичності для малопластичних матеріалів; [24] – виконано моделювання осадки циліндричного чавунного зразка; [25, 27–29] – виконано аналіз механіки формування поверхневого шару антифрикційного матеріалу; [26, 64] – доведено вплив форми і розмірів мікронерівностей на формування антифрикційного покриття; [30] – встановлено вплив деформуючого протягування на припрацювання поверхонь тертя; [33, 34, 52] – розроблено технологічний процес обробки цапф шестерень гідронасосів з використанням ФАБО; [36, 39–41, 46] – запропоновано способи нанесення антифрикційних покриттів; [37, 38, 42, 43, 50] – запропоновано конструкції пристроїв для фрикційно-механічного нанесення покриттів; [44, 45, 48, 49] – запропоновано конструкції інструментів для деформуючого протягування; [47, 51, 54, 56, 57, 60] – розроблено методику і спосіб визначення пластичності малопластичних матеріалів; [62] – запропоновано методику дослідження мікрорізання в процесі ФАБО; [63] – встановлено закономірності взаємодії мікронерівностей при ФАБО; [66, 68] – розроблено технологічний процес обробки гільз циліндрів ДВЗ.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати досліджень, викладені в дисертації, регулярно презентувалися та обговорювалися на міжнародних, всеукраїнських, конференціях, семінарах: науково-технічних конференціях викладачів, аспірантів та співробітників Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький, 2004–2021); Міжнародній науково-практичній конференції «Трибологические основы повышения ресурса машин» (м. Москва, 2012); ІХ Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (м. Кіровоград, 2013); ХІІ, ХV, ХVІ Міжнародному форумі «Молодежь и

сельскохозяйственная техника в XXI веке» (м. Харків, 2016, 2019, 2020); Міжнародній науково-практичній конференції «Прикладні науково-технічні дослідження» (м. Івано-Франківськ, 2017); XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Качество, стандартизация, контроль: теория и практика» (м. Одеса – Київ, 2018); Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner – 2019, 2020, 2021) (Odessa, 2019–2021); X Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент» (м. Житомир, 2019); I, II Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (м. Вінниця, 2019, 2021); 6th, 7th International Conference «New technologies NT-2020, NT-2021» (Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2020, 2021); Міжнародній науково-практичній конференції «Молодь і технічний прогрес в АПК» (м. Харків, 2020); IX Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні – 2020» (м. Львів, 2020); The First International Conference on Advances in Physical Sciences and Materials 2020 (ICAPSM 2020) (Coimbatore, Tamil Nadu, India, 2020); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту» (м. Кременчук, 2020); I Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Інноваційні технології в агропромисловому комплексі» (м. Мелітополь, 2020); XXI Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 2020); VI, VII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020, 2021» (м. Херсон, 2020, 2021); X, XI Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС–2020, 2021)» (м. Чернігів, 2020, 2021); Міжнародній науково-практичній конференції «Инженерия поверхности и реновация изделий» (м. Київ, 2020); 3th, 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange (Kharkiv, 2020, Lviv, 2021).

В повному обсязі дисертація доповідалась на науковому семінарі кафедри «Експлуатація та ремонт машин» Центральноукраїнського національного технічного університету та на розширеному засіданні кафедри «Технологія машинобудування» механіко-машинобудівному інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Публікації.

За результатами досліджень опубліковано 68 наукових праць, у тому числі 2 монографії, 32 статті у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у виданнях України та 8 статей у виданнях іноземних держав, які включені до науково-метричної бази Scopus), 17 патентів України на корисну модель, 17 доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, восьми розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 305 назв, містить 261 рисунок, 20 таблиць та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 465 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі проаналізовано сучасні уявлення про якість поверхневого шару – комплексного поняття, що визначається сукупністю геометричних характеристик і фізико-механічних властивостей як результату технологічного впливу на поверхню.

Вивченню якості поверхневого шару та його оцінці присвячені численні дослідження вчених: А.Г. Сулова, Е.В. Рижова, М.М. Петрова, Б.І. Костецького, І.В. Крагельського, В.С. Комбалова, Грінвуда, М.М. Хруцова, П.О. Ребиндера, Д.Д. Папшева, П.О. Киричка, О.А. Пермькова, Н. Адама, К. Вайнграбера, К. Джонсона, Е. Рабиновича, Т. Хісакадо, Р. Боуера та ін.

Установлено, що якість поверхневого шару досягається на стадії виготовлення заготовок, їх подальшої обробки та залежить, перш за все, від технологічного методу обробки поверхні, що забезпечує отримання оптимальної шорсткості в зоні контакту і комплексу необхідних фізико-механічних властивостей робочих поверхонь деталей.

Для формування високої якості поверхневого шару деталей найбільш перспективним слід вважати напрямок з використання комбінованої обробки, що дозволяють поєднувати переваги різних методів, у тому числі модифікації поверхні і нанесення покриттів. Слід також врахувати, що з точки зору підвищення надійності та ресурсу необхідно, щоб кожна деталь незалежно від матеріалу виготовлення, мала захисне покриття відповідно до свого прямого призначення та умов експлуатації.

Особливе місце серед покриттів займають антифрикційні, нанесені на поверхню тертя з метою забезпечення сприятливих антифрикційних властивостей. До таких покриттів, незалежно від способів їх формування, пред'являється ряд вимог, до основних з яких слід віднести: щільність і суцільність; висока адгезія з поверхнею металу деталі; здатність спільно з основним металом витримувати експлуатаційні навантаження; довговічність деталей.

Систематизація основних способів нанесення антифрикційних покриттів та області їх застосування показала, що найпростішим для реалізації і таким, що не потребує застосування складного обладнання, виявився метод ФАБО, суть якого полягає у фрикційному нанесенні покриттів із пластичних матеріалів. Дослідженню у цьому напрямі присвячені роботи Д.М. Гаркунова, В.М. Лозовського, Готтліба Польцера, Ф.М. Бурумкулова, Л.М. Рибаквої, В.Ф. Карпенкова, В.І. Балабанова, В.А. Погонишева, І.М. Соколенка, М.Й. Бурди, О.М. Лукашка, В.В. Черкуна та ін.

Аналіз існуючих схем і пристроїв для нанесення антифрикційних покриттів методом ФАБО дозволив установити, що розроблені конструкції пристроїв та оснащення не мають достатньо високої продуктивності; використовувані технології та пристрої для ФАБО не забезпечують достатнього рівня зміцнення поверхні деталей, а, отже, і зносостійкості на більш тривалий термін.

Виявлено, що отримання якісного покриття ФАБО багато в чому залежить від шорсткості вихідної поверхні. Однак використання лише одного висотного параметра Ra не дає повного уявлення про мікрорельєф поверхні, який значною мірою залежить від виду обробки. Отже, доцільне проведення спеціальних досліджень впливу форми та розмірів мікронерівностей на формування антифрикційного покриття.

Ефективність процесу ФАБО залишається недостатньо високою, особливо при експлуатації в умовах високих питомих навантажень, коли антифрикційне покриття швидко виходить з ладу. Підвищити якість покриття можливо шляхом поєднання ФАБО зі способами ППД.

На сьогодні все ширшого застосування в багатьох галузях промисловості набувають методи фінішної обробки деталей холодним пластичним деформуванням (ХПД), серед яких слід виділити деформуюче протягування. Найбільш детально процес деформуючого протягування розглядався в роботах школи ІНМ НАН України ім. В.М. Бакуля під керівництвом О.М. Розенберга та його учнів Ю.Ф. Бусела, А.Д. Кріцького, О.О. Розенберга, Е.І. Гриценка, Е.К. Посвятенка, Ю.О. Цеханова, С.Є. Шейкіна, Я.Б. Немировського, В.В. Кривошеї, О.В. Чернявського та ін.

Для оцінки якості деталей, оброблених деформуючим протягуванням, широко використовується параметр, що характеризує дефектність поверхневого шару – ресурс використаної пластичності. Вивчення цього показника стає особливо актуальним при обробці пластичним деформуванням малопластичних матеріалів і такого конструкційного матеріалу, як графітовмісний чавун, можливості пластичної формозміни якого обмежені руйнуванням. Дослідженню поведінки матеріалів у пластичній зоні присвячені праці І.С. Алієва, Г. Бакхауза, О.В. Грушка, С.І. Губкіна, Г.Д. Деля, Л.М. Качанова, В.Л. Колмогорова, В.А. Огороднікова, І.О. Сівака, Г.О. Смірнова-Аляєва та ін.

При всьому різноманітті досліджень в області застосування деформуючого протягування, незважаючи на його переваги, питання використання зазначеного процесу в технології ФАБО або в поєднанні з ним не досліджувалося, а значить виникає необхідність проведення спеціальних досліджень щодо можливості та доцільності застосування деформуючого протягування в комбінації з ФАБО, особливо при обробці виробів з малопластичних чавунів.

Зазначене дало можливість вибрати предмет та об'єкт дослідження, сформулювати мету та визначити задачі дослідження.

У другому розділі представлені умови проведення експериментів, дано опис інструмента, апаратури, обладнання, досліджуваних матеріалів та їх фізико-механічних властивостей.

Для досліджень обрано широко використовувани у вузлах тертя матеріали деталей: сірий чавун СЧ20, різні марки модифікованого чавуну. В якості матеріалу антифрикційного покриття використовувалися: мідь М1, латунь Л63 і бронза ОЦС 5-5-5.

Більшість експериментальних досліджень формування антифрикційного покриття виконувалися на спеціальних зразках із сірого чавуну, виготовлених у

вигляді дисків. Виходячи з аналізу відомих методів досліджень процесів фрикційно-механічного нанесення антифрикційних покриттів ФАБО, розроблена і використана нова схема реалізації зазначеного процесу, що забезпечує багаторазове проведення експериментальних досліджень на одному зразку (рис. 1) за різних умов (зміна навантаження на антифрикційний брусок, матеріалу покриття тощо).

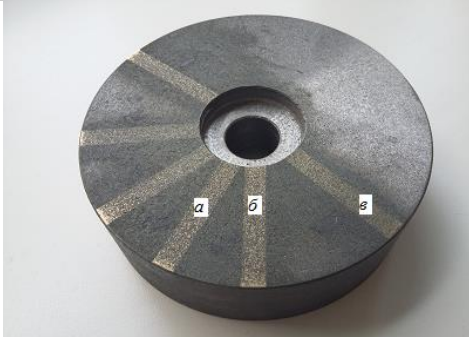


Рис. 1. Зразок із чавуну СЧ20 з антифрикційними покриттями:
а) бронза ОЦС 5-5-5; б) латунь Л63;
в) мідь М1

При дослідженні впливу ХПД на процес утворення антифрикційної плівки розроблено та використано методику моделювання роботи деформуючого елемента по поверхневому шару зразка з покриттям.

Для досліджень процесу мікрорізання при ФАБО застосовували метод теорії подібності і розмірності, відповідно до якого були виготовлені чавунні мікрорізці, геометрія ріжучої частини яких моделювала окрему мікронерівність поверхні оброблюваної заготовки. Причому, передній кут γ цієї мікронерівності варіювався у межах від $+5^\circ$ до -15° . За досліджуваній зразок, що взаємодіє з одиничною мікронерівністю, використовувалася пластина із латуні Л63.

Вивчення і фотографування мікростружки досліджуваних зразків виконувалося на металографічних мікроскопах МІМ-7 і «Альтами», а також на скануючому електронному мікроскопі ZEISS EVO 50XVP в ІНМ НАН України ім. В.М. Бакуля. Геометрія контактуючих поверхонь оцінювалася за допомогою профілографа Mahr XR20 – приладу на базі ПК.

Величина площі покриття, а також його схильність до налипання на задній поверхні мікрорізця визначилася, виходячи з результатів металографічного аналізу поверхні, з використанням методів цифрової обробки зображень на ПК.

При побудові кривої течії і градуйованого графіка твердість–напруження для латуні Л63 випробовування зразків на стиснення проводилося на універсальній випробувальній машині Р-20 та на гідравлічному пресові моделі ПММ-25.

Розроблено та використано такі оригінальні методики:

– моделювання процесу осадки трубчастого зразка з використанням програмного комплексу Deform-2D/3D v.10 та методу скінченних елементів (МСЕ). Умови моделювання: швидкість руху пуансона $V = 0,1$ мм/с. Постановка задачі – осесиметрична. Властивості досліджуваного матеріалу (сірий чавун марки СЧ20) задавалися експериментально отриманою кривою стиснення, твердістю, коефіцієнтом Пуассона і модулем Юнга.

– дослідження напружено-деформованого стану (НДС) при моделюванні деформуючого протягування зразка з використанням програмного комплексу Deform-2D/3D v.10 МСЕ. Умови моделювання: швидкість руху пуансона

$V = 0,5$ мм/с; номінальний натяг на деформуючий елемент – $a_{ном} = 0,05$ мм; кут робочого конуса деформуючого елемента α становив відповідно 2° , 4° і 12° .

У третьому розділі представлені результати досліджень з моделювання процесу мікрорізання при ФАБО.

Розглянуто схему взаємодії одиничної мікронерівності, що становить модель – мікрорізець із чавуну СЧ20 з контактною поверхнею з латуні Л63. На початку процес мікрорізання здійснювався гострозаточеним різцем, вихідний радіус ріжучої кромки якого знаходиться в межах $r = 0,008 \div 0,015$ мм, що значно менше від товщини оброблюваного шару t_p . Схема взаємодії такого мікрорізця з поверхнею латунного зразка наведена на рис. 2, з якого випливає, що контур ріжучого клина складається з таких частин: AB – прямолінійна частина контуру передньої поверхні, заточена з переднім кутом $\gamma > 0$; BC – заокруглена частина передньої поверхні, у якої $\gamma < 0$; CD – заокруглена частина контуру задньої поверхні, у якої задній кут $\alpha < 0$; DE – частина контуру задньої поверхні, утворена в результаті її зношення; EF – частина прямолінійного контуру задньої поверхні, у якої задній кут $\alpha > 0$. Таким чином, передня поверхня ріжучого клина складається з двох частин $L = AB + BC$, а задня поверхня, довжиною L_1 , – із трьох частин: $L_1 = CD + DE + EF$. Точка C відповідає розділенню контакту оброблюваного матеріалу з передньою і задньою поверхнями клина.

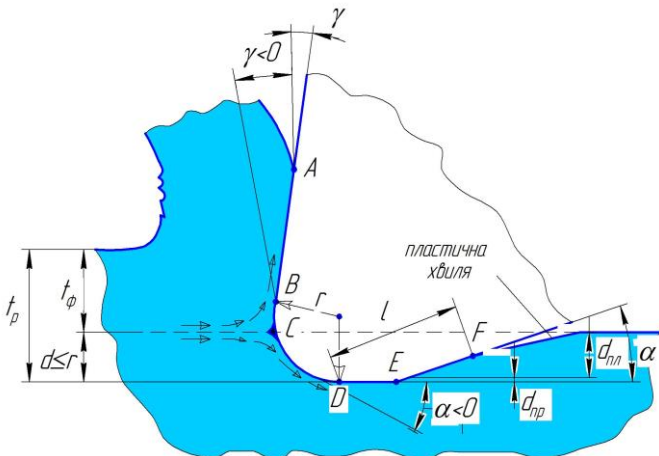


Рис. 2. Схема взаємодії одиничної мікронерівності з оброблюваною поверхнею при фрикційно-механічному методі ФАБО

Напливаючий на ріжучий клин матеріал заготовки у точці C ділиться на два потоки, один із яких переміщується по передній поверхні інструменту, а другий шар, товщиною d , деформується задньою поверхнею ріжучого клина. У цьому випадку реальна поверхня зрізу проходить через точку C і фактична глибина різання t_ϕ не збігається з номінальною товщиною t_p поверхневого зрізу.

Отже, точка C буде точкою розподілу всього знятого шару, товщиною t_p , а саме: на шар матеріалу, який відходить у мікростружку, з фактичною глибиною різання t_ϕ , і на шар, який обробляється поверхневим пластичним деформуванням радіусною ділянкою задньої поверхні.

