

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

На правах рукопису

**Іщенко Олена Анатоліївна**

УДК 621.902

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯМНИХ  
КОВЗАННЯ МЕТАЛОРИЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ**

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

Струтинський Василь Борисович

2019

## АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної наукової задачі, яка полягає у підвищенні якості напрямних ковзання з використанням композитних матеріалів та підвищенні за рахунок цього експлуатаційних характеристик металорізальних верстатів.

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

Аналіз робіт, присвячених вивченню динаміки роботи напрямних, зокрема, теорії фрикційних автоколивань, дозволяє встановити, що на малих швидкостях виникають фрикційні 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.

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.

Представлено результати дослідження процесу роботи напрямних з використанням полімерного матеріалу. Наведено результати дослідження механічних та інших характеристик полімерного матеріалу, від яких залежать експлуатаційні показники роботи виготовлених з 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.

Також визначено коефіцієнт тертя спокою для пари чавун-«моглайс», 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  $\sigma=11-12$  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 межах 100-300 МПа, що також потрібно враховувати при оцінці вірогідного навантаження на напрямні, які будуть виготовлятися з цього матеріалу.

Виконана оцінка можливості полімерного матеріалу «моглайс» 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 звичайна, 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.

За допомогою спеціально розробленого оснащення з пружною ланкою приводу супорта, тензометричних датчиків, АЦП та ПК були проведені дослідження руху супорта в діапазоні швидкостей від 54 мм/хв до 4500 мм/хв. Отримані результати дозволили встановити, що в області високих швидкостей подач спостерігається зниження коефіцієнта тертя в межах від 0,047 до 0,055, а перехід в область малих швидкостей подач спричиняє помітне зростання коефіцієнта тертя в межах від 0,14 до 0,17. Таке зростання коефіцієнта тертя можна пояснити явищем «стик-зліп» за малих швидкостей подачі, що спостерігається візуально та відображено в осцилограмах.

**У четвертому розділі** побудовано математичну модель роботи напрямних верстата, виготовлених із полімерного матеріалу для вивчення релаксаційних автоколивань пари метал-полімер. Запропонована математична модель дозволяє визначити межі критичних швидкостей для верстатів, у яких застосований полімерний матеріал як покриття напрямних, тобто швидкостей, за яких можлива поява переривчастого стрибкоподібного руху супорта.

**В п'ятому розділі** роботи виконані дослідження й розроблено способи підвищення якості виготовленої поверхні та промислове впровадження розроблених технологій.

Запропоновані методи підвищення якості виготовлення поверхні напрямних за допомогою композитних полімерних матеріалів реалізовані шляхом використання способів, захищених патентами України №66441, №98887. Наведені практичні рекомендації щодо виготовлення напрямних з полімерного матеріалу.

Розроблені способи нанесення полімерного матеріалу були впроваджені при виготовленні напрямних розточувальної бабки "Skoda" W200HA. Виготовлені таким чином три напрямні шириною 100мм та довжиною 2000мм знаходяться в роботі з 2015 року 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.

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

## SUMMARY

Ishchenko O.A. Increase of operational characteristics of sliding guides of metal-cutting machine tools. – Qualitying scientific work as the manuscript.

Dissertation on competition the science degree of candidate of technical sciences on specialty 05.03.01 – "Processes of mechanical processing, machine tools and tools" - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2017.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific problem, which is to improve the quality of sliding guides with the use of composite materials and increase due to this performance characteristics of metal cutting machines.

In the first section, methods and materials for guides are analyzed. The work of famous scientists Kochergin A., Pronikov O., Trofimov O., Kucher I., Push V., Meshcheryakov V., Orlikov M. etc. are devoted to the processes of research of metal-cutting machine tools and, in particular, to slip friction processes.

The analysis of works devoted to studying the dynamics of guides, in particular, the theory of frictional self-oscillations, allows us to establish that frictional self-oscillations occur at low speeds. Such auto-oscillations lead to an unstable movement of

the machine's knots and cause significant dynamic loads on the machine's knives and on the cutting tool and, as a consequence, errors in the processing of parts.

As a result of the analysis of working processes in the guides and materials used for their manufacture, it has been established that there is a need to increase the operational characteristics of the machine tools. It should also be noted that the technologies of polymer material application have not been sufficiently worked out, so new methods have not become widely used. Since it has been established that the polymeric material of the "moglice" of German production has the best prospects for use, there is a need to study both the antifriction properties of the material and other aspects of its application, namely: the reliability of obtaining the necessary exact combination of guides, determining the boundaries of the appearance of a spin-off movement of the carriage, testing in laboratory and industrial conditions as the properties of materials, as well as possible technologies for their application.

The second section presents developed facilities and equipment that performed experiments to determine the characteristics of the composite polymeric material. In particular, equipment for determining the coefficient of sliding friction for pairs of cast iron-polymer and steel-polymer, the coefficient of static friction, the installation for studying the margin of shear strength and compression, the stability of the polymer to various environments.

This section also presents the results of the study of the work of guides using a polymeric material. The results of research of mechanical and other characteristics of polymeric material are given, on which the operational parameters of work of guides made from this material depend. In particular, the coefficients of sliding friction for steel- polymeric material and cast iron- polymeric material are determined, and their comparison with steel-steel and steel-cast iron steams for a range of speeds from 940 mm/min to 3770 mm/min.

The coefficient of static friction for a pair of cast iron polymeric material is also determined, which in the following theoretical calculations will be taken as the initial value.

The definition of the margin of displacement is performed because the shear loads in some cases can determine the possibility of applying polymer materials. It has been established that the value  $\tau=11-12$  MPa should be taken into account when designing guides, which will be made of polymeric material.

It was also checked the strength of the polymer layer compression in order to avoid possible destruction of the polymer, provided the impact on him of cutting forces and weight of the carriage. The compression strength value is within the range of 100-300 MPa, which should also be taken into account when assessing the likely load on the guides to be made from this material.

The estimation capabilities polymeric material remain effective provided the impact that various substances showed no change in mass and size of the samples during interaction with such environments as: ordinary water, marine water, gasoline, industrial oil 40.

In the third section were conducted experimental studies to determine the limits of the appearance of uneven movement. To do this, the developed technology was made guides at the laboratory stand of the cross-support lathe automaton system PAB 130.

By using specially designed equipment with an elastic element drive caliper, strain gauge sensors, ADC and PC, studies caliper movement speeds ranging from 54 mm/min to 4,500 mm/min. The obtained results allowed to establish that in the region of high feed rates there is a decrease in the coefficient of friction in the range from 0,047 to 0,055 and the transition to the region of low feed rates causes a marked increase in the coefficient of friction in the range from 0,14 to 0,17.

Such an increase in the coefficient of friction can be explained by the phenomenon of "stick-blind" at low feed rates, which is observed visually and reflected in oscillograms.

In the fourth section a mathematical model of work of guides of a machine made from a polymeric material for studying relaxation self-oscillations of a metal-polymer pair is constructed. The proposed mathematical model allows to determine the limits of critical speeds for machine tools, in which the polymer material is used as a cover of

guides, that is, the speeds at which the appearance of a discontinuous hopping motion of a support can occur.

In the fifth section of the work, the methods of improving the quality of the manufactured surface and the industrial introduction of the developed technologies have been investigated and developed.

The proposed methods for improving the quality of the surface of guides by means of composite polymeric materials are realized by using methods protected by the patents of Ukraine № 66441, №98887.

Methods of application polymeric material were introduced in the manufacture of guides of the "Skoda" W200HA machine.

The three guides, 100 mm wide and 2000 mm long, are manufactured in this way from 2015 and ensure smooth movement of the boring head on any, including small, speeds of its displacement. Application of these technologies allows only one machine to get an economic effect of 125000 UAH.

Keywords: machine, carriage, slide guides, the coefficient of friction, polymeric material, frictional self-oscillation.

**Основні положення дисертації надруковані у наступних наукових працях:**

**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 металообробному 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. Іщенко 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. Іщенко // Міжнародний науково-технічний семінар, м. Свалява, 2016, С. 232-234.

13. Іщенко 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 / Іщенко О.А.; заявник та патентовласник Іщенко 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., Іщенко О.А.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». – u201412785; заявл. 28.11.2014; опубл. 12.05.2015, бюл. №9.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ РОБІТ, ПРИСВЯЧЕНИХ ПІДВИЩЕННЮ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯМНИХ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ.....	19
1.1 Матеріали та технології для виготовлення напрямних.....	19
1.2 Аналіз робіт, присвячених вивченню динаміки роботи напрямних та механічних властивостей полімерного матеріалу.....	38
Висновки.....	51
Мета і завдання дослідження.....	52
РОЗДІЛ 2 ОБЛАДНАННЯ, МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НАПРЯМНИХ.....	53
2.1 Алгоритм дисертаційної роботи.....	53
2.2 Обладнання та методика для визначення коефіцієнта тертя ковзання.....	54
2.3 Визначення коефіцієнта тертя ковзання.....	64
2.4 Обладнання та методика для визначення коефіцієнта тертя спокою.....	68
2.5 Визначення коефіцієнта тертя спокою.....	71
2.6 Обладнання та методика визначення межі адгезійної міцності на зсув .....	74
2.7 Визначення межі адгезійної міцності на зсув.....	79
2.8 Обладнання та методика визначення межі міцності на стиск....	80
2.9 Визначення межі міцності на стиск.....	81
2.10 Методика визначення стійкості полімеру до агресивних	

середовищ.....	84
2.11 Визначення стійкості полімеру до впливу агресивних середовищ.....	86
Висновки.....	88
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ НАПРЯМНИХ, ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ ПОЛІМЕРНОГО МАТЕРІАЛУ...	90
3.1 Методика та устаткування для проведення експерименту з виготовлення та дослідження процесів тертя напрямних.....	90
3.1.1 Технологія виготовлення напрямних експериментальної установки.....	90
3.1.2 Устаткування та методика проведення експерименту.....	95
3.2. Результати експерименту з виготовлення та дослідження процесів тертя напрямних.....	101
Висновки.....	106
РОЗДІЛ 4 ДИНАМІЧНА ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ФРИКЦІЙНИХ АВТОКОЛИВАНЬ СУПОРТА ВЕРСТАТА НА НАПРЯМНИХ ІЗ ПОЛІМЕРУ.....	107
4.1 Теоретичний аналіз автоколиваний супорта.....	107
4.2 Чисельний аналіз задачі з визначення «критичної» швидкості руху супорта.....	117
Висновки.....	129
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ Й РОЗРОБКА СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ, ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ СПОСОБІВ.....	130
5.1 Вивчення та розробка способів нанесення матеріалу, які підвищують якість поверхні.....	130
5.2 Рекомендації по практичному застосуванню технології	

виготовлення напрямних полімерним матеріалом.....	140
5.2.1 Загальні рекомендації щодо підготовки поверхні та нанесення полімерного матеріалу.....	140
5.2.2 Технологія виготовлення напрямних.....	143
5.2.3 Види дефектів,що можуть виникати під час виготовлення напрямних.....	146
5.3. Промислове впровадження розроблених технологій.....	148
Висновки.....	153
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	156
Додаток А Акти впровадження у виробництво.....	167
Додаток Б Акт впровадження в навчальний процес.....	170

## ВСТУП

**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 багатокординатних верстатів і машин з механотронними стрижневими структурами та їх системи керування», а також темою госпдоговірної 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;

б) 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 166 сторінок, у тому числі: 148 сторінок основного тексту, 68 рисунків, 14 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ РОБІТ, ПРИСВЯЧЕНИХ ПІДВИЩЕННЮ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯМНИХ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТІВ

В металорізальних верстатах напрямні є одним з основних конструктивних елементів, що визначають як плавність переміщення рухомих вузлів і точність процесу обробки, так і довговічність верстата в цілому. Тому правильному вибору конструкції напрямних і матеріалів, з яких вони виготовлені, приділяється особлива увага як при проектуванні металорізального обладнання, так і при його експлуатації

#### 1.1 Матеріали, технології для виготовлення напрямних та їх конструктивні особливості

Практика експлуатації металорізальних верстатів, що містять вузли, які переміщуються вздовж 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 ковзання за певної характеристики сил тертя. Це знижує вібростійкість рухомих вузлів і, у багатьох випадках, обмежує точність, якість обробки й продуктивність верстатів. Для виключення цього явища та зниження сили тертя використовують відомі методи, зокрема, застосовують антистрибкові мастила та фторопластові стрічки на напрямних ковзання, замінюють напрямні ковзання на напрямні кочення, або на гідростатичні напрямні. Останні широко використовуються в шліфувальних верстатах, а для сучасних металорізальних верстатів усе ширше використовують напрямні кочення, які забезпечують не тільки плавність руху на малих швидкостях, але й точне позиціонування їхніх вузлів. Проте залишається ціла низка верстатів, які продовжують виготовлятися з напрямними ковзання, зокрема,

важкі металорізальні верстати, такі як: розточувальні та розточувально-фрезерні, що випускають такі відомі закордонні фірми «Skoda» (Чехія), Sibaura (Японія), низка сучасних верстатів з ЧПУ фірми Challenger (токарно-оброблювальні центри BNC 4000, фрезерно-оброблювальні центри НМ 8000, розточувально-оброблювальні центри НВМ-4) та верстати марок ВО 130, 2В 622Ф4, 2Е 656 російського виробництва, оскільки на цих верстатах великі контактні навантаження не дозволяють використовувати напрямні кочення, як показано в роботах Ковальова В.Д., Васильченко Я.В [1-2] Крім того, під час модернізації великої кількості верстатів з напрямними ковзання, що експлуатуються на багатьох українських підприємствах, необхідно виготовляти нові напрямні бажано з поліпшеними експлуатаційними характеристиками пар тертя за рахунок забезпечення наступних вимог, до яких належать: [3-5]:

- зносостійкість. Зношення напрямних визначає їх працездатність і збереження точності протягом необхідного періоду експлуатації;

- мала величина коефіцієнта тертя руху і незначна залежність від швидкості руху вузла на напрямних. Мала величина коефіцієнта тертя спокою і незначна його залежність від тривалості нерухомого контакту;

- стабільність розмірів з часом за наявності експлуатаційних напружень; стійкість до теплових та вібраційних навантажень, впливу вологи, масел та слабких кислот;

- достатня жорсткість із урахуванням можливого зменшення її за рахунок додаткових стиків у накладних напрямних;

- легка оброблюваність для досягнення необхідних точності й шорсткості поверхні;

Тому розробка нових високоточних і продуктивних конструкцій напрямних верстатів або модернізація наявних вимагають комплексного дослідження коливального процесу у разі застосування нових композитних матеріалів, які можуть забезпечити задані параметри вібростійкості, зносостійкості й меншого коефіцієнта тертя.

Підвищення експлуатаційних характеристик верстата з напрямними ковзання, насамперед, може бути досягнуто за рахунок підбору зносостійкого матеріалу з малим коефіцієнтом тертя (наприклад, полімерного композиту) та з необхідним коефіцієнтом розсіювання енергії, що приведе до зникнення фрикційних автоколивань або переведе їх в область мінімальних показників критичних швидкостей, за яких вони з'являються.

Для того, щоб вибрати необхідний матеріал для виготовлення напрямних, проаналізуємо властивості й параметри наявних матеріалів, які найчастіше застосовуються в парах тертя.

Пару тертя ковзання найчастіше комплектують із різнорідних матеріалів, що мають різний склад, структуру і твердість; цим усувають загрозу небезпечної аварійної ситуації – схоплювання контактуючих поверхонь. Напрямні станин виготовляють із більш зносостійких і твердих матеріалів, ніж напрямні рухомих вузлів. За рахунок цього досягають більш тривалого збереження точності, бо вона визначається, у цілому, точністю більш довгих напрямних станин.

