

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

Іщенко Олена Анатоліївна

УДК 621.941.02

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
НАПРЯМНИХ КОВЗАННЯ МЕТАЛОРИЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ**

Спеціальність 05.03.01 – «Процеси механічної обробки,
верстати та інструменти»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Краматорськ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі конструювання верстатів та машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Струтинський Василь Борисович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського» МОН України, м. Київ,
завідувач кафедри конструювання верстатів та
машин.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент,
Васильченко Яна Василівна
Донбаська державна машинобудівна академія
МОН України, м. Краматорськ, завідувач
кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи,
інструмент і технології».

кандидат технічних наук, доцент,
Сапон Сергій Петрович,
Чернігівський національний технологічний
університет МОН України, м. Чернігів,
доцент кафедри технологій машинобудування і
деревообробки.

Захист відбудеться «__» _____ 2019 р. о __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.02 Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, корп. 2, ауд. 2313.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72, корп. 1 або за web-адресою: <http://www.dgma.donetsk.ua/zahistiu-radi-d12.105.02.html>.

Автореферат розісланий «__» _____ 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 12.105.02,
кандидат технічних наук, доцент



С.Л. Міранцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Практика експлуатації металорізальних верстатів, що містять вузли, які переміщуються по напрямних ковзання, показує, що рух цих вузлів за певних умов значно відрізняється від заданого рівномірного руху. Причина цього явища - коливальний процес, який виникає в напрямних за певної характеристики сил тертя та за великих навантажень при малих швидкостях (до 200 мм/хв), що викликає стрибкоподібне переміщення рухомих вузлів. Це знижує їх вібростійкість, точність позиціонування, обмежує продуктивність верстатів та сприяє появі браку виробів.

Отже, актуальним залишається питання підвищення важливих експлуатаційних характеристик металорізальних верстатів, зокрема характеристик напрямних таких як: зменшення коефіцієнта тертя, демпфування вібраційних навантажень, зниження інтенсивності зношування напрямних, забезпечення плавності руху каретки по напрямних верстата. Водночас напрямні, що застосовуються в металорізальних верстатах, не забезпечують у достатній мірі таких вимог, тому що пари тертя останнім часом не зазнали істотних змін, за винятком напрямних із використанням тіл кочення. Разом з тим напрямні ковзання, як і раніше, широко використовуються в верстатобудуванні під час виробництва середніх та важких токарних, фрезерних, розточувальних верстатів, призначених для обробки деталей вагою в понад 20 т з розвантаженням напрямних різними засобами. На користь цього висновку свідчить, наприклад, низка сучасних верстатів із ЧПУ з напрямними ковзання фірми Challenger, які ведуть обробку деталей діаметром від 1000 мм і більше та вагою понад 3 т. Останнім часом розробляються способи виготовлення напрямних із застосуванням полімерних матеріалів, які дозволяють усунути наявні недоліки пар тертя сталь-чавун. Тому тема підвищення якості напрямних ковзання з використанням композитних матеріалів та підвищення за рахунок цього експлуатаційних характеристик металорізальних верстатів, якій присвячена дана робота, є своєчасною й актуальною.

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

Дисертаційна робота виконана відповідно до тематики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Висновки і пропозиції дисертаційних досліджень використані в державній бюджетній науково-дослідній роботі за номером державної реєстрації №0113U002333 «Розробка теорії проектування та дослідження апробації багатокоординатних верстатів і машин з механотронними стрижневими структурами та їх системи керування», а також темою госпдогвірної науково-дослідної роботи №0116U003804 «Визначення характеристик напрямних супорта металорізального верстата, виготовлених із композитних матеріалів».

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення експлуатаційних характеристик рухомих вузлів металорізальних верстатів за рахунок використання напрямних із композитних полімерних матеріалів та визначення меж «критичних» швидкостей, за яких можлива поява переривчастого стрибкоподібного руху супорта. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) визначити коефіцієнт тертя ковзання та коефіцієнт тертя спокою пар тертя полімер-чавун, полімер-сталь в умовах додавання мастильного матеріалу;

2) дослідити механічні властивості полімерних матеріалів, які використовуються для виготовлення напрямних металорізальних верстатів;

3) шляхом математичного та експериментального моделювання встановити закономірності підвищення якості нанесеного полімерного покриття під час використання різноманітних технологічних прийомів;

4) установити закономірності появи в парі тертя чавун-полімер явища схоплювання поверхонь тертя та межі виникнення ефекту стрибкоподібних фрикційних автоколивань руху супорта(релаксаційних автоколивань);

5) розробити оптимальні способи виготовлення напрямних металорізальних верстатів з використанням полімерних матеріалів та технології їх практичного застосування;

6) провести виробничі випробування розроблених способів під час виготовлення напрямних розточувального верстата;

7) впровадити результати дослідження в виробництво на машинобудівному підприємстві та використати їх в навчальному процесі.

Об'єкт дослідження – процес руху вузлів металорізального верстату по напрямних ковзання на малих швидкостях.

Предмет дослідження – закономірності руху вузлів верстатів по напрямних ковзання з полімерного матеріалу.

Методи дослідження – теоретичні дослідження проведені методом математичного моделювання процесу тертя пари метал-полімер в умовах роботи верстатного обладнання з використанням основ механіки полімерів та їх триботехнічних характеристик, методів оцінки пружності та хімічної стійкості полімерів. Експериментальне дослідження проводилось з використанням сучасних приладів для визначення коефіцієнта тертя ковзання та коефіцієнта тертя спокою, тензометрії, а також статичних і динамічних методів дослідження механічних властивостей пар тертя. Експериментальне дослідження проводилось на промисловому обладнанні в умовах лабораторії кафедри «Конструювання верстатів і машин». Математична обробка результатів дослідження виконувалась з використанням наявного прикладного програмного забезпечення.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вдосконалена математична модель руху супорта верстату по напрямних з полімерним покриттям шляхом уточнення закономірностей його руху з

використанням трансцендентних рівнянь, якими визначається поява релаксаційних автоколивань.

2. Уперше встановлена для напрямних з полімерного матеріалу межа появи «критичної» швидкості, яка розділяє плавний рух супорта від стрибкоподібного з врахуванням дисипативних та триботехнічних властивостей цього матеріалу. Це дозволяє прогнозувати та цілеспрямовано забезпечувати якісну обробку на металорізальних верстатах за рахунок вибору оптимальних режимів переміщення супорта.