У зоні стружкоутворення відбувається пластична деформація матеріалу, якій передуює пружна. Вона призводить до ущільнення шару матеріалу, що знаходиться нижче поверхневого зрізу. Після проходження мікрорізця навантаження знімається, і цей шар пружно відновлюється, повертаючись у початковий стан, що призводить до його взаємодії із задньою поверхнею мікрорізця. Величина пружного відновлення d_{np} визначає довжину пружного контакту по задній поверхні ріжучого клина.

Моделювання процесу ФАБО дозволило встановити, що ріжуче лезо чавунного мікрорізця інтенсивно зношується у процесі взаємодії з латунною поверхнею, причому це відбувається вже на самому початку його роботи. Процес зміни геометрії вершини різця відбувається відповідно до принципу пристосування всієї системи різець–деталь, згідно з яким реалізується мінімум енергії мікрорізання. Кількісне значення затуплення показало вплив переднього кута γ на радіус затуплення r ріжучої кромки мікрорізця з чавуну СЧ20. За даними розрахунку відношення радіуса затуплення r до фактичної глибини різання t_f для різних кутів γ визначено, що зі зменшенням переднього кута γ радіус затуплення r збільшується.

Аналогічний розрахунок відношення радіуса затуплення r ріжучої кромки різця до повної глибини різання t_p , також свідчить про істотний вплив кута γ на радіус затуплення r ріжучої кромки різця (рис. 3), з якого випливає, що мінімальне зношування має місце при куті $\gamma = +5^\circ$. При зміні значення γ від $+5^\circ$ до 0° цей процес зростає, а потім при від'ємних кутах γ інтенсивність його знижується, що обумовлено незначною (дуже близька до 0 при $\gamma = -10^\circ \div -15^\circ$) фактичною глибиною різання t_f .

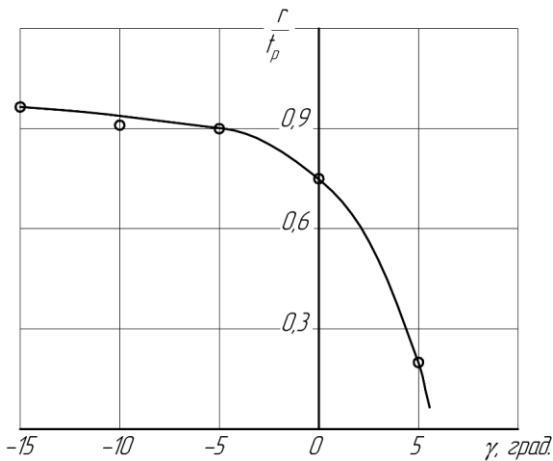


Рис. 3. Залежність відношення радіуса затуплення ріжучої кромки різця r до повної глибини різання t_p від переднього кута різання γ при моделюванні мікрорізання мікрорізцем з чавуну СЧ20 поверхні латуні Л63

Фотографії коренів стружок (рис. 4) свідчать про те, що при куті $\gamma = +5^\circ$ спостерігається найбільша товщина зрізаного шару і вектор зсуву стружки зберігає напрямок передньої поверхні з кутом $\gamma = +5^\circ$ (рис. 4, а). При $\gamma = 0^\circ$ товщина зрізаного шару помітно зменшується, і вектор зсуву стружки зберігає напрямок передньої поверхні з кутом $\gamma = 0^\circ$ (рис. 4, б). Найменша товщина зрізаного шару спостерігається при куті $\gamma = -5^\circ$ (рис. 4, в), і вектор зсуву стружки зберігає напрямок передньої поверхні з кутом $\gamma = -5^\circ$.

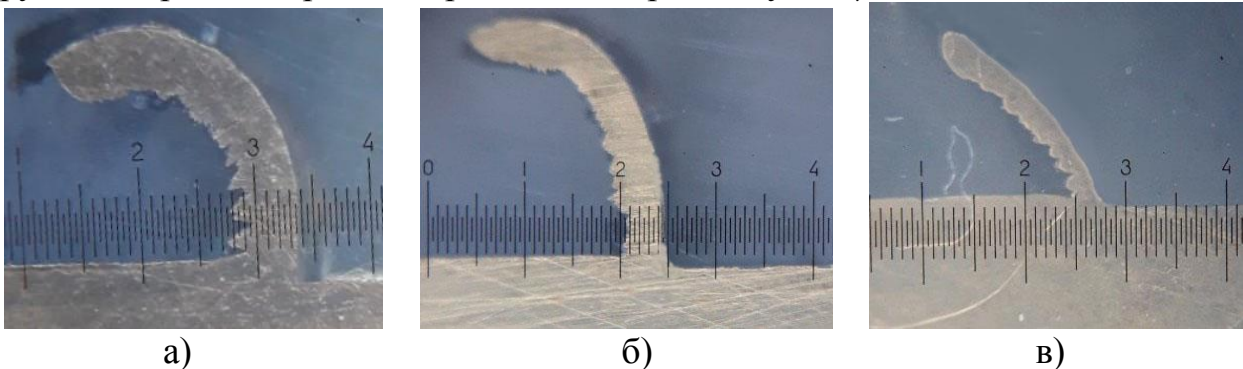


Рис. 4. Корені мікростружки, отримані при обробці мікрорізцем при різних передніх кутах різання γ : а) $\gamma = +5^\circ$; б) $\gamma = 0^\circ$; в) $\gamma = -5^\circ$, збільшення $\times 50$

Отримання якісної картини з урахуванням фізики процесу мікрорізання можливе тільки шляхом проведення експериментальних досліджень (рис. 5).

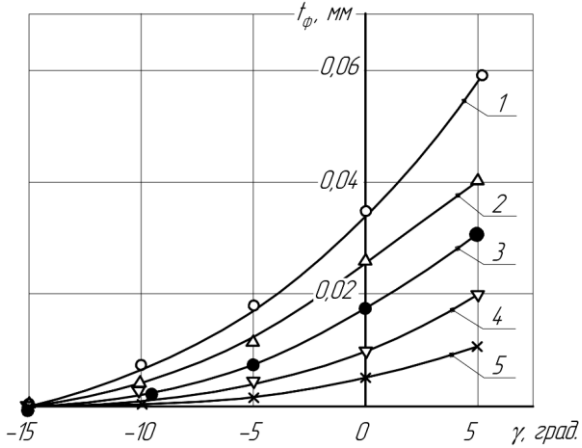


Рис. 5. Залежність фактичної глибини мікрорізання t_f від переднього кута різання γ при моделюванні мікрорізання мікрорізцем з чавуну СЧ20 поверхні латуні Л63 при номінальних товщинах мікрорізання $t_{ном}$, мм: 1 – 0,6; 2 – 0,4; 3 – 0,3; 4 – 0,2; 5 – 0,1

Із рис. 5 випливає, що фактична товщина різання при зменшенні значень γ від $+5^\circ$ до -5° знижується пропорційно куту γ , а потім монотонно зменшується до 0, при значенні $\gamma = -15^\circ$. Це пояснюється інтенсивним формуванням радіуса зношення ріжучої кромки.

Установлено, що зі зменшенням кута γ об'єм знятої мікростружки знижується незалежно від номінальних товщин різання, наближаючись до 0 при значенні $\gamma = -10^\circ \div -15^\circ$. Отже, для інтенсифікації процесу ФАБО на етапі мікрорізання і заповнення западин антифрикційним матеріалом геометрія мікронерівностей повинна забезпечувати передній кут різання $\gamma = 0 \div 5^\circ$.

За наведеними вище результатами, кут γ має значний вплив на глибину різання, радіус заокруглення ріжучої кромки, а, отже, буде впливати на схему взаємодії контактних поверхонь при мікрорізанні.

Отримані експериментальні дані та результати моделювання дозволили вперше представити схеми контактної взаємодії інструменту з оброблюваною поверхнею для різних кутів γ при ФАБО на етапі мікрорізання, а також встановити основні закономірності їх параметрів.

Збільшення радіуса заокруглення різальної кромки інтенсифікує наступний етап процесу ФАБО – взаємодію задньої поверхні інструменту з латунною поверхнею. У зоні контакту оброблюваного матеріалу на задній поверхні мають місце високі контактні тиски, що перевищують межу плинності латуні. Тому на задній поверхні інструменту утворюється шар пластично зміцненого матеріалу і з'являється плівка з адгезійно-налиплою латуні.

Новоутворена антифрикційна плівка (рис. 6) починає відігравати роль третього тіла, тобто твердого змащення, запобігаючи подальшому затупленню вершин мікронерівностей, а значення радіуса округлення r – стабілізується.

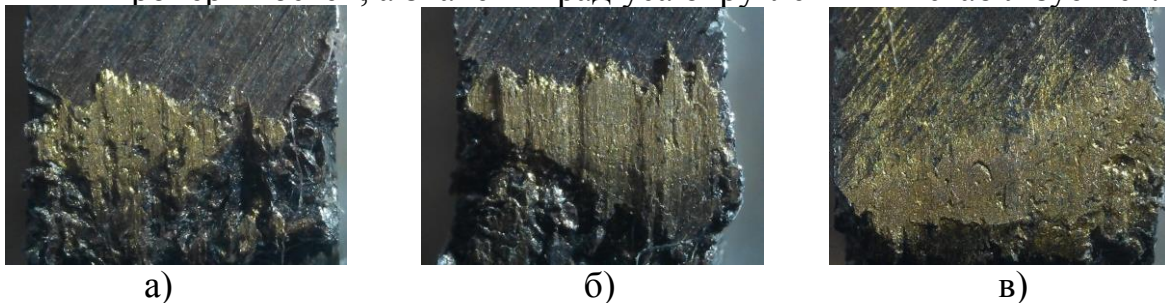


Рис. 6. Наліпання латуні на задній поверхні різця з чавуну СЧ20 при натиранні латуні Л63 при передньому куті різання γ : а) $\gamma = +5^\circ$; б) $\gamma = 0^\circ$; в) $\gamma = -15^\circ$, $\times 30$

Вивчення умов контактної взаємодії показало суттєвий взаємовплив інструменту і латунної поверхні, з якої знімається мікростружка. Ця мікростружка, розміщуючись у впадинах мікронерівностей, знижує шорсткість і утворює на другому етапі латунне покриття. Отже, безпосередньо процес ФАБО необхідно розглядати з позицій системного підходу та з урахуванням принципів самоорганізації.

За допомогою методики симуляції процесу мікрорізання з використанням МСЕ були проведені дослідження НДС та деформаційного зміцнення поверхневого шару латуні у процесі мікрорізання.

Установлено (рис. 7), що глибина зміцненого шару латунної поверхні в кілька разів менша від радіуса затуплення мікронерівності $r \approx 0,05$ мм. При цьому спостерігається великий градієнт накопиченої деформації e_0 за глибиною поверхневого шару. Його максимальне значення зафіксовано на глибині приблизно 0,01 мм. Такий характер зміцнення не може істотно вплинути на процес мікрорізання при ФАБО і, тим більше, на його силові характеристики.

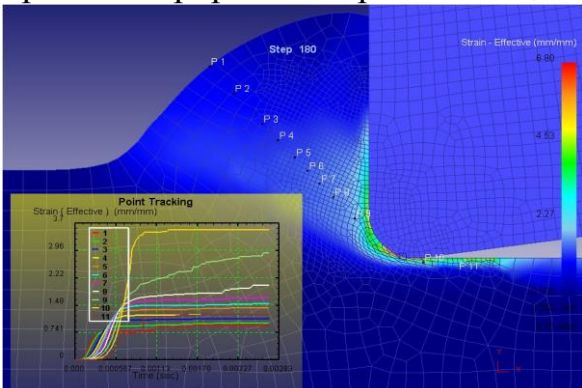


Рис. 7. Поле розподілу накопиченої деформації e_0 в зоні мікрорізання

Розподілення накопиченої деформації та мікротвердості за глибиною зміцненого поверхневого шару (рис. 8, 9) отримано двома способами: теоретично, – за допомогою МСЕ (рис. 7) та експериментально – методом вимірювання мікротвердості шляхом побудови кривих течії латуні Л63.

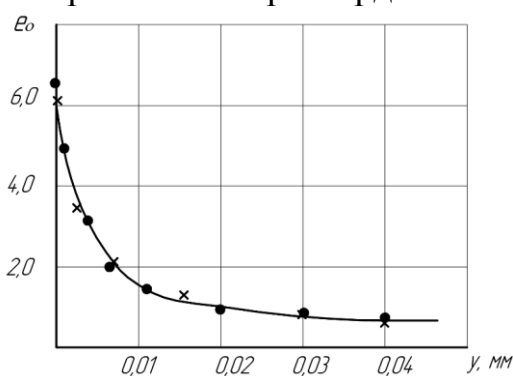


Рис. 8. Розподіл накопиченої деформації e_0 за глибиною зміцненого поверхневого шару латунного зразка у: ● – за МСЕ; × – за розподілом мікротвердості HV_{10} при навантаженні 10 г

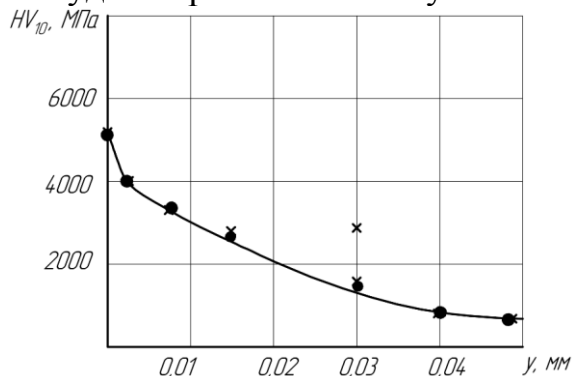


Рис. 9. Розподіл мікротвердості HV_{10} за глибиною зміцненого поверхневого шару латунного зразка у: ● – за МСЕ; × – за розподілом мікротвердості HV_{10} при навантаженні 10 г

Аналіз механіки деформування поверхневого шару латунного зразка, виконаний за допомогою МСЕ, з урахуванням експериментально встановлених закономірностей дозволив встановити наступне:

- деформаційне зміцнення латунної поверхні спостерігається на малій глибині, що не має помітного впливу на процес мікрорізання при наступних проходах технологічної операції ФАБО;

- за контактною областю у поверхневому шарі виникають великі розтягувальні напруження, що призводить до утворення поверхневих мікротріщин, а отже сприяє мікрорізанню антифрикційного матеріалу;

- на задній поверхні контактної зони поблизу нижньої частини округлення мають місце граничні контактні навантаження, які для латуні становлять близько 1,4 ГПа, тобто матеріал перебуває у граничному стані. Такий стан забезпечує адгезійне налипання латуні на поверхню чавуну та утворення локальних ділянок адгезійної закріпленої латуні на мікрорельєфі чавунної поверхні. Поява таких ділянок, що мають максимальну адгезійну міцність, забезпечують утворення з них основи для формування подальшого антифрикційного покриття.

Визначено, що використання деформуючого протягування при нанесенні антифрикційних покриттів потребує вивчення механіки цього процесу та визначення параметру, що характеризує дефектність поверхневого шару – ресурсу використаної пластичності.

У четвертому розділі представлені результати досліджень пластичних властивостей малопластичних матеріалів.

Для кількісного визначення величини граничних деформацій, вибору значень деформації роздачі, визначення значень залишкової пластичності необхідно побудувати діаграму пластичності для чавуну. Особливістю діаграми пластичності для малопластичних матеріалів, зокрема графітовмісних чавунів, виступає необхідність створення напруженого стану, що забезпечує істотні від'ємні значення показника жорсткості напруженого стану η , які дозволяють досягти значних пластичних деформацій.

Існуючі, практично доступні для технологічної практики, методики визначення залишкової деформації для малопластичних матеріалів забезпечують значення показника жорсткості напруженого стану $\eta = -1$. Звісно, це не дозволяє отримати продовження діаграми пластичності в область сильного гідростатичного стискання, де можливе досягнення великих пластичних деформацій без руйнування, що дало б можливість вивчати технологічні процеси обробки тиском таких матеріалів. Це обумовлює необхідність розробки методики визначення пластичної деформації до руйнування при значних від'ємних значеннях показника жорсткості напруженого стану $\eta \leq -1$.