Матеріали, які застосовують для напрямних ковзання верстатів, розподіляють на три групи: зміцнені сталі й чавуни, кольорові сплави, пластмаси. Чавунні загартовані напрямні найчастіше виготовляють із сірих чавунів СЧ20, СЧ25, СЧ30 як одне ціле [6-17].

За подальшого розгляду характеристик пар тертя вузлів верстатів першим буде вказаний матеріал напрямних меншої довжини в парі тертя (столів, санчат, бабок), другим – матеріал напрямних більшої довжини одного й того ж верстату (станин, стійок, поперечок) [10, 13].

Рухомі вузли верстатів з парами тертя сталь-чавун значно поширені в металорізальних верстатах різних типів. Така пара може надійно працювати лише за умов ретельного змащення та захисту від забруднень поверхонь тертя. Однак вона має істотні переваги, зокрема, малу вартість та високу технологічність. Забезпечити вказані вище ідеальні умови роботи важко і тому внаслідок потрапляння продуктів обробки на напрямні та недостатньої кількості мастила можуть з'являтися задири на напрямних, які збільшують швидкість зношування.

Така пара тертя не може забезпечити надійної роботи напрямних без ремонту, отже, не відповідає вимогам довговічної роботи.

У значній мірі позбавлена вказаних вище недоліків пара тертя чавун-загартований чавун. Гартування значно підвищує зносостійкість напрямних, які працюють в умовах високих і нерівномірних тисків на поверхнях тертя. Зносостійкість значно збільшується в незагартованій напрямній, але й друга напрямна теж підвищує свій ресурс.

Таким чином, значне викривлення деталей, яке з'являється, коли загартовують напрямні, ускладнює операцію підгонки контактих поверхонь тертя шабренням, тому область застосування такої пари обмежується, головним чином, верстатами нормальної точності, до яких не висуваються високі вимоги щодо рівномірності переміщення за малих подачах. На рівномірність ковзання цієї пари впливає співвідношення розмірів графітових включень чавуну. Для напрямних супорта застосовують чавун з великим розміром графітових включень і меншою твердістю, ніж у чавуну, який використовується для напрямних станин. Наприклад, пари тертя з чавуну з однаковим розміром графітових включень і рівної твердості за низьких швидкостей ковзання мають удвічі більші параметри стрибків і діапазон навантажень з нерівномірним ковзанням [10].

Як показано у [10], глибина загартованого шару напрямних такої пари повинна бути не менше ніж 2,5-3,0 мм, із твердістю HRC 45-50. Вимоги до мікроструктури чавуну, призначеного для загартування, за характеристиками металевої основи однакові з чавуном, який не термооброблювався. При цьому довжина графітових включень повинна бути трохи меншою. Як було встановлено у [10], найбільше підвищення зносостійкості спостерігається у загартованого чавуну з довжиною включень від 50 до 150 мкм. У той же час загартування чавуну з включенням понад 220 мкм не дає такого ефекту й лише забезпечує збільшення його зносостійкості в незначній мірі.

Як було встановлено практикою експлуатації верстатів [10], пари тертя кольоровий сплав-чавун застосовують у вузлах тертя з високим тиском і ймовірністю задирів поверхонь тертя, головним чином, у важких верстатах та у

верстатах середніх розмірів під час значного тиску на напрямні. Це викликає появу високих місцевих тисків на поверхнях тертя, що в поєднанні з забрудненням напрямних відходами обробки та порушенням режимів змащування створює умови, за яких зношування напрямних прискорюється.

Із кольорових сплавів для напрямних рухомих елементів використовують бронзу і цинкові сплави, але вони мають невисоку зносостійкість під час абразивного зношування, тому напрямні, виконані з такого матеріалу вимагають надійного захисту під час роботи [10].

Найкращі результати зі зносостійкості, відсутності задирів і рівномірності подачі дають алюмінієва бронза БрАМц 9-2 і цинковий сплав ЦАМ 10-5, що застосовуються в парі зі сталевими й чавунними напрямними.

Пластмаси використовують для напрямних рухомих вузлів деяких верстатів з ЧПУ. У верстатах використовують: фторопласт у вигляді стрічок, наповнений фторопласт з бронзовим компонентом, композиційні матеріали на основі епоксидних смол з присадками та домішками різних модифікаторів [18-25]. Позитивними властивостями пластмас є характеристики тертя, що виключають появу стрибкоподібного руху пристроїв за малих швидкостей і за відсутності явища схоплювання. Однак, більшість пластмас не мають достатньої жорсткості та необхідної стійкості до впливу теплових навантажень, вологи, масла [22]. Пластмаси виключають появу задирів на поверхнях тертя, забезпечують високу зносостійкість вузла, найбільш істотно знижуючи інтенсивність зношування напрямних з чавуну. Характеристики тертя й антистрибкові властивості ряду пластмас підвищують рівномірність малих подач, точність і чутливість до малих переміщень вузлів. Вони мають підвищену демпфуючу здатність і добре обробляються [26-36]. Однак під час роботи напрямних із забрудненим мастильним матеріалом найбільше на зношування поверхонь тертя впливає процес зношення поверхні пластмас твердими частинками. У цих умовах зношування оцінити зносостійкість пластмас у першому наближенні можна за їх твердістю [22,23].

Напрявні з пластмас використовують у вузлах важких і середніх верстатів з порівняно рівномірним тиском на поверхнях тертя і досить надійним захистом від забруднень. У вузлах з парою тертя пластмаса-чавун зносостійкість металевих напрямних безпосередньо залежить від властивостей пластмас, які використовуються.

Зупинимося, перш за все, на полімерних матеріалах на основі фторопласта, властивості яких наведені в [23].

Фторопласт-4 (політетрафторетилен) - найбільш хімічно стійкий полімер з унікальними антифрикційними властивостями. За кордоном випускають політетрафторетилен таких марок: тефлон (США), флюонія (Великобританія), сорефлон (Франція), гостафлон (ФРН), поліфлон (Японія), алгофлон (Італія) та ін.

Найбільшого поширення для напрямних металорізальних верстатів набули такі полімерні матеріали, розроблені в ЕНІМС спільно з інститутами Мінхімпрому [18, 23]:

- стрічки з наповненого фторопласта Ф4К15М5-Л-ЕА ТУ 6-05-05-138-80 і високомолекулярного поліетилену ВМПЕ 87-А і ВМПЕ-122-А ТУ 6-05-05-85 товщиною в 1, 7 + 0,15 мм, шириною в 140 мм підготовлені до склеювання з обох боків активованим тліючим розрядом у вакуумі на глибину 4...6 мкм. Розроблено спільно з НВО «Пластполімер»;

- пластини з наповненого (сульфатом барію, нітридом бору й ін.) сополімеру формальдегіду СФД-ВМ-БС ТУ 6-05-211-1160-80 розмірами 800x300x4 мм підготовлені до склеювання клейовими сумішами. Розроблено спільно з НВО «Пластмас» і випускаються заводом «Карболіт» (м. Орехово-Зуєво) із крихти СФД ТУ 6-05-211-1176-79 виробництва Кусковського хімічного заводу;

- епоксидні компаунди: рідкий У11-5-250 ТУ 6-05-241-408-84 і пастоподібний УП-5-251 ТУ 6-05-241-85. Розроблені спільно з УкрНДІпластмас і випускаються в банках місткістю 2...6 кг (затверджувач - в окремій тарі).

Кращими й найбільш поширеними зарубіжними аналогами цих матеріалів є такі [23, 37-41]:



- стрічки з наповненого (в основному, бронзою) фторопласта Торсайт Б фірми Shamban (США) і Рулон ЛД фірми Dixon (США);
- пластини з дельрина фірми Dupon (США) і БіПласт П фірми Industry-Plastik-X. Zikel (ФРН);
- епоксидні компаунди СКЦ-3 і СКЦ-7 фірми Gleitbelag-technik GmbH (ФРН), наповнені кварцовим піском, дисульфідом молібдену й іншими наповнювачами, та «моглайс» фірми Diamant (ФРН), наповнені каоліном, графітом та іншими матеріалами.

На практиці, в окремих випадках, як накладка на напрямні кареток застосовуються інші матеріали, наприклад, текстоліт, який, порівняно з іншими полімерними матеріалами, підвищує інтенсивність зносу напрямних, і цей чинник стає дуже важливим в умовах, коли поверхневий загартований шар напрямних на станині піддається шліфовці. І, відповідно, твердість поверхневого шару знижується, крім того, застосування накладок з текстоліту, маючи підвищений коефіцієнт тертя, збільшує ймовірність появи стрибкоподібного переміщення каретки навіть за умови середніх значень робочих швидкостей, що в решті-решт знижує точність верстата. Цікавими видаються результати порівняння зносостійкості розробленого сополімеру формальдегіду СФД-ВН-БС з іншими традиційними парами тертя як чавун-чавун, бронза-чавун, текстоліт-чавун, виконаними в роботах [18, 23]. При цьому оцінці піддавалася як відносна зносостійкість цих пар тертя, так і швидкість зношування (у мм/рік). Таким чином, коли прийняти відносну зносостійкість пари чавун-чавун за одиницю, то відносна зносостійкість пари бронза-чавун дає показники вище й оцінюється величиною відносної зносостійкості в 1,47, пара текстоліт-чавун - 0,74 і пара матеріал СФД-ВМ-чавун-1,92. Тобто пара текстоліт-чавун дає найнижчі показники за зносостійкістю, у той час як сополімер піднімає показник зносостійкості порівняно з чавуном майже вдвічі.

Разом з цими результатами оцінювався ступінь зношування напрямних станини (чавун НВ 180). Якщо в парі чавун-чавун він становив 0,038 мм/рік, то

пара чавун-бронза давала показник 0,026 мм/рік, текстоліт-чавун-0,051 мм/рік, СФД-ВМ-чавун 0,02 мм/рік.

Таким чином, напрямні виконані на основі фторопласта, безумовно, мають кращі показники. Саме з цієї причини німецька фірма ZEDEX розробила детальну технологію використання фторопластових стрічок і пластин під час наклеювання на металеву основу напрямних, які в останній час використовуються у вітчизняній промисловості.

**Матеріал фірми ZEDEX.** Ці матеріали вже багато років успішно використовуються для розв'язання різноманітних технічних проблем, зумовлених тертям ковзання [42]. Головна особливість цього матеріалу – це низький коефіцієнт тертя, зносостійкість та спроможність компенсувати вібраційні навантаження. Унаслідок малого коефіцієнта стає можливим знизити діапазон стрибкоподібного руху каретки верстата. У той же час пара тертя з матеріалом ZEDEX може недовго працювати і без змащування.

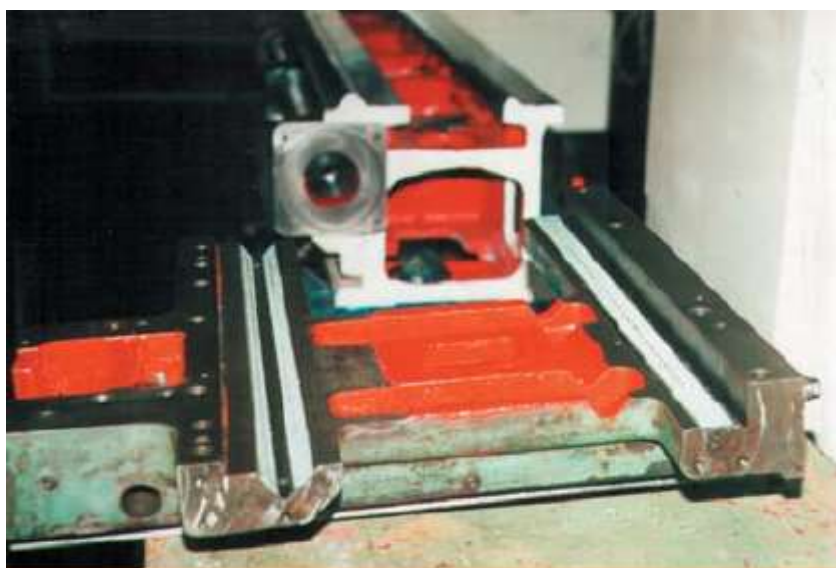


Рисунок 1.1 - Напрямні з нанесенням матеріалу ZX100K

Для оцінки переваг цього матеріалу в [44] наводяться залежності коефіцієнта тертя ковзання від поверхневого тиску (рис 1.2). Як видно з цього графіка, підвищення температур його використання з 25 до 100 °С знижує коефіцієнт тертя до показників 0,035-0,05, але у верстатах такі температури не є робочими й орієнтуватись слід на температуру 25 °С та коефіцієнт тертя при

цьому 0,125, що не є великим досягненням, враховуючи той факт, що інші полімерні матеріали мають значно нижчі показники цього параметра.

У [44] наведено кілька прикладів використання матеріалу ZX100K серії ZEDEX, які характеризують його експлуатаційні показники. Наприклад, заміна виготовлених з пари тефлон-бронза напрямних ковзання важкого токарного верстата на одному з підприємств США дозволила збільшити термін їх експлуатації з 2,5 до 7 років [44]. А, наприклад, заміна напрямних ковзання фрезерного оброблювального центру, виготовлених із тефлону, збільшила технічний ресурс від 1,5 до 4 років. Але не зовсім зрозуміло, чому напрямні верстатів працювали всього лише 1,5 року. За цей термін, як правило, зношення нових напрямних не відбувається. Ще один наведений приклад – виготовлення з матеріалу ZX100K напрямної втулки револьверної головки токарного верстата, яка дала можливість щодо експлуатації верстата без ремонту протягом 10 років [44].

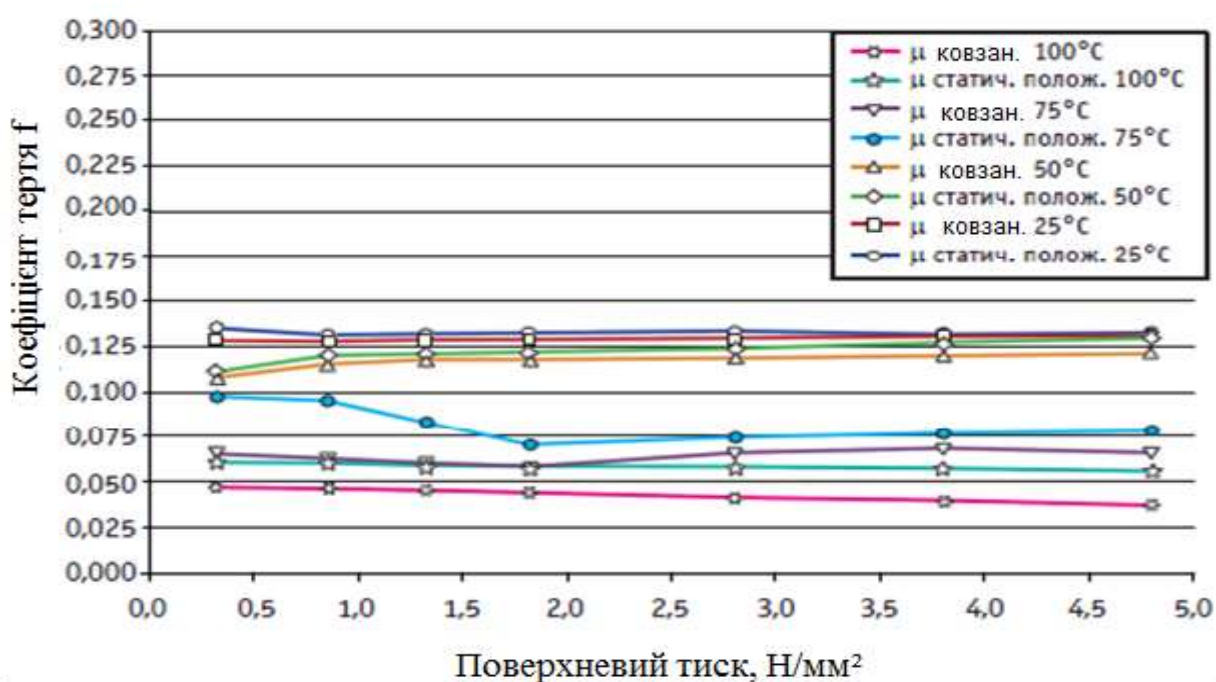


Рисунок 1.2 - Графік залежності коефіцієнта тертя ковзання матеріалу ZX100K від поверхневого тиску під час роботи зі змащенням.

