

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

ГУРЕЙ ВОЛОДИМИР ІГОРОВИЧ

УДК 620.3:621.787:620.178

**НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТА
ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАШИН
ФОРМУВАННЯМ ЗМІЦНЕНИХ НАНОКРИСТАЛІЧНИХ ШАРІВ**

05.02.08 – технологія машинобудування

Галузь знань 13 – механічна інженерія

131 – Прикладна механіка

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Кузьо Ігор Володимирович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри робототехніки та інтегрованих
технологій машинобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кальченко Володимир Віталійович,
Національний університет «Чернігівська політехніка»,
проректор з науково-педагогічної роботи

доктор технічних наук, професор
Оргіян Олександр Андрійович,
Державний університет «Одеська політехніка»,
завідувач кафедри технології машинобудування

доктор технічних наук, доцент
Роп'як Любомир Ярославович,
Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу
професор кафедри комп'ютеризованого машинобудування

Захист відбудеться 21 вересня 2021 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.06 у Національному університеті «Львівська політехніка» за
адресою: 79013, Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного корпусу.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці за адресою:
79013, Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий « » серпня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.06,
кандидат технічних наук, доцент

Шоловій Ю.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку техніки основним завданням машинобудування є забезпечення довговічності, точності і надійності деталей машин. Довговічність, головним чином, визначається зносостійкістю поверхневих шарів деталей машин. Одним із основних методів підвищення експлуатаційних характеристик поверхневого шару є створення в них нанокристалічних структур. Нанокристалічні структури містять структурні елементи, геометричні розміри яких хоч в одному вимірі не перевищують 100 нм, та володіють якісно новими експлуатаційними і функціональними характеристиками. Зростання міцності і твердості відбувається із зменшенням розміру зерен, оскільки воно обумовлене введенням додаткових границь зерен, які є перешкодою для руху дислокацій.

Формування поверхневих шарів з нанокристалічною структурою на масивних деталях можливе здійснювати нанесенням покриттів із наноматеріалів, застосуванням технологічних методів з використанням висококонцентрованих джерел енергії (лазерна, плазмова, іонно-променева обробки тощо). Альтернативним методом створення нанокристалічного шару є подрібнення зерен у поверхневому шарі деталей до нанометричного розміру інтенсивною пластичною деформацією. Поєднання методів оброблення поверхневих шарів масивних деталей з використанням висококонцентрованих джерел енергії і інтенсивного пластичного деформування дозволить інтенсифікувати формування зміцнених шарів з нанокристалічною структурою.

Технологічний процес фрикційного оброблення належить до методів механічного зміцнення з використанням висококонцентрованих джерел енергії. На відносно малі об'єми металу діють з великими швидкостями концентровані потоки енергії високої інтенсивності з наступним їх швидкісним охолодженням. Для інтенсифікації процесу формування зміцненого шару застосовується поєднання двох методів – дії висококонцентрованого потоку енергії і інтенсивного деформування зони контакту інструмент-деталь.

Під час фрикційного оброблення інструментом з перервною робочою поверхнею немає чітко встановлених взаємозв'язків між параметрами якості шару, механізмами його формування, формою робочої поверхні інструмента, які забезпечують необхідні умови формування нанокристалічних зміцнених поверхневих шарів і їх вплив на довговічність деталей машин. Дослідити динамічні параметри пружної системи верстата під час оброблення робочих поверхонь деталей інструментом з перервною робочою поверхнею інструмента.

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

Дисертаційна робота виконана відповідно до Постанови КМУ №942–2011–п «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2021 року» й наукового напрямку кафедри робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» «Високоєфективні технологічні процеси в машинобудуванні», а також на основі держбюджетної науково-дослідної теми. Дисертаційна робота виконана на кафедрі робототехніки та інтегрованих технологій машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» у рамках завдання

фундаментальної держбюджетної НДР МОН України «Розроблення та дослідження прогресивних технологічних методів поверхневого зміцнення деталей машин» (ДР № 0119U101123, 03.2019 р. – 12.2022 р.) та роботи за міжнародною НДКР (договір № NA/16/2015/0500, 12.2014 р. – 02.2015 р.), а також договору на створення науково-технічної продукції № 646 «Поверхнєве зміцнення робочих поверхонь струмозміначів» Національний університет «Львівська політехніка» (05.2021 р. – 06.2021 р.), де здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розроблення науково-технологічних основ фрикційного зміцнення робочих поверхонь деталей машин задля підвищення експлуатаційної надійності керуванням параметрами якості оброблених поверхонь та поверхневого нанокристалічного шару.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- провести аналіз методів формування нанокристалічних зміцнених поверхневих шарів на масивних деталях і їх вплив на довговічність деталей машин під час експлуатації;
- визначити термонапружений стан у поверхневому шарі зони контакту інструмент-деталь під час фрикційного оброблення деталей машин інструментом з перервною робочою частиною;
- розробити математичні та імітаційні моделі динамічних процесів під час фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей, побудувати амплітудно-частотні характеристики процесу зміцнення;
- дослідити вплив форми робочих поверхонь інструментів під час фрикційного оброблення на структурний і фазовий склади зміцнених шарів;
- встановити вплив параметрів процесу фрикційного оброблення та легування на формування показників якості оброблених поверхонь та зміцнених нанокристалічних шарів;
- дослідити вплив зміцнених нанокристалічних поверхневих шарів на довговічність деталей машин;
- розробити практичні рекомендації по зміцненню робочих поверхонь деталей машин.

Об'єкт дослідження – технологічний процес фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин інструментами з перервною робочою частиною.

Предмет дослідження – умови формування параметрів якості зміцнених поверхонь та поверхневих нанокристалічних шарів під час фрикційного оброблення деталей машин інструментами з перервною робочою частиною.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень покладені наукові підходи і принципи фундаментальних положень технології машинобудування, термопружності і теорії коливань, методи математичного планування експериментів та математичної статистики. Результати експериментальних досліджень одержано за допомогою стандартного і спеціального обладнання й оснащення з використанням комп'ютерних засобів та програм. Обробка отриманих результатів проводилась за допомогою оригінального та прикладного програмного забезпечення і програмних пакетів *Mathcad, MATLAB, Mathematica, MS Excel, Origin, Digital Surf Mountains Lab*.

Обґрунтованість встановлених закономірностей підтверджується проведенням низки комплексних експериментів, теоретичними положеннями, математичних методів планування експерименту, використанням нових методик, відповідності результатів лабораторних і виробничих досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше розроблено технологічний метод поверхневого фрикційного оброблення плоских і циліндричних поверхонь деталей машин у яких формується зміцнений шар з нанокристалічною структурою при поєднанні дії висококонцентрованого джерела енергії і інтенсивного пластичного деформування зони контакту інструмент-деталь.

2. Вперше розроблено математичну і динамічну моделі фрикційного оброблення циліндричних поверхонь інструментом з перервною робочою поверхнею для визначення динамічних характеристик процесу оброблення.

3. Розвинуто математичну і імітаційну моделі динамічних процесів фрикційного оброблення плоских поверхонь, які розглядають пружну систему верстата як тримасову.

4. Удосконалено математичну модель параметрів термопружності при формуванні зміцнених шарів під час фрикційного оброблення інструментом з перервною робочою поверхнею, яка базується на твердженні про скінчену швидкість теплового потоку.

5. Розроблено технологію поверхневого легування зміцнених шарів з використанням інструментів з перервною робочою поверхнею інструмента і внутрішньою подачею технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь.

6. Встановлено закономірності впливу параметрів оброблення та форми робочої поверхні інструментів на формування параметрів якості обробленої поверхні і характеристик зміцненого нанокристалічного шару та точності оброблених поверхонь.

7. Експериментально обґрунтовано вплив параметрів оброблення та інструмента з перервною робочою поверхнею під час фрикційного оброблення на експлуатаційні властивості зміцнених шарів з нанокристалічною структурою.

Практичне значення одержаних результатів для машинобудівної галузі.

На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень, дослідно-промислових випробувань розроблено і впроваджено технологічні процеси формування зміцнених поверхневих шарів з нанокристалічною структурою на масивних деталях. Розроблені технологічні процеси для зміцнення циліндричних поверхонь напрямних штампів прес-форм показали підвищення міжремонтного ресурсу роботи прес-форм у 1,4-1,6 разів у порівнянні з заводською технологією. Зміцнення робочих поверхонь кілець струмозміначів для роторних вентиляторів сушил цегельних заводів, які працюють в умовах підвищених температур (90-130°C) показали підвищення довговічності обладнання у 1,3-1,5 разів. Зміцнення плоских поверхонь напрямних спеціального обладнання для штампа обрубки смуги решіткового настилу показали підвищення довговічності у 1,4-1,6 разів. Зміцнення роликів накатних головок для формування профілю дроту решіткового настилу показали підвищення довговічності обладнання у 1,5-1,7 разів. Розроблено технологічний процес та обладнання для зміцнення робочих поверхонь рухомих ножів соломоподрібнювача зернозбирального

комбайна «CLAAS», які показали підвищення ресурсу роботи барабанів у 1,2-1,3 рази. У розробленому технологічному процесі виготовлення ножів відмінено об'ємну термічну обробку ножів і замінено тільки на їх поверхнєве зміцнення робочих поверхонь. Розроблені технологічні процеси фрикційної обробки та необхідне обладнання може застосовуватися для зміцнення робочих поверхонь напрямних технологічного обладнання, ножів для різання паперу для обладнання целюлозо-паперової промисловості.

Результати роботи впроваджено на ТзОВ «Удеч-Техніка» (м. Львів), ТзОВ «Завод Електронпобутприлад» (м. Львів), ТзОВ «САЮЗ» (м. Тернопіль), ФГ «СЕРЖ» (с. Дибще, Тернопільська обл.), ПАП«АГРОІНВЕСТ» (сmt. Козова, Тернопільська обл.).

Технічну новизну розробок захищено 1 патентом на винахід та 2 патентами на корисну модель.

Основні результати дисертаційної роботи можуть використовуватись у навчальному процесі НУ «Львівська політехніка» при проведенні лекційних і практичних занять з навчальних курсів «Математичне програмування» і «Технологічне обладнання та процеси виготовлення машин», а також у навчальному процесі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу під час проведення занять з дисциплін «Основи наукових досліджень» і «Технології зміцнення та відновлення деталей і конструкцій».

Апробація результатів досліджень.

Отримані результати роботи представлялись на наступних наукових конференціях та симпозиумах: Всеукраїнська науково-технічна конференція «Прогресивні технології в машинобудуванні» (Україна, Львів) 2014, 2016 рр.; International scientific conference “Cluster-Casting-Future”, (Rzeszow Poland, 2014); The 8th International techno-scientific conference on Surface Layer – SL’14 (Gorzow-Warsaw, Poland, 25-26 November 2014 r.); XXII Міжнародний науково-технічний семінар «Високі технології у машинобудуванні», ІНТЕРПАРТНЕР – 2014, (Україна, Харків-Одеса, 22-27 вересня 2014 р.); V Міжнародний молодіжний науковий форум (Львів, Україна, 26-28 листопада 2015 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології в машинобудуванні» (Україна, Львів) 2017, 2018 рр.; Всеукраїнська науково-технічна конференція «Обладнання і технології сучасного машинобудування», (Тернопіль, Україна 2017 р.); International youth science forum “Litteris Et Artibus”, (Lviv, Ukraine, 23-25 November 2017 r.); XVIII Міжнародна науково-практичної конференція «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», (Краматорськ, Україна 2018 р.); Міжнародної науково-технічної конференція «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (Львів, Україна 25-26 жовтня 2018 р.); V Ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna «Problematyka funkcjonowania i rozwoju branży metalowej w Polsce. Innowacje technologiczne : streszczenia wystapien», (Jedlina, Polska 5-6 lipca 2018 r.); The 2nd international conference on design, simulation, manufacturing: The innovation exchange, DSMIE-2019 (Lutsk, Ukraine, June 11-14, 2019 r.); Grabchenko's international conference on advanced manufacturing processes (InterPartner-2019) (Odessa, Ukraine September 10-13, 2019 r.); The 3rd International conference on design, simulation, manufacturing: The innovation exchange, DSMIE-2020 (Kharkiv, Ukraine June 9-12, 2020 r.); II Міжнародна

науково-технічна конференція “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту (Вінниця, Україна, 13-15 травня 2021 р.); Семінарах у Кінгстонському університеті. Лондон (Великобританія, 2018, 2020 рр.).

Публікації. Основні результати роботи опубліковано у 41 друкованій праці, серед яких – 5 наукових статей, що входять у наукометричну базу Scopus, 4 наукові статті у іноземних виданнях, 1 – праця в колективній іноземній монографії, 13 – наукових статей у виданнях України (з них 6 одноосібних), 2 патенти на корисну модель, 1 патент на винахід та 15 тез конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота, складається зі вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 357 назв, містить 199 рисунків, 10 таблиць, а також додатків на 40 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації – 347 сторінки. Загальний обсяг дисертації складає 458 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету, об’єкт, предмет, методи та задачі дослідження. Аргументовано наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів. Наведено інформацію про структуру та обсяг роботи і результати апробації дисертації.

У першому розділі проведено аналіз технологічних методів і способів формування поверхневих шарів з мікро- та нанокристалічною структурою, параметрів якості оброблювальних поверхонь деталей машин. Проаналізовано фізико-хімічні й механічні умови формування нанокристалічних шарів з необхідною структурою і властивостями та вплив на їх формування термопружного стану і динамічних навантажень. Розглянуто взаємозв’язки між несучою здатністю і станом поверхні, а також вплив якості поверхневого шару на довговічність.

Експлуатаційні властивості деталей машин залежать від стану робочих поверхонь і їх поверхневого шару, які, у свою чергу, характеризуються стереометричними (відхилення від заданого профілю, хвилястість, шорсткість, несуча здатність) й фізико-механічними, хімічними властивостями і структурними параметрами (макро- і мікротвердість, залишкові напруження, структура, фрагментація, хімічний та фазовий склад, дефекти тощо). Інженерія поверхні (напрямо у технології машинобудування, який досліджує стан поверхонь та поверхневих шарів) полягає у розробленні науково-обґрунтованих рекомендацій отримання заданих параметрів оброблених робочих поверхонь й поверхневих шарів з відповідними параметрами якості і фізико-механічними властивостями, які будуть забезпечувати відповідні експлуатаційні характеристики деталей.

Зміцнення всього перерізу металу деталі вже не дає можливості підвищення їх експлуатаційних властивостей. Необхідні нові підходи до вирішення зазначеної проблеми, які полягають у зміні та керуванні параметрами і властивостями поверхневих шарів. Інженерія поверхні полягає у створенні і розробленні нових технологічних процесів: методами нанесення різного роду захисних покриттів; зміні параметрів поверхневих шарів металу методами їх модифікування, які радикально змінюють їх структуру й відповідно властивості; комбіновані методи, які поєднують різні методи

одночасно.

Нанесення класичних захисних покриттів та поверхнєве легування і насичення хімічними елементами не дозволяє отримувати якісно нові матеріали. Модифікуванням поверхнєвого шару можна досягнути значної зміни структури та властивостей металу поверхнєвого шару, які суттєво відрізняються від основного металу деталі, значно покращують експлуатаційні властивості виробів і не мають границі розмежування між зміцненим поверхнєвим шаром і основним металом.

Великий внесок у вивчення питань формування параметрів поверхнєвого шару оброблюваної деталі, які будуть забезпечувати вимоги поставлені до якості поверхні і експлуатаційні властивості деталей машин з використанням різних методів поверхнєвого зміцнення зробили такі вчені як Н.А. Азаренков, П.Г. Алексєєв, Б.М. Аскіназі, Ю.І. Бабей, Б.С. Балакшин, Р.З. Валиєв, В.М. Голубець, А.І. Гусєв, І.В. Гурей, Б.Д. Грозін, В.Д. Євдокимов, В.В. Кальченко, Г.В. Карпенко, В.І. Кирилів, В.С. Коваленко, Б.І. Костецький, В.С. Корсаков, А.А. Маталін, Ю.В. Петраков, В.Н. Подураєв, С.Н. Полевой, В.І. Похмурський, Е.В. Рижов, Л.Я. Роп'як, Е.О. Сатель, А.Г. Суслєв, О.П. Соколовський, А.В. Якимов, К.А. Ющенко та інші.

На даний час для покращання експлуатаційних властивостей деталей почали інтенсивно використовувати матеріали з нанокристалічною структурою, які забезпечують формування кардинально інші механічні, хімічні, електрофізичні, оптичні, теплофізичні властивості тощо.

Поверхнєві шари металів з нанокристалічною структурою формуються завдяки руйнуванню основної структури на більш дрібні елементи за рахунок механічного подрібнення інтенсивним пластичним деформуванням; дією висококонцентрованих джерел енергії. Механічний вплив на метал під час подрібнення здійснюється імпульсно і локально. Виникнення поля напружень проходить у момент контакту і у короткий час після нього. Формування наноструктур під час інтенсивної пластичної деформації характеризується виникненням комірчастої структури з малими кутами розорієнтування і утворенням великої кількості дислокацій. Зміна структури пов'язана з трансформацією дислокаційної комірчастої структури в нанорозмірну з великокутовими межами зерен. Наноструктурні матеріали внаслідок дуже малого розміру структурних елементів містять велику кількість границь, які відіграють визначальну роль у формуванні їх незвичайних фізичних і механічних властивостей. Міцність нанокристалічних матеріалів суттєво перевищує міцність великокристалічних аналогів і при цьому маємо інше співвідношення між міцністю і пластичністю.

Розроблення нових технологічних процесів модифікації оброблюваних поверхонь з метою отримання наноструктурних поверхнєвих шарів з особливими експлуатаційними властивостями вимагає встановлення їх фізичної природи й взаємозв'язків механічних і фізико-хімічних перетворень у поверхнєвих шарах металу. Нові методи досліджень наноструктурних поверхнєвих шарів, отриманих на робочих поверхнях деталей і нові методи трактування процесів, які відбуваються під час їх формування, дозволяють розробити нові технологічні методи їх отримання.

Сформульовано мету і основні наукові задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі подано методологію теоретичних та експериментальних досліджень, які виконуються у дисертаційній роботі. Представлено технологічний

метод фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин, який виконується на модернізованому верстатному обладнанні. За кінематикою процес фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей подібний до процесу шліфування. Як інструмент використовували металеві диски, виготовлені зі сталі 45, 12X18H10T тощо.

Технологічна операція фрикційного оброблення відноситься до методів поверхневого зміцнення висококонцентрованими потоками енергії. Такий потік енергії утворюється у зоні контакту під час високошвидкісного (60-90 м/с) тертя металевого інструмента-диска по оброблюваній поверхні деталі. Сила притискання інструмента до деталі становила 600-1200 Н. Залежно від оброблюваного матеріалу та необхідних властивостей, які необхідно сформувати у поверхневому шарі, габаритів деталі, а також продуктивності виконання операції зміцнення використовуємо інструменти з різною геометрією робочих поверхонь на їх периферії. Поверхневі шари металу нагріваються до температур вище точки фазових перетворень (A_{c3}). Після переміщення джерела теплоти нагрітий поверхневий шар охолоджується з великою швидкістю за рахунок відведення теплоти у глибину металу деталі. У зоні контакту відбувається одночасне швидкісне зсувне деформування оброблюваної поверхні. За рахунок високошвидкісного нагрівання і охолодження та інтенсивного зсувного деформування у поверхневому шарі деталей формуються зміцнений білий шар з нанокристалічною структурою.

Під час технологічної операції фрикційного оброблення у зону оброблення подається технологічне середовище використовуючи систему подачі мастильно-охолоджуючої рідини верстата. Як технологічне середовище використовували: мінеральну оливу, а також мінеральну оливу з полімервмісними добавками.