З'ясовано, що наукову основу розробки такої методики становить розгляд напружено-деформованого стану трубчастой заготовки у процесі її рівномірної осадки.

Рішення для деформованого стану трубчастих заготовок у процесі їх рівномірної роздачі, коли їх поперечні перерізи залишаються плоскими і осьові деформації незмінні уздовж осі z , має вигляд:

$$e_{\varphi} = \left(e_{\varphi B} + \frac{k}{2} \right) \left(\frac{r_B}{r} \right) - \frac{k}{2}, \quad (1)$$

де k – відносна осьова деформація, постійна по всьому об'єму заготовки;
 e_{φ} – окружна деформація в т. А з координатою r .

Інтенсивність деформацій (накопичена деформація) при цьому дорівнює:

$$e_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_{\varphi}^2 + k \cdot e_{\varphi} + k^2}. \quad (2)$$

Показано, що дане рішення можна застосувати і до випадку осьового стиснення циліндричного зразка, укладеного по зовнішній поверхні в жорстку циліндричну обойму (рис. 10).

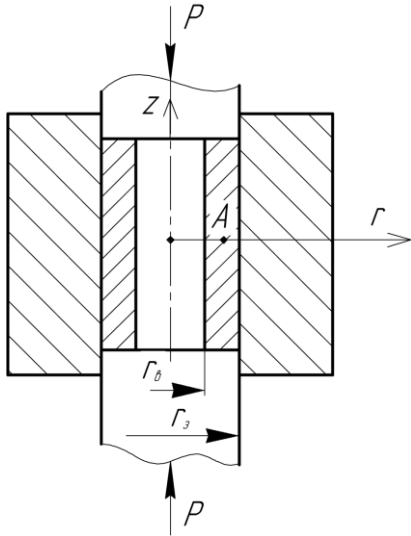


Рис. 10. Схема осьового стиснення зразка в жорсткій обоймі

Окружна деформація на зовнішній поверхні зразка, при $r = r_з$, становить:

$$e_{\varphi з} = 0; \quad (3)$$

$$e_{\varphi} = \frac{k}{2} \left[\left(\frac{r_{\varphi}}{r} \right)^2 - 1 \right]. \quad (4)$$

Оскільки $e_z = k < 0$, то з умови нестиснення отримуємо: $e_r = -\frac{k}{2} \left(\frac{r_з}{r} \right)^2$. (5)

Підставляючи (5) у вираз (2), маємо:

$$e_0 = \frac{k}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{r_з}{r} \right)^4 + 3}. \quad (6)$$

Напружений стан у зразку, який стискається, визначаємо за залежностями:

$$\sigma_r = \frac{2}{3} \frac{e_r}{e_0} \sigma_0(e_0) + \sigma;$$

$$\sigma_{\varphi} = \frac{2}{3} \frac{e_{\varphi}}{e_0} \sigma_0(e_0) + \sigma; \quad (7)$$

$$\sigma_z = \frac{2}{3} \frac{k}{e_0} \sigma_0(e_0) + \sigma,$$

де σ_r , σ_{φ} , σ_z – відповідно радіальне, окружне та осьове напруження;
 σ – гідростатичний тиск (середнє напруження),

$$\sigma = \frac{\sigma_r + \sigma_\varphi + \sigma_z}{3}; \quad (8)$$

$\sigma_0(e_0)$ – інтенсивність напружень, залежна для матеріалу, що зміцнюється, від e_0 .

Додатковим рівнянням є диференціальне рівняння рівноваги при осесиметричній задачі:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0. \quad (9)$$

З урахуванням (7), рівняння (9) набуває вигляду:

$$d\sigma_r = \left[\frac{2 e_\varphi}{3 e_0} \sigma_0(e_0) - \frac{2 e_r}{3 e_0} \sigma_0(e_0) \right] \frac{dr}{r}. \quad (10)$$

Величину гідростатичного тиску знаходимо з (7):

$$\sigma = \sigma_r - \frac{2 e_r}{3 e_0} \sigma_0(e_0) \quad (11)$$

і розраховуємо напруження σ_φ та σ_z .

На внутрішній поверхні зразка при $r = r_e$ деформації становлять:

$$e_{0в} = \frac{|k|}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{r_3}{r_b}\right)^4 + 3}. \quad (12)$$

Оскільки на вільній внутрішній поверхні $\sigma_r = 0$, то на ній із (7), маємо:

$$\sigma = -\frac{2 e_{rв}}{3 e_{0в}} \sigma_0(e_{0в}), \quad (13)$$

а коефіцієнт жорсткості напруженого стану становить:

$$\eta = -\frac{3\sigma}{\sigma_0(e_0)} = -2 \frac{e_{rі}}{e_{0і}}. \quad (14)$$

Підставляючи (14) у (5) і (6), можна визначити η у будь-якій точці А (рис. 10). Зокрема, на вільній внутрішній поверхні η дорівнює:

$$\eta = -\sqrt{3} \frac{\left(\frac{r_3}{r_b}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{r_3}{r_b}\right)^4 + 3}}. \quad (15)$$

У випадку, якщо зразок складається з кількох циліндрів з різних матеріалів, то інтегрування рівняння (10) здійснюється від внутрішньої вільної поверхні послідовно для кожного шару.

Розроблена модель деформації трубчастого зразка дозволила побудувати алгоритм і здійснити розрахунок НДС зразка з чавуну СЧ20 при його стисканні в умовах обмеженої окружної деформації по зовнішній поверхні.

Зміна гідростатичного тиску σ уздовж відносного радіуса r зразка (тобто, для $r_e = 1$) у межах $1 \leq r \leq 3$, розрахованого за розробленою моделлю, представлена на рис. 11.

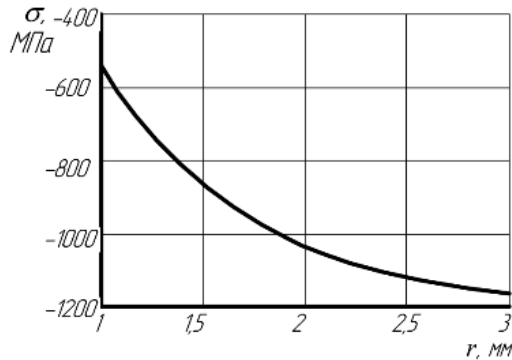


Рис. 11. Зміна гідростатичного тиску σ в залежності від відносного радіуса r заготовки з чавуну СЧ20

Визначено, що максимальне значення гідростатичного тиску (рис. 11) має місце на внутрішній поверхні зразка, а мінімальне – на зовнішній. Коефіцієнт жорсткості напруженого стану змінює своє значення по товщині стінки від $\eta \approx -2$ до $\eta \approx -5$. Така зміна вказує на можливість отримання різних ступенів об'ємного стиснення шляхом зміни товщини стінки зразка.

Аналогічні розрахунки виконувалися для зразків з чавуну СЧ20 з іншими товщинами стінки: $1 \leq r \leq 2$; $1 \leq r \leq 2,5$; $1 \leq r \leq 5$. Результати розрахунків згідно із зазначеними діапазонами дозволили встановити вплив товщини стінки на параметри НДС (рис. 12).

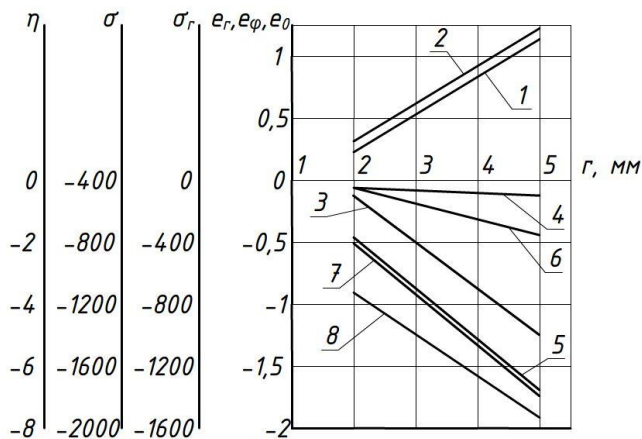
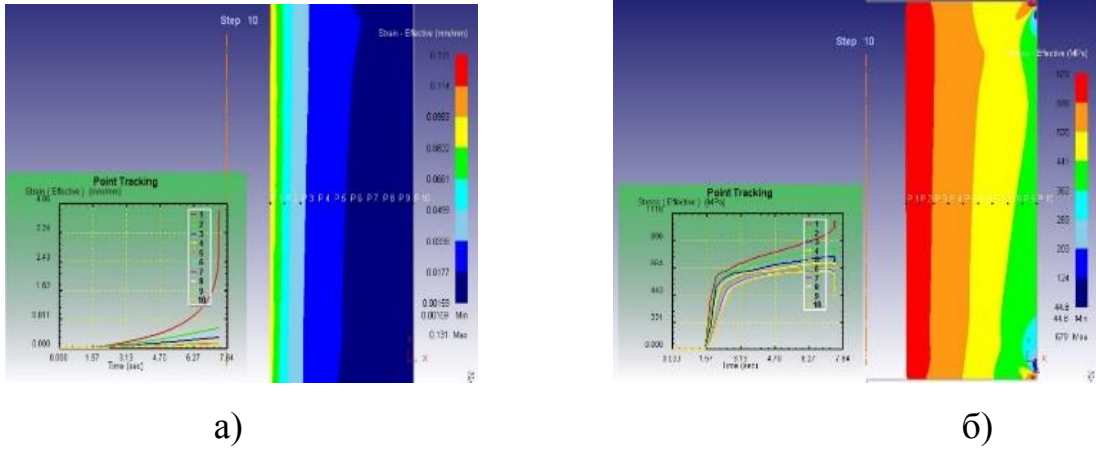


Рис. 12. Залежність деформації e_r , e_ϕ , e_o , напружень σ_r , гідростатичного тиску σ , показника жорсткості напруженого стану η від радіуса r за розрахунками, виконаними згідно з розробленою моделлю: 1 – e_r ; 2 – e_o ; 3 – e_ϕ при r_{min} ; 4 – σ_r при r_{min} ; 5 – σ_r при r_{max} ; 6 – σ при r_{min} ; 7 – σ при r_{max} ; 8 – η

Отримані залежності (рис. 12) свідчать про те, що параметри e_r , e_ϕ , e_o , σ_r , σ і η змінюються практично пропорційно радіусові r . Це дозволяє управляти цими параметрами, що особливо важливо для експериментального досягнення необхідного значення показника жорсткості напруженого стану η .

Для оцінки точності розробленої аналітичної моделі стиснення циліндричного чавунного зразка проводили моделюванням МСЕ. Виконаний аналіз НДС демонструє істотну нерівномірність його розподілу за об'ємом осадженого зразка (рис. 13), тобто відмінність схеми осадки з обмеженням радіальних переміщень по зовнішній поверхні зразка від відомої схеми вільної осадки циліндричного зразка.

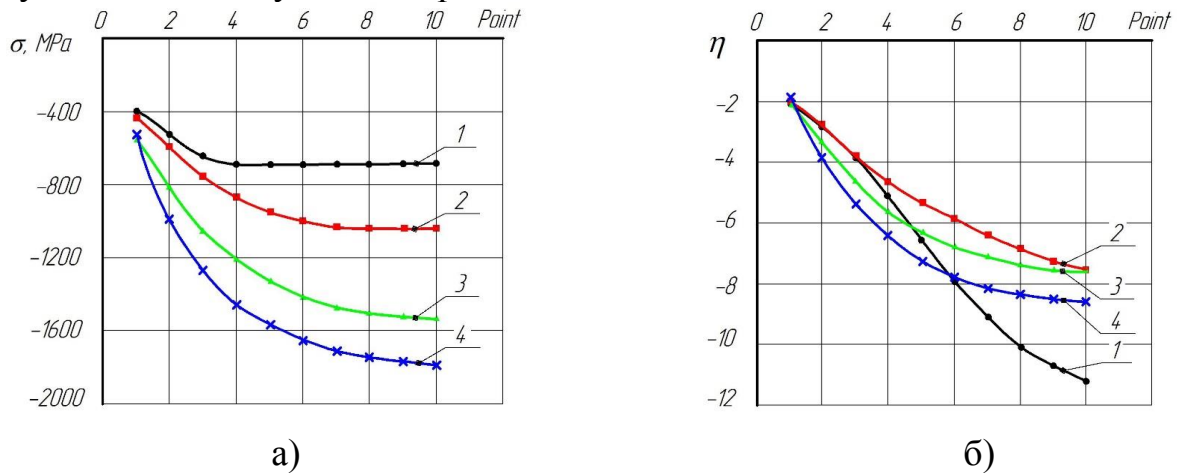


а)

б)

Рис. 13. Поле розподілу накопиченої деформації ϵ_0 (а) та інтенсивності напружень σ_0 (б) і графіки їх зміни за всю історію деформування

Розподіл гідростатичного тиску σ (рис. 14, а) і коефіцієнта жорсткості η (рис. 14, б) за товщиною стінки для різних ступенів осадки $k = 0,05 \div 0,4$ показує, що величина η істотно змінюється. Це дозволяє здійснювати процес деформування чавуну СЧ20 при різних значеннях η і використовувати отримані результати для побудови діаграми його пластичності.



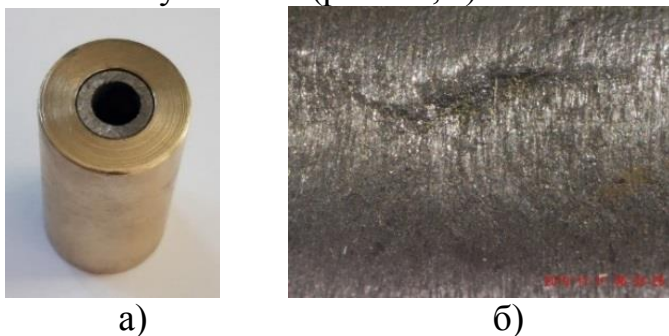
а)

б)

Рис. 14. Розподіл гідростатичного тиску σ (а) і коефіцієнта жорсткості напруженого стану η (б) за товщиною стінки зразка при різних ступенях його осадки k : 1 – $k = 0,05$; 2 – $k = 0,1$; 3 – $k = 0,3$; 4 – $k = 0,4$

Виконані теоретичні дослідження і дані процесу моделювання дозволяють скласти програму випробувань збірних зразків з чавуну і пластичного матеріалу при різних від'ємних значеннях показника жорсткості напруженого стану η .

Для стискання збірного зразка було вибрано поєднання матеріалів «чавун СЧ20 – латунь Л63» (рис. 15, а).



а)

б)

Рис. 15. Загальний вигляд збірного зразка «чавун СЧ20 – латунь Л63» (а); вид тріщини у чавунному зразку після стискання (б)

При даній парі збірного зразка процес стискання відбувався стабільно. При цьому осьова деформація до руйнування складала $k = -0,096$. Як видно з рис. 15, б, вид руйнування чавунного зразка – змішаний. Слід зазначити, що разом з появою пластичних ділянок вичерпання ресурсу пластичності тріщина має ділянки крихкого руйнування. Проведені дослідження дозволили встановити, що при деформації збірного зразка «чавун СЧ20 – латунь Л63» накопичена деформація чавунного зразка складала $\epsilon_0 = 0,39$ (39%) при коефіцієнті жорсткості $\eta = -1,89$.

Стисненням збірного із трьох втулок зразка: «мідь М1 – чавун СЧ20 – мідь М1» (рис. 16, а) досягнута ще більша пластична деформація до руйнування $\epsilon_0 = 0,78$ (78%) при осьовій деформації $k = -0,28$. Аналіз тріщини в чавунному зразку (рис. 16, б) дозволив визначити пластичний вид руйнування.