Листовий матеріал ZX-100K для відновлення напрямних постачається у вигляді готових нарізаних смуг і кріпиться на напрямних за допомогою

двокомпонентного клею. Але для того, щоб забезпечити максимальну площу контакту накладних смуг ZEDEX зі станиною, необхідна механічна обробка цих смуг.

Фахівці рекомендують під час проведення капітального ремонту верстатів виконувати ці роботи в такій технологічній послідовності [42].

Для середніх токарних верстатів достатня товщина накладної смуги 2-3 мм, для фрезерних і важких токарних верстатів 3-5 мм і більше. Матеріал устанавлюється з використанням оригінального двокомпонентного клею. За умови кімнатної температури вже через добу після нанесення матеріал можна піддавати механічній обробці (шліфуванню, шабруванню). Для кращого утримання мастила поверхня обробляється шабером.

Для збільшення терміну служби застосовують очищувальні скребки і засоби захисту напрямних, наприклад засоби виробництва KabelSchlepp (рисунок 1.3).

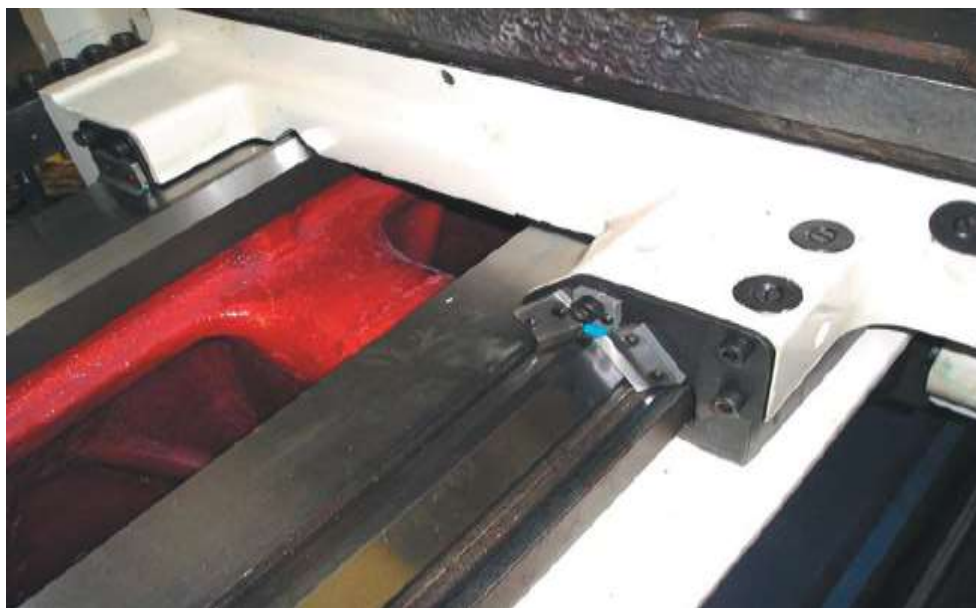


Рисунок 1.3 - Очищувальні скребки та засоби захисту напрямних фірми KabelSchlepp.

Виконують наклеювання матеріалу ZX-100K таким чином.

Змішування. Для температури навколишнього середовища від +10 °С до +60 °С застосовується двокомпонентний склеювальний склад: клей (світла непрозора

паста) із затверджувачем (світло-жовта в'язка рідина). Кількість компонентів, що постачаються, відповідає замовленій площі. Обидва компоненти слід ретельно перемішати до однорідності маси. Лист, товщиною понад 4 мм, кріпиться додатково гвинтами з латуні.

Зберігання. Компоненти складу повинні зберігатися за температури 18-25 °С у щільно закритому сухому місці та бажано в спеціальних контейнерах. Тільки в цих умовах строк зберігання відповідає зазначеному в специфікації продукту. Для 100 г готового складу термін зберігання становить мінімум 90 хвилин за 23 °С.

Таблиця 1.1 Характеристики застигання матеріалу

Температура застигання матеріалу, °С	10	23	40	60
Час застигання, год.	48	24	5	1

Наклеювання матеріалу. Перед наклеюванням необхідно виконати очищення поверхні матеріалу. Поверхню матеріалу потрібно протерти чистою матерією, просоченою розчинником жирів (ацетон, трихлоретилен). Ні в якому разі не використовувати спирт, бензин, розчинник для фарби. Металева поверхня повинна бути оброблена наждачним папером, зернистість якої - K80 - K150. Потім потрібно зачистити поверхню від масла та жиру. При цьому необхідно:

- занижувати посадочне місце під установку матеріалу. Для малих та середніх верстатів (за товщині використовуваного матеріалу 2 - 4 мм) досить, щоб матеріал виступав над поверхнею на 0,8 - 1 мм;

- після зачистки на поверхні металу нанести подряпини шабрувальною пластиною;

- склеювані поверхні знежирити ацетоном.

Нанесення клею. Склеювальний склад наносять суцільним шаром. В іншому випадку можливе значне погіршення якості склеювання. На поверхню металу

нанести клеючий склад шпателем. Товщина шару 0,2 мм. На поверхню ZX-100K нанести клеючий склад. Товщина шару 0,2 мм.

Склеювання. Починаючи з одного боку та загинаючи лист матеріалу ZX-100K вгору, наклеюємо його на потрібну поверхню. Далі посуваємо матеріал точно на потрібне місце

Твердіння. Після з'єднання поверхонь необхідна витримка часу для затвердіння клею. Процес затвердіння відбувається під тиском. Необхідно забезпечити щільне прилягання склеюваних поверхонь шляхом установки додаткового рівномірного навантаження (рівного металевого бруска). Під вантаж рекомендується встановити гумову стрічку товщиною 2 - 4 мм (для рівномірного розподілу навантаження). Величина навантаження повинна бути 0,05 Н/мм<sup>2</sup>.

Якщо матеріал наклеюється на супорт токарного верстата, після наклеювання матеріалу супорт установити на станину та витримати протягом 12 - 15 годин.

Після наклеювання проводиться остаточна підгонка геометричних параметрів верстата. Матеріал обробляється шліфуванням або шабруванням.

Герметизація швів. Після зняття вантажу необхідно очистити шви (метал - ZEDEX) від виступаючих надлишків клею та промазати їх герметиком на основі силікону.

Недоліки матеріалу фірми «ZEDEX» і такого методу:

- неможливо дотриматись необхідної точності позиціювання площини ковзання по висоті;
- необхідно шляхом шабрування домагатися прилягання напрямних;
- має місце відрив приклеєних пластин унаслідок зсувних навантажень і старіння клейового шару.

**Антифрикційні полімерні матеріали.** Під час виготовлення верстатів одна з контактуючих поверхонь напрямних (або на станині, або на каретці) виготовляється з антифрикційного полімерного матеріалу. За відновлення напрямних утрати матеріалу, які виникли під час шабрування або шліфування та зазори, що виникли при цьому між напрямними супорта і станини, також можуть

компенсуватися нанесенням на напрямні каретки антифрикційного полімерного матеріалу [43-47]. Матеріал має двокомпонентний склад, гарні адгезійними властивостями під час нанесення на металеві поверхні [48-50] та досить низький коефіцієнт тертя. До переваг матеріалу слід також віднести здатність без усадки переходити за 24 години від пластичного стану до твердого за умови кімнатної температури.

Властивості полімерних матеріалів визначаються властивостями та співвідношенням їх компонентів, характером взаємодії на границі розділу матриця - наповнювач і технологією виготовлення. Типові компоненти ПМ: полімерна матриця на основі термопластичних або термореактивних полімерів; жорсткий міцний наповнювач (органічної та неорганічної природи) у вигляді частинок розміром у 0,2...1,2 мм, волокон, стрічок і ін., антифрикційні наповнювачі - домішки типу твердомастильних або полімерних матеріалів у високодисперсному стані.

Залежно від методу виготовлення полімерних деталей (лиття, пресування, екструзія, намотування) вміст наповнювачів становить від 20... 30% до 80...90%, антифрикційних домішок - 1...15%. Від полімерної матриці залежать тепло- і вологостійкість, стійкість до агресивних середовищ, діелектричні та інші властивості полімерних матеріалів, а також метод переробки полімерних матеріалів у виробі. Утворюють матрицю полімери в чистому вигляді або багатокомпонентні поєднання, що складаються з синтетичної смоли (полімерної або олігомерної складової), затверджувачів (каталізаторів затвердіння), а також розчинників, пластифікаторів, стабілізаторів та ін.

Властивості матриць залежать від хімічної будови, фізичного стану і структури полімерних матеріалів.

До матеріалів цієї групи відносяться полімерний матеріал «моглайс» німецької фірми «Діамант» та польської фірми «Честер молекуляр» - «Chester Metal Slide».

**Матеріал «Chester Metal Slide» фірми «Честер Молекуляр».** Це двокомпонентний пастоподібний компаунд на основі епоксидних смол з додаванням графіту та волоконних наповнювачів [51].

Область застосування - ремонт напрямних ковзання металорізальних верстатів (станини, каретки та супортів), штоків гідроциліндрів, поверхонь тертя, деталей і вузлів, шатунів, підшипників.

Технічна характеристика матеріалу:

- коефіцієнт теплопровідності – 0,3 Вт / мК;
- межа міцності, МПа: під час стискання –146, під час зсуву – 18.2;
- модуль пружності – 6500 МПа;
- ударна в'язкість – 8 кДж/м<sup>2</sup>;
- максимальна тимчасова температура – 200 °С;
- робоча температура: від -50 °С до 160 °С;

**Матеріал «Моглайс» фірми «Діамант».** Це спеціальний матеріал з найбільш тонкими наповнювачами на епоксидно-смолистій основі, призначений для ремонту пар ковзання (напрямних, підшипників тощо) [52, 53].

У порівнянні з традиційними матеріалами цей матеріал має високу ефективність, не потребує спеціальних допоміжних матеріалів і професійних знань. Методи його застосування відображені у роботах [54, 55]. Зокрема, в роботі [53] наведені приклади ремонтів ушкоджень різних деталей різними полімерними матеріалами, в тому числі і при ремонті локальних пошкоджень напрямних металообробного обладнання матеріалом моглайс. Наприклад, подряпин на напрямних шліфувальних верстатів, вифрезерованих ділянок напрямних станини розточувального верстата та ремонт інших пошкоджень. Однак, відновлені в результаті ремонту такі ділянки напрямних не чинили істотного впливу на характер процесу переміщення рухомих частин верстатів з огляду на їх незначний розмір у порівнянні з розміром самої напрямної. У той же час перехід до виготовлення напрямних кардинально змінює цей характер з огляду на зміни параметрів тертя пари метал-полімер і вимагає ретельного дослідження і перевірки як триботехнічних характеристик матеріалу, так і його механічних



показників, які будуть визначати можливість використання цього матеріалу при виготовленні напрямних нових верстатів. Ще одне питання, яке виникає при виготовленні напрямних і не знайшло відображення в роботі [53] - це якість поверхні з полімеру. Якщо для відремонтованої ділянки напрямних поява раковини не носить визначального характеру в роботі пари тертя, то при виготовленні нових напрямних наявність раковин не припустима. Питання виключення появи раковин це ще одна задача, яка не була вирішена в роботі [53].

Різновиди матеріалу моглайс можна наносити в пластичному стані, відливати й нагнітати залежно від конкретних умов застосування. За допомогою цього матеріалу пропонується замінювати клеєні пластикові та металеві накладки.

Види матеріалів:

Hart – пастоподібний; P500 – рідкоплинний; FL/P – густо-рідкоплинний.

Однією з переваг матеріалу «моглайс» є його більша в 2,5 рази (50хв.) життєздатність, що дуже важливо при виготовленні напрямних великих верстатів, оскільки час нанесення матеріалу й монтажу каретки або супорта верстата перевищує ті 20 хв., відведені на цю операцію матеріалом фірми «Честер молекуляр», тому застосування його в окремих випадках стає проблематичним.

Загальна технічна характеристика матеріалу Diamant moglice:

- питома маса – 1,7 г/см<sup>3</sup>;
- міцність на стиск –140 МПа;
- температуростійкість – -40° ... + 100°С;
- час полімеризації – 24 години;
- модуль пружності – 9500...11200 МПа.

Таким чином, матеріал фірми «Діамант» має в порівнянні з «Честер Молекуляр» більш широкий спектр застосування, оскільки має три модифікації матеріалу за консистенцією й дозволяє виконувати відновлення як нагнітанням, так і нанесенням шпателем.

До вітчизняних матеріалів цієї групи, що деякий час використовувалися для нанесення на напрямні верстатів, слід віднести бутакрил або епоксидно-акрилову пластмасу СХЕ - 2. Ці матеріали мають невисокий коефіцієнт тертя по металу і

гарну адгезію, застосовувалися під час ремонту напрямних ковзання металорізальних верстатів. Однак, з огляду на те, що затвердіння цих матеріалів після змішування компонентів супроводжується виділенням тепла [56], отримати ідеально точне з'єднання не завжди можливо, бо після охолодження матеріал стискається й дає усадку. Тому рекомендують виконувати ці операції під тиском, що потребує виготовлення спеціального оснащення [56]. У поєднанні з такими явищами як старіння й подальше руйнування шару полімеру та недостатня його зносостійкість [1] зазначені вище недоліки не дозволили застосовувати вітчизняні матеріали при виготовленні нових верстатів.

**Альтернативні матеріали та методи.** Як базу для дослідження властивостей фрикційних та антифрикційних матеріалів [57] використовують матеріали на основі епоксидно-діанової смоли марки ЕД-20, твердий поліетиленполіамін та лаки-модифікатори з наповнювачами з базальтового та вуглецевого волокна, а також порошок графіту, фторопласту та оксиду міді. Такі матеріали мають різний ступінь наповнення – мало, середньо та високо наповнену. Проте, навіть незалежно від ступеня наповнення, матеріали мають високий коефіцієнт тертя.

Зносостійкість композитів на основі просторово-сітчастих полімерів, у тому числі й на основі епоксидів смол, визначається переважно ступенем зшивання зв'язуючого. У роботах [58, 59] встановлено істотний вплив будови макромолекул епоксидних смол на опір зношування сітчастих полімерів, сформованих на їх основі. Значно менше досліджено вплив температури формування та впливу теплостійких модифікаторів на просторово-сітчасту структуру і зносостійкість епоксидних полімерів. Розглянуто вплив модифікування епоксидних полімерів і температури затвердіння на зносостійкість і фізико-механічні властивості матеріалу, а також встановлена кореляція між опором фрикційно-контактної втоми й параметрами структури епоксидних полімерів, що дозволяє розробити методи управління фрикційними і фізико-механічними властивостями матеріалів антифрикційного призначення шляхом більш повної реалізації потенційних можливостей базових зв'язуючих [60].

Однак результати цих експериментів не були доведені до широкого використання в промисловості, і тому відсутність таких матеріалів на ринку України не дозволяє реалізувати не тільки їх використання але й перевірку їх трибо технічних показників.

Також для реалізації завдання щодо підвищення мікротвердості поверхневого шару напрямних був запропонований варіант газополуменевого напилення з одночасним оплавленням покриття [61].

В інших джерелах [62, 63] для дослідження впливів покриттів на нестабільні переміщення вузлів верстата використовували композитні матеріали, отримані методами порошкової металургії шляхом спікання сумішей порошків міді та заліза з легуючими домішками порошків олова, свинцю, графіту, дисульфиду молібдену (див. таблицю 1.2). Товщина сформованих шарів покриття на перевищувала 4-5 мкм.