3. Уперше встановлено межі можливого застосування полімерного матеріалу для виготовлення напрямних, які визначаються комплексом вимог, серед яких допустимі стискаючі та зсувні навантаження на шар полімеру, а також стійкість до впливу агресивних середовищ, що дозволяє якісно й надійно виготовляти напрямні з композита. Без урахування встановлених меж існує велика ймовірність руйнування шару полімеру під час експлуатації верстата.

4. Уточнені закономірності ковзання композитного матеріалу «моглайс» по чавунній та сталевій поверхнях у широкому діапазоні швидкостей переміщення. Раніше ці умови були визначені тільки для обмежених значень режимів ковзання.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені способи виготовлення напрямних металорізальних верстатів за допомогою полімерних матеріалів, які містять не тільки методи застосування полімеру, а й методи підвищення якості в процесі нанесення полімеру, які впроваджені на ТОВ «Южстанкомаш».

Розроблено спосіб виготовлення напрямних розточувального верстата «Skoda W200HA» із застосуванням методу закачування полімеру в проміжок між напрямними розточувальної бабки та напрямними станини, впровадженої в виробництво на ТОВ «Магма».

Розроблені рекомендації щодо практичного використання технології якісного виготовлення напрямних, які містять способи нанесення полімерного матеріалу з урахуванням його різної консистенції.

Розроблені технології виготовлення напрямних металорізальних верстатів використано в навчальному процесі під час викладання дисциплін: конструювання верстатів, роботів та машин; металорізальні верстати, розрахунок і конструювання; експлуатація верстатів.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною роботою автора, що базується на опублікуванні її результатів [1-15]. Особистий внесок здобувача полягає в формулюванні цілей та завдань досліджень [6], виборів підходів та методів математичного моделювання, зокрема, в проведенні комплексу досліджень механічних та триботехнічних показників полімерних матеріалів [3, 4, 1], розробки методик та устаткування для експериментального моделювання напрямних верстата [8], отримання результатів математичного моделювання процесів роботи напрямних [8, 9], розробки методів виготовлення напрямних [4,

10, 13], розробки способів підвищення якості виготовлення напрямних та їх реалізація у патентах на корисну модель [2, 7, 11, 14, 15], участі у впровадженні нового способу при виготовленні розточувального верстату [5, 12].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати виконаних у дисертації досліджень доповідались та обговорювались на науково-технічних конференціях: Загальноуніверситетській науково-технічній конференції молодих учених та студентів, присвяченій Дню науки (м. Київ, 2009-2011); Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 2015); Міжнародному науково-технічному семінарі «Сучасні проблеми виробництва та ремонту в промисловості» (м. Свалява, 2016); Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2016).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 15 працях, включаючи 8 у фахових виданнях (4 – в українських журналах, які входять до наукометричних баз даних, зокрема 1 у Scopus , і 4 статті у виданнях, що входять до переліку фахових видань), матеріалах 3 міжнародних науково-технічних конференцій, у 2 тезах доповідей науково-технічних конференцій, 2 патентах України на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та двох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 167 сторінок, у тому числі: 148 сторінок основного тексту, 68 рисунків, 14 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі проаналізовані способи та матеріали для виготовлення напрямних. Процесам дослідження металорізальних верстатів і, зокрема, процесам тертя ковзання присвячені роботи відомих вчених Кочергіна А.І, Пронікова О.С., Трофимова О.М., Кучера І.М., Пуша В.Е., Мещерякова В.Б., Орликова М.Л., Струтинського В.Б, Ковальова В.Д., Васильченко Я.В. та ін.

Аналіз робіт, присвячених вивченню динаміки роботи напрямних, зокрема, теорії фрикційних автоколивань, дозволяє встановити, що на малих швидкостях виникають релаксаційні автоколивання. Такі автоколивання призводять до нестабільного переміщення вузлів верстата та викликають значні динамічні навантаження на вузли верстата й на різальний інструмент і, як наслідок, похибки під час обробки деталей.

У результаті проведеного аналізу робочих процесів у напрямних та матеріалів, що використовуються для їх виготовлення, встановлено, що існує необхідність у підвищенні експлуатаційних характеристик верстатів. Також слід

зазначити, що технології застосування полімерного матеріалу недостатньо відпрацьовані, тому нові методи не набули значного поширення. З огляду існуючих матеріалів для напрямних зроблено висновок про те, що полімерний матеріал «моглайс» німецького виробництва має найкращі перспективи використання. Тому виникає потреба в дослідженні як антифрикційних властивостей матеріалу, так і інших аспектів його застосування, а саме: надійності одержання необхідного точного сполучення напрямних, визначення меж появи стрибкоподібного переміщення каретки, випробування в лабораторних і промислових умовах як властивостей матеріалів, так і можливих технологій їх застосування.

Отже робота буде складатися з наступних етапів:

- експериментальне дослідження різних пар тертя з метою виявлення мінімального коефіцієнта тертя ковзання й тертя спокою;
- експериментальне дослідження адгезійної міцності полімерного матеріалу та його стійкості до експлуатаційних умов;
- експериментальне й теоретичне дослідження умов появи стрибкоподібного руху каретки по напрямних із полімерного матеріалу;
- розробка математичної моделі вузла тертя та передавальних механізмів верстата;
- вивчення та розробка способів підвищення якості поверхні напрямних із полімерного матеріалу;
- промислові випробування розробленої технології виготовлення напрямних;
- розробка рекомендацій для конструювання напрямних.

У другому розділі представлені розроблені установки та обладнання, на яких виконувалися експерименти з визначення характеристик композитного полімерного матеріалу. Зокрема, обладнання для визначення коефіцієнта тертя ковзання пар чавун-полімер та сталь-полімер, коефіцієнту тертя спокою, установка для дослідження межі міцності на зсув та стискання, стійкості полімеру до різноманітних середовищ.

Удосконалена технологія та обладнання для визначення коефіцієнта тертя ковзання пар чавун-полімер та сталь-полімер, яке представлено на рис. 1.

Експериментальні зразки з полімерного матеріалу виготовлялися за допомогою спеціально розробленого пристрою.

Параметри тертя спокою визначалися на спеціально розробленій лабораторній установці, а дослідження межі міцності на зсув виконувалося на розривній машині РМ-20. При цьому схема навантаження та закріплення пластин, на які наносився полімер, зображена на рис.2.

На цій же установці виконувалось визначення межі міцності полімеру на стискання. Експериментальні зразки для випробувань виготовлялися діаметром у 12 мм і товщиною від 1 до 6 мм.