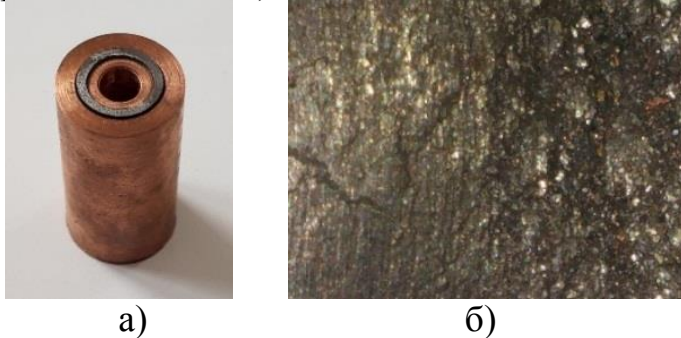


Рис. 16. Загальний вигляд збірного зразка «мідь М1 – чавун СЧ20 – мідь М1» (а), вид тріщини у чавунному зразку після стискання (б)

Отримані дані дозволили вперше побудувати діаграму пластичності чавуну СЧ20 при значних від'ємних значеннях коефіцієнта жорсткості напруженого стану η (рис. 17).

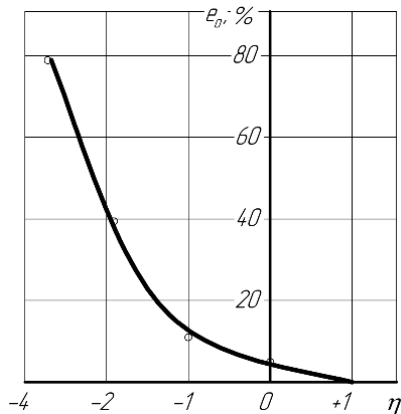


Рис. 17. Діаграма пластичності чавуну СЧ20 отримана експериментально при значних від'ємних значеннях коефіцієнта жорсткості напруженого стану η

У п'ятому розділі представлені дослідження механіки деформуючого протягування виробів із чавуну.

Результати дослідження НДС виробу із чавуну СЧ20 при моделюванні за розробленою методикою наведені на рис. 18. Розподіл інтенсивності швидкостей деформацій ξ_0 (рис. 18, а) свідчать про те, що найбільш інтенсивно деформування відбувається у самій оброблюваній поверхні на початку і на кінці контактної зони. Максимальна область накопиченої деформації ϵ_0 (рис. 18, б) не обмежується поверхневим шаром, а поширюється на деяку глибину h , причому цей шар близький до рівнозміцненого.

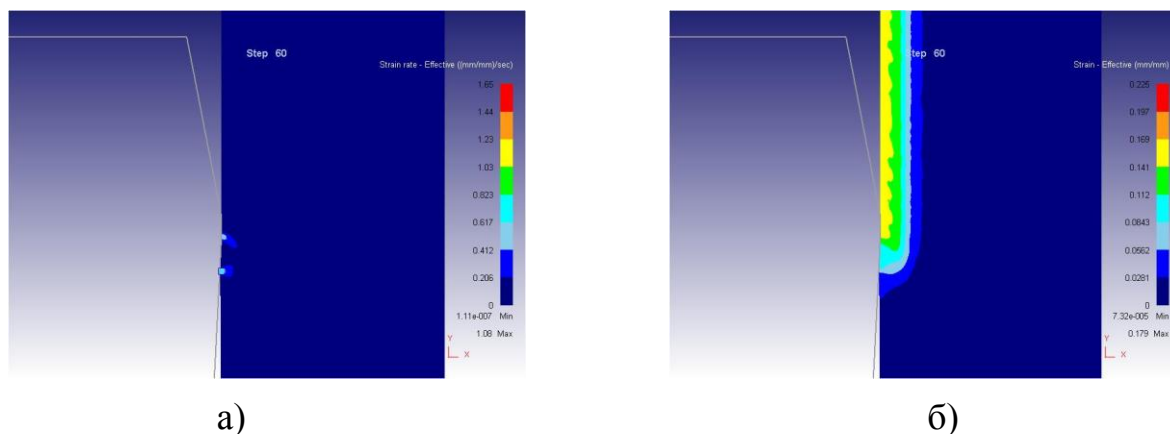


Рис. 18. Розподіл швидкостей деформацій ξ_o (а), накопиченої деформації e_o (б) зразка на 60-му кроці симуляції деформуючого протягування

Розглянуто напружений стан заготовки з чавуну при деформуванні інструментом з кутом конусності $\alpha = 4^\circ$ (рис. 19).

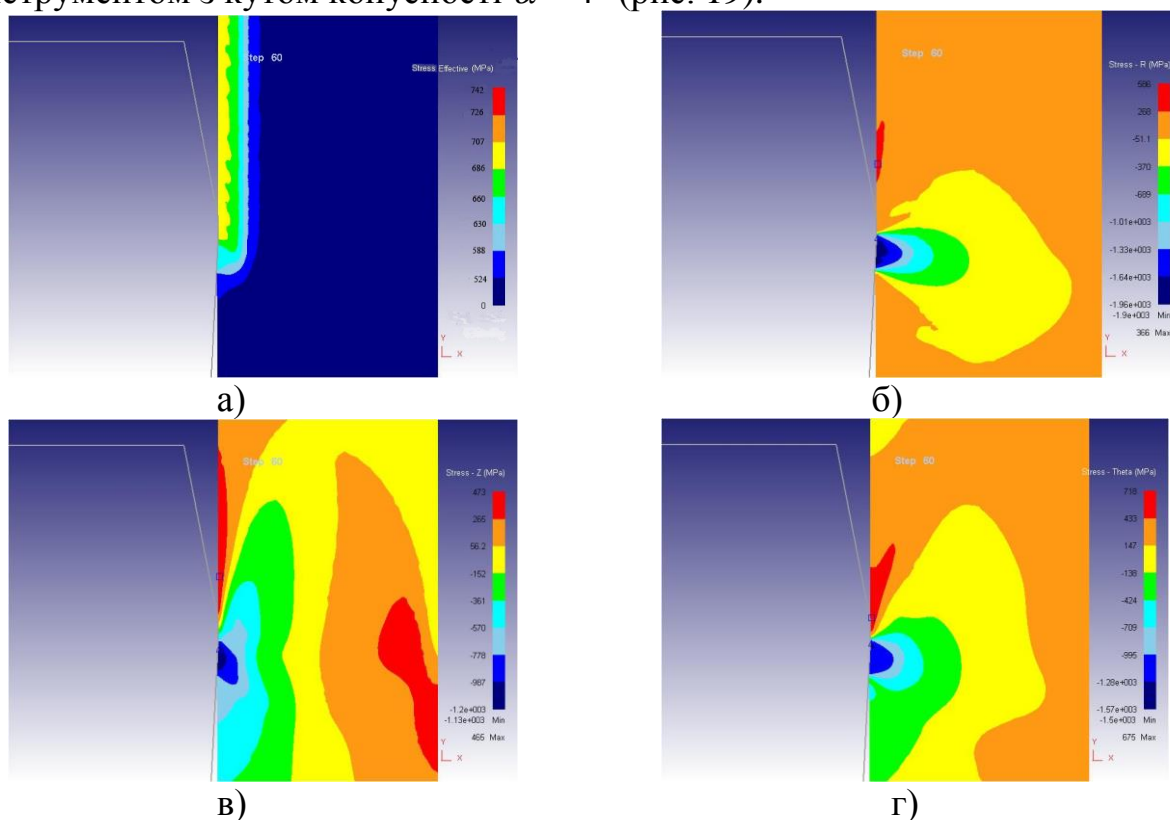


Рис. 19. Розподіл інтенсивності напружень σ_o (а), радіального напруження σ_r (б), осевого напруження σ_z (в), окружного напруження σ_φ (г) на 60-му кроці деформуючого протягування

Із рис. 19, а слідує, що максимальна інтенсивність напружень спостерігається у поверхні отвору і поширюється на деяку глибину, що подібно розподілу деформації (рис. 18, б). На початку контактної зони має місце інтенсивна пластична деформація стискання, якій відповідають максимальні від'ємні значення радіальних напружень ($\sigma_r = -1690$ МПа) (рис. 19, б). Причому ці значення максимальні до деякої глибини залягання, а потім монотонно знижуються. Тобто у контактній зоні є ділянка, на якій матеріал знаходиться у стані інтенсивного об'ємного стискання. В кінці контактної зони має місце різке

падіння від'ємного значення радіального напруження. Більш того, на межі переходу контактної зони у позаконтактну з'являється локальна зона радіальних розтягуючих напружень, що свідчить про появу в цьому місці зони локальної пластичної деформації. Подібний характер має зміна інших компонентів тензора напружень (рис. 19, в, г) на ділянці деформування. Також спостерігається різке зростання від'ємних значень σ_z і σ_φ , які до кінця зони контакту зменшують своє від'ємне значення і переходять на межі контактної і позаконтактної зони через нуль і стають розтягуючими, тобто позитивними. Слід зазначити, що їх значення на деякій глибині, практично, постійні, а потім дещо знижуються. Наявність у місці переходу зони контакту у позаконтактну трьох розтягуючих компонентів тензора напружень указує на появу небезпечної зони локальної пластичної деформації в цьому місці, яка змінює плинність матеріалу в позаконтактній зоні.

Отримані результати підтверджують наявність локальної зони пластичного деформування – напливу матеріалу, розташованого на початку контактної зони, який збільшує протяжність зони контакту.

Дослідження впливу геометрії інструменту на параметри НДС показало, що збільшення кута α від 2° до 12° змінює значення параметру накопиченої деформації e_0 до 5 разів (рис. 20). При цьому змінюється протяжність позаконтактної зони перед ділянкою контакту, яка є мінімальною для кута $\alpha = 12^\circ$ і максимальною – для кута $\alpha = 2^\circ$. Визначено, що зона локальної пластичної деформації після ділянки контакту найбільш помітна при куті $\alpha = 12^\circ$ (крива 1, рис. 20).

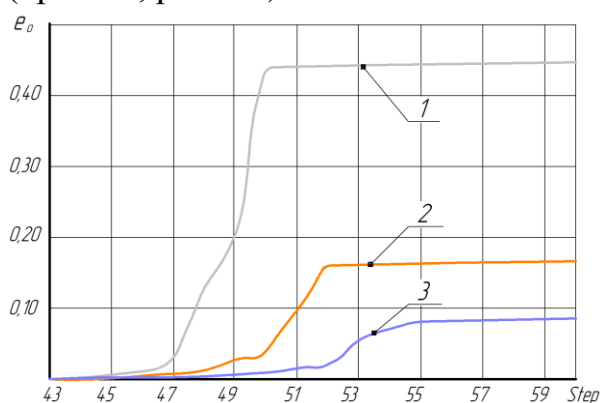


Рис. 20. Зміна накопиченої деформації e_0 від кількості кроків $Step$ для кутів α : 1 – 12° ; 2 – 4° ; 3 – 2°

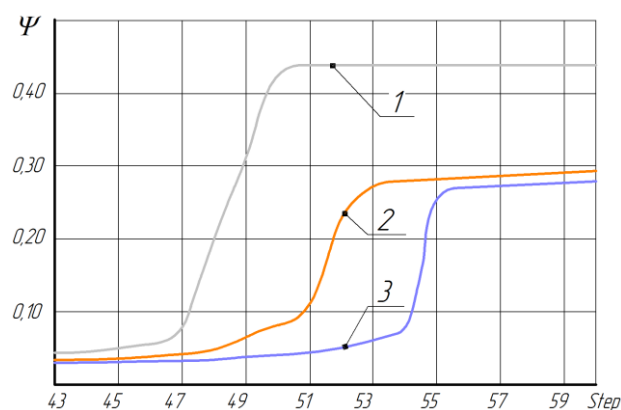


Рис. 21. Зміна ресурсу використаної пластичності ψ від кількості кроків $Step$ для кутів α : 1 – 12° ; 2 – 4° ; 3 – 2°

Залежність ресурсу використаної пластичності ψ від кута α (рис. 21) показало, що на ділянці, яка відповідає передній позаконтактній зоні, спостерігається полого накопичення деформацій і відповідне накопичення ресурсу використаної пластичності.

На початку зони контакту відбувається стрибкоподібне збільшення від'ємного значення гідростатичного тиску від значення $\sigma \approx -500$ МПа до значення $\sigma \approx -1500$ МПа (рис. 22) і відповідне збільшення від'ємного значення коефіцієнта жорсткості напруженого стану η (рис. 23) від -2 до -7 для кутів $\alpha = 2^\circ, 4^\circ$ і $\eta = -5$ для кута $\alpha = 12^\circ$.

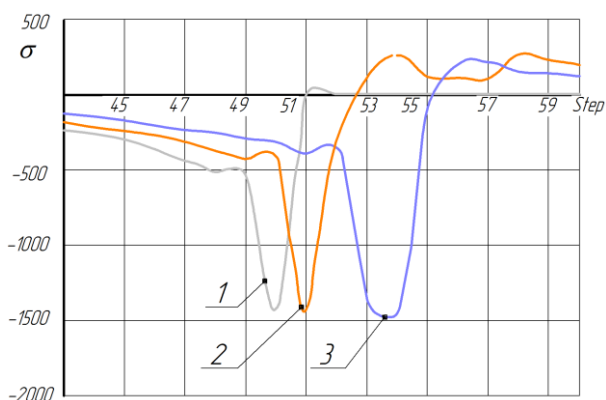


Рис. 22. Зміна гідростатичного тиску σ залежно від кількості кроків *Step* для кутів α : 1 – 12°; 2 – 4°; 3 – 2°

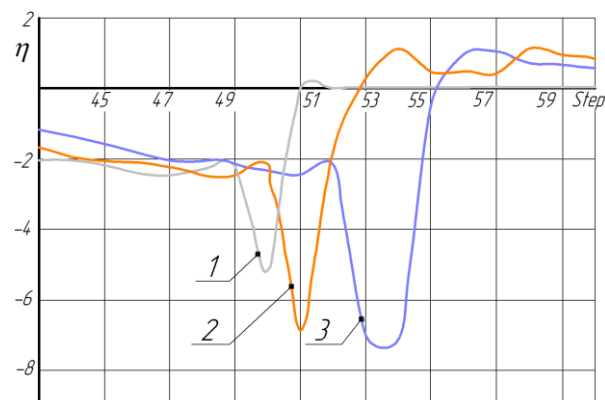


Рис. 23. Зміна коефіцієнта жорсткості напруженого стану η залежно від кількості кроків *Step* для кутів α : 1 – 12°; 2 – 4°; 3 – 2°

Історію деформування (шлях деформування) досліджено при деформуючому протягуванні заготовки з чавуну СЧ20 робочим елементом з різними кутами α (рис. 24).

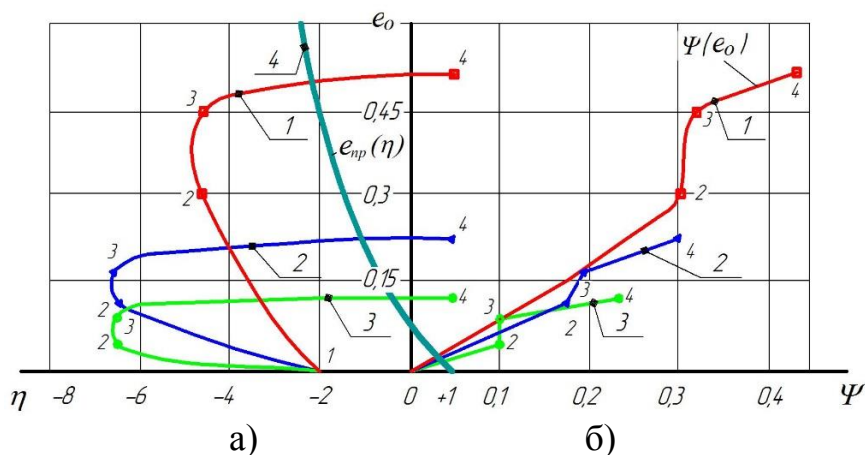


Рис. 24. а) Залежність параметра e_0 від η для різних кутів α : 1 – 12°; 2 – 4°; 3 – 2° при моделюванні заготовки з чавуну СЧ20; б) залежність параметра ψ від e_0 при моделюванні заготовки з чавуну СЧ20 розмірами $d_0 = 35$ мм, $t_0 = 10$ мм з натягом $a = 0,1$ мм для різних кутів α : 1 – 12°; 2 – 4°; 3 – 2°; 4 – ділянка діаграми пластичності

З аналізу представлених результатів випливає, що з ростом кута α інтенсивність накопичення пошкоджень збільшується і має місце більш інтенсивне зниження ресурсу пластичності ψ . Крім того, для всіх значень кута α на ділянці, на якій відбувається перехід контактної зони у позаконтактну, створюються умови збільшення значення ресурсу використаної пластичності ψ , що призводить до появи руйнування оброблюваного матеріалу. Це обумовлено наявністю локальної зони пластичного деформування, поява якої викликана витіканням оброблюваного матеріалу під дією критичних контактних тисків із зони контакту.