Для виконання технологічної операції фрикційного оброблення використовували чотири конструкції інструментів, які відрізняються між собою за формою робочої поверхні: з поперечними пазами (патент на корисну модель № 75804); з різнонаправленими пазами (патент на корисну модель № 134389); з хвилеподібною робочою поверхнею (патент на корисну модель № 146839); а також з гладкою робочою поверхнею (прототип для усіх інструментів). Інструменти виготовлено збірними для можливості змінювати лише кільця з різною конструкцією робочої поверхні на периферії. Ширина робочої поверхні інструмента на периферії становила 6-8 мм, а ширина пазів – 6-12 мм (рис. 1).

При високошвидкісному обертанні інструмента навколо нього формується повітряна оболонка, яка обмежує потрапляння технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь. Розроблено конструкцію збірного інструмента для подачі технологічного середовища через радіальні канали, які виходять у пази на периферії інструмента, безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь (патент на винахід № 123883). Даний інструмент використовується для мікролегування поверхневих шарів деталей машин. Запропонована конструкція інструмента використовується з усіма формами робочої поверхні.

Розроблено спеціальний динамометр з нерухомими центрами для визначення складової P_y і P_z сили дії у зоні контакту інструмента з деталлю під час оброблення циліндричних поверхонь деталей. Представлено методики визначення складових

сили дії у зоні оброблення плоских і циліндричних поверхонь.

Запропонована методика визначення балансу жорсткості і коефіцієнтів заганяння коливань пружної системи токарного та плоскошліфувального верстатів.

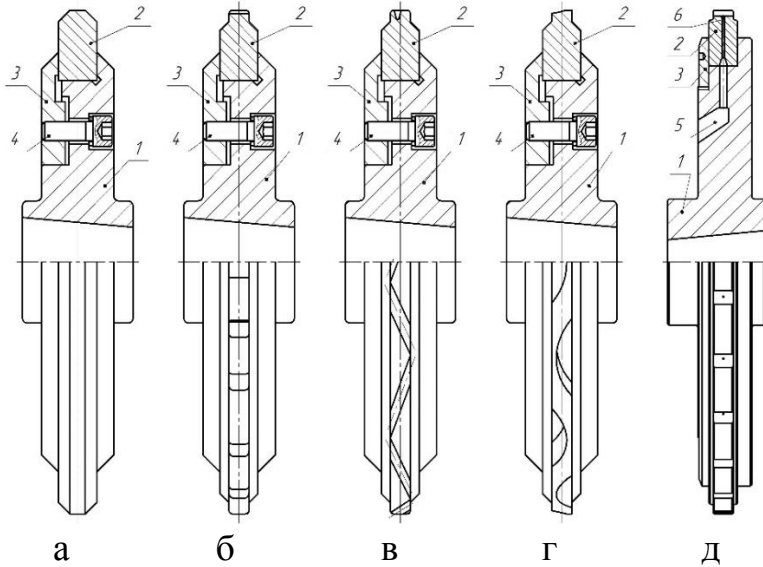


Рисунок 1 – Інструменти для фрикційного оброблення з різною формою робочої поверхні: а) гладка; б) поперечні пазами; в) різнонаправлені пази; г – хвилеподібна; д) диск з внутрішньою подачею технологічного середовища: 1 – корпус, 2 – диск (з різною формою периферії); 3 – притискне кільце; 4 – болт; 5 – кільцева канавка для середовища; 6 – радіальний отвір

руйнуванню під час контактного навантаження, яке здійснювали на спеціальній трироликовій установці.

Для побудови математичних моделей взаємозв'язку параметрів фрикційного оброблення з товщиною зміцненого шару, складових сили взаємодії у зоні контакту інструмент-деталь використовували математичне планування експериментів.

Представлена діаграма причинно-наслідкових зв'язків між факторами фрикційного оброблення на основі діаграм Ісікава.

У третьому розділі представлена удосконалена математична модель термопружного стану оброблювального зразка під час технологічної операції фрикційного оброблення використовуючи інструмент, який формує перервний тепловий потік.

Під час фрикційного оброблення за рахунок високошвидкісного тертя інструмента по оброблюваній поверхні деталі виникають високі температури у зоні їх контакту, які є вищими за точки фазових переходів. Зона у якій відбуваються термомеханічні процеси можна розділити на три ділянки: перша – зона підвищеної температури перед джерелом теплової енергії; друга – зона дії інтенсивного потоку теплової енергії; третя – зона інтенсивного охолодження, яке проходить після припинення дії потоку теплової енергії (рис. 2).

Розроблена математична модель термопружного стану в поверхневих шарах металу під зоною контакту інструмент-деталь на основі модифікованої теорії

Для визначення розподілу температури за глибиною під час фрикційного оброблення плоских поверхонь деталей розроблено збірний зразок на одній частині якого виконано поздовжню канавку під кутом 1° до оброблюваної поверхні, у яку запаяні термопари, а також подана методика вимірювання температури.

Приведено опис експериментальних досліджень зносотривкості на універсальних машинах тертя типу УМТ-1 за схемою «кільце-кільце» та типу СМТ-1 за схемою «кільце-вкладка» під час тертя без мащення, з граничним мащенням та у оливо-абразивному середовищі. Представлено методику дослідження опору втомному

термопружності. Основним недоліком класичної теорії термопружності є припущення про нескінченну швидкість поширення тепла в матеріалах. Для його подолання

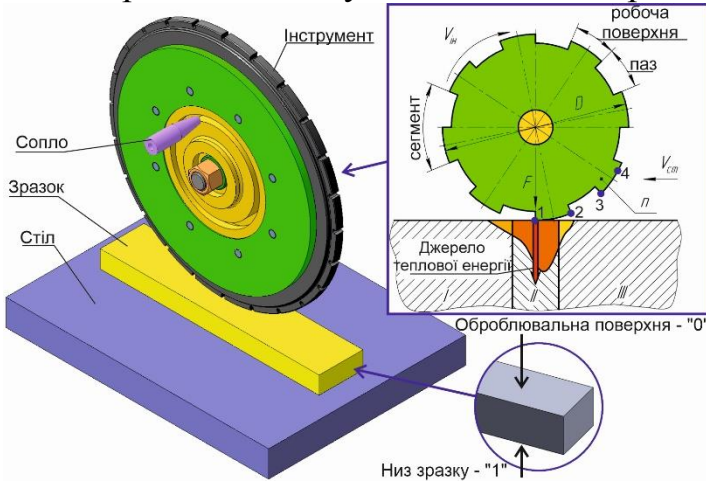


Рисунок 2 – Схема фрикційного оброблення

Грін та Ліндсей запропонували модифіковану теорію термопружності (GL-теорія), де рівняння теплопровідності стало гіперболічним. Швидкість поширення тепла у матеріалах приймається скінченою на основі якої побудована математична модель термопружності.

Обмежена зв'язана область Ω представлена точками $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_d) \in \mathbb{R}^d$ з неперервною границею Ліпшица $\partial\Omega = \Gamma$ і $\mathbf{n} = \{n_i\}_{i=1}^d$ є одиницею зовнішнього вектору нормалі $n_i = \cos(n, x_i)$.

Розглядаємо інтервал часу $[0, T]$, $0 < T < +\infty$. Метою є знайти вектор пружних переміщень $\mathbf{u} = \{u_i(\mathbf{x}, t)\}_{i=1}^d$ та збурення температури $\theta = \theta(\mathbf{x}, t)$, які задовольняють наступним рівнянням $\Omega \times (0, T]$:

$$\rho(u_i'' - f_i) - \sigma_{ji,j} = 0, \quad (1)$$

$$\rho(T_0 S' - w) + q_{i,i} = 0. \quad (2)$$

Наведені вище вирази (1) та (2) є рівняннями руху та теплопровідності, σ_{ij} є тензором напружень, який визначається наступним рівнянням:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} [\varepsilon_{km}(\mathbf{u}) - \alpha_{km}(\theta + t_1 \theta')] + a_{ijkl} \varepsilon_{km}(\mathbf{u}'), \quad (3)$$

Густина ентропії S визначається як:

$$\rho S = \rho c_v T_0^{-1} (\theta + t_0 \theta') + c_{ijkl} \alpha_{km} \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}). \quad (4)$$

У рівняннях (3) та (4), параметри $t_1 \geq t_0 > 0$ мають часову розмірність і були введені Гріном та Ліндсей для усунення ефекту нескінченної швидкості розповсюдження тепла від класичної задачі теплопровідності. Ці параметри також відомі як так звані "часи релаксації", і їх значення завжди приймаються менше 10^{-10} с. Встановлюємо $t_1 = t_0 = 0$, як у класичній моделі термопружності.

Вектор q_i визначається за класичним законом Фур'є:

$$q_i = -\lambda_{ij} \theta_{,j}. \quad (5)$$

Тензор деформацій ε_{km} , приймається таким, щоб задовільнити співвідношення:

$$\varepsilon_{km}(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} (u_{k,m} + u_{m,k}), \quad (6)$$

де кома в нижньому індексі позначає часткову похідну від просторової змінної, тобто $g_{,k} = \partial g / \partial x_k$. Позначимо: ρ – густина маси в'язкопружного матеріалу, c_v є його питомою теплоємністю і T_0 є фіксованою рівномірною опорною температурою зразка, f_i є вектором об'ємних сил і представляє об'ємне джерело тепла. Тензори a_{ijkl} та c_{ijkl} описують властивості в'язкості та пружності матеріалу із загальними властивостями

симетрії та еліптичності. Тензори λ_{ij} , α_{km} визначають симетричну і еліптичну тепло-провідність та теплові розширення відповідно.

Систему рівнянь (1) – (6) необхідно доповнити граничними умовами:

$$\begin{cases} u_i = 0 \text{ на } \Gamma_u \times [0, T], \Gamma_u \subset \Gamma, \text{mes}(\Gamma_u) > 0, \\ \sigma_{ij} n_j = \bar{\sigma}_i \text{ на } \Gamma_\sigma \times [0, T], \Gamma_\sigma = \Gamma \setminus \Gamma_u, \\ \theta = 0 \text{ на } \Gamma_\theta \times [0, T], \Gamma_\theta \subset \Gamma, \text{mes}(\Gamma_\theta) > 0, \\ q_i n_i = \bar{h} \text{ на } \Gamma_q \times [0, T], \Gamma_q = \Gamma \setminus \Gamma_\theta, \end{cases} \quad (7)$$

і початковими умовами:

$$\mathbf{u}|_{t=0} = \mathbf{u}_0, \mathbf{u}'|_{t=0} = \mathbf{v}_0, \theta|_{t=0} = \theta_0, \mathbf{q}|_{t=0} = \mathbf{q}_0 \text{ в } \Omega. \quad (8)$$

Тут $\bar{\sigma} = \{\bar{\sigma}_i(\mathbf{x}, t)\}_{i=0}^d$ і $\bar{h} = \bar{h}(\mathbf{x}, t)$ представлено векторами поверхневого навантаження і теплового потоку відповідно.

Для постановки варіаційної задачі введемо простори допустимих пружних переміщень та приростів температури (відносно початкової температури T_0) відповідно:

$$\mathbf{V} = \{\mathbf{v} \in [H^1(\Omega)]^d : \mathbf{v} = 0 \text{ на } \Gamma_u\}, Z = \{\zeta \in H^1(\Omega) : \zeta = 0 \text{ на } \Gamma_\theta\}. \quad (9)$$

Символ $H^m(\Omega)$ означає стандартний простір Соболева. Позначаємо $\Phi := \mathbf{V} \times Z$ подвійний простір $\Phi' := \mathbf{V}' \times Z'$ і $\mathbf{H} = [L^2(\Omega)]^d$. Тоді початкову крайову задачу термопружності Гріна-Ліндсі (1) – (8) переписується у наступному вигляді:

задано $\Psi_0 = (\mathbf{u}_0, \theta_0) \in \Phi$, $\mathbf{v}_0 \in \mathbf{H}$, $\theta_{10} \in L^2(\Omega)$ та $(l, \mu) \in L^2(0, T; \Phi')$;

знайти пару $\Psi = \{\mathbf{u}, \theta\} \in L^2(0, T; \Phi)$ таку, що (10)

$$m(\mathbf{u}''(t), \mathbf{v}) + a(\mathbf{u}'(t), \mathbf{v}) + c(\mathbf{u}(t), \mathbf{v}) - \gamma(\theta(t) + t_1 \theta'(t), \eta) = \langle l(t), \mathbf{v} \rangle,$$

$$s(\theta'(t) + t_0 \theta''(t), \eta) + k(\theta(t), \eta) + \gamma(\eta, \mathbf{u}'(t)) = \langle \mu(t), \eta \rangle \quad \forall t \in (0, T],$$

$$m(\mathbf{u}'(0) - \mathbf{v}_0, \mathbf{v}) = 0, \quad c(\mathbf{u}(0) - \mathbf{u}_0, \mathbf{v}) = 0 \quad \forall \mathbf{v} \in \mathbf{V},$$

$$s(\theta(0) - \theta_0, \eta) = 0, \quad s(\theta'(0) - \theta_{10}, \eta) = 0 \quad \forall \eta \in Z.$$

Введені дволінійні та лінійні форми є такими:

$$m(\mathbf{u}, \mathbf{v}) := \int_{\Omega} \rho u_i v_i dx = \int_{\Omega} \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{v} dx, \quad a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) := \int_{\Omega} a_{ijkl} \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{kl}(\mathbf{v}) dx,$$

$$c(\mathbf{u}, \mathbf{v}) := \int_{\Omega} c_{ijkl} \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \varepsilon_{kl}(\mathbf{v}) dx, \quad \langle l, \mathbf{v} \rangle := \int_{\Omega} \rho f_i v_i dx + \int_{\Gamma_\sigma} \bar{\sigma}_i v_i d\gamma,$$

$$\gamma(\eta, \mathbf{v}) := \int_{\Omega} \eta c_{ijkl} \alpha_{km} \varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) dx \quad \forall \mathbf{u}, \mathbf{v} \in V, \quad (11)$$

$$s(\theta, \eta) = \int_{\Omega} \rho c_v T_0^{-1} \theta \eta dx, \quad k(\theta, \eta) = \int_{\Omega} T_0^{-1} \lambda_{ij} \theta_{,i} \eta_{,j} dx,$$

$$\langle \mu, \eta \rangle := \int_{\Omega} T_0^{-1} \rho w \eta dx - \int_{\Gamma_h} T_0^{-1} \bar{h} \eta d\gamma \quad \forall \eta, \theta \in Z.$$

Математичне моделювання процесів термопружності, які протікають у поверхневих шарах деталей, проводили під час технологічної операції фрикційного

оброблення зразків, виготовлених зі сталі 45, інструментом, виготовленим з нержавіючої сталі 12X18H10T з поперечними пазами на його периферії. У процесі контакту гладкої поверхні інструмента з оброблюваною поверхнею деталі у зоні їх контакту формується концентроване джерело теплової енергії, а також зсувне деформування від тертя робочої поверхні інструмента, яке проходить у напрямку обертання інструмента. Лінійна швидкість на периферії інструмента під час його обертання складає 60-90 м/с. Швидкість переміщення оброблюваної поверхні відносно інструмента (переміщення джерела теплової енергії) є в межах 0,03-0,12 м/с, що набагато менша за швидкість тертя у зоні контакту інструмент-деталь. Інструмент притискається до оброблюваної поверхні зі силою, яка рівна 600-1200 Н.

Для підвищення інтенсивності деформування поверхневого шару металу у зоні контакту використовується інструмент з перервною робочою частиною. На робочій поверхні інструмента утворені поперечні пази. Кількість пазів вибирається кратною чотирьом. При малій ширині пазів (біля 3 мм), співрозмірних з шириною зони контакту проходить лише розривання дії теплового потоку, динамічні навантаження є невеликими, а час переривання дії теплового потоку є малим. У момент входження у контакт чергової гладкої частини інструмента проходить ударне навантаження зони контакту з наступним її зсувним деформуванням. Дія теплового потоку відновлюється з великою інтенсивністю. При збільшенні ширини пазів, окрім збільшення часу переривання дії теплового потоку проходить також інтенсивне динамічне навантаження зони контакту інструмент-деталь. Ширину пазу на робочій поверхні інструментів (зовнішній діаметр складав 240 мм) вибирали 6 мм, 9 мм та 12 мм. На робочій частині інструмента були виготовлено 16, 24 та 32 пази.

Розглянемо процеси, які відбуваються у поверхневих шарах під час фрикційного оброблення плоских поверхонь інструментом з поперечними пазами на робочій поверхні. Під час входження у контакт першої гладкої поверхні (точка 1, рис. 1) робочої поверхні інструмента з оброблюваною поверхнею деталі починає діяти джерело теплової енергії. Результати моделювання показали, що у перші моменти тертя інструмента по оброблюваній поверхні, коли формується тепловий потік концентрованої енергії питома густина теплового потоку становить $1,3 \cdot 10^6$ Дж/(с·м²). З глибиною зразка величина густини теплового потоку різко зменшується.

Під дією концентрованого потоку теплової енергії, який формується під зоною контакту інструмента з оброблюваною поверхнею локальний об'єм поверхневого шару починає інтенсивно нагріватися. Швидкість нагрівання у початкові моменти часу складає до $2 \cdot 10^6$ К/с (рис. 3а). З глибиною швидкість нагрівання поверхневого шару різко зменшується. Так, у початковий момент тертя інструмента по оброблюваній поверхні на глибині біля 50 мкм густина теплового потоку і, відповідно, швидкість нагрівання зменшились приблизно у два рази від значень, які є на оброблюваній поверхні.

Під час закінчення тертя першої гладкої поверхні робочої поверхні (точка 2, рис. 2) інструмента зона контакту нагрівається до температури приблизно 240 °С (рис. 3б). З глибиною шару температура різко знижується до температури навколишнього середовища. У даному випадку зменшується також і швидкість нагрівання шару. У процесі тертя поверхневий шар металу нагрівається, його температура

збільшується інтенсивно, а швидкість нагрівання зменшується. Так, у момент завершення дії джерела теплового потоку, тобто коли завершується процес тертя гладкої поверхні інструмента швидкість нагрівання зменшилась до величини приблизно $3 \cdot 10^5$ K/c (рис. 3в). Напруження у шарі металу біля поверхні також збільшуються і дорівнюють 1 ГПа, з глибиною напруження різко зменшуються (рис. 3г).

Під час проходження пазу (точки 2-3, рис. 1) над зоною контакту проходить розрив контакту інструмента з оброблюваною поверхнею і припиняється дія джерела теплової енергії. Тепловий потік продовжує переміщатися у глибину металу зразка за рахунок інерційної дії. Поверхневий шар металу починає швидко охолоджуватись, швидкість охолодження на поверхні складає біля $1,7 \cdot 10^6$ K/c, а з глибиною швидкість охолодження різко зменшується. Під час проходження пазу над зоною контакту інструмент-деталь оброблювана поверхня починає інтенсивно охолоджуватися за рахунок відведення теплоти у глибину металу, так як дія теплового потоку припинена. Перед входженням у черговий контакт гладкої поверхні (точка 3, рис. 2) оброблювана поверхня охолодилася до температури біля 180 °C, (охолодилася на 80 °C). Час проходження пазу над зоною контакту залежить від його ширини та лінійної швидкості на периферії інструмента. При ширині пазу 9 мм і лінійній швидкості на периферії інструмента 60 м/с час проходження пазу становив $1,5 \cdot 10^{-4}$ с.