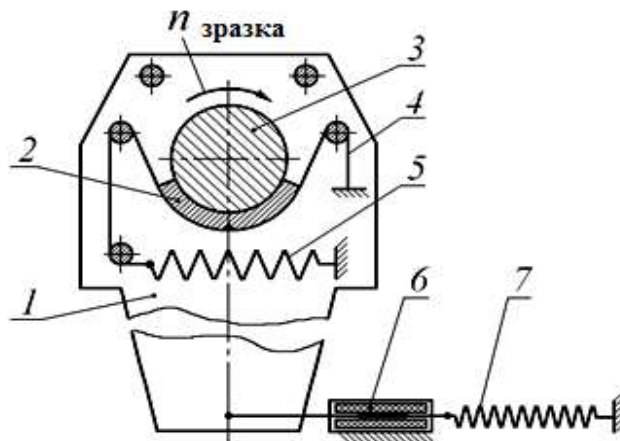


Рис. 1 – Схема встановлення чавунного вкладиша: 1 – каретка трибометра; 2 – вкладиш; 3 – зразок; 4 – сталева стрічка; 5 – пружина натягу стрічки; 6 - датчик кута повороту каретки; 7 – пружина повороту каретки.



Рис. 2 – Схема закріплення зразків: 1 – захоплювачі, 2 – ланцюг, 3 – кріпильні планки, 4 – зразок.

За допомогою ємностей з різними рідинами (розчинник 647, масло індустріальне 40, бензин А95, вода морська, вода, соляна кислота) визначалася стійкість полімеру до різноманітних середовищ. Зразки витримувалися у рідинах протягом 7-10 діб за температури 17-23 °С.

Наведено результати дослідження механічних та інших характеристик полімерного матеріалу на прикладі матеріалу «моглайс», від яких залежать експлуатаційні показники роботи виготовлених із застосуванням цього матеріалу напрямних. Зокрема, визначено коефіцієнти тертя ковзання пар сталь-полімер і чавун-полімер та проведено їх порівняння з парами сталь-сталь та сталь-чавун для діапазону швидкостей від 940 мм/хв до 3770 мм/хв. Зокрема, на рис.3 наведено

графік залежності співвідношення коефіцієнтів тертя від часу для зазначених вище пар ковзання при швидкості 940 мм/хв.

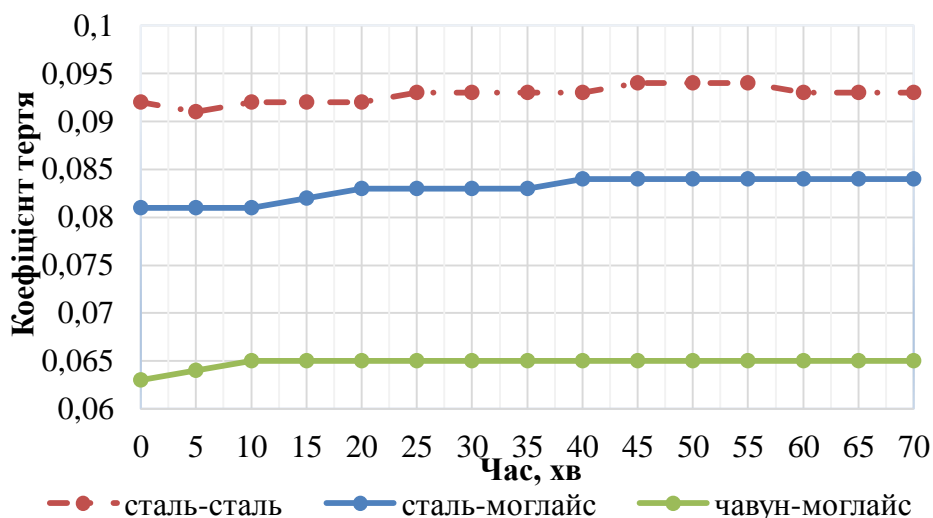


Рис. 3 - Графік залежності коефіцієнта тертя пар сталь-сталь, сталь-«моглайс» та чавун-«моглайс» від часу роботи за швидкості ковзання 940мм/хв і тиску $P=50 \text{ Н/см}^2$.

Також визначено коефіцієнт тертя спокою для пари чавун-полімер, що в наступних теоретичних розрахунках буде взятий як вихідне значення.

Виконано визначення межі міцності на зсув, оскільки зсувні навантаження в окремих випадках можуть визначати можливість застосування полімерних матеріалів. Установлено, що величина $\tau=11-12 \text{ МПа}$ повинна враховуватися під час проектування напрямних, які будуть виготовлятися з полімерного матеріалу.

Була також виконана перевірка міцності полімерного шару на стискання, з метою виключення можливого руйнування полімеру за умови впливу на нього сил різання та ваги каретки. Величина межі міцності на стискання перебуває в діапазоні 100-300 МПа, що також потрібно враховувати при оцінці вірогідного навантаження на напрямні, які будуть виготовлятися з цього матеріалу.

Виконана оцінка можливості полімерного матеріалу зберігати свої властивості за умови впливу на нього різних речовин показала відсутність змін маси та розмірів зразків у процесі взаємодії з такими середовищами, як: вода, вода морська, бензин, масло індустріальне 40.

У третьому розділі були проведені експериментальні дослідження з визначення межі появи стрибкоподібного руху. Для цього за розробленою технологією були виготовлені напрямні на лабораторному стенді хрестового супорта токарного автоматного комплексу ПАБ 130.

Технологія виготовлення напрямних складалася з таких операцій (рис. 4):

- 1) установка супорта в проектне положення;

- 2) знежирення поверхні;
- 3) обробка напрямних верстата відділювачем;
- 4) нанесення полімерного матеріалу;
- 5) формування відновлюваної поверхні на напрямних супорта;
- 6) видалення залишків видавленого і застиглому матеріалу.



Рис. 4 – Сформовані напрямні на каретці

Експериментальна установка (рис. 5) складається з пари гвинт-гайка, яка приводилася в обертання від електродвигуна потужністю 0,7 кВт через двошвидкісну коробку передач з передавальним числом 50 і 35 та муфту. Крок гвинта дорівнює 4 мм, діаметр 30 мм. Гайка розміщувалася в спеціально виготовленому металевому корпусі, який за допомогою болтів кріпився до двох пружних балок, що закріплені на супорті та на яких розміщувалися тензометричні датчики (рис. 6). Тензодатчики, кожен опором $R = 200 \text{ Ом}$, з'єднані в мостову схему.