Таблиця 1.2 - Альтернативні матеріали та їх склад

Матеріал	Склад, % маси					
	Cu	Sn	Pb	Fe	C	MoS <sub>2</sub>
ЗД20С10Гр2	20	-	10	решта	2	-
БрО8320ДМ2	решта	8	-	20	-	2
БрО5С20Гр0,5ДМ0,5	решта	5	20	-	0,5	0,5
БрО9С8Гр734	решта	9	8	4	7	-

У ході експерименту [64] було встановлено, що для покращення трибологічних характеристик пар тертя кращим матеріалом є бронза, легована порошками графіту та заліза (БрО9С8Гр734) для загартованої сталі 45, а для загартованого чавуну СЧ20 – матеріал на основі бронзи, легований порошками графіту та дисульфиду молібдену (БрО5С20Гр0,5ДМ0,5). Досліди були проведені за умови швидкостей 125 та 190 мм/хв., при цьому коефіцієнт тертя для обраних матеріалів дорівнював 0,1 та 0,12, відповідно.

У роботі [64] в результаті триботехнічних випробувань покриттів, сформованих із порошкових матеріалів на основі міді та заліза з легуючими домішками олова, свинцю, графіту і дисульфиду молібдену, встановлено, що в умовах зворотно-поступального переміщення досліджувані покриття забезпечують зменшення коефіцієнта тертя й інтенсивності зношування пари тертя. Крім того, експериментально встановлено закономірності впливу композиційних покриттів на антифрикційні коливання.

Враховуючи, що знайдені в процесі експериментів показники величини коефіцієнту тертя залишаються достатньо великими, а технологія виготовлення напрямних потребує не тільки доволі складної технології нанесення покриття, а й подальшу її механічну обробку, використання цієї технології не отримало широкого розповсюдження.

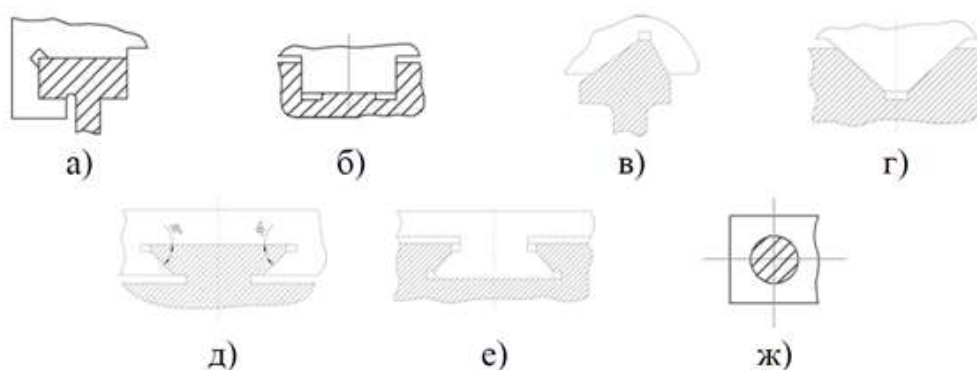
Таким чином, із розглянутого ряду матеріалів та засобів виготовлення напрямних найбільш перспективними є використання двокомпонентних полімерних матеріалів, бо застосування їх можливе без використання механічної обробки. При цьому досягається стовідсоткова взаємодія контактних поверхонь.

А серед двокомпонентних полімерних матеріалів важливою перевагою матеріалу «моглайс» є короткий час набору повної міцності - 24 години, порівняно з 7 добами у матеріалу Честер-молекуляр, що, у решті-решт, істотно розширює можливості використання композита за рахунок підвищення продуктивності процесу виготовлення напрямних. І, нарешті, як це впливає з наведених вище технічних характеристик, модуль пружності матеріалу «моглайс» у 1,3-1,5 разу вище, ніж у матеріалу Честер-молекуляр, що робить використання матеріалу «моглайс» кращим варіантом для виготовлення напрямних ковзаня.

Конструкції напрямних. На практиці для напрямних прямолінійного руху застосовують такі типи перерізів: призматичні, трикутні, трапецивидні, що зображені на рисунку (1.4) [65].

При цьому можливі варіанти їх виконання у вигляді охоплюючого профілю, як видно з рисунку, або у вигляді охопленого. Перевагу має охоплюючий профіль як той, що забезпечує утримання мастила за рахунок утворення масляної ванни

[1]. Оскільки крім утримання мастила одним з основних критеріїв оцінки типу перетину є трудомісткість виготовлення і ремонту, полімерні композитні матеріали можуть забезпечити нескладну технологію виготовлення напрямних такого типу при наявності відповідного шаблону, який виготовити не представляє особливих труднощів. З цієї точки зору виконання двох основних критеріїв оцінки перетину при використанні напрямних з охоплюючим профілем, роблять застосування такого профілю напрямних найбільш доцільним.



а) прямокутні напрямні; б) призматичні напрямні; г) V-подібні напрямні;  
д, е) ластівчин хвіст.

Рисунок 1.4 - Типи напрямних ковзання.

Ще один аргумент на користь використання полімерних матеріалів і полегшення при цьому їх виготовлення відноситься до тих випадків, коли напрямна при обмежених габаритах виконується одна із замкнутих контуром (піноли, колони) і має один з профілів показаних на рис.1.5.

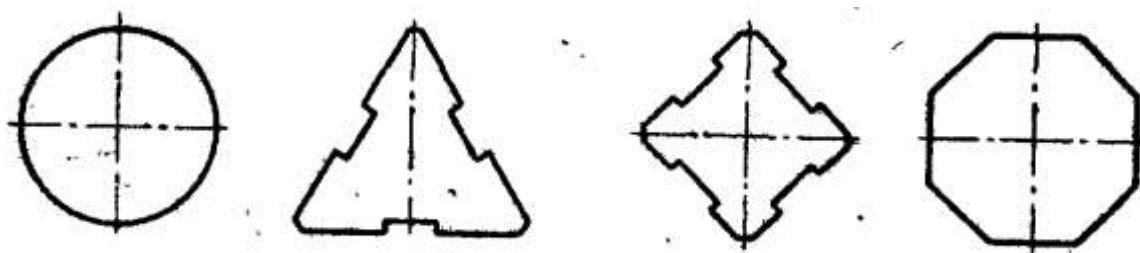


Рисунок 1.5 - Види профілів напрямних

В цьому випадку виникає проблема виготовлення замкнутого контуру в корпусі каретки або столу, що переміщуються по цій напрямній.

При дотриманні умов початкової точності, жорсткості і трудомісткості виготовлення застосування полімерного композитного матеріалу забезпечить виготовлення внутрішньої поверхні замкнутого контуру шляхом нагнітання полімеру в зазор між шаблоном і внутрішньою поверхнею охопленого контуру, тобто представляється можливим виготовити напрямну з мінімальною трудомісткістю.

Таким чином, спрощення виготовлення як напрямних, так і відповідних поверхонь супортів, столів та інших рухомих частин верстата також свідчать на користь доцільності застосування полімерних композитів при виготовленні пар тертя металорізальних верстатів.

## **1.2 Аналіз робіт, присвячених вивченню динаміки роботи напрямних та механічних властивостей різних пар тертя**

Підвищення експлуатаційних характеристик верстатів і, перш за все, їх вібростійкості, для металорізальних верстатів є досить актуальним завданням. Явища вібрацій у верстатах досить складні й різноманітні, вони розглянуті в багатьох наукових працях [10], [65-74], [76] А.П. Соколовського, А.Ю. Ішлінського, І.В.Крагельського, А.В. Каширіна, В.Б. Струтинського та інших.

Найбільш розповсюдженою формою коливань у верстатах є автоколивання, які характеризуються тим, що виникають унаслідок процесів різання й несталістю сил тертя в напрямних елементах верстату.

Існує цілий ряд теорій, що пояснюють автоколивальний процес. Професор А.І. Каширін [10] вважав, що причина коливань у зменшенні сил тертя при збільшенні швидкості різання. Професор А.П. Соколовський [8] пояснив причину автоколивань зміною сили різання, яка зростає при відході різця від деталі й зменшується, коли різець вривається в ненаклепані шари металу. Цей факт

заперечується вченими, бо вказане явище може розглядатися як коливання об'єкта з одним ступенем свободи.

Іноді коливання визначаються не фізико-хіміко-механічними процесами в зоні тертя, а динамічними характеристиками всієї системи в цілому, що має свої форми й декременти затухання. При цьому реальні фрикційні системи належать до систем зі змінною жорсткістю, яка залежить від процесів, що відбуваються в зоні тертя.

Більш переконливою є теорія виникнення автоколивань, якщо розглянутий вузол верстата має не менше, ніж два ступені свободи, реалізована В.А. Кудіновим, Глухим І. і Л. Шпачеком [75]. Пояснюють виникнення коливань тим, що траєкторія різця щодо заготовки має форму еліпса, на ділянці еліпса, де напрямок сили різання майже збігається з напрямком руху різця, ця сила виконує додатну роботу, на іншій ділянці - від'ємну. За один цикл додатня робота перевищує від'ємну і це підтримує коливальний процес. Під час автоколивань створюється невідповідність зміни сили різання від товщини зрізаного шару в результаті відставання в часі.

Відповідно до теорії Кудінова В.А., вузол може не тільки переміщатися в напрямку руху, а й підніматися над напрямними. Це «спливання» відбувається під дією гідродинамічної підйомної сили шару мастила і призводить до зменшення сил тертя. Релаксаційні коливання призводять до нестійкого переміщення вузлів і можуть викликати значні динамічні навантаження на вузли верстата, на різальний інструмент, а також недостатню якість оброблюваних деталей.

На інтенсивність і характер коливань у верстатах впливають не тільки процеси обробки, але й сама пружна система, яка, як зазначає В.А.Кудінов [75], являє собою, з точки зору динаміки, активну енергетично замкнуту систему. Під впливом сил різання й тертя пружні елементи верстата деформуються; у результаті змінюються умови його роботи.

Більш детально зупинимося на фрикційних автоколиваннях при повільних переміщеннях вузлів [77], бо цей діапазон швидкості подач під час використання полімерних матеріалів залишається не дослідженим.

За малих швидкостей ковзання часто спостерігається різко виражена нерівномірність руху, що супроводжується фрикційними автоколиваннями, тобто періодично відбуваються зриви й зупинки вузлів, які переміщуються по напрямних. Такого роду стрибкоподібний рух є характерним для верстатів високої точності, коли необхідно забезпечити переміщення зі швидкостями порядку кількох десятків міліметрів за хвилину й менше. Стрибкоподібний рух часто має місце також у важких верстатах навіть за більш високих швидкостей.

Розвиток напряму теорії фрикційних автоколиваний (ФА) налічує багаторічну історію. Одна з перших механічних моделей ФА, яка виникла в теорії автоколиваний радіоелектронних систем – вантаж на рухомій стрічці – була запропонована Б. Ван-дер-Поєм у 1930 році. Якісний опис ФА релаксаційного типу було надано в роботах [65, 66].

Вагомі результати отримані в роботах [67-77] такими вченими, як: Ішлінський А.Ю. [67], Ветюков М.М. [74], Пуш В.Є [77].

Принципово важливе значення ФА мають у верстатобудуванні, оскільки визначними є такі важливі фактори експлуатаційної якості роботи верстатів, як рівномірність малих швидкостей переміщень і точність настановних переміщень. Нерівномірність подачі присутня в верстатах майже всіх типів [75-86], вона є не припустимою, особливо в сучасних верстатах з ЧПУ. Фрикційні автоколивання призводять до нестабільного переміщення вузлів верстата, що викликає значні динамічні навантаження на вузли верстата й на різальний інструмент і, як наслідок, похибки при обробці деталей.

Фрикційні автоколивання, як зазначалось у [77, 78], залежать від різниці коефіцієнта тертя статичного та кінематичного. Відомо: ще Ш.О. Кулон в 1785 році звернув увагу на той факт, що сила статичного тертя (її максимальне значення), як правило, перевищує силу кінетичного тертя, а величина її зростає зі збільшенням тривалості контакту. Такий же характер зміни сили статичного тертя отримано іншими авторами [79, 80] під час дослідженні різних пар, які труться в умовах, близьких до роботи верстатних напрямних ковзання. Кулон у силу тертя ввів дві складові: адгезійну і механічну  $F_{адг}$ ,  $F_{мех}$ , тобто



$$F_{\text{тер}} = F_{\text{адг}} + F_{\text{мех}} . \quad (1.1)$$

Таким чином, сила тертя дорівнює добутку приведенного коефіцієнта тертя  $f_{\text{пр}}$  на силу нормального тиску  $N$

$$F_{\text{тер}} = f_{\text{пр}} \cdot N , \quad (1.2),$$

$$\text{де } f_{\text{пр}} = f_{\text{м}} + f_{\text{адг}} \quad (1.3)$$

$f_{\text{м}}$  ,  $f_{\text{адг}}$  - механічний та адгезійний коефіцієнти тертя.

Для з'ясування залежностей цих коефіцієнтів тертя від сили нормального тиску і швидкості ковзання використовувалися експериментальні установки [81].

У результаті експериментів зроблені висновки:

- за умови великого навантаження  $N$  адгезійний коефіцієнт тертя  $f_{\text{адг}}$  менший. За умови великих значень адгезійна складова сили тертя переважає над механічною;

- в області малих швидкостей механічний коефіцієнт тертя  $f_{\text{мех}}$  більший за  $f_{\text{адг}}$ ;

- для великих швидкостей величина  $f_{\text{мех}}$  практично не змінюється. Про це свідчать графічні залежності, отримані для різних пар тертя [77].

Як відомо, [83, 84], під час дослідження стійкості руху на верстатах істотне значення має крутизна характеристики сили тертя. І це підтверджується наведеними нижче графіками (рис. 1.6-1.9).

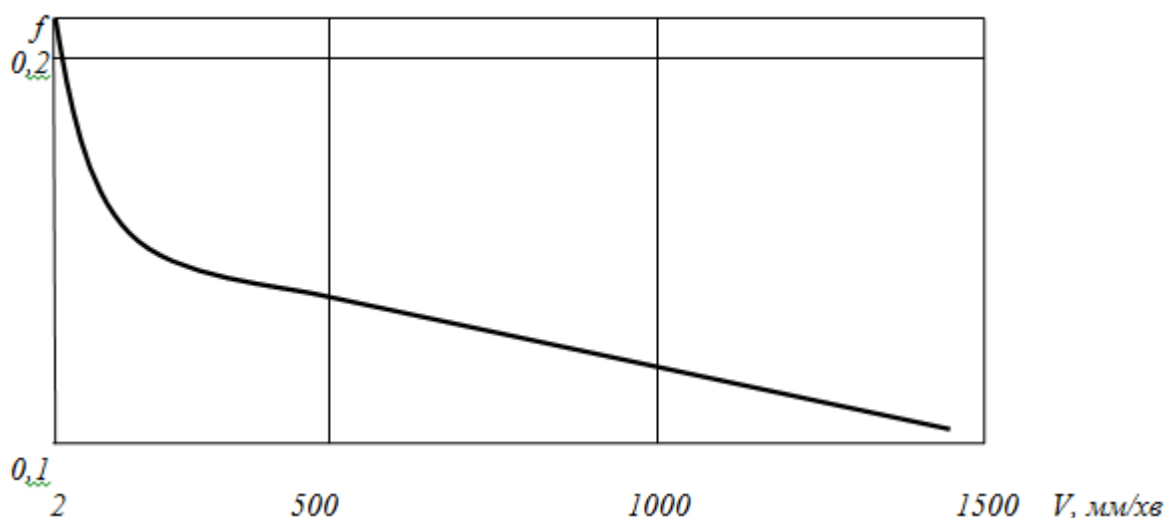


Рисунок 1.6 - Характеристика коефіцієнта тертя  $f$  для пари чавун-сталь 40.