Представлені дані, отримані моделюванням деформуючого протягування заготовки з чавуну СЧ20, вказують на істотний вплив геометрії інструменту, зокрема кута α , на параметри НДС та ресурс використаної пластичності ψ . Очевидно, що використання кутів $\alpha \leq 4^\circ$ є більш прийнятним, оскільки дозволяє мінімізувати значення ресурсу використаної пластичності ψ .

Розглянуто процеси, що відбуваються в осередку деформації, зміну на його ділянках параметрів НДС та залежних від нього факторів (рис. 25, 26).

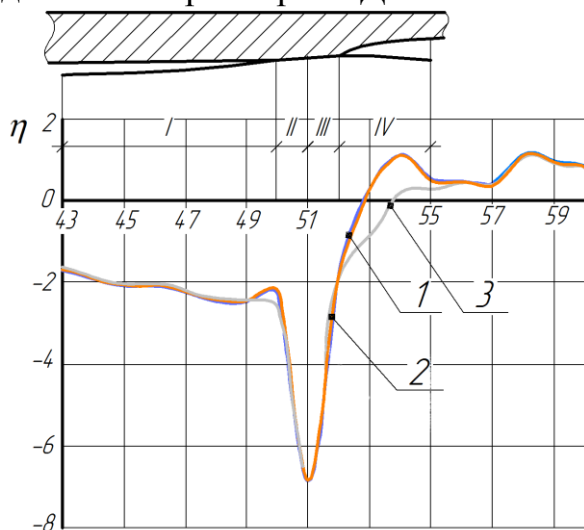


Рис. 25. Залежність коефіцієнта жорсткості напруженого стану η від глибини залягання точок щодо оброблюваної поверхні при деформуючому протягуванні виробів із чавуну СЧ20: I, IV – позаконтактна зона; II, III – контактна зона; 1 – точка 1; 2 – точка 2; 3 – точка 3

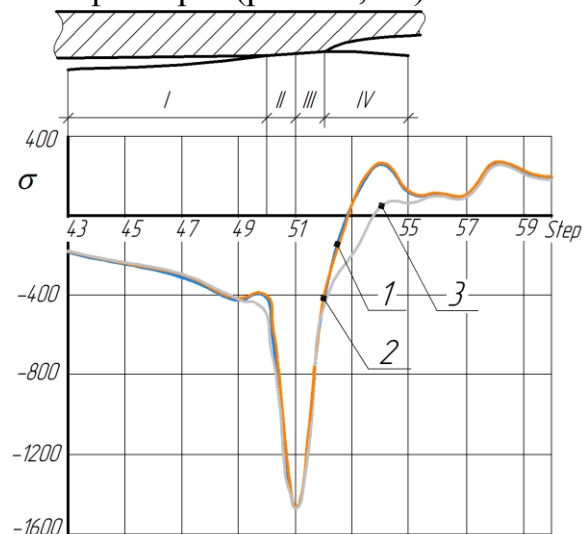


Рис. 26. Залежність гідростатичного тиску σ від глибини залягання точок щодо оброблюваної поверхні при деформуючому протягуванні виробів із чавуну СЧ20: I, IV – позаконтактна зона; II, III – контактна зона; 1 – точка 1; 2 – точка 2; 3 – точка 3

Показник напруженого стану для цієї зони, згідно з результатами моделювання (рис. 25), $\eta = -1,73$ і дещо збільшується до значення $\eta = -2$ на Step 50 (точка початку контактної зони). Ці значення відповідають напруженому стану: стискання в умовах плоскої деформації, і характеризуються наявністю від'ємного гідростатичного тиску в межах $\sigma = -400$ МПа (рис. 26). У розглянутій зоні відбувається накопичення пошкоджень, що відображається зростанням параметра $\Delta\Psi$ і ресурсом використаної пластичності до значення $\Psi = 0,08$.

Проведений аналіз дозволив вивчити механіку деформування в осередку деформації та визначити шляхи оптимізації конструкції інструменту і процесу деформуючого протягування за параметрами залишкового ресурсу пластичності.

У шостому розділі розглянуто вплив основних технологічних факторів на якість антифрикційного покриття, отриманого ФАБО.

З'ясовано, що на формування якісного покриття фрикційно-механічним методом ФАБО впливають режими обробки (контактні навантаження P , число проходів N), а також вихідний мікрорельєф обробленої поверхні (кут різання γ , довжина задньої поверхні L і подача S).

Для аналітичного обґрунтування отриманих експериментальних результатів, оцінки впливу вибраних факторів на якість нанесеного покриття використовувався метод регресійного аналізу. При цьому якість покриття,

отриманого ФАБО, оцінювали декількома параметрами: відносною площею покриття S_n/S , масою покриття m , зміною висотного параметра $R_d/R_{a \text{ вих}}$.

Для встановлення впливу вказаних факторів на показники, що характеризують якість нанесення покриття, реалізували матрицю центрального композиційного плану 2^3+3 зіркові точки.

Обробка експериментальних даних дозволила побудувати статистичні математичні моделі для маси покриття m (Y_1), відносної площі покриття S_n/S (Y_2) та відносної шорсткості поверхні $R_d/R_{a \text{ вих}}$ (Y_3) при натуральних значеннях факторів:

$$Y_1(m) = 0,005519 + 0,000735 \cdot x_1 - 0,000462 \cdot x_2 - 0,001442 \cdot x_3 - \\ - 0,001895 \cdot x_1^2 - 0,001603 \cdot x_2^2 - 0,001799 \cdot x_3^2 + \quad ; \quad (16) \\ + 0,000248 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,000306 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,00031 \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$Y_2\left(\frac{S_n}{S}\right) = 0,668755 + 0,044408 \cdot x_1 - 0,056635 \cdot x_2 - 0,275208 \cdot x_3 - \\ - 0,199841 \cdot x_1^2 - 0,200608 \cdot x_2^2 - 0,149047 \cdot x_3^2 - \quad ; \quad (17) \\ - 0,014875 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,042875 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,006198 \cdot x_2 \cdot x_3$$

$$Y_3\left(\frac{R_d}{R_{a \text{ вих}}}\right) = 0,626308 - 0,088358 \cdot x_1 - 0,00778 \cdot x_2 + 0,077667 \cdot x_3 + \\ + 0,163163 \cdot x_1^2 + 0,048406 \cdot x_2^2 + 0,061634 \cdot x_3^2 - \quad . \quad (18) \\ - 0,017354 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,015312 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,003099 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Проаналізовано вплив кожного з факторів на критерії оптимізації.

Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу для $R_d/R_{a \text{ вих}}$ наведені на рис. 27.

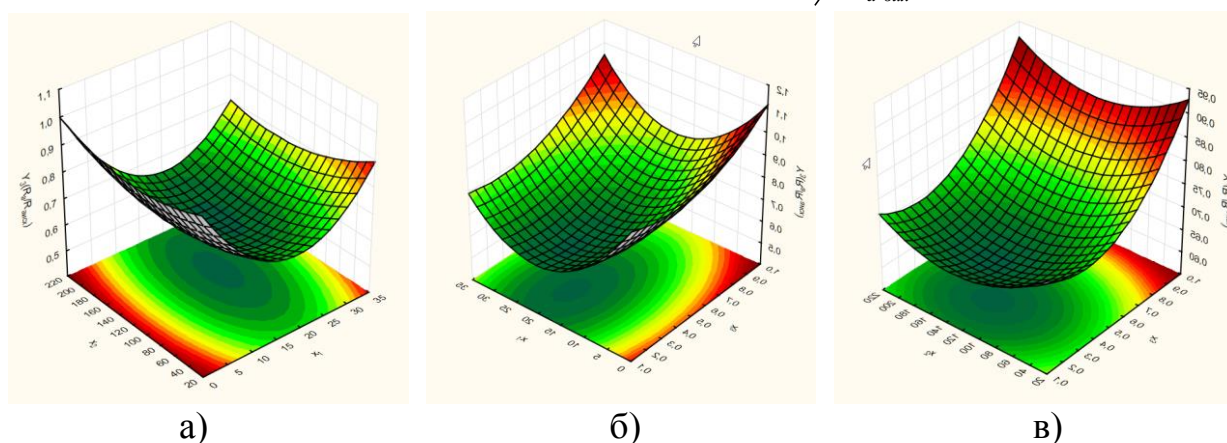


Рис. 27. Поверхні відгуку та графіки ліній рівного виходу $Y_3\left(\frac{R_d}{R_{a \text{ вих}}}\right)$:

а) $Y_3 = f(x_1, x_2)$; б) $Y_3 = f(x_1, x_3)$; в) $Y_3 = f(x_2, x_3)$

Аналіз поверхні відгуку та графіків розсіювання впливу технологічних факторів дозволив оцінити їх вплив та визначити оптимальні значення.

Доведено, що параметри шорсткості поверхні після ФАБО змінюються незначно. Отже, при проектуванні технологічного процесу, що включає як завершальну операцію ФАБО, необхідно вибрати попередню операцію, що

забезпечує покращений стосовно зносостійкості мікрорельєф і фізико-механічні характеристики поверхневого шару.

Аналіз існуючого технологічного процесу обробки робочої поверхні гільзи циліндрів двигуна ДВЗ, що вміщує операцію чистового хонінгування, показав наявність на робочій поверхні абразивних мікрочастинок, які призводять до прискореного зносу поршневих кілець.

Для розробки технологічного процесу, що включає операції деформуючого протягування і ФАБО, проводилися експериментальні дослідження партії з 24 гільз циліндрів ДВЗ, виготовлених з модифікованого чавуну (типу СЧ20) при відновленні їх до першого ремонтного розміру. Відремонтовані двигуни, до кожного з яких встановлювалися по 4 гільзи, що були оброблені за існуючим технологічним процесом, і по 2 гільзи, оброблені за технологічними процесами: деформуюче протягування – полірування; деформуюче протягування – ФАБО, піддавали 2 годинній обкатці. Характеристики робочих поверхонь гільз циліндрів, оброблених за розглянутими технологічними процесами, визначалися після обкатки двигуна.

Установлено ефективність технологічного процесу, що складається з операцій протягування і ФАБО. Він забезпечує мінімальну трансформацію шорсткого шару у процесі експлуатації, поліпшення трибологічних характеристик, відсутність частинок абразиву на оброблюваній поверхні і мінімальний знос робочої поверхні гільзи при її експлуатації. Операція деформуючого протягування значно (до 25%) зміцнює поверхневий шар матеріалу гільзи. Глибина зміцнення при цьому досягає близько 0,3 мм, що гарантує наявність зміцненого матеріалу в парі тертя навіть при тривалій експлуатації.

У цьому розділі представлені дослідження НДС антифрикційних покриттів, нанесених на робочу поверхню гільз циліндрів ФАБО. Моделювання і розрахунок НДС гільзи виконувався МСЕ за схемою, що враховує основні конструктивні особливості виробу та умови його навантаження як контактними – з боку кілець, так і від тиску газів (рис. 28).

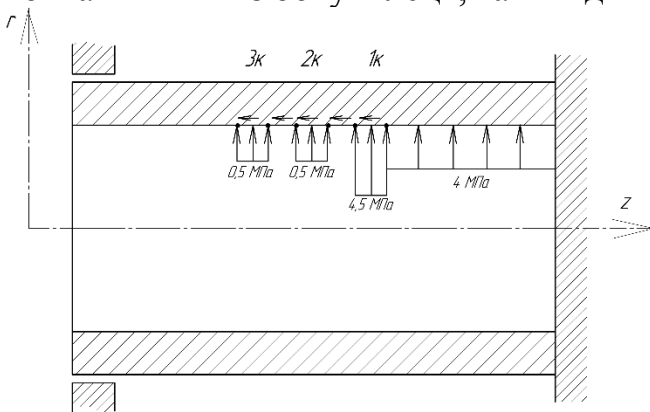


Рис. 28. Розрахункова схема НДС для гільзи циліндрів

Установлено, що на межах контактної ділянки виникає велика концентрація напруження. Причому відразу за кільцем, що рухається, має місце пік розтягуючого осьового напруження, а перед кільцем – стискаючого.

Оскільки розміри контактної зони з кільцем не перевищують 2 мм, і вони істотно менші розмірів гільзи, останню розглядали як нескінченний пружний напівпростір із прямокутною межею. У цьому випадку на контактній епюрі

виділяється ділянка нескінченно малої довжини (рис. 29), а навантаження на ній розглядалися як дві зосереджені малі сили $P_n \cdot dz$ і $P_\tau \cdot dz$.

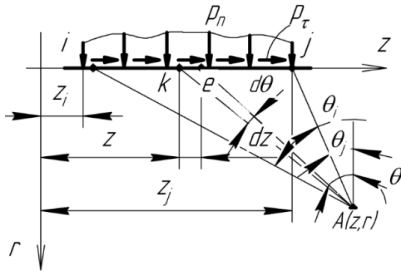


Рис. 29. Схема до аналітичного розрахунку напружень

Напруження від дії P_n і P_τ в довільній точці А дорівнюють:

$$d\sigma_r^n = -\frac{2P_n dz}{\pi r} \cos^3 \theta; \quad (19)$$

$$d\sigma_z^\tau = -\frac{2P_\tau dz}{\pi r} \sin^3 \theta; \quad (20)$$

$$d\sigma_r^\tau = -\frac{2P_\tau dz}{\pi r} \sin^2 \theta. \quad (21)$$

В якості основи для розрахунків було обрано закон тертя Кулона:

$$P_{\tau i} = f_i \cdot P_{n i}; \quad P_{\tau j} = f_j \cdot P_{n j}, \quad (22)$$

а напруження від усіх лінійних ділянок епюри P_n – підсумовувались.

Розрахунок напруження на поверхні чавунної гільзи виконувався за формулами:

$$\sigma_z = -\frac{2f}{\pi} \left\{ \left[P_{ni} \ln \left| \frac{z - z_i}{z - z_j} \right| + (P_{ni} - P_{nj}) \frac{z_j - z}{z_j - z} \ln \left| \frac{z - z_i}{z - z_j} \right| + 1 \right] \right\} - P_n; \quad (23)$$

$$\sigma_r = -P_n; \quad \tau_{rz} = -f \cdot P_n; \quad \sigma_\varphi = \mu(\sigma_z + \sigma_r); \quad (24)$$

$$P_n = P_{ni} + (P_{nj} - P_{ni}) \frac{z - z_i}{z_j - z_i}. \quad (25)$$

Графічна інтерпретація розподілу напружень представлена на рис. 30.