Рис. 5 – Експериментальна установка

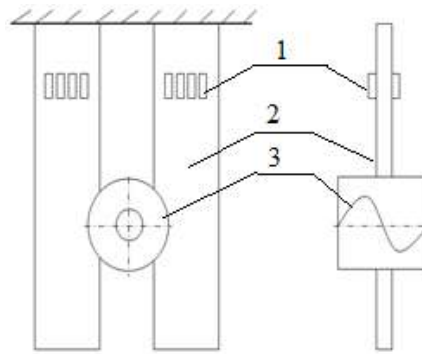


Рис. 6 – Схема вимірювання навантажень: 1 – тензодатчики; 2 - балка; 3 – гайка з гвинтом

Вимірювання сил переміщення виконувалися за допомогою аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) та комп'ютера за схемою, зображеною на рис. 7.



Рис. 7 – Принципова схема вимірювання сили переміщення супорта верстата

Типову осцилограму процесу переміщення супорта з різними швидкостями по виготовленим напрямним зображено на рис.8, а на рис.9 наведено отримані залежності коефіцієнта тертя від швидкості переміщення супорта.

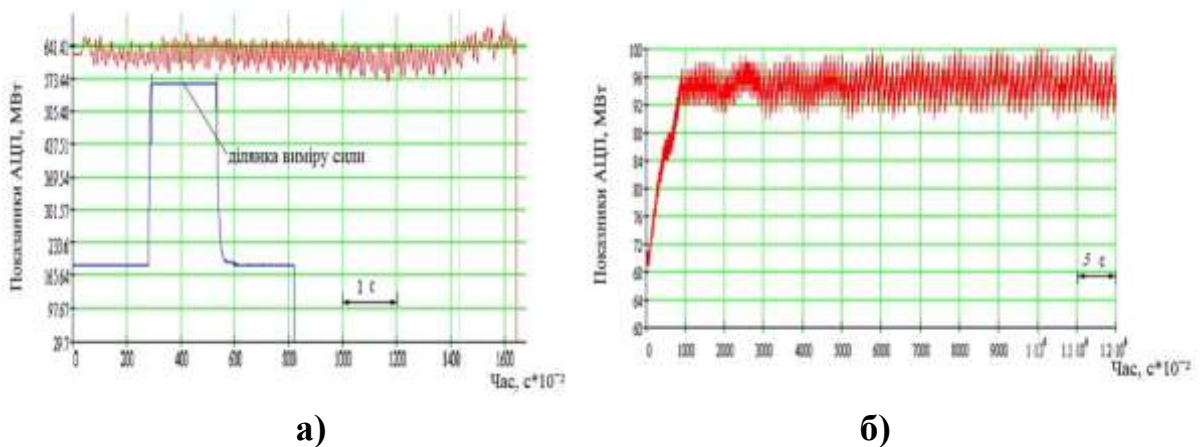


Рис. 8 - Типові осцилограми процесу переміщення супорта: а) за швидкостей у діапазоні від 1370 мм/хв до 4500 мм/хв; б) за швидкостей у діапазоні від 54 мм/хв до 80 мм/хв

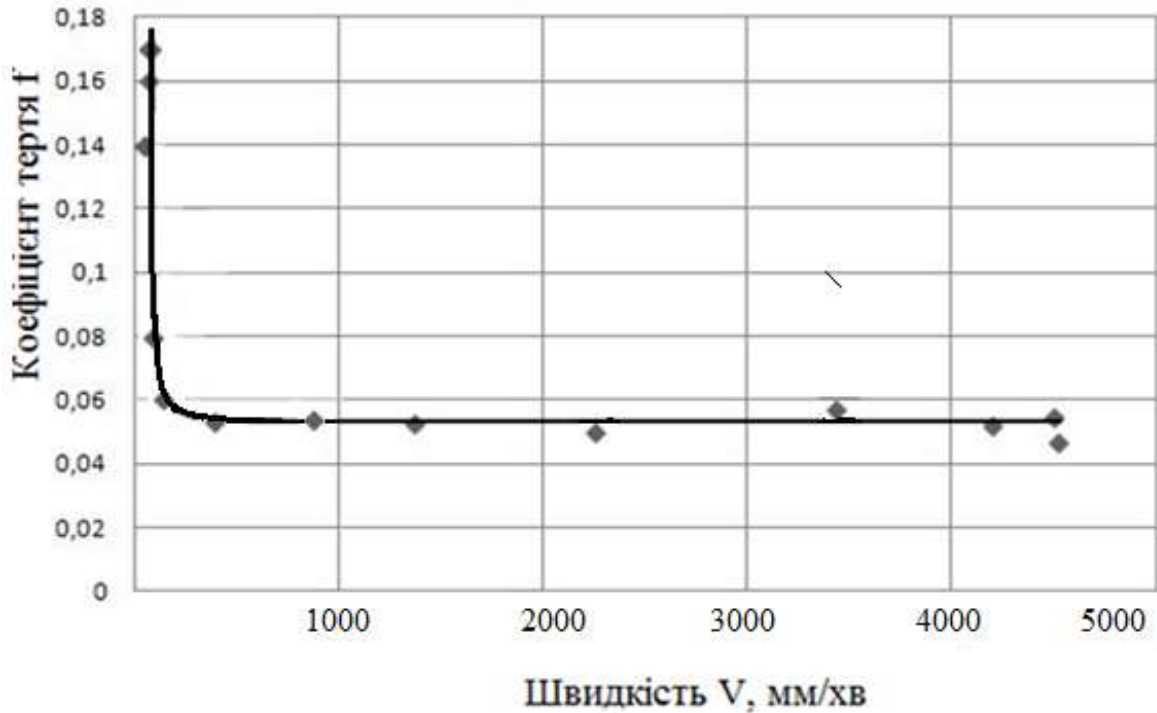


Рис. 9 – Графічна апроксимація залежності коефіцієнта тертя від швидкості

Отримані результати дозволяють констатувати, що:

- в області високих швидкостей подач (діапазон від 1370 мм/хв до 4520 мм/хв) спостерігається зменшення сили переміщення в межах від 50 Н до 58 Н та коефіцієнта тертя f у межах від 0,047 до 0,055;
- перехід в область малих швидкостей подач (діапазон від 120 мм/хв до 50 мм/хв) приводить до помітного зростання коефіцієнта тертя f (від 0,06 до 0,17);
- зростання коефіцієнта тертя f можна пояснити явищем «стик-зліп» при малих швидкостях подачі. Це підтверджує стрибкоподібне переміщення каретки, що спостерігається візуально та відображено в осцилограмі.