Аналіз цих графіків показує, що за умови швидкостей менших, ніж 100 мм/хв у металевій парі тертя починається збільшення коефіцієнта тертя до значення 0,2. У той же час використання текстоліту в парі з чавуном не тільки збільшує коефіцієнт тертя на великих швидкостях, але й зсуває межу швидкості, за якої починається зростання коефіцієнта тертя до 200-350 мм/хв.

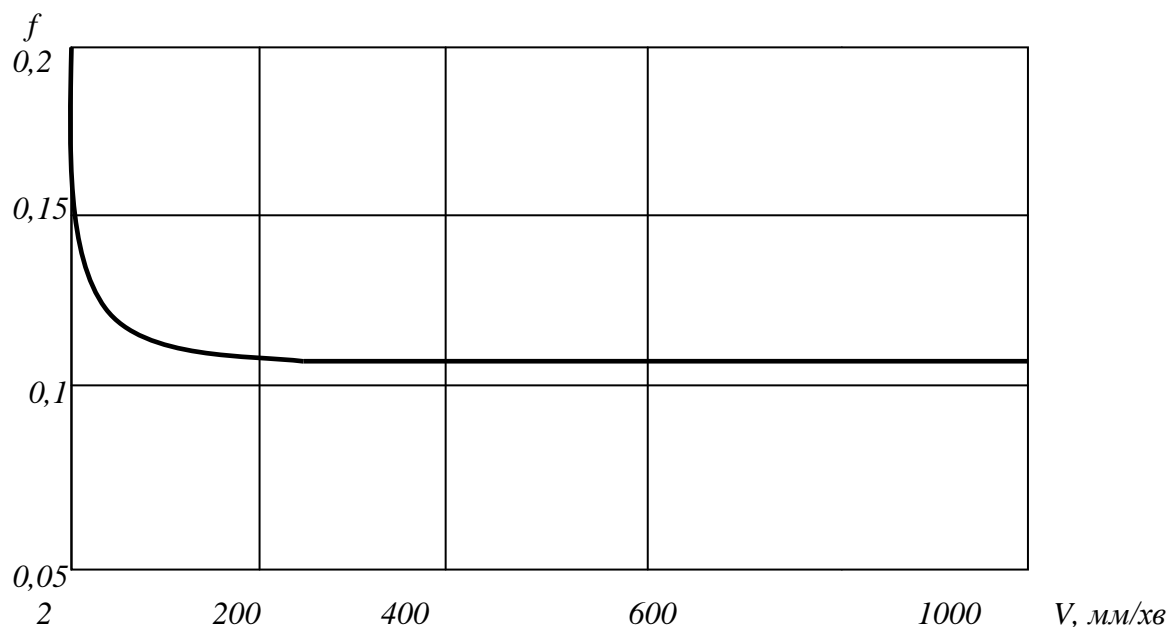


Рисунок 1.7 - Характеристика коефіцієнта тертя  $f$  для пари чавун-чавун.

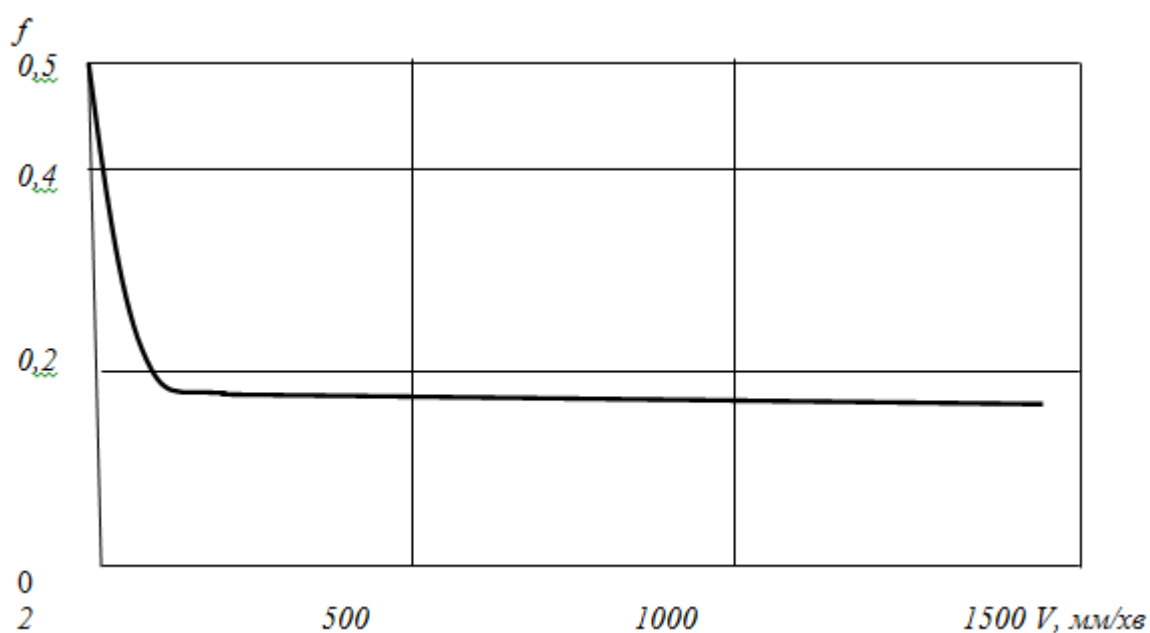


Рисунок 1.8 - Характеристика коефіцієнта тертя  $f$  для пари чавун-текстоліт.

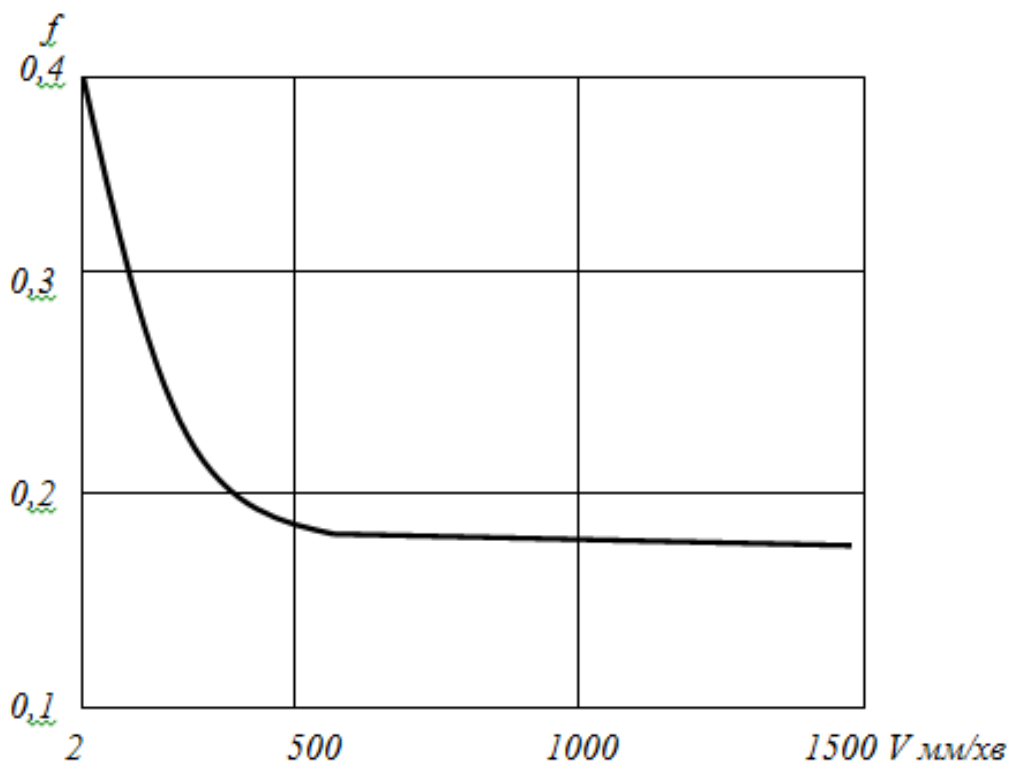


Рисунок 1.9 - Характеристика коефіцієнта тертя  $f$  для пари текстоліт-текстоліт.

Величина коефіцієнтів тертя для традиційних пар тертя у відповідності з даними роботи [77] наведена у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Значення коефіцієнтів тертя спокою, ковзання та їх різниці для різних пар тертя.

Матеріал пари тертя	Коефіцієнт тертя спокою $f_0$	Коефіцієнт тертя ковзання $f$	Розрахункове значення $\Delta f = f_0 - f$
Чавун–чавун	0,25-0,27	0,15-0,17	0,10
Сталь–чавун	0,20-0,25	0,05-0,15	0,12
Сталь–сталь	0,13-0,16	0,05-0,10	0,10
Сталь–бронза	0,15-0,20	0,10-0,15	0,05
Чавун–бронза	0,20-0,25	0,15-0,17	0,06
Чавун–текстоліт	0,23-0,30	0,17-0,20	0,10
Чавун–фторопласт	0,05-0,07	0,02-0,03	0,03

З підвищенням значення цієї різниці критична швидкість, за якої починається стрибкоподібне переміщення рухомих вузлів верстата, зростає та досягає 200 мм/хв. [77]. Але ще більші значення критичних швидкостей можуть з'являтися під час роботи важких верстатів, які виробляють такі деталі, як великогабаритні турбіни для електростанцій, корпуси великих перекачувальних насосів, валки прокатних станів, вагою від 10 т та вище. Переривчастий рух у таких верстатах може з'являтися і при більших значеннях швидкостей. Наприклад, під час випробування копіювально-фрезерного верстата стрибкоподібний рух вузла фрезерної головки (вага  $\approx 20$ т) спостерігався в діапазоні швидкостей 400-500 мм/хв. [77]. Іншим прикладом може бути робота фрезерувального верстата моделі 7288Ф, у якого швидкість, під час якої з'являвся стрибкоподібний рух, становила 350 мм/хв. [77]. Ще більше значення критичної швидкості було встановлено у важкого карусельного верстата з вагою рухомих частин разом із заготовкою, близькою до 120 т при обробці деталі діаметром до 10 м. Критична швидкість для цього випадку становила 603 мм/хв [77].

У зв'язку з цим, актуальним є вибір шляхів усунення ФА чи хоча б зниження їх рівня для безпечної роботи верстата. Тут можливі дослідження удвох напрямках.

По-перше, у трибологічному аспекті, який включає вивчення триботехнічних характеристик фрикційного контакту та розробку нових матеріалів.

По-друге, у плані досліджень динаміки верстатів, що містять фрикційні елементи. При цьому, ставиться питання про стабільність руху залежно від параметрів механічної системи з урахуванням характеристик фрикційного контакту.

Згідно з теорією, висунутою в 1944 році А.Ю. Ішлінським та І.В. Крагельським [67], сила тертя зростає з тривалістю нерухомого контакту. Саме тому в експерименті перший стрибок по амплітуді перевищує наступні. Базуючись на цій теорії, згодом у роботі [86] були побудовані моделі ФА, в яких

виявлені стохастичні режими. Однак Ле Суан Ань [86], аналізуючи проведені ним експерименти, приходять до висновку про незалежність сили зрушення з місця від тривалості нерухомого контакту. Ця сила, на його думку, визначається швидкістю тангенціального навантаження, зменшуючись при зростанні цієї швидкості.

Переважаючою причиною автоколивань, як визначалося в більшості перелічених робіт, є нелінійна, з «спадаючою» ділянкою, залежність коефіцієнта тертя від відносної швидкості. При цьому характеристика може мати експоненційну, кусково-лінійну або стрибкоподібну залежність [87].

Стрибкоподібний рух повзуна по шорсткій основі, що рухається зі швидкістю  $v$ , Д. Мур пояснює спадаючою залежністю коефіцієнта тертя у вигляді [88].

$$f = f_0 - q_B \cdot v, \quad (1.4)$$

де  $f_0$  – постійна величина,

$q_B$  – тангенс кута нахилу кривої залежності коефіцієнта тертя від швидкості в конкретній точці В,

$v$  – відносна швидкість ковзання повзуна.

Якщо величина  $q_B$  більша, ніж коефіцієнт демпфування, поділений на масу повзуна, то має місце експоненційний закон його руху. Це впливає з аналізу розв'язку диференційного рівняння руху повзуна.

Дослідженнями залежності сили тертя від швидкості ковзання займалися Л.С. Мурашкін та С.Л. Мурашкін [83] за допомогою спеціального експериментального обладнання. Вивчалось тертя металевих, змішаних та неметалевих пар. Незалежно від матеріалу для малих швидкостей, як визначено авторами, коефіцієнт тертя залишається постійним. При зростанні швидкості ковзання характеристика тертя стає нелінійною з «падаючою» ділянкою. Це призводить до того, що в області малих значень швидкостей виникає автоколивальний рух, який порушує плавність руху провідних органів верстата.

При дослідженні стабільності руху на верстатах автори [83] помітили, що крутизна характеристики механічної складової сили тертя в області малих швидкостей більша, ніж крутизна характеристики адгезійної складової. Поділ сили тертя на адгезійну та механічну складову є в роботах багатьох дослідників: Крагельського, Гюмбелі, Баудена та інших [67], [87]. За умови невеликих навантажень тертя ковзання, в основному, визначається адгезійною складовою. Коли навантаження  $N$  достатньо велике, тертя ковзання характеризується механічною складовою, а коефіцієнт тертя  $\mu$  є функцією швидкості:

$$F_{\text{тер}} = \mu(v) \cdot N \quad (1.5)$$

Авторами роботи [88] отримані залежності коефіцієнта тертя для спектра швидкостей від 2 до 1500 мм/хв. для різноманітних пар тертя, а саме: сталь-сталь, чавун-чавун, чавун-сталь, чавун-текстоліт, текстоліт-текстоліт.

Дослідження авторів [83, 88] дають підстави умовно вважати силу тертя постійною величиною для цього вузла за певних умов зовнішнього навантаження. Перехід від статичного контакту до руху здійснюється після деформації ділянок контакту, що утворилися в статичних умовах при зворотно-поступальному русі. Досліджені фрикційні коливання при різних швидкостях відносного переміщення й питомих навантаженнях в різноманітних робочих середовищах [87].

На відміну від вищерозглянутих робіт динамічними характеристиками механічної системи визначався характер зміни сил тертя в роботі [90]. Ці характеристики включають у себе вузол тертя й передавальні ланки та залежать від процесів, що виникають на робочих поверхнях під час тертя.

Повне розкриття механіки фрикційних коливань, як зазначає В.А. Кудінов [75], потребує подальших досліджень щодо елементів формування сили тертя з урахуванням нових антифрикційних матеріалів, мастил та інших факторів.

Автори [84, 92] показали, що необхідною умовою збудження ФА є наявність «падаючої» ділянки графічної залежності коефіцієнта тертя від відносної швидкості ковзання. Часто використовується граничний випадок такої

залежності, коли кінематичний коефіцієнт тертя значно менший за коефіцієнти тертя спокою [93].

Відомо, що багато авторів [74], [77], [88] проводили математичне моделювання процесів ФА, пов'язаних зі стрибкоподібним поступальним переміщенням рухомого повзуна по шорсткій поверхні ковзання з метою визначення «критичної швидкості», за якої починається це явище. Зокрема, у [77] «критична швидкість» визначається за відомих характеристик запропонованої автором динамічної моделі: жорсткості, коефіцієнта розсіювання енергії та швидкості ведучої ланки. Складено диференціальне рівняння руху, за допомогою якого обчислюється «критична швидкість» за формулою

$$V_c = \frac{\Delta f \cdot N}{\sqrt{\Psi \cdot c \cdot m}}$$

де,  $\Delta f$  – різниця коефіцієнтів тертя спокою та руху;

$N$  – нормальна сила ;

$\Psi$  – коефіцієнт розсіювання енергії ;

$C$  – жорсткість приводу;

$m$  – маса повзуна.