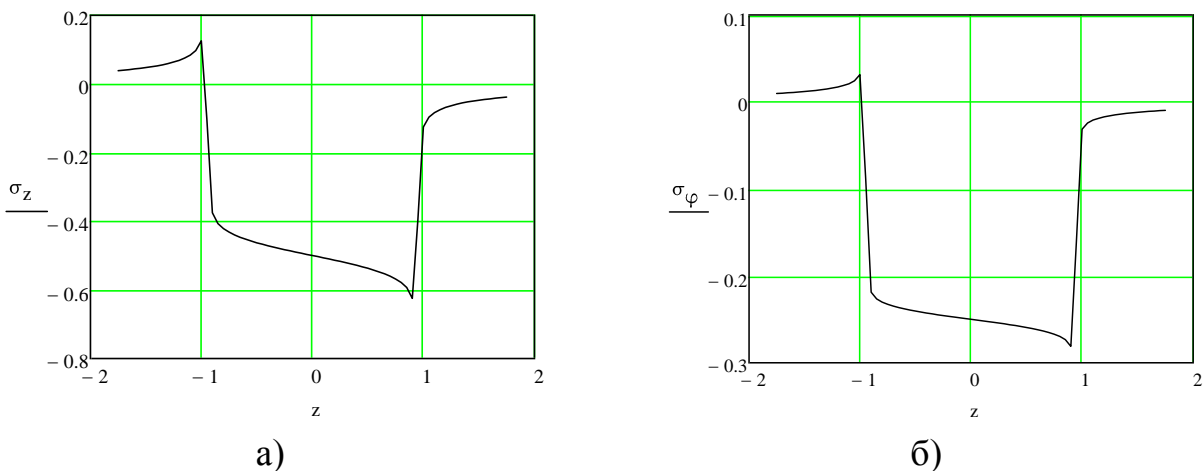


Рис. 30. Розподіл осьових σ_z (а) та окружних σ_φ (б) напружень уздовж контактної поверхні для 2-го поршневого кільця

Установлено, що метод теорії пружності підтверджує основні закономірності, отримані за допомогою МСЕ:

– на межах контактних ділянок виникають піки осьових напружень σ_z – розтягуючих та стискаючих, на різних кінцях цих ділянок;

– величини піків залежать від довжини Δ перехідної ділянки.

Розглянуто поверхню гільзи з антифрикційним покриттям, на яку діють нормальне q і дотичне τ контактні напруження (рис. 31).

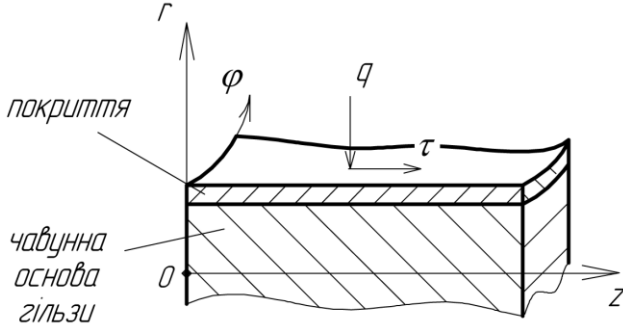


Рис. 31. Розрахункова схема покриття

У системі координат $r0z\varphi$ представлено: r – радіальна координата; z – осьова координата; φ – окружна координата. Узагальнений закон Гука для чавунної основи і латунного покриття має вигляд:

$$\tau = G\gamma, \quad (26)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\varphi)];$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_z + \sigma_\varphi)]; \quad (27)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{E} [\sigma_\varphi - \mu(\sigma_r + \sigma_z)],$$

де G і E – модулі пружності другого і першого роду;

μ – коефіцієнт Пуассона;

σ_r , σ_z , σ_φ – радіальне, осьове та окружне напруження;

γ – деформація зсуву від дії τ ,

ε_r , ε_z , ε_φ – радіальна, осьова та окружна деформації в поверхневих шарах отвору гільзи або в покритті.

З урахуванням прийнятих вище припущень можна вважати, що деформації ε_z , ε_φ і γ у покритті такі ж, як і на поверхні чавунної втулки. Зовнішні граничні навантаження для покриття і для основи будуть рівні, оскільки передаються через тонке покриття без зміни.

Забезпечимо індексом « z » величини, що відносяться до чавунної гільзи, а індексом « n » – до покриття. Тоді з урахуванням осесиметричності задачі можна записати:

$$\begin{aligned} \tau_z &= \tau_n = \tau_{rz}; \\ \tau_{y\varphi z} &= \tau_{y\varphi n} = 0; \\ \sigma_{rz} &= \sigma_{rn} = -q; \\ \varepsilon_{rz} &= \varepsilon_{zn}; \\ \varepsilon_{\varphi z} &= \varepsilon_{\varphi n}. \end{aligned} \quad (28)$$

З виразів (26), (27), (28) отримуємо систему рівнянь для знаходження невідомого напруження в покритті за умови, що напруження на поверхні чавунної гільзи відомі. Вирішуючи ці рівняння, знаходимо:

$$\tau_n = \tau_z; \quad (29)$$

$$\sigma_{zn} = -\frac{\mu_n}{1-\mu_n}q + \frac{1}{1-\mu_n^2} \frac{E_n}{E_z} [(\mu_n - \mu_z)\sigma_{\varphi z} + (1 - \mu_n\mu_z)\sigma_{zz} + \mu_z(1 + \mu_n)q]; \quad (30)$$

$$\sigma_{\varphi n} = -\frac{\mu_n}{1-\mu_n}q + \frac{1}{1-\mu_n^2} \frac{E_n}{E_z} [(\mu_n - \mu_z)\sigma_{zz} + (1 - \mu_n\mu_z)\sigma_{\varphi z} + \mu_z(1 + \mu_n)q]. \quad (31)$$

За викладеною методикою зроблено перерахунок напружень з чавунної поверхні в латунне покриття. Порівняння епюр напружень, які розраховувалися аналітичним методом і МСЕ, показало якісно подібний характер, що свідчить про коректність прийнятих припущень.

Отримані результати дослідження та аналізу НДС у зоні контакту поршневого кільця з робочою поверхнею гільзи дозволили розробити прискорений метод зносостійких випробувань покриття, нанесеного на робочу поверхню гільзи.

З наведених вище розрахунків напруженого стану, при дискретному контакті, у його кінцевих точках виникають зони сильної концентрації осьових напружень σ_z . При чому вони мають різний характер: у т. А – стискаючи, у т. В – розтягуючи (рис. 32).

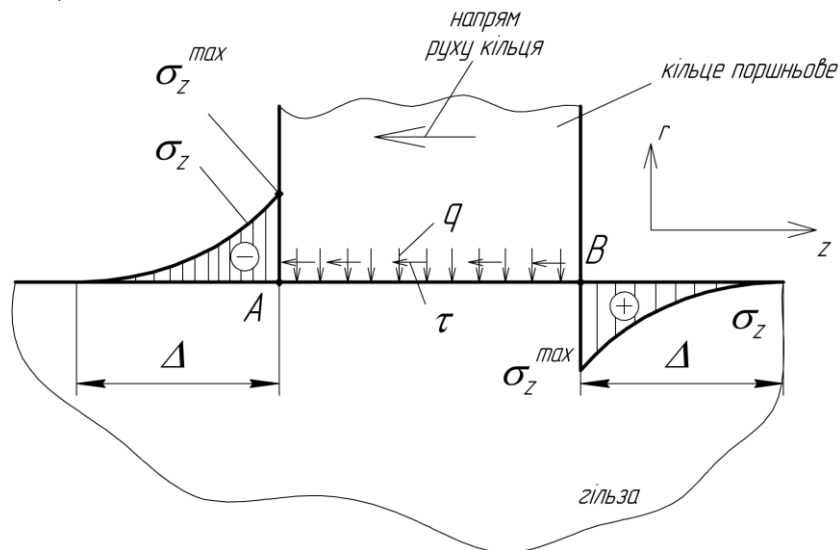


Рис. 32. Схема НДС контактної зони кільця з поверхнею гільзи

Таким чином, будь-яка матеріальна точка на поверхні гільзи, окрім точок зони стирання, випробовує дію змінних розтягуючих та стискаючих напружень σ_z^{max} , що може впливати на міцність та зносостійкість покриття. При моделюванні зносу покриття необхідно створювати періодичну дію цих напружень у поєднанні із звичайним зносом.

З урахуванням цих особливостей розроблена конструкція контртіла для випробування зносостійкості робочої поверхні гільзи, використання якої забезпечує значне скорочення часу випробувань на зносостійкість при максимальній відповідності умов роботи поршневого кільця в гільзі циліндрів.

У **восьмому розділі** наведено результати промислового впровадження, виконаного на основі отриманих науково-технологічних результатів.

Впровадження технологічних процесів на основі деформуючого протягування та ФАБО потребує удосконалення конструкції інструменту, особливо для обробки деталей значних діаметрів, наприклад гільз циліндрів ДВЗ.

Проведенні дослідження дозволили розробити методику для оцінки міцності збірного робочого елемента при дискретного деформування отворів значного діаметру і оптимізації на цій основі конструктивних параметрів інструменту. Розроблений алгоритм послідовності розрахунку збірного деформуючого елемента дозволив вибрати технологічні і конструкційні параметри інструменту з можливістю економії гостродефіцитного твердого сплаву.

Методика оцінки міцності збірного деформуючого елемента для обробки отворів значного діаметру передано до впровадження на підприємство ТОВ «Кіровоградський інструментальний завод «Лезо»», м. Кропивницький, а рекомендації і технічна документація на конструкцію деформуючого інструменту – на завод із виробництва рульової гідравліки науково-виробничого підприємства ПАТ НВП «Радій», м. Кропивницький.

Розроблений технологічний процес обробки гільз циліндрів ДВЗ при їх відновленні в I ремонтний розмір з використанням операції комбінованого протягування та ФАБО прийнятий до впровадження на КАТП «Агробудавтосервіс», м. Кропивницький. Використання запропонованої технології забезпечило отримання робочої поверхні гільзи з поліпшеними фізико-механічними і трибологічними характеристиками та шорсткістю, близькою до експлуатаційної.

Розроблено технологічний процес обробки отворів у вінцях шарошечних доліт, що включає операції свердління, деформуюче протягування та ФАБО з наступним запресуванням твердосплавних вставок.

Порівняльний аналіз показників якості поверхні, обробленої за традиційною технологією та з використанням деформуючого протягування і ФАБО підтвердив переваги запропонованих технічних рішень, а саме: зменшення шорсткості та макровідхилення поверхні отворів, збільшення твердості. Все це в сукупності забезпечило збільшення міцності пресового з'єднання за рахунок зміцнення матеріалу, стабільного натягу і поліпшених показників шорсткого поверхневого шару.

Очікуваний економічний ефект від експлуатації 100 шарошок становить 480 тис. грн. Пропозиції щодо розробки та впровадження запропонованої технології передані у ТОВ «Унібуртех», м. Драгобич.

З метою скорочення періоду припрацювання з'єднання гідронасосу «цапфа шестерні – обойма» запропонована технологія обробки цапф з використанням ФАБО і поверхневого пластичного деформування, яка реалізується за рахунок накладання вібрації. Стендові випробування шестеренних гідронасосів НШ50А – 3 і НШ100А – 3 з шестернями, цапфи яких були оброблені за розробленою технологією показали скорочення періоду припрацювання в 4

рази у порівнянні з деталями, обробленими за існуючим технологічним процесом.

Використання запропонованої технології дозволило зменшити величину зносу пари тертя «цапфа шестерні – обойма» та підвищити технічний ресурс гідронасосів. Очікуваний економічний ефект від впровадження технології обробки цапф шестерень гідронасосів з використанням ФАБО в умовах ВАТ Старокримське підприємство «Сільхозтехніка», м. Старий Крим склав понад 1 млн. 850 тис. грн. на річну програму 6372 гідронасоси.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконаних теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтовано і вирішено науково-технічну проблему, що має важливе народно-господарське значення: створення наукових основ технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням холодного пластичного деформування задля підвищення якості поверхонь тертя деталей з малопластичних матеріалів, які полягають: у розробці і реалізації експериментально-аналітичної моделі контактної взаємодії одиничної мікронерівності з інструментом при ФАБО; у встановленні основних технологічних факторів, що впливають на якість покриття; у визначенні шляхів технологічного управління якістю покриття за рахунок використання деформуючого протягування; у дослідженні пластичних властивостей чавуну і побудові діаграми пластичності, яка враховує умови його деформування; в дослідженні механіки деформуючого протягування виробів з чавуну і визначенні його залишкового ресурсу пластичності; у розробці методики вивчення НДС антифрикційних покриттів, нанесених на робочу поверхню чавунних гільз ДВЗ; в розробці науково-обґрунтованих способів нанесення покриттів, інструментів для нанесення покриттів і деформування, методів випробувань на зносостійкість.

Більш детально основні висновки можна сформулювати таким чином:

1. Розроблена і реалізована експериментальна модель контактної взаємодії одиничної мікронерівності з інструментом при ФАБО показала, що при взаємодії мікронерівності з латунним інструментом практично відразу відбувається формування затупленої вершини мікронерівності з радіусом округлення, який після досягнення свого оптимального значення відповідно до принципу самоорганізації закінчує своє формування за рахунок зносу від сил тертя.

2. Визначено, що на задній поверхні експериментальної моделі одиничної мікронерівності, через наявність високих контактних тисків, які перевищують межу плинності латуні, має місце адгезія антифрикційного матеріалу латуні. Показано, що ці ділянки надалі відіграють роль осередків поширення адгезійної латунної плівки на обробленій фрикційно-механічним методом поверхні. Формування тонкого адгезійного прошарку на етапі мікрорізанні, значною мірою визначає якість усього антифрикційного покриття.

3. Показано, що з позицій максимальної ефективності протікання процесу мікрорізання і заповнення западин антифрикційним матеріалом геометрія мікронерівностей повинна забезпечувати передній кут різання $\gamma=0\div 5^\circ$. Виявлені закономірності взаємодії мікронерівностей з латунним інструментом дозволили забезпечити інтенсифікацію процесу мікрорізання і заповнення мікрозападин антифрикційним матеріалом.

4. Виділені і систематизовані основні технологічні фактори, що впливають на якість нанесеного покриття. Експериментально встановлено вплив технологічних факторів на якість антифрикційного покриття, що підтвердило основні закономірності, отримані за допомогою розробленої моделі контактної взаємодії одиничної мікронерівності з латунним інструментом.

5. З'ясовано шляхи технологічного управління якістю нанесеного антифрикційного покриття. Встановлено, що використання операції деформування протягування після нанесення антифрикційного покриття підвищує якість покриття за рахунок поліпшення адгезійної взаємодії з основним матеріалом і забезпечення постійності товщини покриття, але обов'язково вимагає додаткового вивчення НДС поверхневого шару, обробленого деформуючим протягуванням, побудови діаграми пластичності чавуну СЧ20, що враховує його деформування при від'ємних показниках жорсткості напруженого стану, уточнення залишкового ресурсу пластичності чавуну СЧ20, обробленого деформуючим протягуванням.

6. Показано, що графітовмісний чавун може пластично деформуватися тільки при від'ємних значеннях показника жорсткості напруженого стану, що дозволяє сформулювати наступне положення: обробка отворів у чавунних виробах деформуючим протягуванням можлива тільки за відсутності пластичних деформацій поблизу зовнішньої поверхні виробу, а пластично може деформуватися тільки матеріал стінки, що прилягає до отвору. З'ясовано, що для вивчення можливості пластичної деформації чавуну необхідно провести механічні випробування зразків з чавуну. Особливу увагу приділено визначенню граничної деформації чавуну до руйнування при різних від'ємних значеннях показника жорсткості напруженого стану.

7. Запропоновано метод отримання значних пластичних деформацій чавуну СЧ20, який полягає в розробці теоретичної моделі деформування збірною чавунного трубчастого зразка при спільному його стисканні в умовах обмеженої окружної деформації по зовнішній поверхні в комбінації з іншими пластичними матеріалами, що дозволяє впливати на значення гідростатичного тиску і показника жорсткості НДС за товщиною стінки. Розрахунки, які виконані згідно з розробленою теоретичною моделлю, дозволили визначити параметри НДС і накопичену до руйнування пластичну деформацію при різних від'ємних значеннях показника жорсткості напруженого стану.