У четвертому розділі побудовано математичну модель експериментальної установки з метою дослідження релаксаційних автоколивань на напрямних, виготовлених з полімерного матеріалу. Установка складається зі станини, супорта, пружних балок, пари гвинт-гайка, муфти, коробки швидкостей та електродвигуна.

За ланку зведення динамічної моделі вибрали супорт, узагальнена координата x характеризує положення супорта (відносно нерухомого глядача). За початок відліку координати x приймаємо момент зриву з місця зведеної маси. Кут повороту гвинта φ пов'язаний з координатою x формулою $\varphi = x \cdot \delta$, де $\delta = \frac{2\pi}{h}$, h – крок гвинта. Маємо розрахункову схему динамічної моделі, зображеної на рис.10.

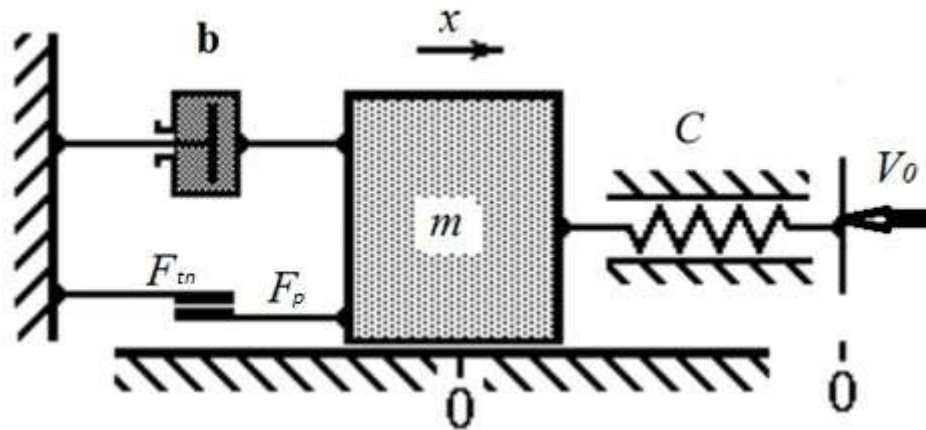


Рис. 10 - Розрахункова схема спрощеної динамічної моделі експериментальної установки

Зведену масу m отримуємо із тези про еквівалентність кінетичної енергії експериментальної установки кінетичній енергії динамічної моделі.

$$m = m_c + (I_z + I_M)\delta^2, \quad (1)$$

де m_c – маса супорта;

I_z, I_M - осьовий момент інерції гвинта та муфти, відповідно.

Враховуючи те, що пружні елементи установки: гвинт з лінійною жорсткістю c_l , пружні балки зі згинальною жорсткістю c_{zg} та муфти з крутильною жорсткістю $c_{кр}$ з'єднані послідовно, маємо зведений коефіцієнт жорсткості C динамічної моделі

$$C = \frac{c_l \cdot c_{zg} \cdot c_{кр} \cdot \delta^2}{c_l \cdot c_{zg} + c_l \cdot c_{кр} \cdot \delta^2 + c_{zg} \cdot c_{кр} \cdot \delta^2}. \quad (2)$$

Наближене теоретичне дослідження стрибкоподібного руху супорта, який має місце за малих швидкостей подачі V_0 проводилось за умови, що сила тертя руху F_p менша ніж сила тертя спокою F_{cn} . Ланка зведення рухається з постійною швидкістю V_0 доки пружна сила не дорівнює силі тертя спокою. Сила тертя зменшується до сили тертя руху, а пружна сила миттєво змінитись не може. Тому на масу, в першу мить (для дуже малих значень t), діє узагальнена сила тертя, яка дорівнює:

$$Q_x^{(тер)} = \Delta f \cdot m_c \cdot g = \Delta F, \quad (3)$$

де, $\Delta f = f_{cn} - f_p$ - різниця коефіцієнтів тертя спокою та руху.

Введене припущення про те, що розсіювання енергії має місце переважно в

області контакту супорта з напрямними, на які нанесене полімерне покриття. Оскільки коефіцієнт розсіювання енергії ψ для цього випадку відомий, є можливість знайти узагальнений коефіцієнт сили лінійного опору b за формулою

$$b = \frac{\psi}{2\pi} \sqrt{c m}. \quad (4)$$

Для отримання диференціального руху застосоване рівняння Лагранжу другого роду

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{\partial \Pi}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}} + Q_x^{(\text{тер})}, \quad (5)$$

де T , Π , Φ – кінетична, потенціальна енергії та функція розсіювання енергії відповідно.

Маємо диференціальне рівняння абсолютного руху об'єкту

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2 x = \frac{\Delta F}{m} + \frac{c_{\text{кр}} \cdot \omega_o \cdot \delta \cdot t}{m}, \quad (6)$$

де введені позначення:

k - частота власних коливань об'єкта.

$$2n = \frac{b}{m}, \quad k^2 = \frac{c}{m} \quad (7)$$

Для подальших досліджень введене відносне відхилення x_{Δ}

$$x_{\Delta} = x - v_0 t. \quad (8)$$

Розв'язуючи диференціальне рівняння відносного руху, отримаємо закон руху, а також формули для визначення швидкості і прискорення цього руху. Оскільки експеримент і практика експлуатації верстатів показує, що супорт рухається з зупинками, було поставлене завдання: визначити той момент часу t_1 , за якого відбудеться перша зупинка супорту та значення «критичної» швидкості руху приводу $v_{\text{кр}}$. Прирівнявши швидкість і прискорення до нуля $\dot{x}_{\Delta}(t_1) = 0$ та $\ddot{x}_{\Delta}(t_1) = 0$, отримаємо систему двох трансцендентних рівнянь з невідомими t_1 та $v_{\text{кр}}$

$$\begin{cases} \frac{\Delta F}{m} \cos k_1 t_1 - \left(\frac{\Delta F}{m} \cdot \frac{n}{k_1} - \frac{k^2}{k_1} v_{\text{кр}} \bar{c} \right) \sin k_1 t_1 = 0; \\ v_{\text{кр}} \left[(\bar{c} - 1) e^{n t_1} - \bar{c} \cos k_1 t_1 - \frac{n \bar{c}}{k_1} \sin k_1 t_1 \right] + \frac{\Delta F}{m k_1} \sin k_1 t_1 = 0, \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{де, } k_1 = \sqrt{k^2 - n^2}, \quad \bar{c} = \frac{c_{\text{кр}} \cdot \delta^2}{C}$$

Результати теоретичних розрахунків представлені в таблиці 1 та відображені на рис.11 у вигляді значень коефіцієнту тертя, знайдених як різниця між коефіцієнтом тертя спокою та показниками Δf у порівнянні з раніше знайденими експериментально показниками коефіцієнтів тертя.