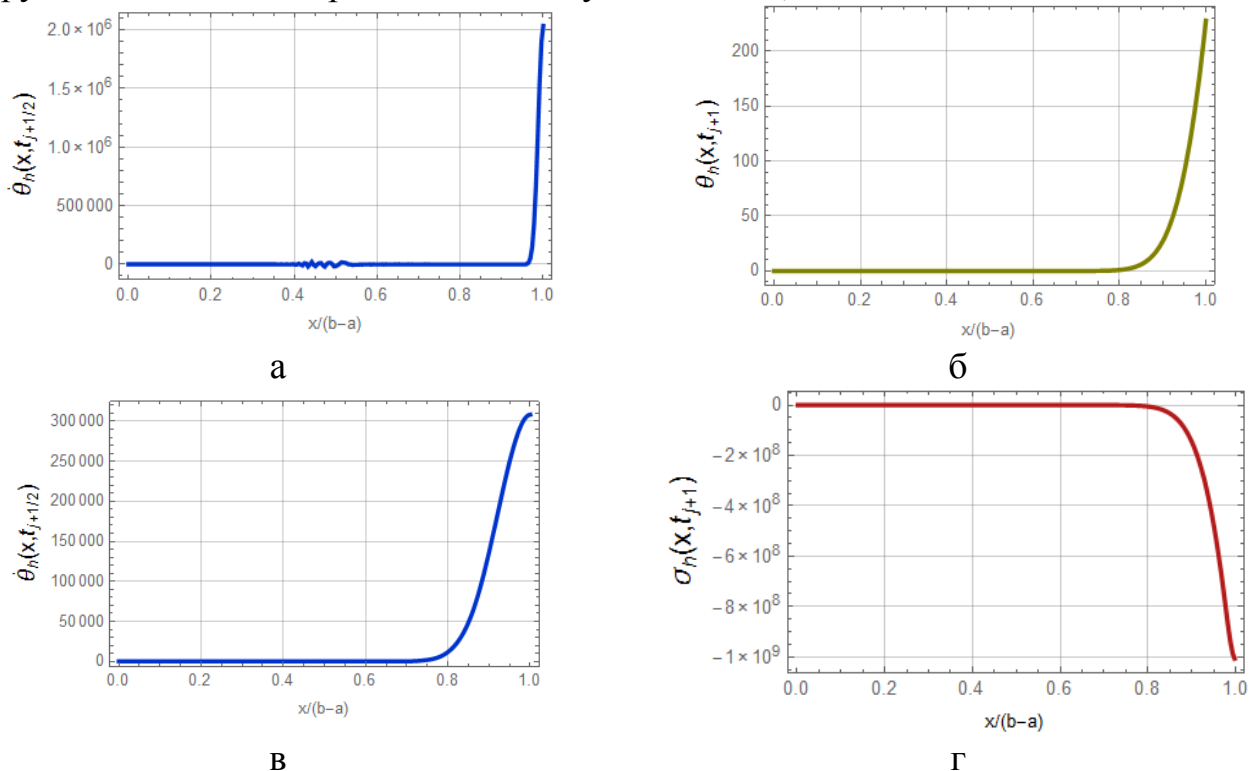


Рисунок 3 – Зміна швидкості нагрівання у початковий момент (а), температура (б), швидкість нагрівання (в) і напруження (г) у момент завершення тертя гладкої поверхні робочої частини інструмента за глибиною оброблюваного зразка

При збільшенні сили притиску (до 1200 Н) інструмента до оброблюваної поверхні густина теплового потоку збільшується до $1,7 \cdot 10^6$ Дж/(с·м²). За таких умов оброблення температура на оброблюваній поверхні у зоні контакту інструмент-деталь (після закінчення обробки зони контакту) збільшилась до 1350 °C, яка з глибиною

зменшується. Швидкість нагрівання поверхневого шару біля поверхні під час закінчення тертя останньої гладкої поверхні інструмента у зоні контакту понизилась і становила біля $1,2 \cdot 10^5$ K/c. Напруження у поверхневому шарі біля оброблюваної поверхні дорівнювали 6 ГПа.

Дослідження показали, що збільшення кількості пазів приводить до зменшення довжини одиничного сегмента (гладка поверхня і паз) на периферії інструмента, а також довжини гладкої поверхні, температура на оброблюваній поверхні понизилась не суттєво, від 1180 °C до 1060 °C. Аналогічно зменшуються напруження від 6,2 ГПа до 5,2 ГПа.

Зі збільшенням ширини пазу температура на оброблюваній поверхні зменшується. Так, під час оброблення інструментом з шириною пазу 6 мм температура на поверхні після проходження зони контакту становила біля 1480 °C. Хоча температура на оброблюваній поверхні є дуже високою, метал поверхневого шару не встигає розплавитись, бо під час припинення дії теплового потоку він починає швидко охолоджуватися. Швидкість охолодження оброблюваної поверхні при цьому складає біля $1,4 \cdot 10^6$ K/c, яка з глибиною різко зменшується і вже на глибині біля 100 мкм складає біля $5 \cdot 10^5$ K/c. Зі збільшенням ширини пазу до 9 мм температура у зоні контакту (після закінчення оброблення зони контакту) зменшується до 1220 °C. При проходженні

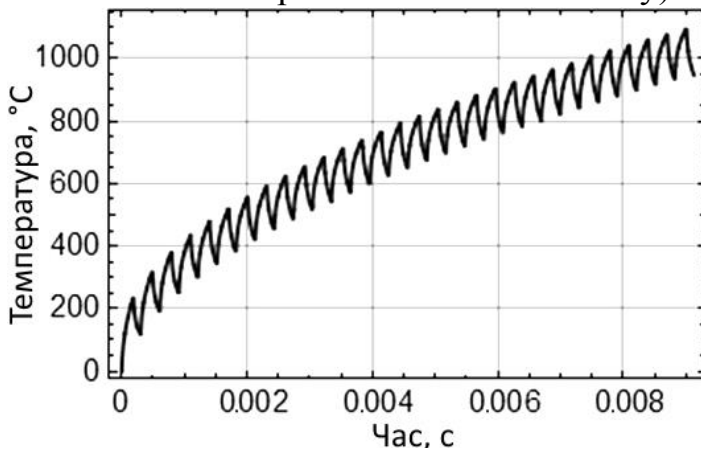


Рисунок 4 – Зміна температури на оброблюваній поверхні у зоні контакту інструмент-деталь ($P = 1200$ Н, $l = 12$ мм)

пазу над даною поверхнею проходить охолодження до температури біля 1100 °C. Відповідно і напруження зменшуються до 6 ГПа. Збільшення ширини пазу до 12 мм приводить до зменшення температури зони контакту до 1100 °C. Під час проходження пазу над зоною контакту по черговою гладкої поверхні і пазу відбувається циклювання нагрівання і охолодження оброблюваної поверхні. При ширині пазу 12 мм величина циклювання температури на поверхні становить більше 150 °C (рис. 4).

Для підтвердження отриманих результатів моделювання зміни температури у зоні оброблення під час фрикційного оброблення визначали розподіл температур за глибиною оброблюваного шару. Для розподілу температури під час оброблення у розробленому збірному зразку під поверхнею були припаяні три термопари на глибинах відповідно 410-430 мкм, 710-740 мкм та 1040-1060 мкм. Під час вимірювання температури інструмент проходив вздовж оброблюваної поверхні з поперечною подачею за подвійний хід. Переміщення інструмента було так встановлено, щоб перший подвійний хід інструмент проходив поряд з встановленими термопарами, а вже другий проходив над розташованими термопарами. Проведені дослідження показали, що під час першого подвійного проходження інструмента по оброблюваній поверхні усі три термопари показали різке збільшення температури у поверхневому шарі металу (рис. 5). Після переміщення зони контакту інструмента з оброблюваною поверхнею

проходить різке охолодження металу поверхнього шару. Отримані експериментальні значення швидкостей нагрівання і охолодження відрізняються від отриманих теоретично тому, що термопари мають інерційність вимірювання, але характер зміни температур є таким самим. На основі проведених експериментальних досліджень обчислено швидкості нагрівання і охолодження поверхнього шару під час фрикційного оброблення. Так, на глибині біля 400 мкм швидкість нагрівання поверхнього шару складає біля $2 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^4$ К/с, а швидкість охолодження біля $1 \cdot 10^4 - 1,5 \cdot 10^4$ К/с.

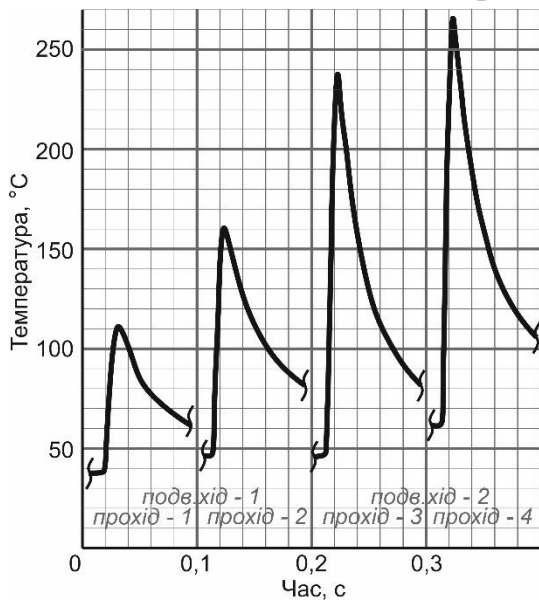


Рисунок 5 – Розподіл температур на глибині 410-430 мкм від поверхні

магаються зменшити динамічні навантаження у зоні різання. У процесі фрикційного оброблення для інтенсифікації процесу формування зміцненого шару з нанокристалічною структурою, і навпаки, збільшуємо динамічні навантаження у зоні контакту інструмент-деталь за рахунок використання інструмента з перервною робочою частиною.

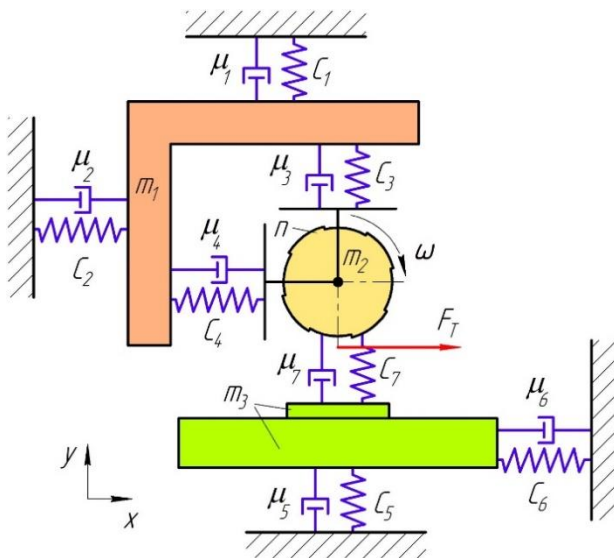


Рисунок 6 – Розрахункова схема плоскошліфувального верстата

тиску інструмента до оброблюваної поверхні деталі подано у неявній формі, тобто через відносне переміщення шпindelної бабки до стола верстата (Δy). При цьому формується сила притиску з врахуванням сумарної жорсткості коливної схеми верстата.

Фрикційне оброблення відноситься до фінішних операцій технологічного процесу виготовлення робочих поверхонь деталей машин. Під час лезового або абразивного оброблень намагаються зменшити динамічні навантаження у зоні різання. У процесі фрикційного оброблення для інтенсифікації процесу формування зміцненого шару з нанокристалічною структурою, і навпаки, збільшуємо динамічні навантаження у зоні контакту інструмент-деталь за рахунок використання інструмента з перервною робочою частиною.

Для дослідження динамічних процесів, які проходять під час фрикційного оброблення плоских поверхонь розроблено розрахункову схему пружної системи верстата, яка є тримасовою моделлю. Для цього верстат розбиваємо на ряд вузлів, кожен з яких представляє собою окрему масу (рис. 6).

Математичну модель процесу фрикційного оброблення розглянемо при використанні інструмента з поперечними пазми, так як усі диски окрім гладкого мають перервний тепловий потік, а інструмент з поперечними пазми окрім перервного теплового потоку має повний вихід з зони контакту за всією шириною робочої поверхні інструмента.

У даній математичній моделі силу притиску інструмента до оброблюваної поверхні деталі подано у неявній формі, тобто через відносне переміщення шпindelної бабки до стола верстата (Δy). При цьому формується сила притиску з врахуванням сумарної жорсткості коливної схеми верстата.

Для механічної системи верстата можна виділити шість узагальнених координат, які характеризують можливі рухи інструмента та деталі у горизонтальній і вертикальній площинах. Як узагальнені координати прийнято відповідні лінійні переміщення інструмента та деталі. Позначимо: ω – кутова швидкість обертання інструмента (рад/с); x_1, y_1 – відповідно горизонтальні та вертикальні переміщення шпиндельної бабки (м); x_2, y_2 – відповідно горизонтальні та вертикальні переміщення інструмента (м); x_3, y_3 – відповідно горизонтальні та вертикальні переміщення стола верстата (м); m_1 – маса шпиндельної бабки (кг); m_2 – маса інструмента (диска) (кг); m_3 – маса оброблювальної деталі та стола верстата (кг); c_1 і c_2 – жорсткість між напрямними колони та шпиндельною бабкою верстата (Н/м); c_3 і c_4 – жорсткість опор шпинделя верстата (Н/м); c_5 і c_6 – жорсткість стола верстата (Н/м); c_7 – контактна жорсткість між оброблювальною деталлю та інструментом (Н/м); μ_1 і μ_2 – коефіцієнт демпфування між напрямними колони та шпиндельною бабкою верстата (Нс/м); μ_3 і μ_4 – коефіцієнт демпфування опор шпинделя верстата (Нс/м); μ_5 і μ_6 – коефіцієнт демпфування стола верстата (Нс/м); μ_7 – коефіцієнт демпфування між інструментом і деталлю (внутрішнє загасання) (Нс/м); F_T – сила тертя між деталлю та інструментом (Н).

Диференціальні рівняння, які описують рух системи, побудовані на основі рівнянь Лагранжа другого роду, мають вигляд:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{i,j}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_{i,j}} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_{i,j}} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_{i,j}} = Q_{q_{i,j}}, \quad (12)$$

де T – кінетична енергія системи; Π – потенціальна енергія системи; Φ – функція розсіювання енергії в системі (дисипативна функція Релея); $Q_{q_{i,j}}$ – узагальнені сили, які відповідають обраним узагальненим координатам x_i та y_i .

Під час формування математичної моделі приймемо наступні припущення: вважатимемо, що закон зміни жорсткості в пружних елементах системи не виходить за межі лінійності і відповідає закону Гука. Це виправдано за умови реалізації малих відхилень пружини від положення рівноваги; механічну систему верстата розглядатимемо як таку, що складається з абсолютно твердих тіл, з'єднаних ідеальними голономними в'язями та пружними елементами строго визначеної жорсткості; у динамічну модель у вигляді демпферів введемо коефіцієнти в'язкого тертя, які пропорційні швидкості переміщення рухомих повзунів вздовж відповідних напрямних осей та відображають розсіювання енергії у відповідних пружних елементах системи.

Узагальнена сила, яка визначається відношенням віртуальних робіт сил $\sum \delta A(F_k)$, що діють на кожний елемент до приросту певної узагальненої координати $\delta q_{i,j}$ для відповідних мас будуть мати вигляд:

$$Q_{i,j} = \frac{\delta A_{i,j}}{\delta q_{i,j}}. \quad (13)$$

Формування сили притиску відбувається за рахунок переміщення шпиндельної бабки у напрямі до деталі за рахунок передачі гвинт-гайка на величину y_0 , яку приймаємо постійною під час оброблення. Завдяки геометрії інструмента (чергуванні гладкої частини з пазом) відбувається зменшення сили притиску між інструментом та деталлю на величину переміщення y_{23} .

$$y_{23} = \begin{cases} 0, & \text{при } \omega t = (0 \dots \varphi_r) + \frac{2\pi}{n} \cdot m \\ (R - R \cdot \cos \omega t), & \text{при } \omega t = \left(\varphi_r \dots \frac{\varphi_{\Pi.}}{2}\right) + \frac{2\pi}{n} \cdot m \\ (R - R \cdot \cos \omega t) - \left(R - R \cdot \cos \left(\frac{\varphi_c - \varphi_r}{2}\right)\right), & \\ \text{при } \omega t = \left(\frac{\varphi_{\Pi.}}{2} \dots \varphi_r\right) + \frac{2\pi}{n} \cdot m & \\ m = 0, 1, 2 \dots (n - 1). & \end{cases} \quad (14)$$

Необхідно описати випадок коли паз інструмента є вузьким і дає можливість припинити дію теплового потоку, але не дає можливості вільно вийти з контакту деталі (рис. 7). Тому мінімальне значення сили притиску буде визначатися з залежності:

$$\text{якщо } y_0 < \Delta R, \text{ тоді } |N_{min}| = c_y^* \cdot (y_0 - \Delta R) \text{ при } \omega t = (\varphi_r \dots \varphi_c) + \frac{2\pi}{n} \cdot m \quad (15)$$

Математична модель, яка описує динаміку механічної системи верстата:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_2 x_1 + c_4 x_1 - c_4 x_2 + \mu_2 \dot{x}_1 + \mu_4 \dot{x}_1 - \mu_4 \dot{x}_2 = Q_{x_1} \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_4 x_1 + c_4 x_2 - \mu_4 \dot{x}_1 + \mu_4 \dot{x}_2 = Q_{x_2} \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_6 x_3 + \mu_6 \dot{x}_3 = -Q_{x_3} \\ m_1 \ddot{y}_1 + c_1 y_1 + c_3 y_1 - c_3 y_2 + \mu_1 \dot{y}_1 + \mu_3 \dot{y}_1 - \mu_3 \dot{y}_2 = 0 \\ m_2 \ddot{y}_2 - c_3 y_1 + c_3 y_2 + c_7 y_2 - c_7 y_3 - \mu_3 \dot{y}_1 + \mu_3 \dot{y}_2 + \mu_7 \dot{y}_2 - \mu_7 \dot{y}_3 = Q_{y_2} \\ m_3 \ddot{y}_3 - c_7 y_2 + c_7 y_3 + c_5 y_3 - \mu_7 \dot{y}_2 + \mu_7 \dot{y}_3 + \mu_5 \dot{y}_3 = -Q_{y_3} \end{cases} \quad (16)$$

Початкова сила притиску інструмента до деталі, коли контакт відбувається гладкою частиною інструмента:

$$F_0 = y_0 \cdot c_y^* \quad (17)$$

Початкові умови:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i|_{t=0} = 0, \quad \dot{y}_i|_{t=0} = 0, \\ y_1|_{t=0} = \frac{F_0}{c_1 + c_3}, \quad y_2|_{t=0} = \frac{F_0}{c_1 + c_3 + c_7}, \quad y_3|_{t=0} = \frac{F_0}{c_1 + c_3 + c_5 + c_7}, \\ x_1|_{t=0} = 0, \quad x_2|_{t=0} = 0, \quad x_3|_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Моделювання взаємодії інструмента з деталлю здійснено за допомогою контактної жорсткості та демпфування енергії локального пружно-пластичного деформування. Додатково вводиться умова перевірки наявності взаємного контакту інструмента з деталлю. Якщо інструмент матиме переміщення у протилежний напрям від деталі, то контактна жорсткість та демпфування будуть відсутні:

$$\text{Якщо } y_3 - y_2 < 0, \quad \text{тоді } c_7 = 0, \mu_7 = 0. \quad (19)$$

Розроблена динамічна модель пружної системи верстата дає змогу визначити вертикальні та горизонтальні переміщення і швидкості шпindelної бабки, інструмента і деталі, а також реакції кожної маси відносно суміжної маси.