8. Експериментальні дослідження, проведені відповідно до розробленої теоретичної моделі та моделювання процесу осадки збірною трубчастого зразка, підтвердили результати розрахунків і дозволили отримати значні пластичні деформації чавуну при від'ємних значеннях показника жорсткості напруженого стану. Це дозволило вперше побудувати діаграму пластичності

чавуну СЧ20, включаючи ділянку, на якій деформування відбувається при значних від'ємних значеннях показника жорсткості напруженого стану. Наявність діаграми пластичності дозволила оцінити ресурс використаної пластичності чавуну при деформуючому протягуванні гільз ДВЗ.

9. На підставі розробленої методики моделювання процесу деформуючого протягування отворів у виробих з чавуну СЧ20 встановлено:

- найбільш небезпечне місце з позиції вичерпання ресурсу пластичності – поверхня обробленого отвору;

- при деформуючому протягуванні в умовах наявності критичних контактних тисків має місце зона локальної пластичної деформації не лише на початку контактної зони, але і в її кінці. Для цього випадку уточнена схема осередку деформації при деформуючому протягуванні, яка становить ділянку контакту, що сполучається з позаконтактними зонами, а в місцях його сполучення мають місце зони локальної пластичної деформації. Передня зона являє собою наплив, що збільшує довжину контактної ділянки, а задня – сходинок з оброблюваного матеріалу, який витікає із зони контакту під дією критичних контактних тисків;

- на глибині рівній товщині покриття, НДС, практично, однорідний, що дозволяє спростити теоретичну модель розрахунку НДС для тонкого антифрикційного покриття.

10. Вивчено вплив геометрії інструменту на параметри НДС та історію деформування. Встановлено вплив кута α на ресурс використаної пластичності. Показано, що основне накопичення ушкоджень відбувається в зонах позаконтактної деформації і в задній локальній зоні пластичного деформування. Запропоновані технологічні та конструктивні рекомендації з вибору геометрії і конструкції інструменту. З позиції мінімізації значення ресурсу використаної пластичності оптимальним варіантом для проектування робочого елемента визначено використання кутів $\alpha \leq 4^\circ$ із обов'язковою наявністю криволінійної ділянки зв'язаних з максимальним радіусом робочого конуса, твірна якого відповідає геометрії позаконтактної зони за ділянкою контакту.

11. Уточнена схема взаємодії поршневих кілець з поверхнею гільзи. Виконані дослідження НДС контактної зони кілець і гільзи за допомогою МСЕ та використанням методу теорії пружності дали можливість визначити основні закономірності цієї взаємодії:

- на межах контактних ділянок виникають піки осьових напружень σ_z – розтягуючих та стискаючих на різних кінцях цих ділянок;

- величина значення піків залежить від сил контактної тертя і довжини перехідної ділянки.

12. Розроблено метод розрахунку НДС антифрикційного покриття, на підставі якого виконано розрахунок напружень на робочій поверхні гільз у зонах контакту з поршневими кільцями. За результатами аналізу НДС встановлено вплив на стійкість антифрикційного покриття двох процесів: адгезійного стирання на ділянці контакту кільця з поверхнею гільзи і втомної

стійкості під дією циклічних піків розтягуючих і стискаючих осьових напружень.

13. За результатами аналізу НДС розроблено прискорений метод випробувань на зносостійкість антифрикційного покриття, який полягає в моделюванні реальних умов роботи поршневого кільця в зоні його контакту з поверхнею гільзи, що включають стирання поверхні гільзи у поєднанні з послідовною взаємодією з піковими зонами сильної концентрації напружень – стискаючих та розтягуючих.

Запропонована оригінальна конструкція моделюючого пристрою для випробування на зносостійкість робочої поверхні гільзи з покриттям, яка включає контргіло, що взаємодіє з поверхнею гільзи і моделює собою сукупність поршневих кілець, які одночасно контактують з поверхнею гільзи.

14. Результати роботи пройшли промислову апробацію та лягли в основу розробки ефективних технологічних процесів обробки робочих поверхонь гільз циліндрів ДВЗ та цапф шестерень гідронасосів; технологічних процесів збирання вінців шарошечних доліт.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Посвятенко Е.К. Протягування та протяжний інструмент: монографія / Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, І.В. Шепеленко. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2020. – 298 с. (запропоновано використання деформуючого протягування у процесі нанесення антифрикційного покриття фрикційно-механічним методом).

2. Посвятенко Е.К. Інженерія деталей, оброблених протягуванням: монографія/ Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, С.Е. Шейкін, І.В. Шепеленко, О.В. Чернявський. Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2021. – 466 с. (обґрунтовано доцільність використання інструменту на базі протяжки для нанесення антифрикційних покриттів).

3. Nemyrovskiy Ya. Designing the structures of discrete solid-alloy elements for broaching the holes of significant diameter based on the assessment of their strength/ Ya. Nemyrovskiy, I. Shepelenko, E. Posviatenko et al.// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, Vol.3, NO 7 (105), 57–65. (Scopus) <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203524> (виконано розрахунок міцності збірного деформуючого елемента при обробці гільзи циліндрів).

4. Nemyrovskiy Ya. B. The use of deforming broaching for enhancing the efficiency of cutter chisels/ Ya. B. Nemyrovskiy, V. V. Krivosheya, I.V. Shepelenko et al.// Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2020. – №2. – pp.61–66. (Scopus) <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-2/061> (розроблено технологічний процес обробки отворів у корпусах шарошкових доліт з використанням деформуючого протягування).

5. Shepelenko I.V. Technological factors influence on the antifriction coatings quality// Проблеми трибології (Problems of Tribology), Хмельницький, 2021. – Т.26, №2/100. – С.50–57. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57>.

6. Shepelenko I.V. The study of surface roughness in the process of finishing antifriction non-abrasive treatment// Проблеми трибології (Problems of Tribology),

Хмельницький, 2020. – №1/95. – С.34–40. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2020-95-1-34-40>.

7. Shepelenko Ihor. Simulation of micro-cutting in the process of finishing anti-friction non-abrasive treatment/ Ihor Shepelenko, Yuriy Tsekhanov, Yakiv Nemyrovskiy et al.// Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science, 2019, Vol 5, №5, pp.43–52. <https://doi.org/10.23939/ujmems2019.02.043> (визначено схеми контактної взаємодії інструменту з оброблюваною поверхнею на етапі мікрорізання).

8. Shepelenko I.V. The mechanism of formation of anti-friction coatings by employing friction-mechanical method/ I.V. Shepelenko, E.K. Posviatenko, V.V. Cherkun// Проблеми трибології (Problems of Tribology), Хмельницький, 2019. – №1. – С.35–39. <https://doi:10.31891/2079-1372-2019-91-1-35-39> (запропоновано схема нанесення антифрикційних покриттів з використанням деформуючого протягування).

9. Chernovol Mykhailo. Appliances for FANT of cylinder liners / Mykhailo Chernovol, Ihor Shepelenko, Mohamed R.F. Budar // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, Кіровоград, 2016. – Вип.46. – С. 258–265. (виконано аналіз існуючих схем обробки гільз циліндрів).

10. Черновол М.И. Повышение качества финишной обработки отверстий/ М.И. Черновол, И.В. Шепеленко, Мохамед Р.Ф. Будар // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, Кіровоград, 2016. – Вип.29. – С.104–111. (запропоновано комбіновану технологію фінішної обробки отворів).

11. Шепеленко И.В. Особенности выбора состава технологической среды для финишной антифрикционной безабразивной вибрационной обработки/ И.В. Шепеленко, В.В. Черкун// Вібрації в техніці та технологіях, Вінниця, 2016. – № 1(81). – С. 75–80. (запропоновано алгоритм вибору технологічного середовища при нанесенні антифрикційного покриття).

12. Chernovol Mykhailo. Effectiveness increase in application of FANT of the components of mobile agricultural machines/ Mykhailo Chernovol, Ihor Shepelenko, Mohamed R.F. Budar// Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, Кіровоград, 2015. – Вип.45 (1). – С. 10–13. (удосконалено спосіб нанесення антифрикційних покриттів).

13. Шепеленко И.В. Применение вибрации при ФАБО/ И.В. Шепеленко, В.В. Черкун// Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету, Серія: Технічні науки, Вінниця, 2014. – Вип. 2 (85). – С.28–31. (запропоновано схему нанесення антифрикційних покриттів з використанням вібрації).

14. Шепеленко И.В. Образование антифрикционного покрытия финишной антифрикционной безабразивной вибрационной обработкой/ И.В. Шепеленко, В.В. Черкун// Вібрації в техніці та технологіях, Вінниця. – 2013. – № 3(71) – С. 99–104. (встановлено особливості утворення антифрикційного покриття при використанні вібрації).

15. Шепеленко И.В. Влияние состояния исходной поверхности на процесс ФАБО/ И.В. Шепеленко, В.В. Черкун // Науковий вісник Таврійського

державного агротехнологічного університету, Мелітополь, 2013. – Вип. 3 (1). – С.150–155. (визначено вплив вихідної поверхні на якість антифрикційного покриття).

16. Черновол М.І. Пристрої для фрикційно-механічного нанесення покриттів/ М.І. Черновол, І.В. Шепеленко // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, Кіровоград, 2013. – Вип.26. – С.58–62. (виконано аналіз методів та пристроїв для нанесення антифрикційного покриття).

17. Черновол М.И. Способы формирования антифрикционных покрытий на металлические поверхности трения/ М.И. Черновол, И.В. Шепеленко// Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, Кіровоград, 2012. – Вип.25 (1). – С.3–8. (розроблено класифікація способів нанесення антифрикційних покриттів на металеві поверхні тертя).

18. Кропивний В.М. Розробка та дослідження складу технологічного середовища для ФАБВО/ В.М. Кропивний, І.В. Шепеленко, В.В. Черкун// Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, Кіровоград, 2011. – Вип.41 (1). – С.248–251. (запропоновано склад технологічного середовища для нанесення антифрикційного покриття).

19. Черновол М.И. Комбинированный метод обработки поверхностей трения/ М.И. Черновол, И.В. Шепеленко, Варума Арифа// Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, Кіровоград, 2011. – Вип.24 (2). – С.13–16. (запропоновано комбінований метод обробки поверхонь тертя).

20. Кропивный В.Н. Антифрикционные свойства поверхности при обработке ФАБВО / В.Н. Кропивный, И.В. Шепеленко, В.В. Черкун// Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, Кіровоград, 2010. – Вип.23. – С. 361–364. (досліджено антифрикційні властивості поверхонь з антифрикційними покриттями).

21. Кропивный В.Н. Структура поверхностного слоя цапф шестерен шестеренных насосов при обработке ФАБВО/ В.Н. Кропивный, И.В. Шепеленко, В.В. Черкун// Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, Кіровоград, 2010. – Вип.40 (1). – С. 185–188. (досліджено мікроструктуру поверхневого шару цап шестерен після фрикційно-механічної обробки).

22. Кропивный В.Н. Исследование свойств покрытия, нанесенного методом ФАБВО/ В.Н. Кропивный, И.В. Шепеленко, В.В. Черкун// Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету, Кіровоград, 2008. – Вип.21. – С.311–314. (встановлено властивості антифрикційних покриттів, отриманих ФАБВО).

23. Shepelenko I. Compression Mechanics of Cylindrical Samples with Radial Deformation Limitation/ I. Shepelenko, Y. Tsekhanov, Y. Nemyrovskiy et al. // In: Ivanov V., Pavlenko I., Liaposhchenko O., Machado J., Edl M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. (2021), pp. 53–62. (**Scopus**)

https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_6 (запропоновано методику побудови діаграми пластичності для малопластичних матеріалів).

24. Shepelenko I. Plasticity Studies During Deformation Under Conditions of Significant Negative Values of the Stiffness Coefficient of the Stress State/ I. Shepelenko, Y. Tsekhanov, Y. Nemyrovskiy et al. // In: Karabegović I. (eds) *New Technologies, Development and Application IV*. NT 2021. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 233. Springer, Cham (2021), pp. 215–223. (Scopus) https://doi.org/10.1007/978-3-030-75275-0_25 (виконано моделювання осадки циліндричного чавунного зразка).

25. Shepelenko I. Mechanics of Micro-cutting Using FANT/ I. Shepelenko, Y. Tsekhanov, M. Storchak M. et al.// In: Tonkonogyi V. et al. (eds) *Advanced Manufacturing Processes II*. InterPartner 2020. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham (2021), pp.619–628. (Scopus) https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_60 (виконано аналіз механіки формування поверхневого шару антифрикційного матеріалу).

26. Rasheed A Abdullah. Experimental quality improvement of the application of antifriction coating/ Abdullah Rasheed A, Ihor Shepelenko, Eduard Posviatyenko // *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1706, First International Conference on Advances in Physical Sciences and Materials 13-14 August 2020, Coimbatore, India, pp.1–11. (Scopus) <https://doi:10.1088/1742-6596/1706/1/012187> (доведено вплив форми і розмірів мікронерівностей на формування антифрикційного покриття).

27. Shepelenko I. Peculiarities of Interaction of Micro-roughnesses of Contacting Surfaces at FANT/ I. Shepelenko, Y. Nemyrovskiy, Y. Tsekhanov et al.// In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. DSMIE 2020. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham (2020), pp.452–461. (Scopus) https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_44 (встановлено основні закономірності взаємодії мікронерівностей поверхні з інструментом).

28. Shepelenko I. Power Parameters of Micro-cutting During Finishing Antifriction Non-abrasive Treatment/ I. Shepelenko, Y. Nemyrovskiy, Y. Tsekhanov et al.// *New Technologies, Development and Application III*. NT 2020. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 128. Springer, Cham (2020), pp 194–201. (Scopus) https://doi.org/10.1007/978-3-030-46817-0_22 (доведено шляхи підвищення ефективності мікрорізання при нанесенні антифрикційних покриттів фрикційно-механічним методом).

29. Shepelenko I. Improving the Efficiency of Antifriction Coatings by Means of Finishing the Antifriction Non-abrasive Treatment/ I. Shepelenko, Y. Tsekhanov, Y. Nemyrovskiy et al.// *Advanced Manufacturing Processes*. InterPartner 2019. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham (2020), pp.289–298. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_30 (Scopus) (визначено шляхи підвищення ефективності нанесення антифрикційних покриттів).

30. Shepelenko I. Restoration of bronze bushes by the method of surface plastic deformation/ I. Shepelenko, Warouma Arifa, V. Sherkun// *International Journal of*

Engineering & Technology, 5 (2016), pp.29–32. (Scopus) <https://doi.org/10.14419/ijet.v5i1.5651> (доведено вплив деформуючого протягування на припрацювання поверхонь тертя).

31. Nemyrovskiy Ya. Improving the Durability of Agricultural Machinery Parts by Applying Antifricition Coatings/ Ya. Nemyrovskiy, I. Shepelenko, O. Medvedieva// Acta Scientific Agriculture 4.5, 2020, pp.46–49. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_30 (виконано аналіз схем нанесення антифрикційних покриттів).

32. Цеханов Ю.А. Особенности взаимодействия микронеровностей контактирующих поверхностей при финишной антифрикционной безабразивной обработке/ Ю.А. Цеханов, М.Н. Подоприхин, И.В. Шепеленко и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета, Воронеж, 2020. – №4 (16). – С.157–166. (запропоновано схему взаємодії одиначної мікронерівності з антифрикційним матеріалом).

33. Shepelenko I.V. Improvement of finishing antifricition treatment without abrasive of the rubbing parts surfaces of agricultural machineries/ I.V. Shepelenko, V.V. Cherkun, A. Warouma // International Journal of Agricultural Research, Innovation and Technology (IJARIT) Current Issue: Volume 4, Issue 1, June 2014, pp. 98–101. (розроблено технологічний процес обробки цапф шестерень гідронасосів з використанням ФАБО).

34. Шепеленко И.В. Совершенствование процесса финишной антифрикционной безабразивной обработки цапф шестерен гидронасосов/ И.В. Шепеленко, В.В. Черкун// Ремонт, восстановление, модернизация, 2012. – № 9. – С. 32–35. (удосконалено метод нанесення антифрикційних покриттів).