Отже, запропонована математична модель дозволяє визначити межі «критичних» швидкостей для верстатів, у яких застосований полімерний матеріал для покриття напрямних, тобто швидкостей, за яких можлива поява переривчастого стрибкоподібного руху супорта. При цьому, як видно з рис. 11, відхилення теоретичних результатів відносно експериментальних не перевищує 20%.

Таблиця 1 - Залежність «критичної» швидкості від Δf , при $\psi = 0,5$

Значення Δf	Значення f при $f_{сп}=0,14$	«Критична» швидкість, мм/хв
0,05	0,09	97,56
0,06	0,08	117,06
0,07	0,07	136,56
0,08	0,06	150,06

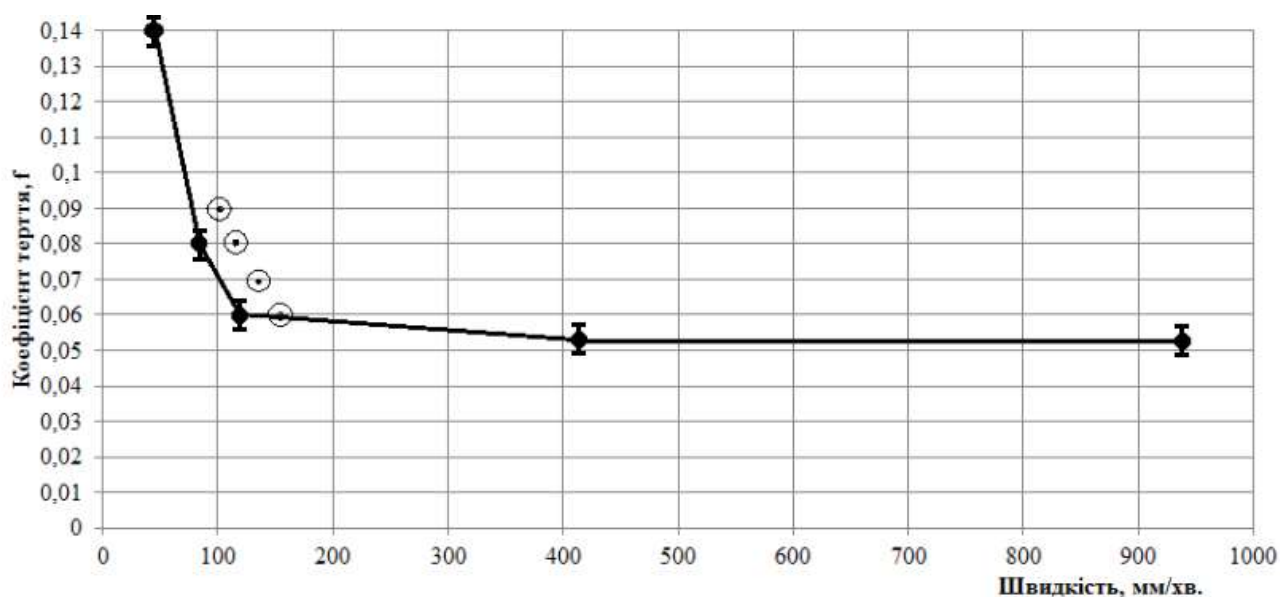


Рис. 11 – Фрагмент експериментального графіку залежності коефіцієнта тертя від швидкості в діапазоні швидкостей від 50 мм/хв до 900 мм/хв (символи \blacklozenge - експериментальні дані) в порівнянні з результатами розрахунків «критичної» швидкості для $\psi = 0,5$ (символи \circ - дані, що були отримані теоретичним шляхом)

В п'ятому розділі роботи досліджено й розроблено способи підвищення якості виготовленої поверхні та дано опис промислового впровадження розроблених технологій.

За спеціально розробленою оригінальною методикою виконувались дослідження різних способів підготовки полімерного матеріалу для нанесення на метал з метою виключення появи раковин на виготовленій поверхні. Зокрема, встановлено, що підігрівання матеріалу разом з його поетапним нанесенням на поверхню шляхом нагнітання позбавляє вироби з нього від газоподібних домішок і, як наслідок, від раковин. Зважаючи на останнє, запропоновано та захищено патентом на корисну модель спосіб вирішення цієї проблеми (патент України № 66441). При нанесенні пастоподібного полімеру позбавитися від газоподібних домішок на поверхні ковзання пропонується іншим шляхом – шляхом попереднього нанесення шару матеріалу на шаблон, а решти матеріалу - на відновлювану поверхню. Цей спосіб також захищено патентом України на корисну модель № 98887. Він дозволив повністю виключити появу раковин та пазирів при виготовленні напрямних верстатів.

Розроблені способи нанесення полімерного матеріалу були впроваджені при виготовленні напрямних розточувальної бабки верстату «Skoda W200HA».

Технологія виготовлення напрямних складалась з таких етапів:

- 1) зачистка поверхні під нанесення полімерного матеріалу;
- 2) обробка роздільником напрямних на стійці;
- 3) установка обмежувальних пластини товщиною 1,7 мм на напрямні;
- 4) нанесення частини матеріалу на напрямні;
- 5) установка розточувальної бабки на станину та фіксація її притискними планками;
- 6) нагнітання полімерного матеріалу FI/P у проміжок між станиною та обмежувальними пластинами;
- 7) зняття розточувальної бабки, видалення обмежувальних пластин та залишків затверділого полімерного матеріалу.

Виготовлені таким чином три напрямні шириною 100 мм та довжиною 2000 мм знаходяться в роботі та забезпечують плавність руху розточувальної бабки на будь-яких, у тому числі і малих, швидкостях її переміщення. Застосування цих технологій дозволяє тільки на одному підприємстві отримати економічний ефект у розмірі 125000 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. В роботі вирішена важлива науково-технічна задача з підвищення експлуатаційних характеристик рухомих вузлів металорізальних верстатів за рахунок використання напрямних із композитних полімерних матеріалів та визначення меж «критичних» швидкостей, за яких можлива поява переривчастого стрибкоподібного руху супорта.