Аналізуючи чисельні розв'язки переміщень системи з різними значеннями сили притиску та ширини паза отримано, що суттєвий вплив на амплітуду коливань має ширина пазу. Зі збільшенням ширини пазу зростає різниця між максимальним і мінімальним значеннями амплітуди реакції, яка виникає у зоні контакту інструмент-

деталь. Так, при обробленні інструментом з 8 пазами і їх шириною 4 мм та з силою притиску 750 Н різниця між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції рівна 10 Н, а при ширині паза 8 мм, різниця збільшується у 7,5 разів і складає 75 Н (рис. 8).

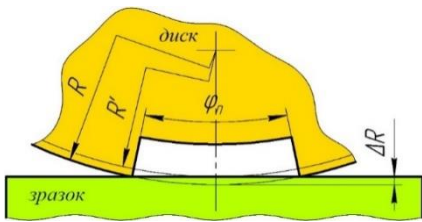


Рисунок 7 – Контакт диска у зоні контакті

Зі збільшенням кількості пазів на периферії інструмента різниця між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції зменшується і, наприклад, при тій самій силі притиску інструмента до деталі з кількістю пазів 24 шт. і шириною паза 4 мм різниця амплітуд рівна 5 Н, а при ширині паза 8 мм різниця амплітуд складає 38 Н. Також слід відзначити, що різниця між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції є однакою при використанні однієї ширини диска при різних силах притиску. Якщо величина переміщення інструмента до деталі, яка формує силу притиску, є більшою за величину ΔR , то різниця між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції буде однаковою при різних силах притиску і однаковій ширині паза.

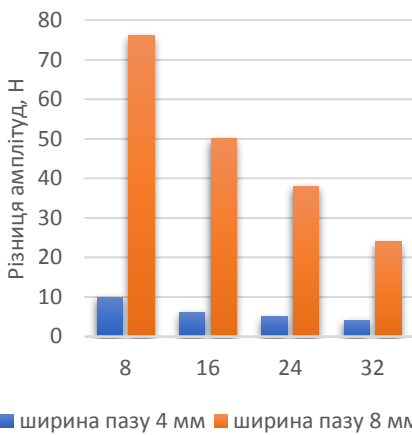


Рисунок 8 – Різниця між значеннями амплітуд від ширини пазу

значення АЧХ пружної системи верстата проводили на основі раніше записаних диференціальних рівнянь (16). З аналізу отриманої АЧХ пружної системи (рис. 6), отримуємо значення частот збурення при яких виникає резонанс у системі. Резонанс шпindelної бабки можливий при $\omega_1 = 3050\text{с}^{-1}$, інструмента – $\omega_2 = 3150\text{с}^{-1}$, а стола при $\omega_3 = 3650\text{с}^{-1}$. Розрахунки частот ударних навантажень проведено для інструмента у якого на робочій поверхні є один паз (рис. 9). Для відображення небезпечних частот обертання інструмента та кількості пазів на робочій частині інструмента при яких може виникнути резонанс, побудована графічна залежність виникнення резонансу від кількості пазів (рис. 10).

З отриманої залежності впливає, що при збільшенні кількості пазів на робочій частині інструмента зменшується швидкість на його периферії, при якій можливий резонанс. Мінімальна швидкість під час якої проходить процес фрикційного зміцнення складає 60 м/с. При такій швидкості резонанс можливий, якщо на робочій поверхні інструмента буде 8-11 пазів. Тому для нормальної роботи інструмента необхідно, щоб на робочій частині інструмента було не менше 12 пазів. Інструмент буде працювати при нормальних умовах коливань на частотах, які є зміщені вправо від

резонансу системи (рис. 10). Для дослідження стійкості пружної системи верстата була побудована АФЧХ розімкнутої системи.

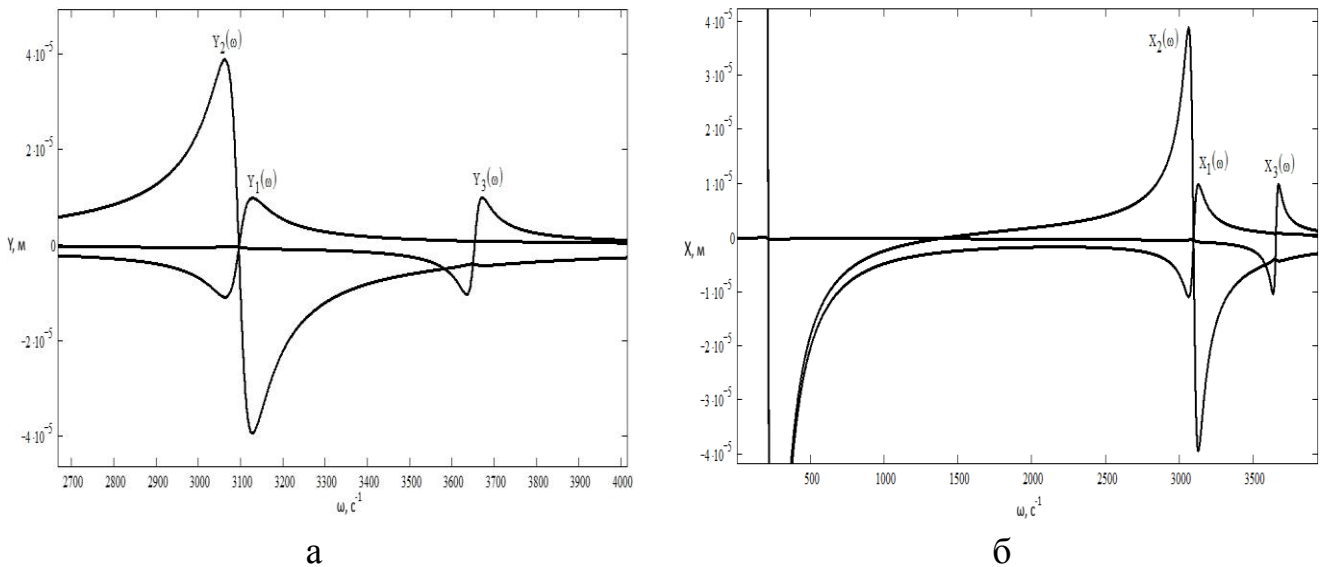


Рисунок 9 – Амплітудно-частотні характеристики обладнання: вертикальна (а) та горизонтальна (б) площини

Для дослідження динамічних процесів, які проходять під час фрикційного оброблення циліндричних поверхонь розроблено розрахункову схему пружної системи верстата, яка представляє собою тримасову модель (рис. 11). Як деталь з умовно безмежною масою прийнята станина верстата до якої «прив'язані» усі решта мас. Взаємозв'язок між окремими масами описуються пружними і демпфуючими зв'язками.

Ударні навантаження, які виникають між оброблюваною поверхнею деталі та робочою поверхнею інструмента (горизонтальні) змодельовані за допомогою контактної жорсткості (c_7) та демпфування енергії (μ_7) локального пружно-пластичного деформування поверхні деталі.

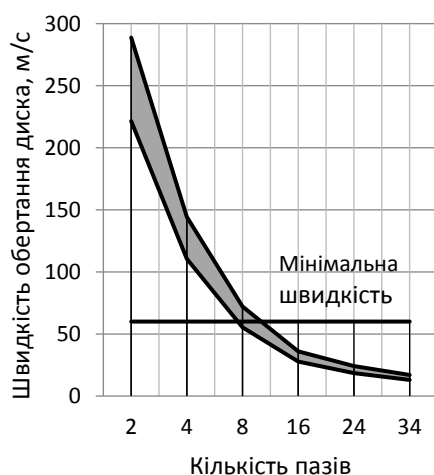


Рисунок 10 – Залежність частот виникнення резонансу від кількості пазів

верстата (Нс/м); μ_7 – коефіцієнт демпфування між інструментом і деталлю (внутрішнє загасання)(Нс/м); F_T – сила тертя між деталлю та інструментом (Н).

Позначимо: ω_2 і ω_3 – кутова швидкість обертання інструмента і деталі (рад/с); x_1 , y_1 – відповідно горизонтальні та вертикальні переміщення пристрою (м); x_2 , y_2 – відповідно горизонтальні і вертикальні переміщення інструмента (м); x_3 , y_3 – відповідно горизонтальні та вертикальні переміщення стола верстата (м); m_1 – маса пристрою (кг); m_2 – маса інструмента (кг); m_3 – маса оброблювальної деталі (кг); c_1 і c_2 – жорсткість супорта верстата (Н/м); c_3 і c_4 – жорсткість пристрою (Н/м); c_5 і c_6 – жорсткість шпинделя верстата (Н/м); c_7 – контактна жорсткість між оброблюваною деталлю та інструментом (Н/м); μ_1 і μ_2 – коефіцієнти демпфування супорта верстата (Нс/м); μ_3 і μ_4 – коефіцієнти демпфування пристрою (Нс/м); μ_5 і μ_6 – коефіцієнт демпфування шпинделя

Для механічної системи верстата можна виділити шість узагальнених координат, які характеризують можливі рухи пристрою, інструмента та деталі у горизонтальній і вертикальній площинах. Як узагальнені координати прийнято відповідні лінійні переміщення пристрою, інструмента та деталі.

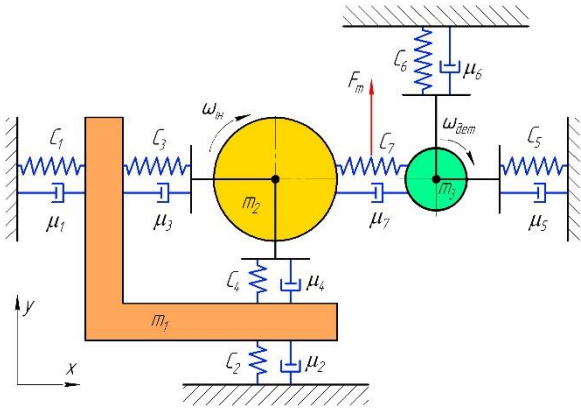


Рисунок 11 – Розрахункова схема токарного верстата

хвнї з пазом) відбувається зменшення сили притиску між інструментом і деталлю на величину переміщення x_{23} .

$$x_{23} = \begin{cases} 0 \text{ при } \omega t = (0 \dots \varphi_{\text{гл.}}) + \frac{2\pi}{n} \cdot m \\ R - R \cdot \cos \omega t \text{ при } \omega t = \left(\varphi_{\text{гл.}} \dots \frac{\varphi_{\text{паз.}}}{2} \right) + \frac{2\pi}{n} \cdot m \\ (R - R \cdot \cos \omega t) - \left(R - R \cdot \cos \left(\frac{\varphi_{\text{сер.}} - \varphi_{\text{гл.}}}{2} \right) \right) \\ \text{при } \omega t = \left(\frac{\varphi_{\text{паз.}}}{2} \dots \varphi_{\text{гл.}} \right) + \frac{2\pi}{n} \cdot m \\ m = 0, 1, 2 \dots n - 1 \end{cases} \quad (20)$$

Математична модель, яка описує динаміку механічної системи верстата:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 x_1 + c_3 x_1 - c_3 x_2 + \mu_1 \dot{x}_1 + \mu_3 \dot{x}_1 - \mu_3 \dot{x}_2 = Q_{x_1} \\ m_2 \ddot{x}_2 - c_3 x_1 + c_3 x_2 + c_7 x_2 - c_7 x_3 - \mu_3 \dot{x}_1 + \mu_3 \dot{x}_2 + \mu_7 \dot{x}_2 - \mu_7 \dot{x}_3 = Q_{x_2} \\ m_3 \ddot{x}_3 - c_7 x_2 + c_7 x_3 + c_5 x_3 - \mu_7 \dot{x}_2 + \mu_7 \dot{x}_3 + \mu_5 \dot{x}_3 = Q_{x_3} \\ m_1 \ddot{y}_1 + c_2 y_1 + c_4 y_1 - c_4 y_2 + \mu_2 \dot{y}_1 + \mu_4 \dot{y}_1 - \mu_4 \dot{y}_2 = Q_{y_1} \\ m_2 \ddot{y}_2 - c_4 y_1 + c_4 y_2 + F_t - \mu_4 \dot{y}_1 + \mu_4 \dot{y}_2 = Q_{y_2} \\ m_3 \ddot{y}_3 + c_6 y_3 - F_t + \mu_6 \dot{y}_3 = Q_{y_3} \end{cases} \quad (21)$$

Початкова сила притиску інструмента до деталі, коли контакт відбувається гладкою поверхнею інструмента:

$$F_0 = x_0 \cdot c_x^* \quad (22)$$

Початкові умови:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i|_{t=0} = 0, \quad \dot{y}_i|_{t=0} = 0, \\ x_1|_{t=0} = \frac{F_0}{c_1 + c_3}, \quad x_2|_{t=0} = \frac{F_0}{c_1 + c_3 + c_7}, \quad x_3|_{t=0} = \frac{F_0}{c_1 + c_3 + c_5 + c_7}, \\ y_1|_{t=0} = 0, \quad y_2|_{t=0} = 0, \quad y_3|_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Моделювання взаємодії інструмента з деталлю здійснено за допомогою

контактною жорсткості та демпфуванням енергії локального пружно-пластичного деформування. Тому додатково вводиться умова перевірки наявності взаємного контакту інструмента з деталлю. Тобто, якщо інструмент матиме переміщення у протилежний напрям від деталі, тоді контактна жорсткість та демпфування будуть рівні нулю.

$$\text{Якщо } x_3 - x_2 < 0, \quad \text{тоді } c_7 = 0, \quad \mu_7 = 0. \quad (24)$$

Моделювання динамічних процесів фрикційної обробки циліндричних поверхонь будемо виконувати за допомогою математичного пакета MATLAB-Simulink. Розроблена динамічна модель пружної системи верстата дає змогу визначити вертикальні й горизонтальні переміщення і швидкості спеціального пристрою, інструмента та деталі, а також реакції однієї маси відносно суміжної маси.

Аналогічно, як і під час оброблення плоских поверхонь деталей, на величину сили удару впливає ширина пазу на периферії інструмента. Під час оброблення інструментом з 8 пазами шириною 4 мм і силою притискання 750 Н різниця між максимальним і мінімальним значенням амплітуди реакції рівна 9 Н, а при ширині паза 8 мм різниця між амплітудами збільшується у майже 7,5 разів і рівна 68 Н (рис. 12).

У процесі лезової обробки поверхонь деталей машин для покращання параметрів якості оброблюваних поверхонь намагаються зменшити динамічні процеси у зоні різання. Під час фрикційного оброблення для покращання формування якісного зміцненого шару навпаки збільшуються коливні процеси у зоні обробки.

Визначення АЧХ пружної системи проводили на основі раніше записаних диференціальних рівнянь (21), які описують пружну систему токарного верстата з встановленим спеціальним пристроєм для оброблення циліндричних поверхонь деталей машин.

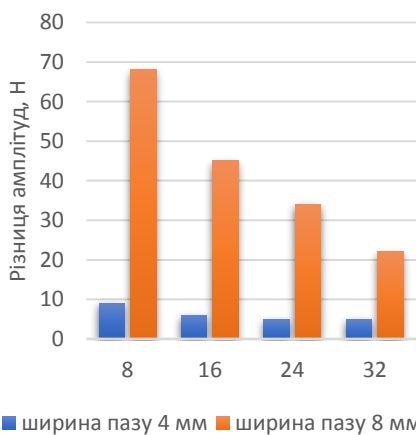


Рисунок 12 – Різниця між значеннями амплітуд від ширини пазу

На основі аналізу отриманої АЧХ пружної системи отримуємо значення частот збурення при яких виникає резонанс у системі (рис. 13). Резонанс спеціального пристрою, який закріплений на супорті верстата відбувається при $\omega = 3650 \text{с}^{-1}$, а інструмента – $\omega = 3750 \text{с}^{-1}$. Розрахунки частот ударних навантажень визначено для інструмента на робочій поверхні якого є один паз.

На основі побудованої АЧХ коливальної системи верстата визначено, що небезпечна кількість пазів становить 9-12, які можуть спричинити резонанс під час оброблення зі швидкістю 60 м/с (рис. 14).

Для визначення коефіцієнтів жорсткості відповідного вузла токарного та плоскошліфувального верстата встановлено баланс жорсткості вузлів обладнання для фрикційного оброблення, а також визначено коефіцієнт загасання відповідного вузла обладнання для фрикційного оброблення.

Систему шпindel-інструмент розглянуто як гіроскоп, який здійснює обертання на великих швидкостях. Так як для інструмента, який використовується для фрикційного оброблення проводимо лише статичне балансування, а сила притискання діє лише у одній площині, а у перпендикулярній площині сила тертя, то при

Систему шпindel-інструмент розглянуто як гіроскоп, який здійснює обертання на великих швидкостях. Так як для інструмента, який використовується для фрикційного оброблення проводимо лише статичне балансування, а сила притискання діє лише у одній площині, а у перпендикулярній площині сила тертя, то при

високій частоті обертання шпинделя з інструментом проходить їх прецесійний рух та виникає гіроскопічне явище. Побудована математична модель прецесійного явища на

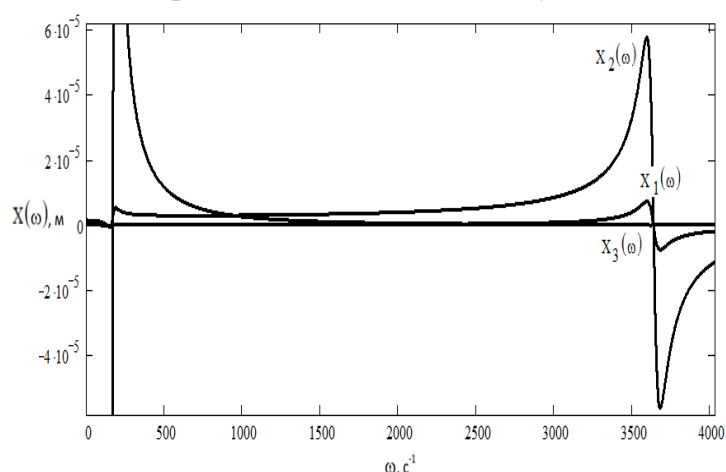


Рисунок 13 – Графік амплітудно-частотної характеристики технологічної системи у горизонтальній площині

основі рівнянь Лагранжа.

У *п'ятому розділі* представлено вплив параметрів фрикційного оброблення на показники якості зміцнених поверхонь. Показана зміна структури, глибина, а також мікротвердість поверхневих шарів залежно від типу технологічного середовища, методу його подачі і форми робочої поверхні інструмента.

Фізико-механічні властивості зміцнених білих шарів з нанокристалічною структурою, в основному, залежать від вмісту в них вуглецю. Проведені дослідження показали, що зі збільшенням кількості вуглецю в сталях збільшується кількість залишкового аустеніту, а також карбідної фази, що сприяє збільшенню товщини та твердості поверхневого зміцненого шару. Для покращання властивостей поверхневого зміцненого шару використовується насичення і легування його різними хімічними елементами, складовими технологічних середовищ. Основу технологічних середовищ переважно складає мінеральна олива з низькою в'язкістю. Використовуючи мінеральну оливу як технологічне середовище під час фрикційного оброблення, у поверхневих шарах формуються збільшена густина дислокацій, яка впливає на процеси масопереносу і сприяє збільшенню вмісту вуглецю. До технологічного середовища для науглечення на основі мінеральної оливи додавали відходи виробництва поліетилену марки Г (ТУ 6-05-36-9-79). Поліетилен утворює продукти термо-механічної деструкції полімеру середовища для формування активного атомарного вуглецю. Продукти, які утворилися під час деструкції полімеру, адсорбуються на оброблюваній ювенільній поверхні, понижують поверхневу енергію, що полегшує процес деформування.