Однак такий підхід до визначення «критичної швидкості» було запропоновано виходячи з чисельного рішення трансцендентного рівняння, яке було замінено автором наближеною формулою, справедливою лише для малих значень коефіцієнта затухання. І тому екстраполяція цих результатів на сучасні пари тертя, наприклад, композит-чавун не є коректною, враховуючи інші характеристики цієї пари, зокрема, інші значення розсіювання коефіцієнта енергії в порівнянні з наведеними [77]. Зважаючи на це є доцільним проведення спеціальних експериментальних та теоретичних досліджень, що передбачають точне рішення диференційного рівня ковзання, коли коефіцієнт затухання бути мати більший діапазон значень.

Інші вчені [88] запропонували визначати критичні швидкості за експериментальними даними, де коефіцієнт тертя представлений аналітичною

залежністю; було складено диференціальне рівняння руху з метою виявлення межі, за якої починається стрибкоподібний рух. У цьому випадку не враховується розсіювання енергії, яке зазвичай має місце у приводах верстатів.

Ще один підхід до оцінки «критичної швидкості» запропонував проф. Вейц В.А. [74]: за допомогою спеціального стенду вивчалися різні режими фрикційних автоколивань. Але очікувана на базі цих експериментів математична модель полягала у введенні в неї отриманих експериментальних параметрів без урахування коефіцієнтів розсіювання енергії, що зрештою не дозволяє з її допомогою визначити «критичну швидкість» аналітичним способом для різних верстатів.

Таким чином, механіка фрикційних коливань і, перш за все, пари тертя полімер-метал вимагає подальшого вивчення з метою визначення режимів роботи верстата, при якому фрикційні автоколивання будуть відсутні.

Разом з вивченням фрикційних коливань слід вважати за доцільне вивчення механічних показників двокомпонентних композитних матеріалів, які не визначені фірмою-виробником, оскільки такий матеріал є найбільш перспективним для використання в напрямних. Механічні властивості полімерного композитного матеріалу, у переважній мірі, визначають спроможність сформованого з цього матеріалу шару напрямних витримувати потрібне навантаження. До основних показників механічних властивостей композитів, які є найбільш важливими в процесі виготовлення напрямних, слід віднести адгезійну міцність та міцність на тиск. Окрім указаних показників, слід зазначати міцність на згинання та розтягування, ударну міцність, твердість та інше. Але ці останні показники не суттєво впливають на процес виготовлення та роботи напрямних і тому в цій роботі розглядатись не будуть.

Термін роботи деталей верстатів із полімерним покриттям значною мірою залежить як від швидкості зношування, так і від співвідношення адгезійних і когезійних властивостей цих полімерних матеріалів. При цьому спроможність таких матеріалів виконувати задані функції залежить від величини внутрішніх напружень, які в комплексі з дотичними фрикційними навантаженнями можуть



знизити адгезійну міцність полімеру, призвести до його відшарування та виходу верстата з ладу [22]. Міцність адгезійного зв'язку з металевою основою напрямних, насамперед, визначає витривалість композитного полімерного шару. Залежність цього явища визначається цілим рядом факторів, таких як природа полімерного матеріалу, марка сталі або чавуну, з яким він з'єднується. Адгезійна міцність полімерних композитів залежить також від товщини шару композита, бо з його зростанням міцність адгезійних зв'язків суттєво знижується. Це пояснюють окремі автори [22], перш за все, підвищенням дефектності його товстого шару, тобто масштабним фактором. Адгезійна міцність також залежить від внутрішніх напружень, які можуть з'явитися під час виготовлення шару композита, або при його експлуатації. Такі проблеми виникали раніше при використанні вітчизняних матеріалів: стереокрилу та бутакрилу. Як підсумок довговічність таких матеріалів залишала бажати кращого, бо шар композита розтріскувався та відділявся від металу. З цієї точки зору необхідно з'ясувати величину адгезійних зв'язків матеріалу «моглайс» при виникненні зсувних навантажень. Це актуально, оскільки цих даних немає в технічних характеристиках матеріалів, наведених виробником, наприклад фірмою «Діамант металпластик, GMBH» [52].

Разом зі зсувними навантаженнями на шар полімеру будуть впливати й стискаючі навантаження, які можуть бути визначальними при оцінці можливості застосування цих матеріалів на великих розточувальних верстатах. Однак, характеристики меж міцності на верстаті цього матеріалу, рекламовані фірмою - виробником, які наведені в розділі 1.1, визначалися відповідно до Європейського стандарту DIN 53454 [52], який пропонує виконувати випробування зразка діаметром  $\varnothing$  20 мм і висотою 20 мм, у той час, як у випадку застосування цього матеріалу для виготовлення напрямних товщина шару коливається в межах 1,5 - 2,0 мм. Така товщина є необхідною і достатньою умовою, оскільки, з одного боку такого шару достатньо для тривалої роботи верстата, а з іншого - такий вибір пояснюється економічними міркуваннями, пов'язаними з вартістю матеріалу й відсутністю необхідності подальшого потовщення його шару. Окрім того, як було

вказано вище, збільшення шару полімеру по товщині може призвести до зниження адгезійної міцності внаслідок появи масштабного чинника [22].

Саме з цієї причини при застосуванні полімеру такої товщини в різних типах верстатів і при різних навантаженнях виникає необхідність проведення досліджень і визначення несучої здатності матеріалу «моглайс» та його міцності на стискання при товщині його шару, у зазначених вище межах.

Ще один момент, який є невизначеним і вимагає практичної перевірки, - це вплив на полімерний матеріал різних речовин, які під час роботи верстата можуть потрапляти в тому чи іншому вигляді на напрямні. Існує ймовірність того, що деякі речовини можуть взаємодіяти з полімером і викликати його набухання, що, у свою чергу, може призвести до їх інтенсивного зношення і до виходу верстата з ладу. З цієї точки зору, перш ніж робити висновок про можливість виготовлення напрямних з того чи іншого композитного матеріалу, слід вивчити взаємодію цього матеріалу з іншими матеріалами, наприклад: маслами, водою, - які можуть потрапляти на напрямні під час роботи.

Триботехнічні характеристики композитних полімерних матеріалів, які є найбільш важливими та визначають можливість їх використання для виготовлення напрямних - це, перш за все, сила тертя та зношування. Ці параметри дозволяють отримати інформацію для прогнозування їх експлуатаційних властивостей. Деякі характеристики зношування полімерних матеріалів були наведені в роботах [53], [101]. Вони можуть дати необхідні дані, які свідчать про досить високу витривалість цього матеріалу під час моделювання процесу роботи напрямних верстатів. Складніше визначити коефіцієнт тертя в широкому діапазоні швидкостей. Для вітчизняних епоксидних композитів ці параметри були частково знайдені [22], але їх триботехнічні характеристики та, перш за все, коефіцієнти тертя були досить великими, щоб сподіватися на достатню зносостійкість. Саме тому вони не знайшли широкого застосування при відновленні напрямних. У нашому випадку для полімерного матеріалу, який буде обраний в якості експериментального зразку, виникає необхідність у визначенні як коефіцієнта тертя ковзання за різних швидкостей і температур, так і показників

коефіцієнта тертя спокою. Ці обидва параметри будуть необхідні під час теоретичного аналізу процесу тертя на напрямних з полімеру та визначення меж появи фрикційних автоколивань у парі тертя чавун-полімер. Отже, цей показник, нарешті, дасть можливість оцінювати доцільність використання матеріалу при виготовленні напрямних, а також рекомендувати надійні режими роботи верстатів.

### **Висновки**

1. Проведений аналіз матеріалів та технологій для виготовлення напрямних дозволив встановити, що використання двокомпонентних полімерних матеріалів є доцільним, оскільки ці матеріали внаслідок поліпшення антифрикційних властивостей можуть дозволити підвищити експлуатаційні характеристики напрямних ковзання металорізальних верстатів.

2. Встановлено, що у якості двокомпонентного полімерного матеріалу можна використати, наприклад, матеріал «моглайс» німецького виробника, однак при цьому необхідно вивчити його механічні та триботехнічні властивості, які не були визначені фірмою-виробником та знання яких необхідне для використання цих матеріалів при виготовленні напрямних важких верстатів. Враховуючи, що технологія відновлення напрямних для цих верстатів недостатньо відпрацьована.

3. Встановлено, що механіка фрикційних коливань пари тертя полімер-метал вимагає подальшого вивчення з метою визначення роботи верстата, при якому фрикційні автоколювання будуть відсутні та встановлення меж їх використання.

4. Встановлена необхідність подальшого розвитку та розробки способів та методів використання полімерних матеріалів для підвищення якості виготовлення напрямних.

## 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 для верстатів тобто швидкостей, за яких можлива поява переривчастого стрибкоподібного руху супорта.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз різних пар тертя та обґрунтувати вибір матеріалу для виготовлення напрямних;
- дослідити міцнісні характеристики полімерного матеріалу, що використовується для виготовлення напрямних каретки металорізальних верстатів;
- визначити коефіцієнт тертя ковзання та коефіцієнт тертя спокою пари тертя полімер-чавун і чавун-чавун;
- установити закономірності підвищення якості нанесеного полімерного покриття за використання різноманітних технологічних прийомів;
- установити закономірності появи в парі тертя чавун-полімер явища захоплення поверхонь тертя та межі виникнення ефекту фрикційних автоколиваний руху супорта;
- розробити оптимальні способи виготовлення напрямних металорізальних верстатів з використанням композитних полімерних матеріалів;
- провести виробничі випробування розроблених способів під час виготовлення напрямних розточувального верстата;
- використати результати дослідження в навчальному процесі.

## РОЗДІЛ 2

**ОБЛАДНАННЯ, МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ  
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НАПРЯМНИХ****2.1 Алгоритм дисертаційної роботи**

В подальшому реалізовано таку послідовність виконання дисертаційної роботи.

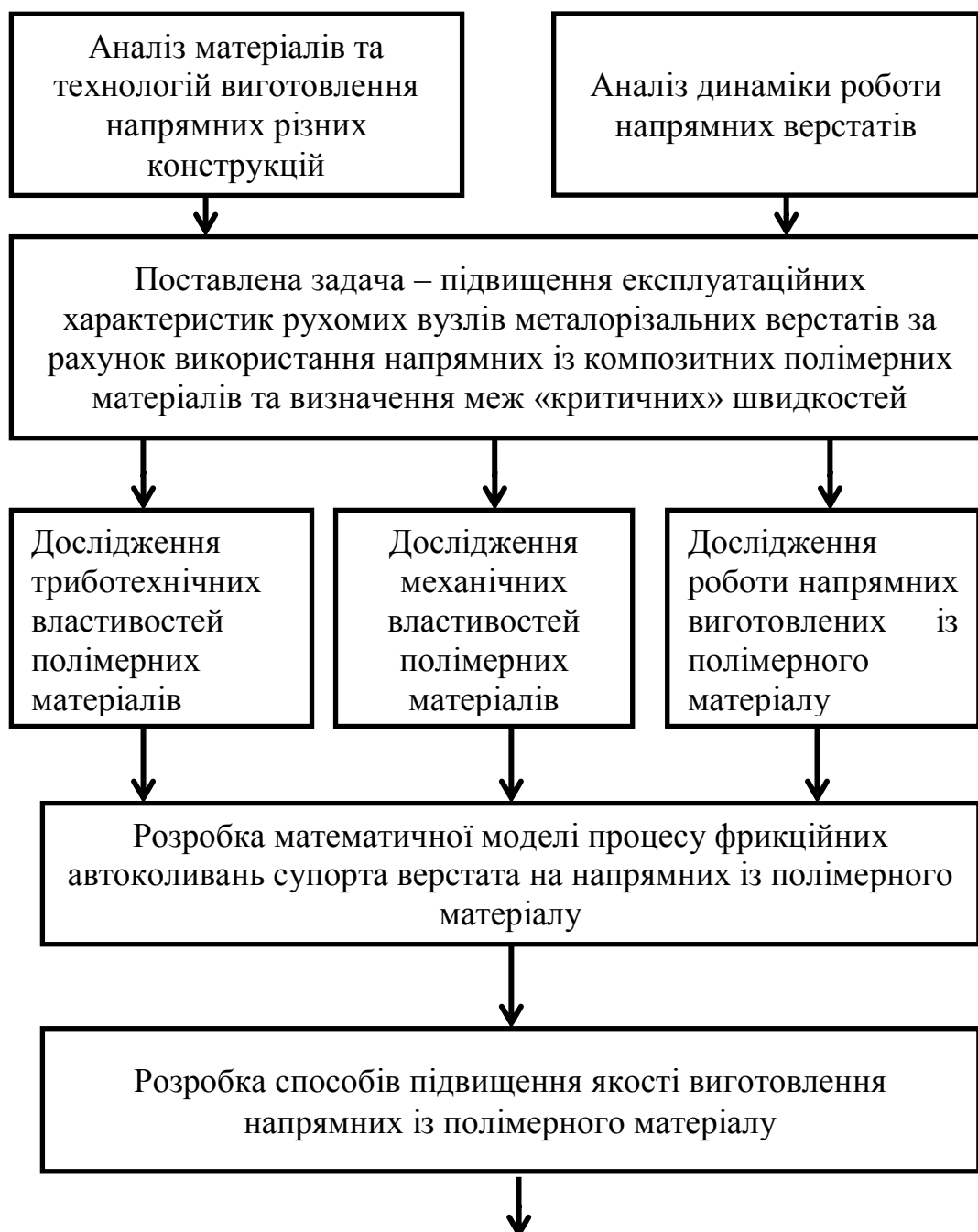




Рис. 2.1 – Структурна схема роботи

## 2.2 Обладнання та методика для визначення коефіцієнта тертя ковзання

Експериментальне визначення коефіцієнта тертя виконувалось на лабораторній установці, що була розроблена в роботі [94]. Тертя здійснювалось за схемою вал-стрічка, що дозволяло усунути попереднє мікроприпрацювання зразків та забезпечити постійність контурної площини контакту.

Схема лабораторної установки (трибометра) включає станину 1 (рис. 2.2), на якій змонтовані бабка заднього центру 2 та бабка ведучого центру 6. Між ними розташована каретка трибометра 4, на котрій безпосередньо кріпляться зразок та контрзразок. Вимірювана величина реєструється датчиком моменту тертя 3. Для зняття даних установка має стрілочний прилад.

Як зразок використовувалась шліфувальна головка універсально-розточувального верстата підвищеної точності з електроприводом постійного струму 5. Це дозволяє плавно змінювати швидкість тертя від  $1,25 \cdot 10^{-2}$  м/с до 3,14 м/с. Для контролю за кількістю обертів використовується цифровий тахометр ТЦ-3М.

На рисунках 2.2, 2.3 представлена конструкція каретки - рухомої частини трибометра. Циліндричний зразок 1 встановлюється в центрах 2 і 3, один із яких є приводним. Крутний момент на зразок передається через поводок 4, що нагвинчений на центр. Контрзразок 5 являє собою гнучку металеву стрічку, на кінцях якої напаяні дві сталеві планки.