2. Проведений аналіз використання матеріалів для напрямних та робочих процесів у напрямних показав, що в результаті експлуатації верстата виникає

необхідність у підвищенні експлуатаційних характеристик напрямних ковзання. Однак існуючі способи не дозволяють якісно виконати ці вимоги, а спроби застосування полімерних матеріалів недостатньо вивчені та не можуть дозволити рекомендувати ці способи для широкого використання без комплексного дослідження властивостей матеріалів.

3. За допомогою спеціального експериментального обладнання встановлено, що із зменшеннями швидкості ковзання переваги полімерного матеріалу за коефіцієнтом тертя в порівнянні з чавуном поступово зростають таким чином, що при швидкості 940 мм/хв коефіцієнт тертя ковзання становить 0,063...0,065, що може сприяти перенесенню межі появи релаксаційних автоколивань у менший діапазон швидкостей. Також уперше експериментально визначено коефіцієнт тертя спокою для пари чавун-полімер, який знаходиться у межах 0,14...0,16, що разом із знанням значення коефіцієнта тертя ковзання дозволило при математичному моделюванні процесу визначити «критичне» значення швидкості ковзання супорта.

4. Експериментально визначено значення адгезійної міцності полімерного матеріалу при дослідженні на зсув, яка становить 11...12 МПа та міцності на стискання, яка становить 250 МПа для шару матеріалу 2 мм. Це дозволило спрогнозувати виключення явища зсуву нанесеного полімерного шару та руйнування його в процесі експлуатації верстата. Експериментально встановлено вплив різних середовищ на стійкість полімерного матеріалу. Зокрема, виявлено відсутність змін маси та розмірів зразків у процесі взаємодії з такими середовищами, як: вода, бензин, масло індустриальне 40.

5. Уперше за допомогою математичного моделювання процесу руху напрямних визначено межу «критичної» швидкості, яка розділяє плавний рух і стрибкоподібний для каретки, що переміщується по полімерних напрямних, це дає змогу спрогнозувати таку межу для інших типів верстатів.

6. Експериментально встановлено закономірності процесу роботи напрямних з полімерів, які дозволяють констатувати, що межа «критичної» швидкості у парах тертя полімер-чавун значно нижча, ніж у парах сталь-чавун та чавун-загартований чавун, насамперед, за рахунок значно нижчого коефіцієнта тертя ковзання в металополімерних парах, а також за рахунок зниження різниці між коефіцієнтами тертя спокою та тертя ковзання з 0,1...0,12 у пари сталь-чавун та чавун-загартований чавун до 0,06...0,08 у пари полімер-чавун.

7. Експериментально підтверджено можливість якісного виготовлення напрямних верстатів за допомогою композитних полімерних матеріалів із збереженням вихідних параметрів якості оброблюваних деталей. Розроблено та запатентовано способи підвищення якості виготовлення поверхні напрямних за допомогою полімерних матеріалів (патент України № 66441 «Спосіб відновлення поверхонь напрямних ковзання полімерним матеріалом», №98887 «Спосіб відновлення напрямних полімерним матеріалом»).

8. Розроблена технологія виготовлення напрямних верстатів різного призначення та практичні рекомендації по її використанню. Впроваджена у виробництво нова технологія виготовлення напрямних розточувальної бабки великого розточувального верстата «Skoda W200HA» з отриманим річним економічним ефектом 125000 гривень. Результати роботи застосовані у навчальному процесі при викладанні дисциплін «Конструювання верстатів, роботів та машин», «Металорізальні верстати-2. Розрахунок і конструювання», «Експлуатація верстатів».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз

1. Ishchenko A. Tribotechnical research of friction surfaces on the basis of polymer composite materials / A. Ishchenko, A. Radionenko, E. Ischenko // Eastern-European Journal of EnterpriceTechnologies. – 2017, №6. – P. 12-19. (Scopus)

2. Ishchenko A.A. Technological bases of use of polimers in case of reconstruction hydraulic cylinders // A.A. Ishchenko, V.P. Grishko, M. Barna, Ishchenko E.A. Metallurgical and Mining Industry – №5, 2016. – С.62-65. (Index Copernicus, eLibrary, Scientific Indexing Services, UlrichsWEB).

3. Ищенко А.А., Исследование и применение полимерного материала «моглайс» для восстановления направляющих поверхностей салазок суппортов металлорежущих станков / А.А. Ищенко, А.В. Радионенко, Е.А. Ищенко // Проблемы тертя та зношування. – 2014. - №1(62), С. 23-30. (EBSCO, Google Scholar, WorldCat).

4. Струтинский В.Б. Триботехнические исследования полимерных композитов, применяемых при восстановлении направляющих станков / В.Б. Струтинский, А.В. Радионенко, Е.А. Ищенко // Проблемы тертя та зношування. – 2015. – №2(67), С.4-11. (EBSCO, Google Scholar, WorldCat).

Статті, що включені до переліку фахових видань

5. Гришко В.П. Восстановление направляющих скольжения на расточной бабке станка фирмы «Skoda W200HA» / В.П. Гришко, В.Ю. Колда, Е.А. Ищенко, А.Н. Просветова // Вестник ПГТУ «Сборник научных трудов», – 2011.- №21, С. 84-88.

6. Гришко В.П. Современные способы и материалы для восстановления пар трения / В.П. Гришко, Е.А. Ищенко // Захист металургійних машин від поломок. – 2013. – №15, С. 173-177.

7. Струтинский В.Б. О восстановлении направляющих станков с помощью полимерного материала / В.Б. Струтинский, Е.А. Ищенко, В.П. Гришко, Д.А. Воробьев // Вісник Приазовського Державного технічного університету – Вип. 30,

Т.2, 2015. – С.91-97.

8. Струтинский В.Б. Математические и экспериментальные методы исследования металлорежущих станков при восстановлении направляющих с помощью полимера / В.Б. Струтинский, Т.Н. Карпенко, Е.А. Ищенко // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2016. – №3(672), С. 17-23.

Публікації апробаційного характеру

9. Ищенко О.А. Особенности динамических рабочих процессов в багатокординатному металлообробному обладнанні / Ищенко О.А., Струтинський В.Б. // Тези доповідей загально університетської наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів присвяченої дню науки, ч.4, 2010р. – С. 27-28.

10. Ищенко О.А. Відновлення напрямних ковзання за допомогою сучасних полімерних матеріалів / Ищенко О.А., Струтинський В.Б. // Тези доповідей загально університетської наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів присвяченої дню науки, м. Київ, 2011р. - С. 30-31.