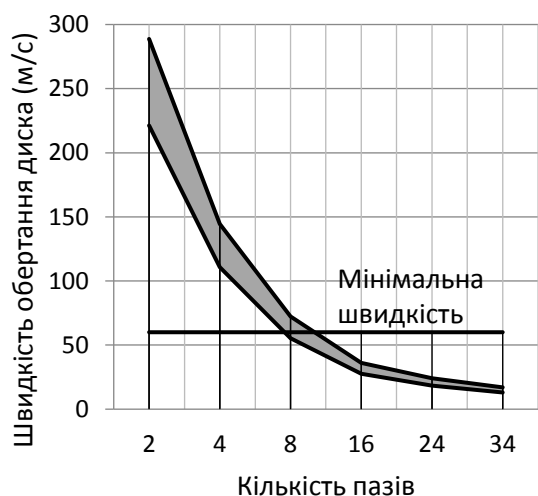


Рисунок 14 – Залежність частот виникнення резонансу від кількості пазів

Для покращання фізико-механічних та експлуатаційних властивостей деталей проводили мікролегування азотом та міддю. Азотування проводили під час фрикційного оброблення з використанням як технологічне середовище 10 % водяний розчин амінілу (ТУ-6-00-5743167-106-90).

Поверхневий шар під зоною контакту інтенсивно нагрівається до високих температур, а після переміщення інструмента із зони контакту інтенсивно

охладжується. У ньому виникають великі градієнти температури та напружень. За рахунок інтенсивного тертя на оброблюваній поверхні деталі у зоні контакту інструмент-деталь видаляються оксидні плівки і утворюються ювенільні (фізично чисті) поверхні. На них адсорбуються молекули технологічного середовища, яке подається у зону оброблення. Під дією високошвидкісного тертя у зоні контакту інструмент-деталь технологічне середовище розкладається на складові хімічні елементи. Проходить інтенсивне виділення водню за рахунок трибодеструкції водневмісних технологічних середовищ. Під час тертя між контактуючими поверхнями деталей виникають великі електричні і електроємні явища внаслідок яких проходять процеси руйнування молекул технологічного середовища і утворення атомів водню, кисню, вуглецю та інших елементів. Швидкість дифузії збільшується зі зростанням градієнту температури і напружень.

Під час технологічної операції фрикційного оброблення технологічне середовище подається у зону оброблення методом поливу. За рахунок високошвидкісного обертання інструмента навколо його робочої частини формується повітряна оболонка, яка ускладнює попадання технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь. Для забезпечення подачі технологічного середовища безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь розроблено конструкцію інструмента для подачі технологічного середовища через його корпус. На робочій поверхні інструмента знаходяться пази, у які виходять радіальні отвори, через які технологічне середовище подається безпосередньо у зону контакту. Технологічне середовище подається на ювенільні поверхні, які є zdeформованими, нагрітими до температур вище 1000 °C. Така поверхня є дуже активною, тому при попаданні безпосередньо на неї технологічного середовища процеси масопереносу його складових хімічних елементів пришвидшуються.

Відомо, що водень у металі негативно впливає на працездатність деталей машин, за рахунок водневого окрихчення. Водневе окрихчення сталей відбувається за рахунок водню який є у молекулярному стані і він знаходиться у дефектах кристалічної ґратки. Наводнення поверхневого шару металу під час процесу тертя немає спільних рис з водневою крихкістю ані за джерелами наводнювання, ані за інтенсивністю і характером розподілу водню в металі.

Також відомо, що водень позитивно впливає на протікання технологічних процесів поверхневого оброблення деталей машин (пластичне деформування, різання тощо), підвищуючи продуктивність та якість оброблених поверхонь. Під час взаємодії водню з металом проходить ослаблення взаємозв'язків між поверхневими атомами металу, що сприяє створенню позитивного градієнта властивостей міцності від поверхні у глибину металу. Такий градієнт властивостей у поверхневому шарі зменшує коефіцієнт тертя, а також полегшує процеси формоутворення робочих поверхонь деталей під час різання та обробленні тиском.

Під час попадання макромолекул та частинок полімерів полімервмісних добавок у зону контакту проходить їх деструкція за головними зв'язками і утворюються вільні радикали. Деструкція полімерів протікає при температурах нижчих, ніж рідких вуглеводнів. Фрагменти макромолекул на ювенільних поверхнях оброблюваного металу утворюють хімічні зв'язки з залізом, марганцем, хромом та нікелем. Особливість

деструкції полімерів полягає в тому, що при підвищених температурах відбувається ланцюгова деполімеризація фрагментів полімерів і утворюються сітки ненасичених вуглецевих зв'язків та атомарний вуглець, а також виділяється активний водень.

Використання полімервмісних добавок у мінеральній оливі як технологічне середовище під час фрикційного оброблення сприяє значному збільшенню товщини і мікротвердості поверхневого шару. Найбільший вплив на формування зміцненого шару має подача технологічного середовища безпосередньо у зону контакту. У складі полімервмісних добавок окрім вуглецю ще містяться компоненти, які під дією високих температур та тисків розкладаються, активують поверхню, зменшують поверхневу енергію і при цьому виділяється активний водень.

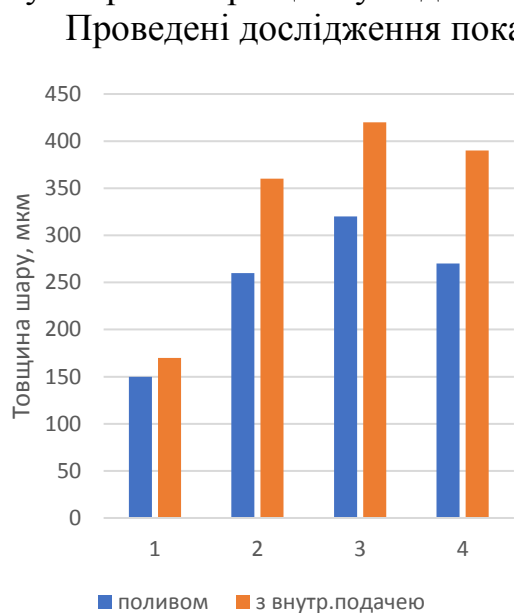


Рисунок 15 – Залежність товщини зміцненого шару, отриманого після оброблення інструментом з різною робочою поверхнею: 1 – гладка; 2 – з поперечними пазами; 3 – з різнонаправленими пазами; 4 – хвилеподібна

метод поливу). Шар ще більшої товщини отримано під час оброблення з подачею технологічного середовища безпосередньо у зону контакту (400-420 мкм). Зміцнений шар дещо меншої товщини отримується під час фрикційного оброблення інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею і подачею технологічного середовища безпосередньо у зону контакту, яка складала 370-390 мкм. Під час оброблення інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею зміцнений шар отримується меншої товщини, аніж після оброблення інструментом з різнонаправленими пазами. Ширина смуги, яка є хвилеподібною має майже таку саму ширину як робоча поверхня інструмента з прямими або різнонаправленими пазами, але загальна ширина робочої частини інструмента є значно більшою. Оброблення проходить з більшими подачами, тому у даному випадку отримуємо більшу продуктивність процесу оброблення, але отримуємо меншу товщину зміцненого шару. Під час дослідження впливу форми

робочої частини використовували інструмент однаковою шириною робочої поверхні рівною 8 мм, кількість і ширина пазів була однаковою і становила 24 пази і 9 мм відповідно. Зовнішній діаметр робочої поверхні інструмента під час проведення експериментальних досліджень у всіх випадках становив 240 мм.

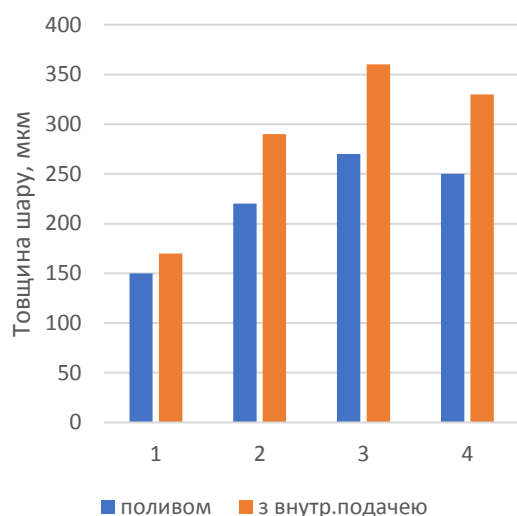


Рисунок 16 – Залежність товщини зміцненого шару, отриманого під час оброблення інструментом з різною кількістю пазів на робочій поверхні: 1 – гладка робоча поверхня; 2 – 16 пазів; 3 – 24 пази; 4 – 32 пази

Наступне збільшення кількості пазів до 32 приводить до зменшення товщини зміцненого шару до 320-330 мкм (рис. 16). На робочій частині інструмента при ширині пазу 9 мм збільшувати кількість пазів більше 24 є не доцільно, бо

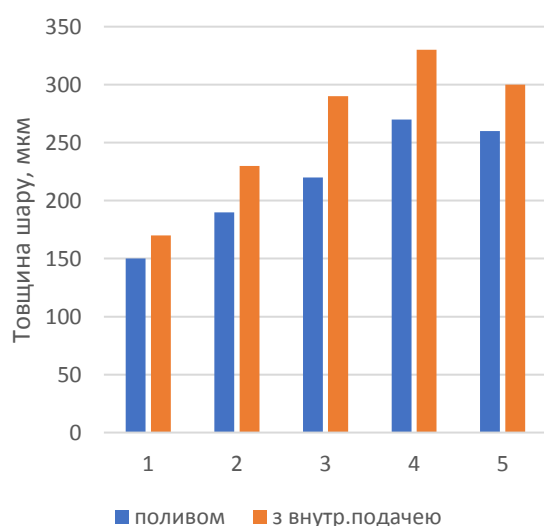


Рисунок 17 – Залежність товщини зміцненого шару під час фрикційного оброблення інструментом з різною шириною пазів на робочій поверхні: 1 – гладка робоча частина; 2 – 3 мм; 3 – 6 мм; 4 – 9 мм; 5 – 12 мм

товщина зміцненого шару починає зменшуватися. Хоча зі збільшенням кількості пазів збільшується частота ударних навантажень на зону контакту інструмент-деталь під входження чергової гладкої частини в контакт.

Проведені експериментальні дослідження показали, що ширина пазів також значно впливає на товщину зміцненого шару. Так, під час фрикційного оброблення плоских поверхонь інструментом з 24 поперечними пазами на робочій частині і подачею технологічного середовища (мінеральна олива з полімервмісними добавками) безпосередньо у зону контакту збільшення ширини пазу від 3 мм до 9 мм приводить до збільшення товщини зміцненого шару від 210-230 мкм до 310-330 мкм. Збільшення ширини пазу до 12 мм приводить до зменшення товщини шару до 280-300 мкм (рис. 17). Під час

товщина зміцненого шару починає зменшуватися. Хоча зі збільшенням кількості пазів збільшується частота ударних навантажень на зону контакту інструмент-деталь під входження чергової гладкої частини в контакт.

Проведені експериментальні дослідження показали, що ширина пазів також значно впливає на товщину зміцненого шару. Так, під час фрикційного оброблення плоских поверхонь інструментом з 24 поперечними пазами на робочій частині і подачею технологічного середовища (мінеральна олива з полімервмісними добавками) безпосередньо у зону контакту збільшення ширини пазу від 3 мм до 9 мм приводить до збільшення товщини зміцненого шару від 210-230 мкм до 310-330 мкм. Збільшення ширини пазу до 12 мм приводить до зменшення товщини шару до 280-300 мкм (рис. 17). Під час

оброблення інструментом з гладкою робочою частиною товщина зміцненого шару становила лише 140-150 мкм.

На процесі насичення вуглецем значно впливає деформування зони оброблення. Використання інструмента з пазами збільшує ступінь деформування поверхневого шару металу. У деформованому металі значно збільшується насичення хімічними елементами поверхневого шару. Проведені дослідження показали, що під час фрикційного оброблення зі збільшенням кількості проходів по одному і тому самому місці збільшується товщина зміцненого шару, його твердість, а також кількість вуглецю, який дифундує з технологічного середовища. Збільшення зазначених параметрів проходить до 4-5 проходів інструмента по одному і тому ж місцю на оброблюваній поверхні, далі відбувається стабілізація формування зміцненого шару. З подальшим збільшенням кількості проходів параметри зміцненого шару практично не змінюються. Це відноситься до оброблення як циліндричних так і плоских поверхонь. Виходячи з цього вибирали рекомендовану подачу інструмента під час оброблення, яка визначається у залежності від ширини робочої частини інструмента. Під час фрикційного оброблення циліндричних поверхонь поздовжня подача інструмента повинна бути: $l_p / (4 \dots 5)$ мм/об., а плоских поверхонь – $l_p / (2 \dots 2,5)$ мм/дв. хід стола верстата (l_p – ширина робочої частини інструмента). Відповідно збільшиться продуктивність процесу оброблення.

У процесі інтенсивної пластичної деформації як методу отримання поверхневого зміцненого шару з нанокристалічною структурою мікролокалізація дислокаційних структур проявляє високу залежність від моди деформації зсуву. Кількісна характеристика моди деформації визначається розподілом швидкостей деформації між головними напрямками континуального зсуву і відповідає граничним станам чистого і простого зсуву. У процесі інтенсивного пластичного деформування проходить фрагментація структури до нанорівня. Інтенсивна пластична деформація лімітується зародженням і рухом дислокацій.

Мартенситна фаза формується після оброблення зразків інструментами з різною робочою поверхнями (гладка і різнонаправлені пази), але в останньому випадку відносна деформація ґратки ϵ зростає, а розміри зерен L зменшуються. У результаті фрикційного оброблення інструментом з гладкою робочою поверхнею отримано мартенситну структуру та мартенситно-аустенітну структуру після оброблення інструментом з різнонаправленими пазами. Величина зерна α -фази складає у першому випадку 10,7 нм та 8,7 нм – у другому. Якщо після оброблення інструментом з гладкою робочою поверхнею спостерігаємо тільки сліди γ -фази, то різнонаправлена деформація веде до збільшення її кількості до 1,23 % (мас.) ($B(111) = 0,719$; $B(311) = 1,234$; $L = 16,4 \pm 1,2$ нм; $\epsilon = 0,1$ %; $\rho = 1,3 \cdot 10^{13}$ см⁻²; $a = 3,6073$ нм; $X_\gamma = 3,2$ %). Лінії мартенситу є також інтенсивніші за різнонаправленої деформації. Відповідно мікротвердості відрізняються незначно, але глибина за обробки інструментом з пазами суттєво збільшується. Різнонаправлена деформація сприяє формуванню наноструктури та фазоутворенню.

У процесі випробувань деформація зсувом є дуже ускладнена через високу густину дислокацій і можливі тільки пластичні розвороти, що і підтверджують характеристики пластичності, а саме відносне видовження дуже мале і відносне звуження

велике і навіть перевищує цей показник для вихідного стану. Підвищення характеристик міцності та пластичності з використанням інструментів з різнонаправленою деформацією можна пояснити формуванням нанокристалітів з рівноважною структурою.

Дослідження показали, що під час фрикційного зміцнення застосовуване технологічне середовище суттєво впливає на характер перерозподілу залишкових напружень першого роду. Так, при зміцненні плоских зразків зі сталі 45 (гартування і низький відпуск) виникають залишкові напруження стиску (рис. 18). Під час застосування мінеральної оливи з полімервмісними додатками вони поширюються на більшу глибину і більші за величиною, у порівнянні з напруженнями, отриманими під час зміцнення із застосуванням мінеральної оливи. Біля поверхні вони невеликі за величиною, але із збільшенням глибини напруження зростаються, переходять через максимум, а потім зменшуються. Така ж картина спостерігається і при зміцненні зразків зі сталі У8А після гартування і низького та високого відпуску. Найбільші напруження виникають на зразках після гартування і низького відпуску, дещо менші після зміцнення зразків після гартування і високого відпуску. Слід відмітити, що на величину залишкових напружень впливає структурний стан вихідного металу, але характер їх розподілу майже однаковий.

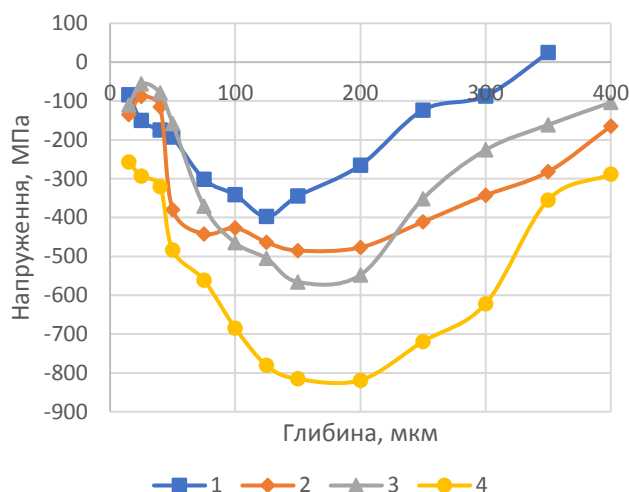


Рисунок 18 – Залишкові напруження першого роду, отримані на сталі 45 (гартування і високий відпуск – 1, 2; гартування і низький відпуск – 3, 4) після фрикційного оброблення: 1, 3 – у мінеральній оливі; 2, 4 – у мінеральній оливі з полімервмісними добавками

і високого відпуску. Слід відмітити, що на величину залишкових напружень впливає структурний стан вихідного металу, але характер їх розподілу майже однаковий.

Характер зміни залишкових напружень отриманих на циліндричних зразках є відмінним від зміни залишкових напружень, отриманих після зміцнення плоских зразків (рис. 19). Так, після фрикційного оброблення зразків, виготовлених зі сталі 45 (гартування і низький відпуск), з використанням як технологічне середовище мінеральну оливу з полімервмісними добавками залишкові напруження є найбільшими біля оброблюваної поверхні. Зі збільшенням глибини напруження зменшуються. Глибина залягання напружень стиску є більшою за товщину зміцненого шару. Поблизу поверхні спостерігаються напруження стиску, які потім переходять у напруження розтягу. Перехід розташований за межею білого шару по основному металу. Після оброблення з використанням мінеральної оливи залишкові напруження є меншими за величиною і глибиною залягання, ніж після оброблення з мінеральною оливою і полімервмісними добавками, але характер розподілу напружень є подібний. Для з'ясування впливу часу витримки на зміну залишкових напружень зразки витримували в приміщенні лабораторії протягом 1,5 року. Встановлено, що час витримки приводить до незначної зміни залишкових напружень, характер їх розподілу зберігається і показує про високу стабільність напруженого стану зміцнених білих шарів з

застосуванням мінеральної оливи з полімервмісними додатками вони поширюються на більшу глибину і більші за величиною, у порівнянні з напруженнями, отриманими під час зміцнення із застосуванням мінеральної оливи. Біля поверхні вони невеликі за величиною, але із збільшенням глибини напруження зростаються, переходять через максимум, а потім зменшуються. Така ж картина спостерігається і при зміцненні зразків зі сталі У8А після гартування і низького та високого відпуску. Найбільші напруження виникають на зразках після гартування і низького відпуску, дещо менші після зміцнення зразків після гартування і високого відпуску. Слід відмітити, що на величину залишкових напружень впливає структурний стан вихідного металу, але характер їх розподілу майже однаковий.

нанокристалічною структурою.