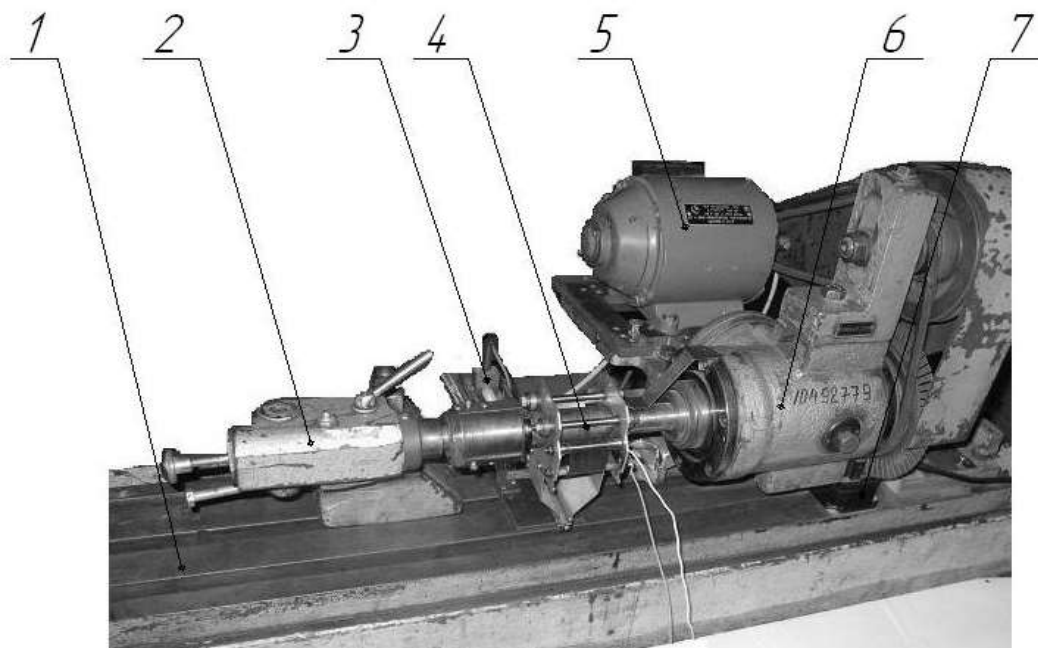


Рисунок 2.2 - Трибометр: 1 – станина; 2 – бабка заднього центру;  
 2 – датчик моменту тертя; 4 – каретка трибометра; 5 – електродвигун привода; 6  
 – бабка ведучого центру; 7 – струмознімальний прилад.

Каретка трибометра (рис. 2.3, 2.4) складається з двох боковин, стягнутих шпильками 6 та осями 7. На кінцях осей установлені чотири підшипники кочення 8. За допомогою цих підшипників каретка трибометра спирається на центри 2 та 3 і має можливість обертатися відносно осі центрів. На центри 2 та 3 установлені підшипники кочення з напресованими на них кільцями 9 і 10. Зовнішні кільця підшипників застопорені. На кільці 9 є кільцева канавка для попередження осьового переміщення каретки та контрзразка. Під час роботи каретка підшипниками 8 спирається на кільця 9 і 10. Контрзразок 5 встановлюється кінцями довгих планок в пази пластин, прикріплених до боковин каретки, а потім огинає шпильки 6 та зразок 1, як показано на рисунку 2.3. Другий кінець контрзразка з короткими планками вводиться в паз коромисла 1 з'єднується з ним за допомогою штифта 15. Коромисло з'єднується з пружинами 12, за рахунок яких і створюється зусилля навантаження на контрзразок. Зміна величини зусилля навантаження досягалась за рахунок зміни довжини стрічки контрзразка. Для того, щоб з'єднати планку контрзразка з коромислом, необхідно попередньо

розтягнути пружину. Це здійснюється за допомогою спеціального натяжного пристрою (вид А).

Момент тертя контролювався кутом повороту каретки трибометра. Для цього в нижній частині до неї прикріплена рамка 14, виконана у вигляді сектора. До одного кінця сектора приєднан тонкий сталевий трос 13. Трос з'єднаний з індуктивним датчиком лінійних переміщень та пружинами повернення.

Під час зростання моменту тертя каретка трибометра поверталася навколо осі центрів, а трос 1 переміщував за собою якір датчика 2. При зменшенні моменту тертя каретка трибометра поверталась у вихідне положення пружинами повернення 3. Для усунення автоколивань каретки трибометра та підвищення точності вимірювання моменту тертя датчик має заспокоювачі 4.

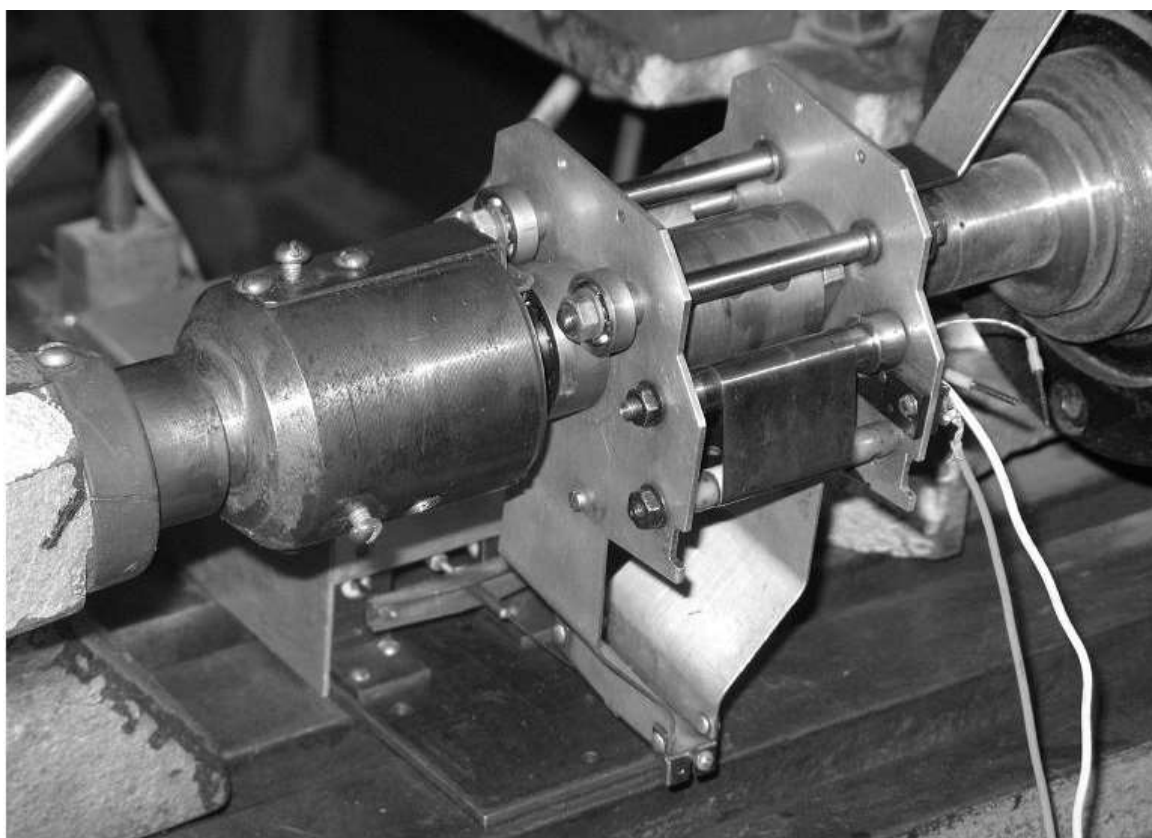


Рис. 2.3 - Каретка трибометра.



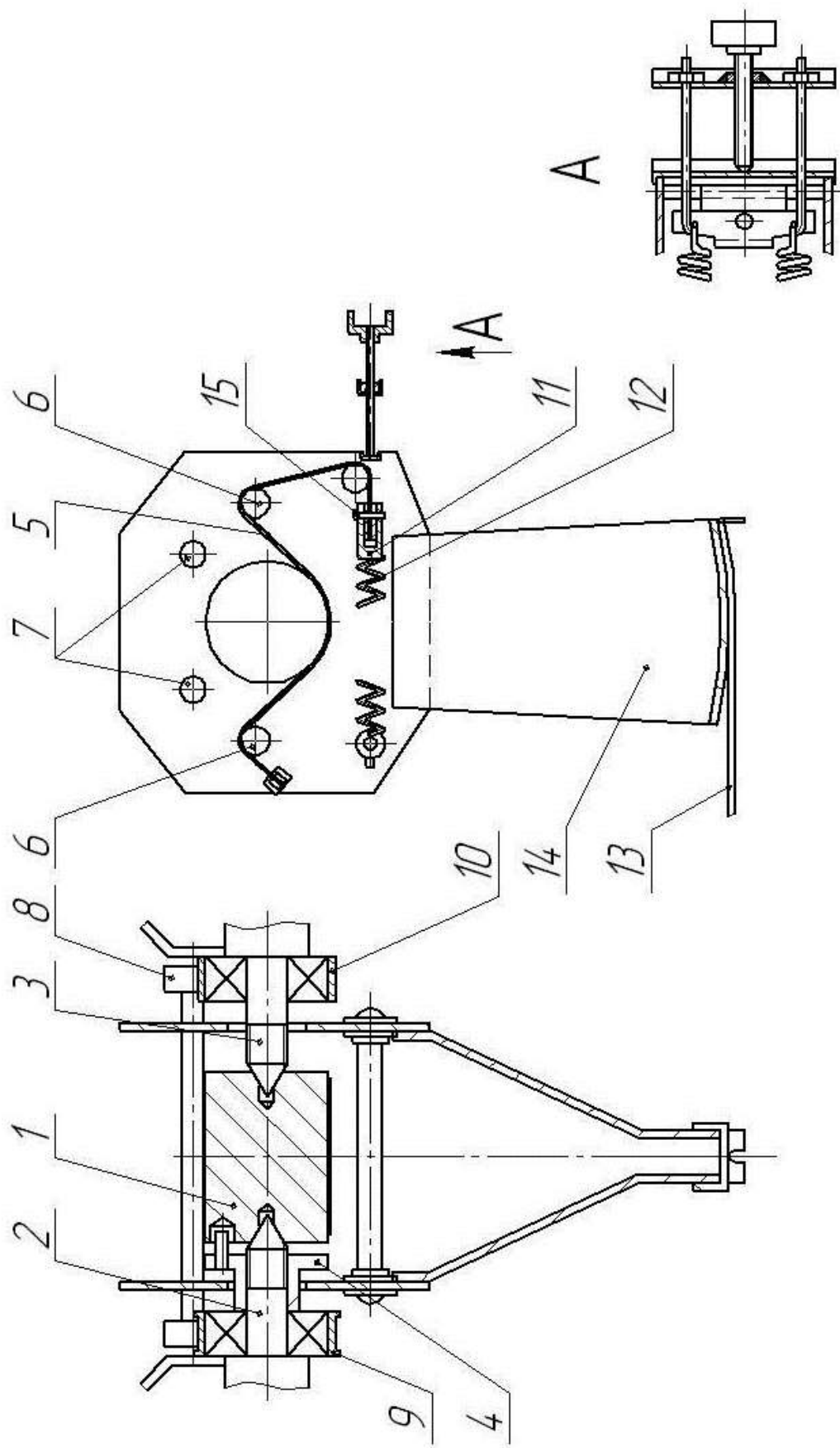


Рис. 2.4 – Каретка трибометра

Для реєстрації моменту тертя використовувався спеціально виготовлений індуктивний датчик великих переміщень з довжиною робочого ходу в 40 мм. Датчик був розрахований для підключення до електронної вимірювальної системи, призначеної для високоточних вимірів лінійних величин, що дозволяло працювати в різних діапазонах та вибрати оптимальну чутливість приладу. Частота обертання ведучого центру трибометра могла плавно регулюватися за допомогою електронного блока управління електроприводом та фіксувалась тахометром цифровим ТЦ-ЗМ.

Тарування зусилля навантаження на зразок трибометра виконувалось за допомогою приладу, зображеного на рисунку 2.5. Прилад складається з корпусу 4, в якому є центрові отвори, та зв'язаного з ним рухомого сектора 1, який фіксується від поворотів відносно корпусу 4 за допомогою двох штифтів 2. У сектор 1 запресовано палець 3 з кулькою на кінці. У корпусі 4 на двох опорах установлена пласка пружина 5. До корпусу 4 кріпиться утримувач 7 з вимірювальною головкою 8.

Тарування приладу відбувалося таким чином. У центра токарного верстата встановлювався описаний вище прилад. Через динамометр відбувалось навантаження сектора 1. Пласка пружина під впливом навантаження прогиналася, та її прогин реєструвався вимірювальною головкою. За результатами вимірювання будувався тарувальний графік.

Для визначення фактичного зусилля навантаження на зразок при заданій довжині стрічки контрзразка тарувальний пристрій встановлювався в центра трибометра одночасно з кареткою трибометра. Роль зразка в цьому випадку виконував корпус 4 (рис. 2.5) та рухомий сектор 1. Стрічка контрзразка давила на сектор 1, зусилля передавалось на плоску пружину 5, і вимірювальна головка 8 показувала прогин пружини. Далі, за тарувальним графіком визначалося зусилля навантаження на зразок при заданій довжині стрічки.

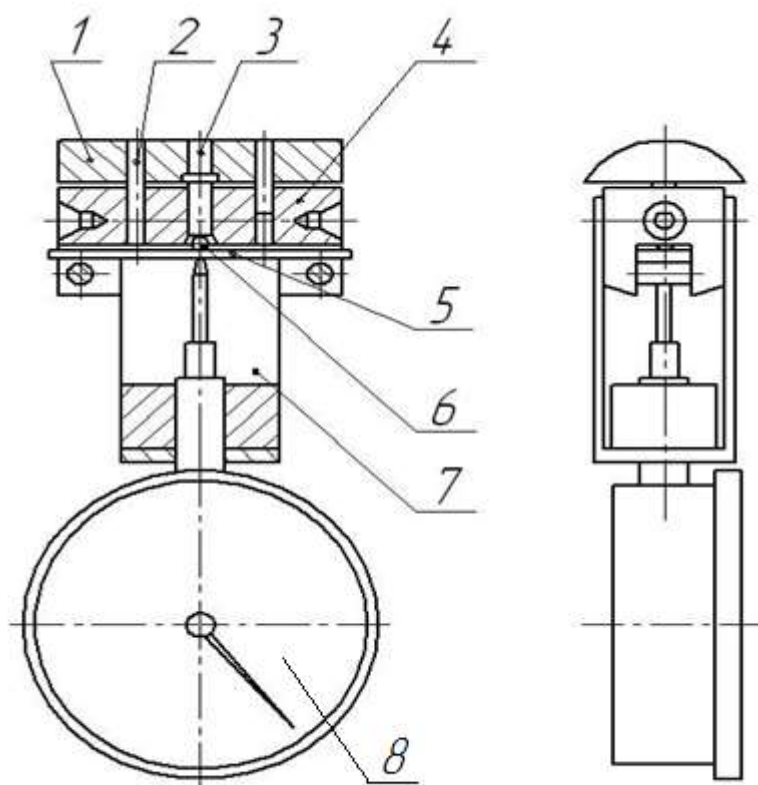


Рис. 2.5 – Прилад для тарування зусилля навантаження.

Тарування виконувалось таким чином. На раму 1 установки монтувався важіль з блоком 2 (рис. 2.6). Каретка 3 установлювалась у необхідне положення. До перекладкини 4, з'єднаною зі штоком 5, приєднувалась мотузка 6, яка огинала блок 7. Після цього, на кінець мотузки вішався вантаж 8 певної маси та знімались показання приладу.

За отриманими точками будувався тарувальний графік. Таким чином, ми отримали графіки залежності сили, докладеної до штоків датчиків  $W_{np}$  від показання приладу. Розрахунок коефіцієнта тертя відбувається за формулою:

$$f = \frac{\ln\left(\frac{6,66 \cdot W_{np}}{Q} + 1\right)}{\alpha}$$

де  $W_{np}$  - сила, докладена до штоків датчиків, Н;

$$Q = \frac{P}{\sin(\alpha/2)} = \frac{408,096}{\sin(90/2)} = 577,36 \text{ Н} - \text{сила натягу стрічки};$$

$P=408,096$  – сила навантаження зразка;

$\alpha = 90^\circ$  – кут охоплення стрічки.