11. Ищенко О.А. Досвід відновлення напрямних металорізальних верстатів композитними матеріалами // Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», м. Тернопіль, 2015, С. 54-55.

12. Струтинский В.Б. Разработка способов восстановления работоспособности металлорежущих станков «Сучасні проблеми виробництва та ремонту в промисловості» / В.Б. Струтинский, Е.А. Ищенко // Міжнародний науково-технічний семінар, м. Свалява, 2016, С. 232-234.

13. Ищенко Е.А. Разработка способов повышения качества полимерных покрытий направляющих станков // Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», м. Чернігів, 2016, С. 64-65.

Патенти

14. Пат. 66441 Україна, МПК (2011.01) В23Р 6/00 Спосіб відновлення поверхонь напрямних ковзання полімерним матеріалом / Ищенко О.А.; заявник та патентовласник Ищенко О.А. – u201104170; заявл. 06.04.2011; опубл. 10.01.2012, бюл. №1.

15. Пат. 98887 Україна, МПК (2015.01) В23Р 6/00 Спосіб відновлення напрямних полімерним матеріалом / Струтинський В.Б., Ищенко О.А.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». – u201412785; заявл. 28.11.2014; опубл. 12.05.2015, бюл. №9.

АНОТАЦІЯ

Ищенко О.А. Підвищення експлуатаційних характеристик напрямних ковзання металорізальних верстатів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2018.

Знайдені значення коефіцієнту тертя ковзання в широкому діапазоні швидкостей та встановлено закономірність руху супорта по напрямних, які виконані з полімерного матеріалу «моглайс». Шляхом математичного моделювання встановлені закономірності руху супорта металорізального верстата по напрямним, які виконані із полімерного матеріалу. Отримані закономірності дають можливість прогнозувати та цілеспрямовано забезпечувати якісну обробку на металорізальних верстатах за рахунок вибору оптимальних режимів переміщення каретки відносно станини.

За допомогою математичного моделювання процесу руху напрямних уперше визначено межу «критичної» швидкості, яка розділяє плавний рух від стрибкоподібного для каретки, що переміщується по полімерних напрямним, а також можна спрогнозувати цю межу для інших типів верстатів.

Експериментально визначені значення адгезійної міцності полімерного матеріалу при дослідженні міцності на зсув та вплив агресивних середовищ на стійкість полімерного матеріалу, що дозволило виключити можливі руйнування виготовлених напрямних.

Теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість якісного виготовлення напрямних верстатів за допомогою полімерних матеріалів із збереженням вихідних параметрів якості оброблюваних деталей.

Розроблено способи підвищення якості виготовлення поверхні напрямних за допомогою композитних полімерних матеріалів шляхом використання способів, захищених патентами України № 66441, № 98887.

Розроблено технологію виготовлення напрямних та впроваджено її в виробництво при виготовленні напрямних на розточувальній бабці великого розточувального верстата «Skoda W200HA»

***Ключові слова:** верстат, супорт, напрямні супорта, коефіцієнт тертя, полімерний матеріал, фрикційні автоколювання.*

АННОТАЦІЯ

Ищенко Е.А. Повышение эксплуатационных характеристик направляющих скольжения металлорежущих станков. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 - процессы механической обработки, станки и инструменты. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». - Киев, 2018.

Найдены значения коэффициента трения скольжения в широком диапазоне

скоростей, установлена закономерность движения суппорта по направляющим, выполненных из полимерного материала. Путем математического моделирования установлены закономерности движения суппорта металлорежущего станка по направляющим, которые выполнены из полимерного материала. Полученные закономерности дают возможность прогнозировать и целенаправленно обеспечивать качественную обработку на металлорежущих станках за счет выбора оптимальных режимов перемещения каретки относительно станины.

С помощью математического моделирования процесса движения направляющих впервые определены границы «критической» скорости, которая разделяет плавное движение от скачкообразного для каретки, перемещающейся по полимерным направляющим, а также можно спрогнозировать эту границу для различных типов станков.

Экспериментально определены значения адгезионной прочности полимерного материала при исследовании прочности на сдвиг и воздействие агрессивных сред на устойчивость полимерного материала, что позволило исключить возможные разрушения готовых направляющих.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность качественного изготовления направляющих станков с помощью композитных полимерных материалов с сохранением исходных параметров качества обрабатываемых деталей.

Разработаны способы повышения качества изготовления поверхности направляющих с помощью композитных полимерных материалов путем использования способов, защищенных патентами Украины № 66441, №98887.

Разработана технология изготовления направляющих и внедрена в производство при изготовлении направляющих на расточной бабке большого расточного станка «Skoda W200HA».

***Ключевые слова:** станок, суппорт, направляющие суппорта, коэффициент трения, полимерный материал, фрикционные автоколебания.*

SUMMARY

Ishchenko O.A. Increase of operational characteristics of sliding guides of metal - cutting machine tools. -Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences on specialty 05.03.01 - machining processes, machines and tools. - National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky». - Kiev, 2018.

The values of the coefficient of sliding friction in a wide range of velocities are found and the regularity of the motion of the slide along the guides made of polymer composite material is established. Through mathematical modeling established laws of motion of the machine tool carriage along the guides, which are made of metal-polymer composite material. The resulting patterns allow predict and consistently provide high

quality processing on machine tools due to the choice of optimal regimes of the carriage relative to the frame.

Using mathematical modeling motion guides process first critical speed defined boundary that separates smooth movement of hop for the carriage moves on guides polymer, and this boundary can be predicted for other types of machines.

Experimentally determined values of the adhesion strength of the polymeric material in the investigation and shear strength on exposure to aggressive environments resistance polymeric material that allowed us to exclude the possible destruction of the ready-made guide.

Theoretically substantiated and experimentally confirmed is the possibility of qualitative manufacturing of guiding machines with the help of composite polymeric materials while maintaining the initial quality parameters of the machined parts.

Methods for improving the surface quality of guides using composite polymer materials have been developed by using the methods protected by the patents of Ukraine № 66441, № 98887.

A technology for manufacturing guides has been developed and introduced into production in the manufacture of guides for boring a large boring machine «Skoda W200HA».

Keywords: *machine, caliper, the caliper guide, the coefficient of friction, polymeric material, frictional oscillations.*

Підп. до друку 6.03.2019. Формат 60×84/16.
Ум. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 1,9.
Тираж 100 пр. Зам. № 89

Видавець
Поліграфічний центр
ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет”
87555, Маріуполь, вул. Університетська, 7.
Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи
ДК № 3729 від 15.03.2010 р.