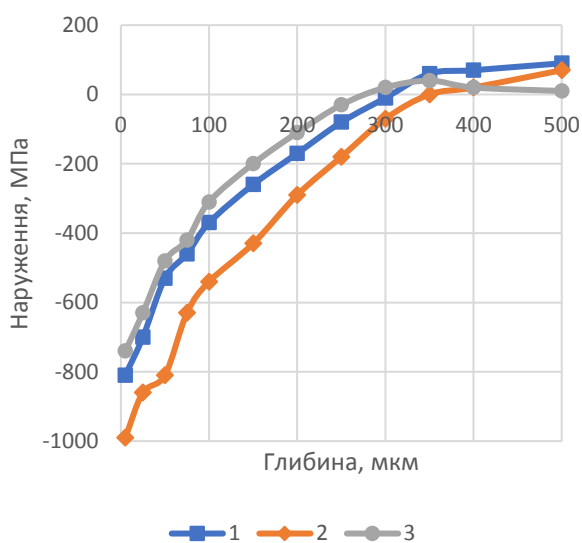


Рисунок 19 – Залишкові напруження першого роду, отримані на сталі 45 (гартування і низький відпуск) після фрикційного зміцнення: 1 – у мінеральному маслі; 2 – у мінеральній оліві з полімервмісними додатками; 3 – після зміцнення і витримки 1,5 року

деталей і складання виробів.

Контактна взаємодія поверхонь деталей визначає фактичну площу контакту, контактну жорсткість, величину локальних напружень, умови утворення оливої плівки та інші фактори, які впливають на експлуатаційні характеристики деталей машин. На контактну взаємодію суттєво впливають мікрогеометрія, фізичні та механічні характеристики контактуючих поверхонь, такі як фактична площа контакту, яка залежить від форми, розмірів одиничних виступів, а також їх розподілу (крива несучої здатності), максимального тиску та характеру контакту.

Проскановані поверхні зразків після оброблення різними інструментами, досліджена топографія, побудовані 3D-моделі оброблених поверхонь, профілі хвилястості й шорсткості у поздовжньому та поперечному напрямках, гістограми розподілу площ за виступами і западинами, гістограми площ точкових виступів і западин, параметри кривої несучої здатності поверхні з визначенням площ і об'ємів виступів та западин та спектрів повторюваності піків на поверхнях з визначенням величини, кроку та кутів нахилу піків виступів, параметрів ізотропії оброблюваних поверхонь.

Аналіз топографії обробленої поверхні інструментом з різнонаправленими пазами показав, що параметри стереометрії даної поверхні мають найменші значення, висота піків складає не більше 13 мкм. Оброблена поверхня має піки, які більш рівномірно розташовані по поверхні (рис. 20).

Хвилястість поверхні, як у поперечному напрямку, так і у поздовжньому напрямку є не чітко вираженою у порівнянні з обробкою іншими інструментами. У

Залишкові напруження, отримані на плоских поверхнях, суттєво відрізняються від напружень, сформованих після оброблення циліндричних поверхонь. На циліндричних поверхнях біля обробленої поверхні формуються максимальні напруження стиску, які з глибиною зменшуються. Біля обробленої плоскої поверхні залишкові напруження є невеликими. Зі збільшенням глибини вони збільшуються, переходять через максимум і поступово знижуються.

Експлуатаційні властивості деталей машин залежать від параметрів якості контактуючих поверхонь і поверхневого шару, які визначаються геометричними (макрорівності, хвилястість, шорсткість) і фізичними й механічними (мікротвердість, залишкові напруження, структура, текстура) характеристиками та взаємним розташуванням мікронерівностей на контактуючих поверхнях. Вказані параметри залежать від технології обробки поверхонь де-

поперечному напрямку чіткість є більше вираженою у порівнянні з поздовжнім напрямком. У поперечному напрямку до напрямку обробки висота хвилястості складає біля 3-4 мкм.

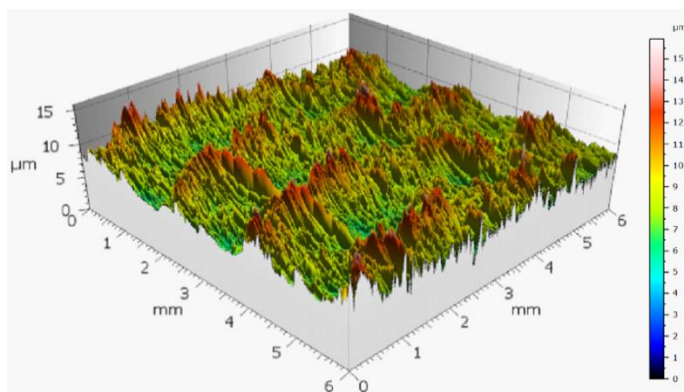


Рисунок 20 – Топографія обробленої поверхні після фрикційної обробки інструментом з різнонаправленими пазами

У даному випадку крок є змінним і складає 1,5-2 мм та є доволі меншим за величину поперечної подачі, з якою проводили процес фрикційної обробки зразків. У поздовжньому напрямку хвилястість немає чіткого виявлення кроку, вона більше відноситься до параметрів шорсткості (рис. 21). Формування параметрів якості обробленої поверхні під час оброблення інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею відбувається за рахунок складного руху деформування зони контакту інструмент-деталь.

Зона контакту деформується у напрямку, який співпадає з напрямком обертання інструмента, а також за синусоїдою. Складне деформування металу в різні сторони у зоні контакту інструмент-деталь формує відповідний профіль обробленої поверхні.

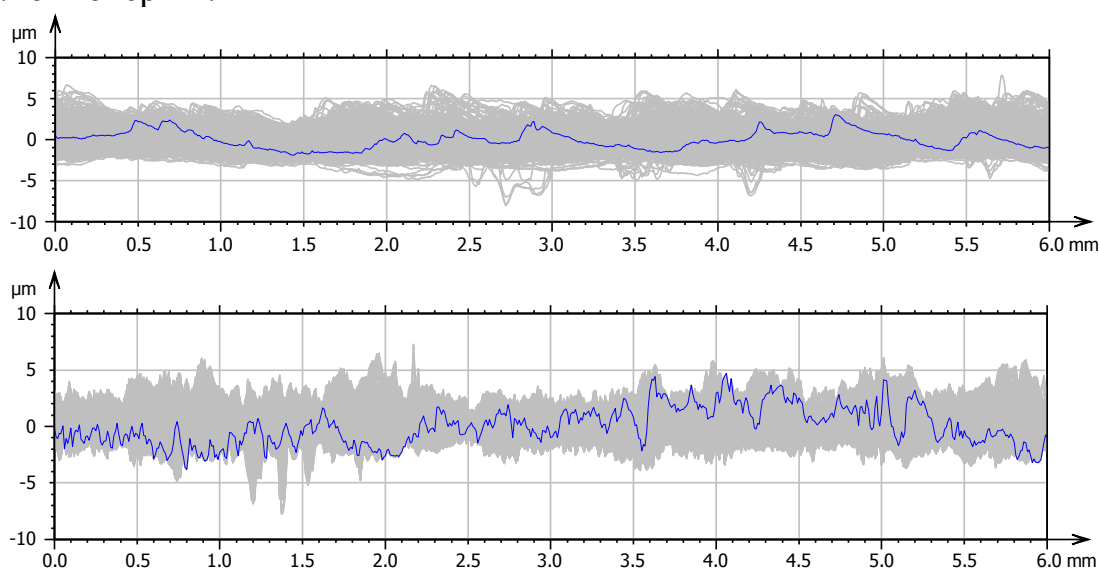


Рисунок 21 – Хвилястість обробленої поверхні у поперечному (а) і поздовжньому (б) напрямках після фрикційного оброблення інструментом з хвилеподібною робочою поверхнею

Одним з важливих параметрів якості обробленої поверхні, який визначає стереометричні параметри, є її несуча здатність. Дана крива характеризує поведінку розглядуваної поверхні у процесі тертя. Вона визначає реальну площу поверхні, яка є на різній глибині деформованого профілю. Січні площини проведені на певних глибинах, дозволяють визначити реальну площу контакту поверхонь, а також визначити об'єм, який займає матеріал металу та порожнечі. На основі отриманих результатів будують криві несучої здатності оброблених поверхонь.

На кривій несучої здатності поверхні є три характерні ділянками: перша –

ділянка виступів з великою висотою, які зношуються під час припрацювання контактуючих поверхонь пари тертя; друга – ділянка виступів середньої висоти, які є основою профіля та визначають несучу здатність поверхні, впливає на довговічність досліджуваної поверхні у процесі тертя та величину допустимого зношування пари у цілому; третя – ділянка впадин, глибина яких характеризує можливість утримувати оливи на поверхні. За кривою несучої здатності поверхні оцінюються процеси припрацювання і зношування контактуючих поверхонь пар тертя. Оцінюється як площа так і об'єм оливних кишень, у яких може знаходитись і утримуватись олива, що є дуже важливим чинником у процесі тертя.

Після оброблення інструментами з різною формою робочої поверхні визначали висоту виступів Spk на кривій несучої здатності, величину нахилу кривої Sk , глибину впадин Svk (рис. 22). Також визначали величину об'єму піків Vmp на досліджуваній поверхні несучої здатності, об'єму матеріалу Vmc , об'єм порожнин Vvc та Vvv .

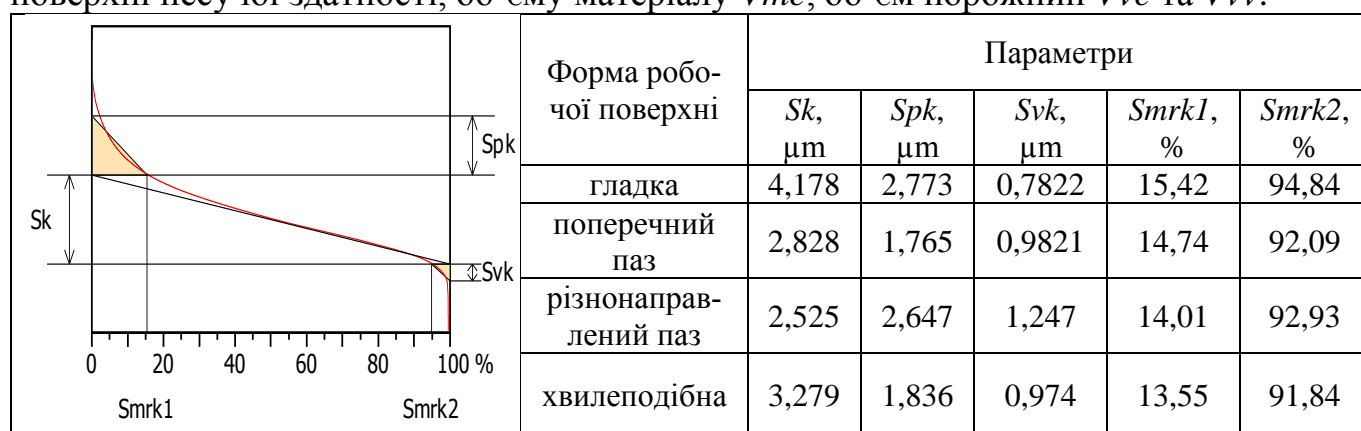


Рисунок 22 – Параметри кривої несучої здатності після фрикційного оброблення поверхонь інструментом з різною робочою поверхнею

Величина нахилу кривої Sk визначає стабілізований період роботи пари тертя. Чим менше значення цього кута, тим більшу довговічність має дана поверхня. Нахил кривої під меншим кутом показує, що реальна площа контакту поверхні є більшою, відповідно буде меншим питоме навантаження у зоні тертя. За таких умов буде зменшуватися температура на контактуючих поверхнях пари тертя і відповідно буде зменшуватися інтенсивність зношування контактуючих тіл. Проведені дослідження показали, що найкращі параметри кривої несучої здатності поверхні отримані після оброблення інструментом з різнонаправленими пазами (ширина пазу 9 мм), що підтверджено експериментальними дослідження на зношування.

Проведені дослідження показали, що під час фрикційного оброблення циліндричних зразків, виготовлених зі сталі 40ХН (гартування і низький відпуск) інструментом з поперечними пазами на робочій поверхні при використанні як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками зі збільшенням глибини притискання t нормальна P_y і тангенціальна P_z складові сили різко зростають (рис. 23).

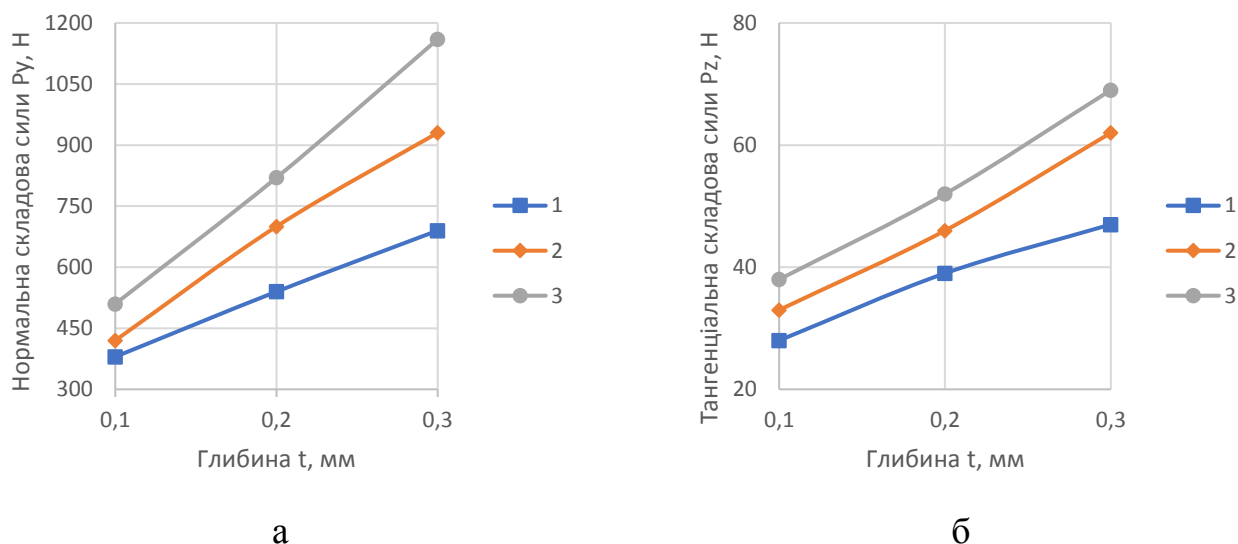


Рисунок 23 – Залежність складових сили дії нормальної P_y (а) та тангенціальної P_z (б) в зоні контакту інструмент-деталь від глибини притискання t під час оброблення сталі 40ХН ($S = 0,3$ мм/об.): 1 – $n_{det} = 40$ об/хв; 2 – $n_{det} = 63$ об/хв; 3 – $n_{det} = 125$ об/хв.

Збільшення значень поздовжньої подачі S інструмента відносно оброблюваної деталі приводить до значного збільшення нормальної P_y і тангенціальної P_z складових сили дії в зоні контакту інструмент-деталь. Наступне збільшення частоти обертання деталі n_{det} , приводить до ще більшого впливу режимів оброблення на нормальні P_y і тангенціальні P_z складові сили дії, які виникають у зоні контакту інструмент-деталь. Під час оброблення з невеликими величинами поздовжньої S подачі та притискання t , а саме – $S = 0,3$ мм/об та $t = 0,1$ мм зі збільшенням величини частоти обертання деталі від $n_{det} = 40$ об/хв до 80 об/хв складові сили дії не значно зростають. У даному випадку нормальна складова сили збільшується від $P_y = 470$ Н до 720 Н, а тангенціальна – від $P_z = 37$ Н до 54 Н.

Фрикційне оброблення застосовується як фінішна операція обробки деталей машин, тому точність виготовлення робочих поверхонь повинна бути забезпечена відповідним чином. Проведені експерименти показали, що на величину усадки металу значно впливають режими фрикційного оброблення і структурний стан вихідного металу. Так, збільшуючи величину притискання інструмента до деталі t величина зменшення розміру деталі (усадка металу) збільшується (рис. 24).

На величину усадки металу значно впливає вихідний структурний стан металу та форма робочої поверхні інструмента. Найбільша величина усадки металу отримана після фрикційного оброблення зразків, які попередньо пройшли гартування і високий відпуск, інструментом з гладкою робочою частиною. Після оброблення зразків, які попередньо були гартовані з низьким відпуском, інструментом з пазами на робочій частині, мають найменшу усадку металу і відповідно точність таких поверхонь є найкращою і збільшується товщина зміцненого шару. При наступному збільшенні величині притискання більше за 0,5 мм величина усадки металу різко зростає, а товщина зміцненого шару збільшується незначно. На величину усадки металу значно впливає форма робочої поверхні інструмента та метод подачі технологічного середовища у

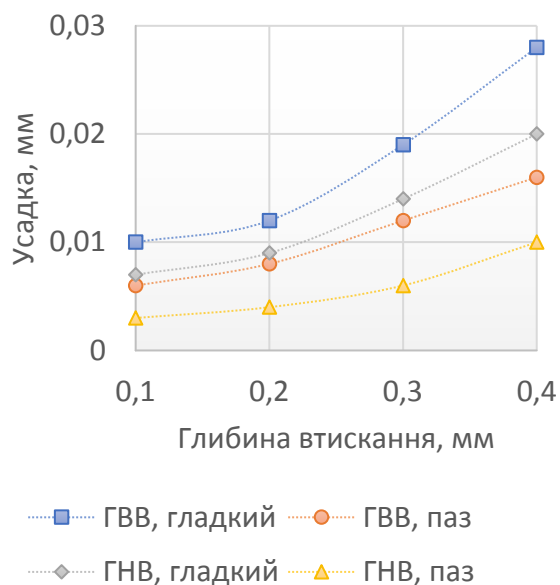


Рисунок 24 – Залежність усадки металу зразка (зменшення розміру) від глибини втискання та вихідного структурного стану

$$\delta = 0,058 \cdot v^{2.02-0.81 \ln(v)} \cdot t^{-5.25-1.78 \ln(t)} \cdot l_p^{1.39} \quad (25)$$

Аналізуючи отриману математичну модель, можна представити, що зміцнений шар максимальної товщини отримується під час оброблення зі швидкістю переміщення деталі біля 4 м/хв. Розміри пазу значно впливають на товщину зміцненого шару. Зі збільшенням ширини пазу товщина зміцненого збільшується, досягає найбільшій значень, а потім починає зменшуватися (рис. 25).

Зміцнений шар з нанокристалічною структурою найбільшої товщини формується під час оброблення інструментом, ширина пазу якого є в межах 8-10 мм. Подальше збільшення ширини пазу є не бажаним, так як зменшується товщина шару. Дані результати узгоджуються з результатами, отриманими під час моделювання параметрів термопружності, які покази, що зі збільшенням ширини пазу більше 10 мм починає зменшуватися температура на оброблюваній поверхні. Використання інструмента з пазом більшої ширини не забезпечує достатньої кількості теплоти для формування зміцненого шару великої товщини.

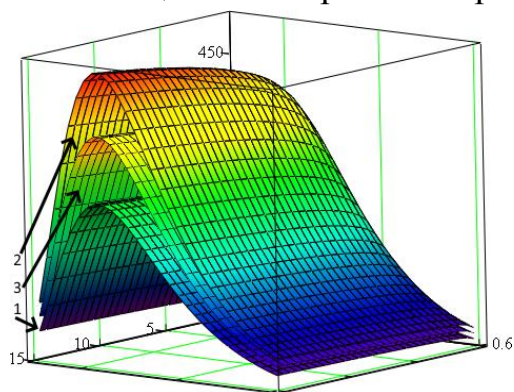


Рисунок 25 – 3-D графік поверхні визначення товщини зміцненого шару, який формується під час фрикційного оброблення: 1 – $V = 2$ м/хв; 2 – $V = 4$ м/хв; 3 – $V = 6$ м/хв.

нічних властивостей поверхневого шару, а також параметрів стану робочих поверхонь деталей, які формуються на фінішних операціях виготовлення деталей. У

зону оброблення. У даному випадку найменшу усадку металу отримали під час оброблення інструментом з різнонаправленими пазами і подачею технологічного середовища безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь.