35. Патент № 41439 України. Поверхнево-активне середовище для нанесення покриттів фрикційно-механічним методом / Кропівний В.М., Шепеленко І.В., Павлюк-Мороз В.А., Черкун В.В., Красота М.В., Соколенко І.М.; опубл.25.05.2009. (виконано аналіз існуючих середовищ для нанесення покриттів фрикційно-механічним методом).

36. Патент № 52699 України. Спосіб нанесення антифрикційних покриттів / Кропівний В.М., Шепеленко І.В., Чернявський О.В., Василенко І.Ф., Красота М.В.; опубл.10.09.2010. (розроблено схема нанесення антифрикційних покриттів).

37. Патент № 63315 України. Пристрій для комбінованої обробки поверхонь тертя / Кропівний В.М., Шепеленко І.В., Чернявський О.В., Красота М.В., Василенко І.Ф.; опубл.10.10.2011. (розроблено конструкція пристрою для комбінованої обробки поверхонь тертя).

38. Патент № 70146 України. Пристрій для фрикційно-механічного нанесення покриттів / Чернявський О.В., Шепеленко І.В., Василенко І.Ф., Красота М.В., Кропівна А.В.; опубл.25.05.2012. (розроблено схема пристрою для фрикційно-механічного нанесення покриттів).

39. Патент № 74630 України. Спосіб нанесення антифрикційних покриттів на внутрішні циліндричні поверхні / Черновол М.І., Шепеленко І.В., Чернявський О.В., Василенко І.Ф., Кропівна А.В.; опубл.12.11.2012. (розроблено схема нанесення антифрикційних покриттів).

40. Патент № 74723 України. Спосіб комбінованої обробки поверхонь тертя / Черновол М.І., Шепеленко І.В., Чернявський О.В., Посвятенко Е.К., Кропівна А.В.; опубл.12.11.2012. (розроблено схема комбінованої обробки поверхонь тертя).

41. Патент № 94809 України. Спосіб нанесення двошарового покриття / Шепеленко І.В., Красота М.В.; опубл.10.12.2014. (розроблено схема нанесення двошарового покриття).

42. Патент № 102038 України. Пристрій для фрикційно-механічного нанесення антифрикційних покриттів / Черновол М.І., Чернявський О.В., Шепеленко І.В., Мохамед Р.Ф. Будар; опубл.12.10.2015. (розроблено схема пристрою для фрикційно-механічного нанесення антифрикційних покриттів).

43. Патент № 108429 України. Пристрій для фінішної антифрикційної безабразивної обробки внутрішніх циліндричних поверхонь / Черновол М.І., Чернявський О.В., Шепеленко І.В., Красота М.В., Мохамед Р.Ф. Будар; опубл.11.07.2016. (розроблено схема пристрою для фінішної антифрикційної безабразивної обробки внутрішніх циліндричних поверхонь).

44. Патент № 115761 України. Протяжка для обробки переривчастих отворів / Немировський Я.Б., Посвятенко Е.К., Шепеленко І.В., Єрьомін П.М., Чернявський О.О.; опубл.25.04.2017. (розроблено схема інструменту для обробки переривчастих отворів).

45. Патент № 118919 України. Комбінована протяжка / Чернявський О.В., Шепеленко І.В., Посвятенко Е.К., Немировський Я.Б., Єрьомін П.М., Чернявський О.О.; опубл.28.08.2017. (розроблено схема комбінованої протяжки).

46. Патент № 119711 України. Спосіб формування регулярного мікрорельєфу / Шепеленко І.В., Чернявський О.В., Посвятенко Е.К., Немировський Я.Б., Єрьомін П.М., Чернявський О.О., Мохамед Р.Ф. Будар; опубл.10.10.2017. (розроблено схема формування регулярного мікрорельєфу деформуючим протягуванням).

47. Патент № 120838 України. Спосіб визначення пластичності малопластичних матеріалів / Немировський Я.Б., Шепеленко І.В., Посвятенко Е.К., Чернявський О.В., Єрьомін П.М., Кривошея В.В., Цеханов Ю.А., Каріх Д.В.; опубл.27.11.2017. (виконано експериментальні дослідження пластичності чавуну СЧ20).

48. Патент № 124157 України. Збірна деформуюча протяжка / Немировський Я.Б., Чернявський О.В., Шепеленко І.В., Посвятенко Е.К., Єрьомін П.М., Шейкін С.Є.; опубл.26.03.2018. (розроблено схема комбінованої протяжки).

49. Патент № 124867 України. Протяжка / Чернявський О.В., Шепеленко І.В., Посвятенко Е.К., Немировський Я.Б., Сіренко О.Д., Єрьомін П.М., Чернявський О.О.; опубл.25.04.2018. (розроблено схема протяжки).

50. Патент № 128740 України. Пристрій для фрикційно-механічного нанесення покриттів / Чернявський О.В., Шепеленко І.В., Посвятенко Е.К., Немировський Я.Б., Єрьомін П.М., Сіренко О.Д., Мохамед Р.Ф. Будар, Чернявський О.О.; опубл.10.10.2018. (розроблено схема пристрою для фрикційно-механічного нанесення покриттів).

51. Патент № 145186 України. Спосіб визначення пластичності малопластичних матеріалів / Шепеленко І.В., Немировський Я.Б., Цеханов Ю.О., Гуцул В.І., Єрьомін П.М.; опубл.25.11.2020. (запропоновано конструкція пристрою для визначення пластичності малопластичних матеріалів).

52. Шепеленко І.В. Підвищення ефективності обробки цапф шестерень гідронасосів/ І.В. Шепеленко, В.В. Черкун// Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу - 2021» (07 – 10 вересня 2021 р.), випуск 7. – Херсон: ХНТУ, 2021. С.109–112. (розроблено технологічний процес обробки цапф шестерень гідронасосів з використанням ФАБО).

53. Shepelenko I.V. Resource-saving and environmentally friendly technology for applying anti-friction coating/ I.V. Shepelenko, Ya.B. Nemyrovskiy, O.V. Medvedieva et al.// Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2021): матеріали XI Міжнародної науково – практичної конференції (26 – 27 травня 2021 р.): у 2-х т. – Чернігів, 2021. – Т.1. С.28–29. (запропоновано схему нанесення антифрикційних покриттів).

54. Шепеленко І.В. Дослідження пластичності чавуну в умовах всебічного стискання/ І.В. Шепеленко, Ю.О. Цеханов, Я.Б. Немировський та ін.// Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2021: Збірник тез доповідей II-ї Міжнародної науково-технічної конференції (13 – 15 травня 2021 р.), м.Вінниця, 2021. С.106–107. (розроблено методику і спосіб визначення пластичності малопластичних матеріалів).

55. Немировский Я.Б. Ресурсосберегающая и экологически чистая технология нанесения антифрикционных покрытий/ Я.Б. Немировский, И.В. Шепеленко, О.В. Медведева // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу - 2020» (08 – 12 вересня 2020 р.), випуск 6. – Херсон: ХНТУ, 2020. С.138–139. (запропоновано технологію нанесення антифрикційних покриттів).

56. Шепеленко І.В. Особливості деформуючого протягування малопластичних матеріалів/ І.В. Шепеленко, Я.Б. Немировський, Ю.О. Цеханов та ін.// Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС - 2020): матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції (23 – 24 вересня 2020 р.): у 3-х т. – Чернігів, 2020. – Т.3. С. 9–11. (запропоновано варіанти управління ресурсом пластичності при деформуючому протягуванні).

57. Шепеленко І.В. До питання оцінки якості обробки деталей холодним пластичним деформуванням за показниками пластичності/ І.В. Шепеленко, Я.Б. Немировський, Ю.О. Цеханов та ін.// Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2020» (08 – 12 вересня 2020 р.), випуск 6. – Херсон: ХНТУ, 2020. С.163–166. (побудовано діаграма пластичності чавуну).

58. Шепеленко І.В. Інтенсифікація процесу нанесення антифрикційних покриттів/ І.В. Шепеленко, Я.Б. Немировський, Е.К. Посвятенко // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали XXI Міжнародної науково-технічної конференції (06 – 09 жовтня 2020 р.), м.Київ, КПІ, 2020. С.94–96.

(визначено шляхи інтенсифікації процесу нанесення антифрикційних покриттів).

59. Шепеленко И.В. Повышение эффективности применения финишной антифрикционной безабразивной обработки/ И.В. Шепеленко, В.В. Черкун, В.И. Гуцул // Інноваційні технології в агропромисловому комплексі: матеріали I Всеукраїн. наук.-практ. Інтернет-конференції (01 – 30 вересня 2020 р.), м.Мелітополь, ТДАТУ, 2020. С.35–38. (запропоновано комбіновану технологію нанесення антифрикційних покриттів).

60. Шепеленко І.В. Дослідження пластичності малопластичних матеріалів/ І.В. Шепеленко, Я.Б. Немировський, М.В. Красота// Сучасні тенденції розвитку машинобудування та транспорту: Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції (11 – 13 листопада 2020 р.), м.Кременчук, КрНУ, 2020. С.56–57. (запропоновано спосіб визначення пластичності малопластичних матеріалів).

61. Шепеленко І.В. Визначення якості металевих покриттів/ І.В. Шепеленко, О.М. Дреєв, Р.Ф. Будар Мохамед// Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Молодь і технічний прогрес в АПК». Інноваційні розробки в аграрній сфері (07 – 08 травня 2020 р.). Том 2. – Харків: ХНТУСГ, 2020. С.298–299. (запропоновано спосіб визначення властивостей металевих покриттів).

62. Шепеленко І.В. Дослідження мікрорізання в процесі фінішної антифрикційної безабразивної обробки/ І.В. Шепеленко, Ю.О. Цеханов, Я.Б. Немировський та ін.// Прогресивні технології в машинобудуванні – 2020: Збірник наукових праць IX-ої Міжнародної науково-технічної конференції (3 – 7 лютого 2020 р.), Львів - Плай, 2020. С.162–164. (запропоновано методику дослідження мікрорізання в процесі ФАБО)

63. Шепеленко И. Моделирование контактного взаимодействия микронеровностей при ФАБО/ И. Шепеленко, Я. Немировский, Ю. Цеханов// Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019: Збірник тез доповідей I-ї Міжнародної науково-технічної конференції (13 – 15 травня 2019 р.), м.Вінниця, 2019. С.218–219. (встановлено закономірності взаємодії микронеровностей при ФАБО).

64. Шепеленко І.В. Вплив мікрорельєфу поверхні основи на формування плівочного антифрикційного покриття/ І.В. Шепеленко, Я.Б. Немировський, А.М. Артюхов та ін.// Процеси механічної обробки, верстати та інструмент – 2019: Збірник наукових праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю, м.Житомир, 2019. С.206–208. (встановлено вплив вихідної поверхні мікрорельєфу поверхні основи на формування антифрикційного покриття).

65. Шепеленко І.В. Перспективи комбінованих плівочних антифрикційних покриттів деталей машин/ І.В. Шепеленко, О.В. Чернявський, Е.К. Посвятенко// Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 18-й Международной научно-практической конференции (03 – 07 сентября 2018 г.), Одесса – Киев: АТМ Украины, 2018. С.136. (запропоновано комбінована технологія нанесення антифрикційних покриттів).

66. Будар Мохамед Р.Ф. Вплив методів фінішної обробки отворів на параметри якості поверхні/ Р.Ф. Будар Мохамед, І.В. Шепеленко// Молодежь и сельскохозяйственная техника в XXI веке: материалы XII-го международного форума молодежи. Харьков, 2016. С.84. (обґрунтовано доцільність використання ФАБО для фінішної обробки отворів).

67. Будар Мохамед Р.Ф. Методы финишной обработки отверстий/ Р.Ф. Будар Мохамед, І.В. Шепеленко// Збірник тез доповідей викладацьких, аспірантських наукових досліджень за підсумками проведення «Дня науки – 2016». Кіровоград, 2016. С.48–51. (виконано аналіз методів фінішної обробки отворів).

68. Шепеленко І.В. Шляхи підвищення ефективності застосування ФАБО гільз циліндрів/ І.В. Шепеленко, Р.Ф. Будар Мохамед// Прикладні науково-технічні дослідження. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (05 – 07 квітня 2017 р.), м.Івано-Франківськ, 2017. С.124. (доведена ефективність ФАБО гільз циліндрів).

АНОТАЦІЯ

Шепеленко І.В. Наукові основи технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню науково-технічної проблеми, що полягає в створенні наукових основ технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням холодного пластичного деформування задля підвищення якості поверхонь тертя деталей з малопластичних матеріалів. Розроблено експериментальна модель контактної взаємодії одиначної мікронерівності з інструментом при ФАБО, що дозволило встановити основні закономірності процесу та забезпечити ефективне протікання мікрорізання і заповнення мікрозападин антифрикційним матеріалом. Для підвищення якості нанесення антифрикційних покриттів запропоновано використання деформуючого протягування задля покращення адгезійної взаємодії з основним матеріалом, отримання робочої поверхні деталі з поліпшеними фізико-механічними властивостями і шорсткістю, близькою до рівноважної.

На підставі проведених досліджень розроблено нові технологічні процеси нанесення антифрикційних покриттів з використанням ФАБО та деформуючого протягування.

Ключові слова: технологія, антифрикційне покриття, фінішна антифрикційна безабразивна обробка, мікрорізання, деформуюче протягування, пластичність, напружено-деформований стан.

SUMMARY

Shepelenko I.V. Scientific bases of technology of drawing antifriction coating with use of plastic deformation. – On the rights of a manuscript.

Thesis for Doctor's of Technical Sciences degree by specialty 05.02.08 – technology of mechanical engineering. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of a scientific and technical problem consisting in creation of scientific bases of technology of drawing antifriction coverings with use of cold plastic deformation for increase of quality of surfaces of friction of details from low-plastic materials.

An experimental model of contact interaction of a single micro-inequality with a tool at FANT was developed, which allowed to establish the basic laws of the process and to ensure effective micro-cutting and filling of micro-cavities with antifriction material.

To raise the quality of application of antifriction coatings, the use of deforming drawing is proposed to improve the adhesive interaction with the base material, to obtain a working surface of the part with improved physical and mechanical qualities and roughness close to equilibrium.

It is established that SCH20 cast iron can be plastically deformed only at negative values of the stress stiffness index, which allows to formulate the following position: treatment of holes in cast iron products by deforming drawing is possible only in the absence of plastic deformations near the outer surface of the product adjacent to the hole.

A method for obtaining significant plastic deformations of low-plastic cast iron SCH20 has been developed, which consists in the development of a theoretical model of deformation of a prefabricated cast iron tubular sample under its joint compression in combination with other plastic materials.

The method of sedimentation of a cylindrical cast iron sample in the conditions of volumetric compression by the method of finite elements is offered, which allowed to perform the calculation of the stress-strain state of the sample during its compression. A ductility diagram of cast iron is constructed, which contains the area where the deformation is performed at significant negative values of the stress stiffness index.

A study of the mechanics of deforming drawing is performed. It is shown that in the presence of critical contact pressures in the contact zone, zones of local plastic deformation appear. The influence of the tool geometry on the parameters of the stress-strain state, the history of deformation and the service life of the used plasticity are investigated. Technological recommendations for the choice of tool geometry during deforming drawing are offered.

It is shown that the basis for the application of antifriction coatings are adhesive areas of setting, which are formed due to the interaction of the tool with the micro-roughness of the treated surface.

A statistical mathematical model has been developed to determine the influence of technological factors on the quality of antifriction coating. The optimal options for combining technological factors that improve the quality of the coating are identified.

The method of calculation of the stress-strain state in the antifriction coating applied to the working surface of the cylinder liner is substantiated. The calculation of coating stresses in the contact zones of the piston rings is performed. An accelerated test method for wear resistance is proposed, which consists in modelling the real operating conditions of the piston ring in the area of its contact with the surface of the sleeve.

On the basis of the conducted research new technological processes of drawing antifriction coverings with use of FANT and deforming drawing are developed.

Key words: technology, antifriction coating, finishing antifriction non-abrasive treatment, microcutting, deforming drawing, plasticity, stress-strain state.