Розроблено математичну модель на основі математичного планування експерименту визначення товщини зміцненого шару під час фрикційного оброблення середньуглецевих сталей (гартування і низький відпуск) інструментом з пазами і подачею технологічного середовища (мінеральна олива з полімервмісними добавками) безпосередньо у зону контакту.

Математична модель зміни товщини зміцненого шару представлена рівнянням:

процесі зношування деталей машин відбувається руйнування поверхневого шару. На контактну взаємодію поверхонь деталей значно впливає фактична площа контакту, контактна жорсткість, значення локальних напружень, умови формування оливої плівки і інші параметри. Зносотривкість і контактна міцність поверхневих шарів, в основному, залежать від параметрів якості шару таких, як його товщина, мікротвердість та величина і знак залишкових макронапружень, структура, текстура, розмір зерна тощо.

Дослідження зносотривкості пари сталь 40ХН – чавун СЧ20 проводили при терті без мащення за схемою «кільце-кільце». Швидкість ковзання змінювали від 0,2 м/с до 4 м/с. Навантаження на зразки регулювали в межах від 0,1 МПа до 1,5 МПа. Експериментальні дослідження показали, що опір зношуванню пари сталь 40ХН – чавун СЧ20 при терті ковзання без мащення суттєво підвищується для усіх пар після фрикційної обробки зразків, виготовлених зі сталі 40ХН (гартування і низький відпуск) з використанням інструментів з різною робочою частиною (рис. 26).

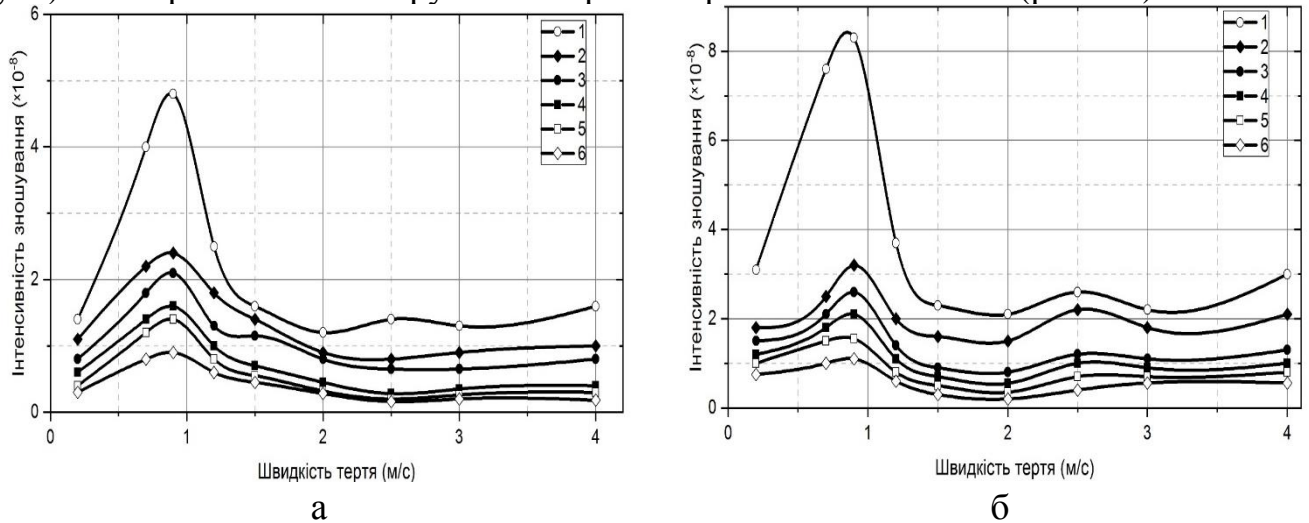


Рисунок 26 – Кінетика зношування пари сталь 40ХН – чавун СЧ20 при терті без мащення зразка (а) та контрзразка (б) після фрикційного оброблення інструментом ($P = 1$ МПа): 1 – вихідна; 2 – гладкою робочою поверхнею; 3 – з поперечним пазом; 4 – з різнонаправленими пазами і подачею середовища методом поливу; 5 – з різнонаправленими пазами і подачею середовища через корпус інструмента; 6 – з легуванням міддю

Максимальний ефект підвищення зносотривкості деталей пар тертя спостерігається після фрикційного оброблення інструментами з різною робочою частинами і різними видами подачі технологічного середовища у зону обробки поверхонь ковзання зразків у порівнянні з незміцненою парою при низьких швидкостях ковзання 0,8-1 м/с. Так, підвищення зносотривкості зразків після фрикційної обробки інструментом з гладкою робочою частиною складало біля 2,1 разів у порівнянні з незміцненою парою. Після фрикційної обробки інструментом з поперечними пазами і подачею технологічного середовища у зону обробки методом поливу підвищення зносотривкості у порівнянні з незміцненою парою складає 2,3 рази. Ще більше підвищення зносотривкості (3 рази) отримано після фрикційної обробки інструментом з різнонаправленими пазами на робочій поверхні і подачею технологічного середовища у зону

обробки методом поливу. Використання подачі технологічного середовища через корпус інструмента з різнонаправленими пазами безпосередньо у зону контакту сприяє ще більшому підвищенню зносотривкості зміцненої пари тертя у порівнянні з незміцненою парою. У даному випадку підвищення зносотривкості складає біля 3,5 раз. Найбільше підвищення зносотривкості отримано після фрикційного оброблення інструментом з різнонаправленими пазами з внутрішньою подачею технологічного середовища і легування міддю і складає біля 5,4 разів.

Дослідження показали, що фрикційне оброблення суттєво підвищує опір зношуванню при терті з граничним мащенням (рис. 27). При малих швидкостях ковзанням $V = 0,2$ м/с підвищення опору зношуванню досягає 2,2-2,5 разів. Зі збільшенням швидкості ковзанням ефект фрикційного зміцнення збільшується. Найбільше підвищення опору зношуванню спостерігається при швидкості ковзанням $V = 1,5$ м/с і складає 2,9-3,2 разів. Зносотривкість зразків після фрикційного зміцнення інструментом з поперечними пазами дещо вища у порівнянні зі зразками зміцненими інструментом з гладкою робочою частиною. Характер зношування незміцнених контрзразків, які працювали у парі зі зміцненими зразками, такий самий, як і зміцнених.

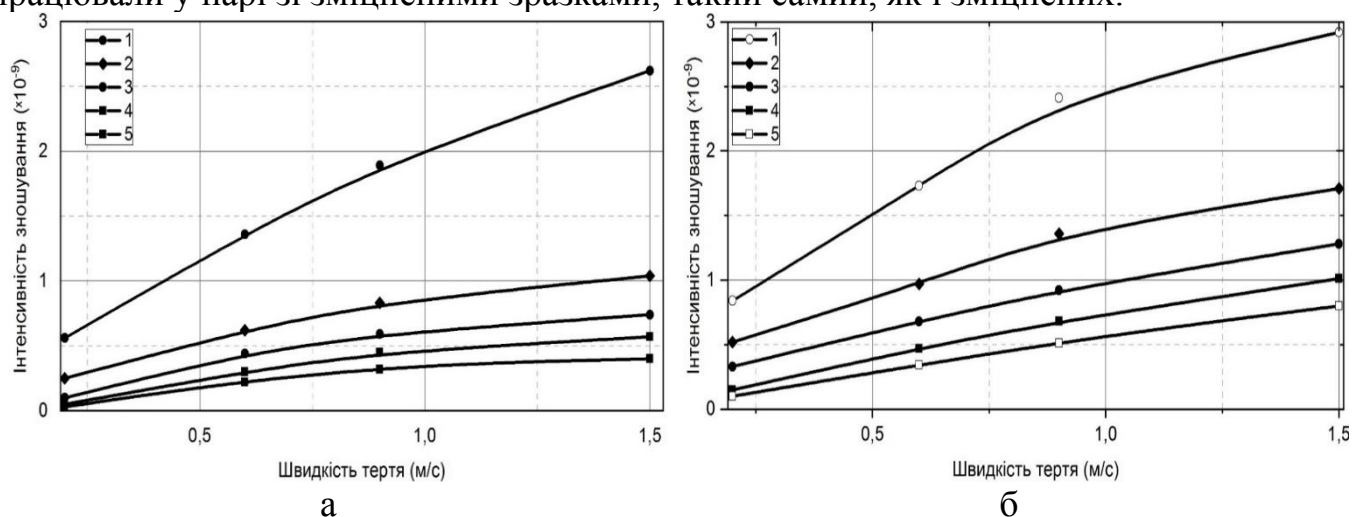


Рисунок 27 – Кінетика зношування пари сталь 45 (ГНВ) – сталь 45 (ГНВ) при терті з граничним мащенням зразка (а) та контрзразка (б) ($P = 1$ МПа) фрикційне оброблення, інструмент: 1 – незміцнені; 2 – з гладкою робочою поверхнею; 3 – з поперечними пазами; 4 – з різнонаправленими пазами і подачею середовища методом поливу; 5 – з різнонаправленими пазами і подачею середовища безпосередньо у зону контакту

Дослідження показали, що фрикційне оброблення значно підвищує опір зношуванню пар сталь-чавун під час тертя у оливо-абразивному середовищі. Так, при випробуваннях на зносотривкість при питомому навантаженні 4,5 МПа і швидкості ковзання 0,9 м/с, величина зношування зміцнених кілець, виготовлених зі сталі 45 (гартування і низький відпуск) зменшилася у 2,7 разу, а після високого відпуску – у 3 рази у порівнянні з такими ж незміцненими кільцями. Найбільшу зносотривкість показала пара тертя у якої кільця були зміцнені інструментом з подачею технологічного середовища безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь. Характерно відмітити, що величина зношування незміцнених вкладок, виготовлених із сірого чавуну, які працювали в парі зі зміцненими кільцями, зменшилася майже у стільки ж разів.

Експерименти показали, що фрикційне оброблення суттєво підвищує опір

контактному втомному руйнуванню сталей. Оброблення інструментом з гладкою робочою поверхнею сталі У8А (гартування і низький відпуск) підвищує опір контактному втомному руйнуванню у 1,4 разу, а при зміцненні інструментом з різнонаправленими пазами на робочій поверхні збільшення довговічності досягає 1,6 разів (рис. 28).

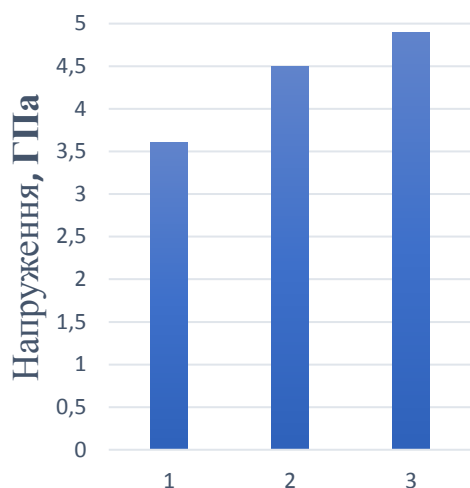


Рисунок 28 – Контактна втома ($5 \cdot 10^7$ циклів) зміцнених шарів з нанокристалічною структурою, отриманих на зразках зі сталі У8: 1 – незміцнені зразки; 2 – інструментом з гладкою робочою поверхнею; 3 – інструментом з різнонаправленими пазами

масивних деталях. Розроблені технологічні процеси для зміцнення циліндричних поверхонь напрямних штампів прес-форм, робочих поверхонь кілець струмоznімачів для роторних вентиляторів сушил цегельних заводів, плоских поверхонь напрямних спеціального обладнання для штампа обрубки полоси решіткового настилу, роликів накатних головок для формування профілю дроту решіткового настилу, а також робочих поверхонь рухомих ножів соломоподрібнювача зернозбирального комбайна «CLAAS».

Підвищення опору втомному руйнуванню під час контактної навантаження зразків після фрикційного оброблення можна пояснити тим, що зміцнені білі шари з нанокристалічною структурою мають підвищену твердість і одночасно більшу в'язкість, ніж основна структура металу.

Проведені дослідження показали, що фрикційне оброблення з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками значно підвищує опір малоциклового втомному руйнуванню зразків зі сталі 45 (гартування і низький відпуск) як при низьких так і високих деформаціях. Фрикційне оброблення зразків з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи підвищує опір малоциклового втомному руйнуванню тільки за низьких деформацій ($\epsilon < 0,5 \%$). За високих деформацій ($\epsilon > 0,5 \%$), навпаки, знижується.

Представлені розроблені і впроваджені технологічні процеси формування зміцнених поверхневих шарів з нанокристалічною структурою на

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішена важлива і актуальна науково-прикладна проблема підвищення ефективності процесу фрикційної обробки за рахунок цілеспрямованої зміни форми робочої поверхні інструмента, подачі технологічного середовища безпосередньо у зону обробки та обґрунтованого призначення режимів обробки, що забезпечило формуванню зміцнених шарів з нанокристалічною структурою, істотне покращання точності і якості оброблених поверхонь деталей машин і підвищення експлуатаційних

властивостей.

1. Подальшого розвитку набули наукові основи забезпечення формування зміцнених шарів з нанокристалічною структурою на масивних деталях машин, які доповнені новими підходами з додаванням циклічних, високочастотних динамічних навантажень оброблювальної поверхні та подачі спеціального технологічного середовища у зону контакту інструмент-деталь та врахуванням термопружного стану у поверхневих шарах.

2. Вперше запропоновано новий технологічний метод фінішної обробки плоских та циліндричних поверхонь деталей машин для формування зміцнених поверхневих шарів з нанокристалічною структурою за рахунок поєднання оброблення з використанням висококонцентрованих джерел енергії та інтенсивного деформування зони контакту інструмент-деталь.

3. Вдосконалено математичну модель термопружного стану поверхневих шарів оброблюваних зразків у процесі фрикційного оброблення інструментом з перервною робочою поверхнею, яка дозволяє визначати розподіл температури та швидкість її зміни за глибиною, величину теплового потоку і напруження та зміну їх значень за глибиною, швидкість навантаження оброблюваної поверхні. Отримано, теоретичні результати швидкостей нагрівання і охолодження металу на оброблюваній поверхні та у поверхневому шарі металу під зоною контакту інструмент-деталь. Швидкість нагрівання зони контакту складає $5 \cdot 10^5$ К/с- $1,5 \cdot 10^6$ К/с, швидкість охолодження зони контакту під час проходження над нею пазу інструмента складає $4 \cdot 10^5$ К/с- $1 \cdot 10^5$ К/с. З глибиною шару швидкості нагрівання і охолодження металу зменшується.

4. Розроблено математичні і імітаційні моделі тримасових коливальних систем динамічних процесів під час фрикційного оброблення циліндричних і плоских поверхонь деталей інструментами з перервною робочою поверхнею. Визначено на основі розв'язку імітаційної моделі частоту ударних навантажень зони контакту інструмента з оброблюваною поверхнею, що має на робочій частині пази, ширина та кількість яких змінна при моделюванні.

5. Розроблено математичні та імітаційні моделі у середовищі Mathcad визначення АЧХ процесу перервного фрикційного оброблення плоских та циліндричних поверхонь деталей машин. Визначено кількість пазів, які розташовані на периферії інструмента, що вводять динамічну систему у явище резонансу (для плоскошліфувального верстату – 7...12 пазів; для токарного верстата – 8...10 пазів).

6. Встановлено, що під час фрикційного оброблення інструментом з перервною робочою поверхнею та з використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками і подачі його безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь (використовуючи інструмент з внутрішньою подачею середовища) зі збільшенням ширини пазу збільшується товщина зміцненого шару (у 1,4-1,5 разів) і його твердість (у 1,2-1,3 разів). Також збільшується насичення поверхневого шару металу вуглецем. Максимальний вміст вуглецю біля оброблюваної поверхні на зразках зі сталі 45 складав біля 2 мас. %.

7. Експериментально встановлено що, збільшення моди деформації за рахунок використання інструмента з різнонаправленими пазами приводить до зменшення розміру зерна зміцненого шару. Так, після оброблення інструментом з

різнонаправленими пазами на робочій частині розмір зерна біля обробленої поверхні складав $8,6 \pm 0,6$ нм.

8. Використання інструментів з перервною робочою поверхнею зменшує параметри стереометрії оброблюваних поверхонь, зменшуються параметри шорсткості, хвилястості. Покращуються параметри кривої несучої здатності, що суттєво впливає на процеси тертя та зношування. Швидше проходить припрацювання пар тертя, збільшені оливкові кишені, збільшується питома площа контакту, що підтверджується експериментальними дослідженнями зносотривкості.

9. Проведені експериментальні дослідження показали, що фрикційне оброблення інструментом з перервною робочою поверхнею, використанням як технологічне середовище мінеральної оливи з полімервмісними добавками і подачею його через корпус інструмента безпосередньо у зону контакту інструмент-деталь підвищують зносотривкість під час різних видів тертя (без мащення, з граничним мащенням, у оливо-абразивному середовищі) у 1,5-3,3 разів у залежності від умов тертя у порівнянні зі зразками, зміцненими інструментом з вузькими пазами і подачею технологічного середовища методом поливу. Підвищується опір втомному контакту руйнуванню у 1,4-1,6 разів, а також опір малоцикловому втомному руйнуванню тільки за низьких деформацій ($\epsilon < 0,5$ %). За високих деформацій ($\epsilon > 0,5$ %), навпаки, дещо знижується.

10. На основі проведеного комплексу теоретичних і експериментальних досліджень представлено інженерні рекомендації відносно використання методу фрикційного оброблення для формування на робочих поверхнях деталей машин зміцненого поверхневого шару з нанокристалічною структурою. Розроблено технологічні процеси зміцнення циліндричних поверхонь напрямних штампів пресформ; робочих поверхонь кілець струмознімачів для роторних вентиляторів сушил цегельних заводів, які працюють в умовах підвищених температур (90-130°C); плоских поверхонь напрямних спеціального обладнання для штампа обрубки смуги решіткового настилу; роликів накатних головок для формування профілю дроту решіткового настилу. Також розроблені технологічний процес та обладнання для зміцнення робочих поверхонь рухомих ножів соломоподрібнювача зернозбирального комбайна «CLAAS». Дослідно-промислові випробування показали, що фрикційне зміцнення робочих поверхонь деталей машин підвищує їх довговічність у 1,3-1,6 разів у порівнянні з незміцненими.

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі на кафедрі робототехніки і інтегрованих технологій машинобудування Національного університету «Львівська політехніка».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях, що включені до наукометричної бази даних Scopus

1. Hurey I. Wear resistance of hardened nanocrystalline structures in the course of friction of steel-grey cast iron pair in oil-abrasive medium / I. Hurey, T. Hurey, V. Gurey. // Lecture notes in mechanical engineering. Advances in design, simulation and manufacturing II. – 2019. Vol. 1. – P. 572–580. (https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_57) (Автору належить мета дослідження, проведення експериментів та опрацювання отриманих даних)
2. Gurey V. The effect of the hardened nanocrystalline surface layer on durability of guideways / V. Gurey, I. Hurey. // Lecture Notes in mechanical engineering. advanced manufacturing processes. Selected papers from the Grabchenko's international conference on advanced manufacturing processes (InterPartner-2019). – 2019. Vol. 1. – P. 63–72. (https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_7) (Автору належить мета дослідження, проведення експериментів та опрацювання отриманих даних)
3. Gurey V. Influence of surface hardened nanocrystalline layers on the resistance of contact fatigue destruction / V. Gurey, I. Hurey. // Lecture notes in mechanical engineering. Advances in design, simulation and manufacturing III. – 2020. – Vol. 1. – P. 483–491. (https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_47) (Автору належить мета дослідження, проведення експериментів та опрацювання отриманих даних)
4. Maksymiv O.V. Influence of the surface nanostructuring of 65G steel on the wear resistance of the disks of furrow openers of seeding machines / O.V. Maksymiv, V.I. Kyryliv, V.P. Chaikovskiy, B.R. Tsizh, A.M. Kostruba, V.I. Hurei. // Materials Science. – 2021. – Vol. 56. – P. 523–529 (<https://doi.org/10.1007/s11003-021-00459-9>) (Автору належить проведення експериментів та опрацювання отриманих даних)

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

5. Hurey I. The research in to components of friction force tool part during friction hardening of plate steel faces / I. Hurey, V. Gurey, P. Dmyterko, B. Robert. // Advances in manufacturing science and technology. – 2014. – N. 3. – P. 56–64. (наукометрична база EBSCO, Ulrich's periodicals, Index Copernicus) (Автору належить мета дослідження, проведення експериментів та опрацювання отриманих даних)
6. Hurey I. Wpływ szlifowania ściernicą z diamentu i CBN na trwałość stali 1H12N2MVFBА / I. Hurey, V. Gurey. // Mechanik. – 2015. – N. 8-9. – S. 132–134. (наукометрична база VazTech, ICI Journals Master List, Index Copernicus) (Автору належить мета дослідження, проведення експериментів та опрацювання отриманих даних)
7. Hurey I. The effect of nanocrystalline layers on the wear resistance of grey cast iron during friction in an oil-abrasive medium / I. Hurey, T. Hurey, V. Gurey. // Tribologia. – 2018. – 282 (6). – P. 37–42 (наукометрична база Index Copernicus) (Автору належить мета дослідження, проведення експериментів та опрацювання отриманих даних)
8. Gurey V. Mathematical model of the thermoelasticity of the surface layer of parts during discontinuous friction treatment / V. Gurey, H. Shynkarenko, I. Kuzio. // Lecture notes in mechanical engineering. Advanced in Design, Simulation and Manufacturing IV. –

2021. – Vol. 2. – P. 12–22 (https://doi.org/10.1007/978-3-030-77823-1_2) (Автору належить теоретичні дослідження термопружних параметрів поверхневого шару металу, представлено узагальнюючі результати досліджень)

Розділ монографії

9. Гурей И. Формирование нанокристаллического поверхностного слоя в процессе фрикционного упрочнения / И. Гурей, В. Гурей, Т. Гурей, Я. Бурек. // *Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografia. Gorzów Wlkp.-Poznań*. – 2014. – S. 190–200. (наукометрична база *Index Copernicus*) ISBN 978-83-64249-17-4 (Автору належить мета досліджень та опрацювання даних, формування висновків)

Статті у наукових фахових виданнях України

10. Гурей І.В. Формування нанокристалічного зміцненого шару деталей машин під час фрикційного зміцнення / І.В. Гурей, В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко. // *Прогресивні технології і системи машинобудування. Міжнародний збірник наукових праць*. – 2013. – Вип. 1,2 (46). – С. 98–106. (Автору належить мета досліджень, металографічні дослідження та опрацювання отриманих даних)

11. Гурей І.В. Моделювання гіроскопічних процесів під час фрикційного зміцнення деталей машин / І.В. Гурей, В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко // *Вісник НУ «ЛП» Серія “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні”*. – 2013. – Вип. 760. – С. 14–18. (Автору належить побудова розрахункової схеми та диференціальних рівнянь)

12. Hurey I. Simulation model of dynamic processes during friction hardening of the flat surfaces / I. Hurey, V. Gurey, P. Dmyterko. // *Вісник НУ «ЛП» Серія “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні”*. – 2013. – Вип. 772. – С. 80–85. (Автору належить формування розрахункової схеми та динамічної моделі пружної системи верстата при фрикційному обробленні)

13. Гурей І.В. Вплив нанокристалічного зміцненого шару на зносостійкість сірого чавуну при терті з граничним мащенням / І.В. Гурей, В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко. // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2014. – Вип. 9. – С. 23–32 (наукометрична база *Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)*) (Автору належить постановка мети та проведення експериментальних досліджень з опрацюванням даних)

14. Gurey V. Mathematical model of dynamic processes during frictional hardening of flat surfaces / V. Gurey, V. Korendiy, P. Dmyterko. // *Вісник НУ «ЛП» Серія “Динаміка, міцність та проектування машин і приладів”*. – 2014. – Вип. 788. – С. 79–85. (Автору належить формування розрахункової схеми та динамічної моделі пружної системи верстата при фрикційному обробленні)

15. Гурей І.В. Теоретичне визначення термонапруженого стану під час фрикційного зміцнення / І.В. Гурей, В.І. Гурей // *Сучасні технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць*. – Харків НТУ «ХПІ». – 2016. – Вип. 11. – С. 42–48. (наукометрична база *Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)*) (Автору належить теоретичні дослідження термопружних параметрів поверхневого шару металу)

16. Gurey V. Wear resistance of strengthened layers with nanocrystalline structure

in friction with boundary lubrication / V. Gurey. // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. – 2020. – Vol. 6, No. 1. – P. 83–90. (наукометрична база *Index Copernicus*) (<https://doi.org/10.23939/ujmems2020.01.083>)

17. Гурей В.І. Моделювання амплітудно-частотної характеристики процесу фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей машин / В.І. Гурей. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Харків НТУ «ХПІ». – 2020. – Вип. № 2. – С. 30–35 (наукометрична база *Index Copernicus*) (<https://doi.org/10.20998/2078-9130.2020.2.219636>)

18. Gurey V. Simulation modelling of dynamic processes due discontinuous frictional treatment of the flat surfaces / V. Gurey. // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. 2020. – Vol. 6, No. 2 – P. 23–33. (наукометрична база *Index Copernicus*)

19. Гурей В.І. Моделювання амплітудно-частотної характеристики фрикційного зміцнення циліндричних поверхонь деталей машин / В.І. Гурей. // Наукові нотатки. Луцький національний університет. 2020. – № 70. – С. 82–89. (наукометрична база *Index Copernicus*)

20. Gurey V. Mathematical model of dynamic processes during frictional hardening of the cylindrical surfaces of parts / V. Gurey; I. Kuzio. // Scientific Journal of TNTU. – Ternopil: TNTU, 2020. – Vol. 100, No. 4. – P. 29–39. (наукометрична база *Index Copernicus*). (Автору належить формування розрахункової схеми та динамічної моделі пружної системи верстата при фрикційному обробленні)

21. Gurey V. Topography of the strengthened cylindrical surface after frictional continuous treatment / V. Gurey. // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. – 2020. – Vol. 6, No. 3. – P. 9–19. (наукометрична база *Index Copernicus*).

22. Гурей В.І. Дослідження складових сил під час фрикційного зміцнення циліндричних поверхонь деталей машин / В.І. Гурей. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2020. – №2(49). – С. 81–90.

Патенти України

23. Інструмент для отримання наноструктурних зміцнених поверхневих шарів деталей машин: пат. 134389 Україна, МПК (2019.01) В24В 7/00, В82У 30/00 / Гурей І.В., Гурей В.І., Гурей Т.А., Кирилів В.І. – № u201812892; заявл. 26.12.18; опубл. 10.05.19, Бюл. 9. (Автором проведено патентний аналіз, експериментальні дослідження)

24. Інструмент для поверхневої наноструктуризації плоских, торцевих і циліндричних поверхонь: пат. 146839 Україна, МПК (2021.01) В24В 39/00, В82У 30/00 / Кирилів В.І., Чайковський Б.П., Максимів О.В., Ціж Б.Р., Гурей В.І. – № u202006884; заявл. 27.10.20; опубл. 24.03.21, Бюл. 12/2021. (Автором розроблено 3D-модель та обґрунтовано конструктивне рішення пристрою)

25. Інструмент для легування поверхневих шарів деталей машин: пат. 123883 Україна, МПК (2021.01) В39В 39/00 В24В 39/04 (2006.01) В12Н 5/00 В23Н 5/14 (2006.01) / Гурей І.В., Гурей В.І., Кирилів В.І. – № a201907693; заявл. 08.07.19; опубл. 16.06.21, Бюл. 24. (Автору належить ідея подачі технологічного середовища у зону контакту)

Інші наукові видання

26. Hurey I. Wear resistance of gray cast iron pair after friction hardening / I. Hurey, V. Gurey, T. Hurey, P. Dmyterko. // International scientific conference “Cluster-Casting-Future”. – 2014. – P. 95–98. *(Автору належить мета дослідження, проведення експериментів та опрацювання отриманих даних)*

Публікації у матеріалах наукових конференцій

27. Гурей І.В. Імітаційна модель динамічних процесів під час фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей / І.В. Гурей, В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко. // Збірник наукових праць II-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції, Львів. – 2014. – С. 25.

28. Gurey V. Simulation model of dynamic processer during friction hardening of the flat surfaces / V. Gurey, P. Dmyterko. // Litteris et Artibus : V Міжнародний молодіжний науковий форум : матеріали, 26–28 листопада 2015 р., Львів, Україна. – 2015. – С. 322–326.

29. Гурей І.В. Математичне моделювання точності поверхонь тіл обертання під час їх оброблення / І.В. Гурей, В.І. Гурей. // Збірник наукових праць V-ої науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», Львів. – 2016. – С. 36–38.

30. Гурей І.В. Дослідження якості вторинних структур в зоні тертя зміцнених поверхонь / В.І. Гурей, Т.А. Гурей, Гурей І.В. // Матеріали всеукр. наук.-практ. конф. «Обладнання і технології сучасного машинобудування», Тернопіль. – 2017. – С. 68–69.

31. Гурей В.І. Моделювання траєкторії руху точки контакту інструмент-деталь під час зміцнення диском з гладкою робочою частиною / В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко. // Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць VI Міжнародної науково-практичної конференції, Львів–Звенів (Карпати). – 2017. – С. 35–36.

32. Dmyterko P. Impact of processing modes and parameters of the working part of the instrument on the surface quality of flat parts during high-speed friction hardening / P. Dmyterko, Y. Novitskyu, V. Gurey. // Матеріали конференції: Litteris et Artibus, Lviv. – 2017. – P. 250–251.

33. Гурей Т.А., Гурей В.І., Гурей І.В. Дослідження адсорбційного ефекту під час зношування зміцнених поверхонь / Т.А. Гурей, В.І. Гурей, І.В. Гурей. // Збірник наукових праць III-ої Всеукраїнської науково-практичної конференції «Новітні шляхи створення, експлуатації і сервісу автомобілів» 12-15 вересня 2017 р, Миколаїв-Коблево. – 2017. – С. 18–20.

34. Гурей І.В. Зміна вмісту хімічних елементів у поверхневому шарі під час фрикційного зміцнення деталей машин / І.В. Гурей, Т.А. Гурей, Гурей І.В. // Збірник наукових праць VII-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», Львів. – 2018. – С. 38–40.

35. Гурей І.В. Дослідження малоциклової втомної міцності поверхневих шарів сталевих зразків після фрикційного зміцнення / І.В. Гурей, Т.А. Гурей, В.І. Гурей. // Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво», Краматорськ, 2018. – С. 41–44.

36. Hurey I. Wpływ Utwardzonych Warstw Nanokrystalicznych na odporność na zużycie żeliwa podczas Tarcia w Środku Olejowo – Sciernym / I. Hurey, T. Hurey, V. Gurey. // Problematyka funkcjonowania i rozwoju branży metalowej w Polsce. Innowacje technologiczne : streszczenia wystąpień : V Ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna, 5–6 lipca 2018 r - Jedlina : Radomska Rada Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych NOT. – S. 11.
37. Hurey I. Wear resistance of hardened nanocrystalline structures in the course of friction of steel-grey cast iron pair in oil-abrasive medium / I. Hurey, T. Hurey, V. Gurey. // Advances in design, simulation and manufacturing: The innovation exchange : proceedings of the 2nd International conference, Lutsk, Ukraine, June 11–14, 2019. – Sumy : Sumy University Book. – P. 117.
38. Gurey V. The effect of the hardened nanocrystalline surface layer on durability of guideways / V. Gurey, I. Hurey. // Grabchenko's international conference on advanced manufacturing processes (InterPartner-2019), September 10–13, 2019. Odessa : International Association for technological development and innovation. – P. 41.
39. Gurey V. Influence of surface hardened nanocrystalline layers on the resistance of contact fatigue destruction / V. Gurey, I. Hurey. // Proceedings of the 3rd international conference on design, simulation, manufacturing: The innovation exchange, DSMIE-2020, June 9-12, 2020, Kharkiv. – 2020. – P. 104
40. Гурей В. І. Імітаційне моделювання переміщення осі швидкообертаючого шпинделя верстата під дією гіроскопічних сил / В.І. Гурей, П.Р. Дмитерко, І.В. Кузьо. // Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць ІХ Міжнародної науково-практичної конференції, Львів–Плай (Карпати), 3–7 лютого, 2020 року. – 2020. – С. 66–70.
41. Гурей В.І. Моделювання динамічних процесів під час фрикційної обробки циліндричних поверхонь / В.І. Гурей, І.В. Кузьо // II Міжнародна науково-технічна конференція “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2021”, Вінниця. – 2021.

АНОТАЦІЇ

Гурей В.І. Науково-технологічні основи підвищення якості та експлуатаційних характеристик деталей машин формуванням зміцнених нанокристалічних шарів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування (131 – Прикладна механіка). – Національний університет «Львівська політехніка» МОН України, м. Львів, 2021.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна проблема в області технології машинобудування – розроблення технологічного забезпечення підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин шляхом формування зміцненого поверхневого шару з нанокристалічною структурою на масивних деталях фрикційним обробленням. Вперше запропоновано технологічний метод формування поверхневих шарів з нанокристалічною структурою у якому поєднується їх високошвидкісне нагрівання і охолодження з інтенсивною пластичною деформацією, яка

реалізується використанням інструментів з перервними робочими поверхнями. Розроблені математична модель термопружного стану в поверхневих шарах металу під зоною контакту інструмент-деталь; математичні моделі динамічних процесів під час оброблення плоских і циліндричних поверхонь деталей. Досліджено формування структури, фазового і хімічного стану шарів, параметрів якості оброблених поверхонь і поверхневих шарів, їх вплив на експлуатаційні характеристики, а саме, зносотривкість під час тертя з різними видами мащення і контактному втомному навантаженні. Розроблено і впроваджено у виробництво технологічні процеси поверхневого зміцнення робочих поверхонь деталей машин та технологічного спорядження.

Ключові слова: технологічний процес, фрикційне оброблення, температура, деформація, коливальна система, динамічні процеси, нанокристалічний шар, шорсткість, довговічність, зносотривкість.

Гурей В.И. Научно-технологические основы повышения качества и эксплуатационных характеристик деталей машин формированием упрочненных нанокристаллических слоев. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения (131 – Прикладная механика). – Национальный университет «Львовская политехника» МОН Украины, г. Львов, 2021.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая проблема в области технологии машиностроения - разработка технологического обеспечения повышения эксплуатационных характеристик деталей машин путем формирования упрочненного поверхностного слоя с нанокристаллической структурой на массивных деталях фрикционной обработкой. Впервые предложено технологический метод формирования поверхностных слоев с нанокристаллической структурой в котором сочетается их высокоскоростной нагрев и охлаждения с интенсивной пластической деформацией, которая реализуется использованием инструментов с прерывистыми рабочими поверхностями. Разработанные математическая модель термоупругого состояния в поверхностных слоях металла под зоной контакта инструмент-деталь; математические модели динамических процессов при обработке плоских и цилиндрических поверхностей деталей. Исследовано формирование структуры, фазового и химического состояния слоев, параметров качества обработанных поверхностей и поверхностных слоев, их влияние на эксплуатационные характеристики, а именно, износостойкость при трении с различными видами смазки и контактной усталостной нагрузке. Разработаны и внедрены в производство технологические процессы поверхностного упрочнения рабочих поверхностей деталей машин и технологического оснастки.

Ключевые слова: технологический процесс, фрикционная обработка, температура, деформация, колебательная система, динамические процессы, нанокристаллический слой, шероховатость, долговечность, износостойкость.

Gurey V.I. Scientific and technological bases of improving the quality and operational characteristics of machine parts by forming strengthened nanocrystalline layers. – Qualification scientific work as the manuscript.

Thesis for a Doctor's of Technical Sciences degree by specialty 05.02.08 – manufacturing engineering (131 – Applied Mechanics). – Lviv Polytechnic National University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

During friction treatment, due to the high-speed friction of the tool with the part, high temperatures occur in their contact zone, which is higher than the phase transition points. The zone in which thermomechanical processes take place can be divided into three sections: the first is the zone of elevated temperature in front of the thermal energy source; the second – the area of intense thermal energy flow; the third is the zone of intensive cooling, which occurs after the cessation of the thermal energy flow.

The mathematical model of the thermoelastic state in the surface layers of metal under the tool-part contact zone, on the basis of the modified theory of thermoelasticity is developed. The main disadvantage of the classical heat resistance theory is the assumption of an infinite rate of heat expansion in the material. To overcome it, Green and Lindsay proposed a modified theory of thermoelasticity (GL-theory), the propagation of thermal conductivity became hyperbolic with the introduction of so-called "relaxation times" parameters. Numerical solutions for different tool groove widths are presented. Also based on the method of determining the temperature by the depth of the sample using the thermocouples, experimental studies of the temperature at three different depths and several passes of the tool with transverse feed were determined.

The three-mass model of the surface grinding machine used for flat parts' frictional treatment is presented, the differential equations of which are written based on Lagrange equations of the second kind. The clamping force of the tool to the part is given as the vertical movement of the spindle head to the part by some value, where the total stiffness corresponds to some value of clamping force, as well as subtraction of movement, which is formed due to grooves on the periphery of the tool. The analysis of numerical solutions shows that the greatest value of the amplitude of the impact occurs when the width of the groove increases and the number of grooves decreases. The frequency response of the machine' three-mass oscillating system is developed, it is determined that the dangerous number of grooves is 8-10, which can cause resonance.

A three-mass model of a lathe is presented, on which instead of the tool-post the special device with an autonomous tool drive for frictional treatment of cylindrical machine parts is installed, the differential equations of which are written based on Lagrange equations of the second kind. The clamping force is given as the movement of the carriage in the horizontal direction to the workpiece by some value, where the total stiffness corresponds to some value of clamping force, as well as subtraction of movement, which is formed due to grooves on the periphery of the tool. The frequency response of the machine' three-mass oscillating system is developed, it is determined that the dangerous number of grooves is 9-12, which can cause resonance.

The change of structure, depth, and also microhardness of surface layers depending on the feed' type of the technological medium and its structure and type of the tool' periphery is shown. The redistribution of chemical elements by the depth of the strengthened layer

are shown. The phase composition of the surface layers after strengthening and alloying, as well as residual stresses in the strengthened surface layers, are presented.

After using various tools, the parts' surfaces were scanned and then the 3D view of the scanned surfaces, the topography, profiles of waviness and roughness in the longitudinal and transverse directions, peaks count distribution, volumes of the holes or the peaks, textures directions, averaged power spectrum density, textures isotropy, Abbott-Firestone curves, Sk parameters, etc. are investigated.

The studies of the friction pairs' wear resistance according to the "ring-ring" and "ring-insert" schemes of wearing without lubrication, with maximum lubrication, as well as in an oil-abrasive medium were showed. Wear resistance studies were performed for pairs of steel – cast iron, cast iron – cast iron, steel – steel.

Experimental studies of the contact strength of the strengthened layers after friction treatment were performed by using the special equipment where a test-sample is mounted, which is run-in by three spring-loaded rollers.

The friction treatment technology and microalloying have been tested and new improved results of increased wear resistance of friction pairs after this friction treatment have been obtained.

Keywords: technological process, friction treatment, temperature, strain, oscillating system, dynamic processes, nanocrystalline layer, roughness, durability, wear resistance.