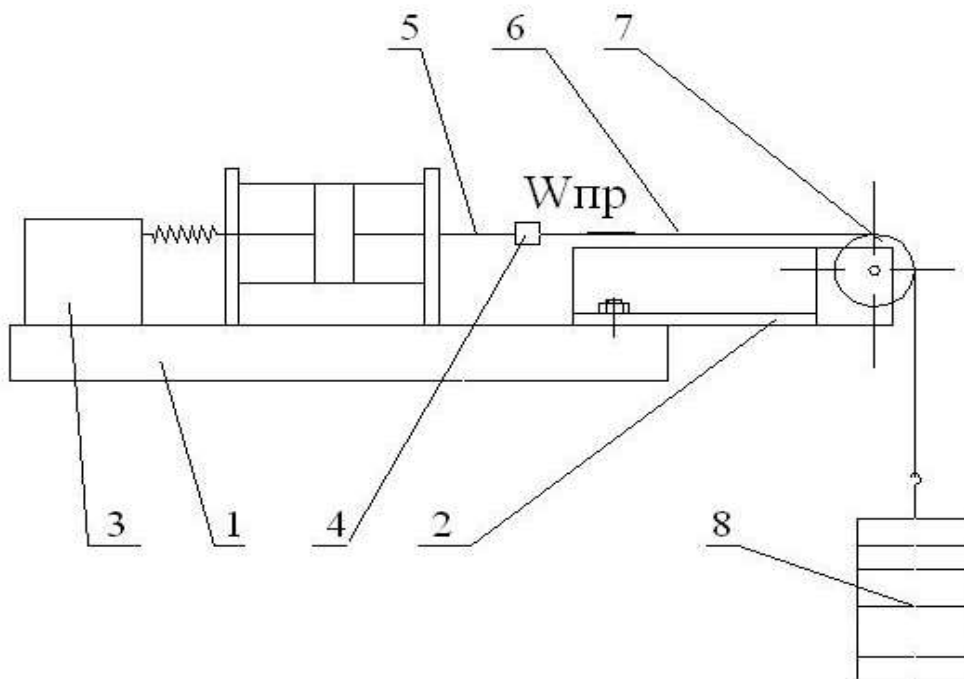


Рис. 2.6 - Схема тарування датчиків моменту тертя.

На рис.2.7 зображено тарувальний графік залежності сили, докладеної до штоків датчиків  $W_{np}$  від показання приладу.

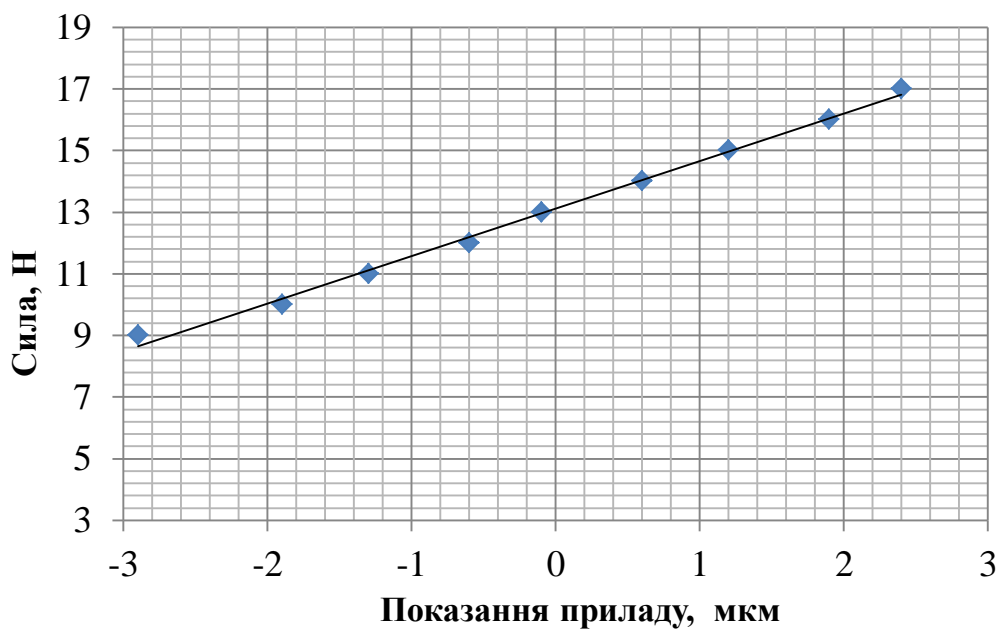
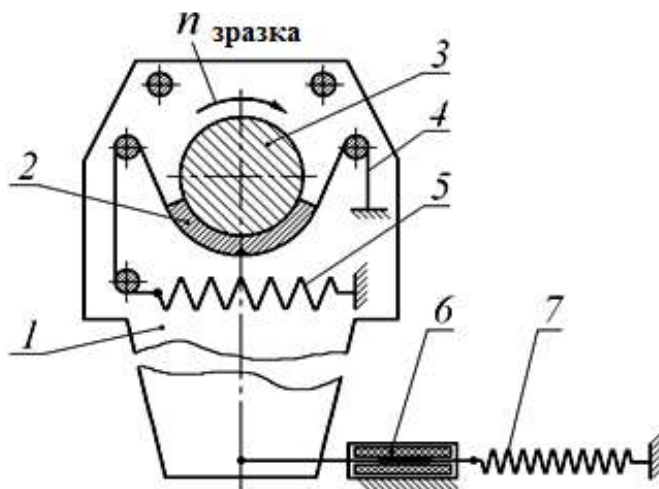


Рисунок 2.7 - Тарувальний графік залежності сили, докладеної до штоків датчиків  $W_{np}$  від показання приладу.

Для оцінки коефіцієнту тертя ковзання полімеру по чавуну був виготовлений чавунний вкладиш із чавуну СЧ35-56, який встановлювався під сталеву стрічку, як показано на рис. 2.8, та взаємодіяв зі зразком із полімеру.



1 – каретка трибометра; 2 – вкладиш; 3 – зразок; 4 – сталеві стрічка; 5 – пружини натягу стрічки; 6 - датчик кута повороту каретки; 7 - пружини повороту каретки.

Рисунок 2.8 - Схема встановлення чавунного вкладиша.

Для проведення експерименту також були виготовлені циліндричні зразки (рис. 2.9), ( $D=30\text{мм}$ ,  $h=40\text{мм}$ ). Один з яких був сталевий, а інший – із полімерного матеріалу «моглайс».



а)

б)

в)

а) зразок із матеріалу «моглайс», б) сталевий зразок, в) чавунний вкладиш

Рисунок 2.9 - Експериментальні зразки.

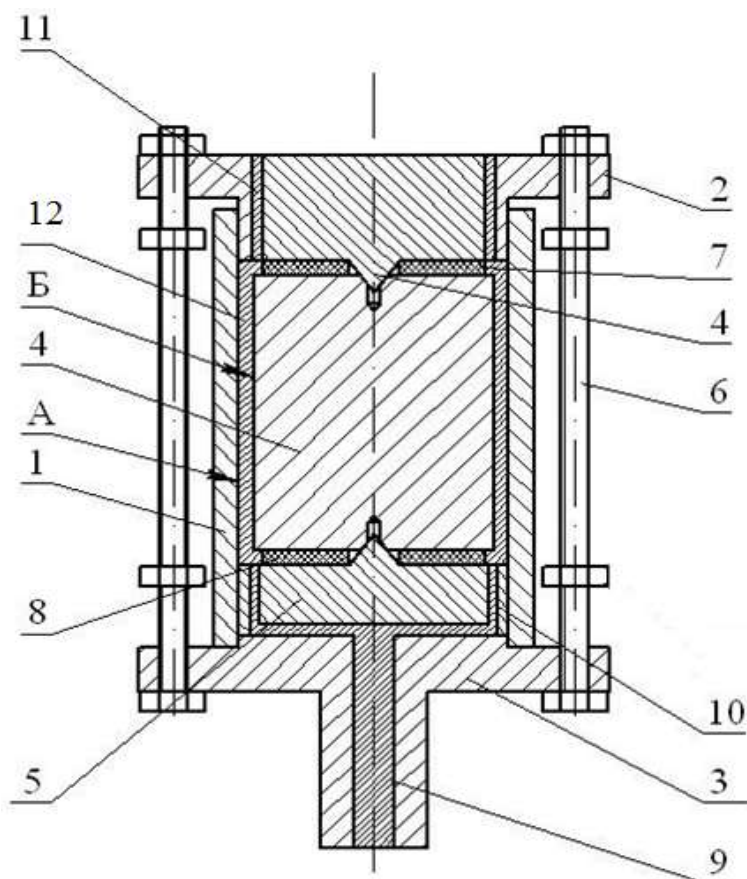
У цьому та в подальшому експериментах були використані дві модифікації матеріалу «моглайс» німецької фірми «Diamant metallplastic GMBH» з технічними характеристиками, наведеними в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Технічна характеристика матеріалу «моглайс»

Тип матеріалу	FL/P	Hart
Межа міцності на стискання, МПа	140	130
Допустимий тиск при ковзанні, МПа	14,5	12,5
Межі міцності при згинанні, МПа	98	64
Модуль пружності, МПа	9100	11200
Густина, г/см <sup>3</sup>	1,6	1,85
Час виробки, хв.	50	50
Час затвердіння, год.	24	24
Термостійкість, °С		
- короткочасно	-40...+125	-40...+125
- довгостроково	-20...+60	-20...+60

Для виготовлення експериментального зразка було розроблено та виготовлено спеціальне оснащення. На рисунку 2.10 зображено герметичний контейнер для створення зразків. Завдяки тому, що матеріал «моглайс» рідкоплинний, необхідний шар отримували шляхом його нагнітання знизу вверх.

Контейнер складався з корпусу 1, кришок 2 і 3, стягнутих між собою шпильками 6. Усередині поміщалась сталеві заготовка 4, на якій безпосередньо і формувалася шар полімерного матеріалу. Для того, щоб шар був рівномірним з усіх боків, заготовка центрувалась відносно корпусу за допомогою конусних отворів, розміщених на її торцях та центруючих призмах у кришці 2 і шайбі 5. Для попередження заливання матеріалом центруючих конусів були передбачені гумові прокладки 7 та 8. Діаметр основи дорівнював 24 мм, а діаметр внутрішньої частини корпусу – 30 мм. Таким чином, ми отримали шар полімеру товщиною в 3мм. Внутрішня поверхня корпусу А була високої якості з чистотою поверхні Ra 1,6, бо саме вона формувала поверхню зразка.



1 – корпус; 2 – верхня кришка; 3 – нижня кришка; 4 – стальний циліндр;  
 5 – шайба; 6 – шпилька; 7 – прокладка; 8 – прокладка; 9 – отвір для нагнітання;  
 10 – розподільчі отвори; 11 – отвори для виходу повітря; 12 – шар полімеру

Рисунок 2.10 - Контейнер для виготовлення зразків.

Для забезпечення кращого зчеплення матеріалу «моглайс» зі сталеву заготовкою 4, на поверхню заготовки Б наносили риски та засвердлювали на ній отвори.

Перед збиранням контейнера поверхні всіх деталей оброблялись знежирювальною рідиною - ацетоном. Після того, як поверхні висохли, вони оброблялись відділювачем для того, щоб матеріал не прилипав (відділювачем не оброблялась тільки поверхня Б).

Необхідна кількість матеріалу та загущувач змішувались у потрібній пропорції (при розрахунку кількості матеріалу брали з запасом у 20%). Наповнювачі в матеріалі «моглайс» мають властивість осідати, тому перед тим, як

відміряти потрібну кількість матеріала, основи розмішували до однорідного стану. Після з'єднання основи та затверджувача суміш добре перемішували й заливали в шприц. Необхідно було слідкувати, щоб у шприц не потрапили бульбашки повітря - в іншому випадку це могло призвести до виникнення пор та раковин на зразку. Після змішування матеріал нагнітався крізь отвір 9 діаметром 3 мм. Для рівномірного розподілу матеріалу по колу зразка в шайбі 5 були передбачені отвори 10 діаметром у 2 мм. Ці вісім отворів були розташовані рівномірно по колу. Для виходу повітря в кришці 2 зроблені отвори 11 діаметром у 3 мм (4 шт.). Також по мірі їх заповнення можна зробити висновок про рівномірність заповнення контейнера матеріалом. Для затвердіння матеріалу необхідно 24 години. Після затвердіння за допомогою гайок 12 знімалась одна з кришок. Далі за допомогою преса витискався зразок. Залишки матеріалу з торців зразка видалялися на верстаті. Отвори 9, 10 та 11 висвердлювались, після чого контейнер був готовий для виготовлення наступного зразка. Таким чином був підготовлений експеримент із визначення коефіцієнта тертя ковзання таких пар ковзання: сталь-полімер, чавун-полімер, чавун-чавун.

### **2.3 Визначення коефіцієнта тертя ковзання**

За описаною в розділі 2.2 методикою було визначено коефіцієнт тертя ковзання. Експерименти виконані для чотирьох різних швидкостей ковзання: 10 об/хв, 20 об/хв, 30 об/хв, 40 об/хв, що відповідає лінійній швидкості 940 мм/хв, 1880 мм/хв, 2830 мм/хв, 3770 мм/хв.

Перед початком експериментів стрічка змащувалась шаром мастила індустріальне 40. Потім у процесі експериментів замірялись показники стрілочного приладу через кожні 5 хвилин роботи установки. Сумарний час експерименту на одній швидкості становить 70 хвилин. Результати визначення коефіцієнта тертя після перерахунку показань стрілочного приладу зведені до таблиці 2.2 для різних швидкостей ковзання в діапазоні 940-3770 мм/хв. та для різних пар тертя: сталь-сталь, чавун-«моглайс», сталь-«моглайс» [95-98].



Таблиця 2.2 - Результати експерименту визначення коефіцієнта тертя ковзання

Час, хв	Коефіцієнт тертя за умови швидкості V, м/хв											
	940 мм/хв			1880 мм/хв			2830 мм/хв			3770 мм/хв		
	сталь- сталь	сталь- моглайс	чавун- моглайс	сталь- сталь	сталь- моглайс	чавун- моглайс	сталь- сталь	сталь- моглайс	чавун- моглайс	сталь- сталь	сталь- моглайс	чавун- моглайс
0	0,093	0,083	0,063	0,094	0,080	0,065	0,087	0,082	0,068	0,080	0,076	0,068
	0,092	0,080	0,063	0,093	0,077	0,066	0,084	0,079	0,066	0,079	0,078	0,067
	0,092	0,081	0,063	0,093	0,078	0,065	0,085	0,080	0,067	0,079	0,077	0,067
5	0,092	0,082	0,063	0,092	0,078	0,064	0,085	0,080	0,067	0,080	0,078	0,066
	0,091	0,081	0,064	0,091	0,077	0,066	0,086	0,082	0,067	0,079	0,077	0,067
	0,091	0,081	0,064	0,091	0,077	0,065	0,086	0,081	0,067	0,079	0,078	0,067
10	0,092	0,081	0,064	0,090	0,077	0,067	0,087	0,080	0,068	0,082	0,078	0,068
	0,091	0,081	0,065	0,087	0,078	0,067	0,086	0,081	0,067	0,085	0,079	0,067
	0,092	0,081	0,065	0,088	0,078	0,067	0,086	0,081	0,067	0,084	0,079	0,067
15	0,093	0,083	0,066	0,086	0,079	0,068	0,086	0,081	0,068	0,084	0,080	0,068
	0,091	0,081	0,065	0,087	0,081	0,067	0,087	0,082	0,067	0,083	0,079	0,066
	0,092	0,082	0,065	0,087	0,080	0,067	0,087	0,082	0,067	0,083	0,079	0,067
20	0,091	0,084	0,066	0,088	0,080	0,067	0,088	0,082	0,067	0,084	0,081	0,068
	0,092	0,082	0,065	0,086	0,081	0,067	0,087	0,083	0,066	0,084	0,079	0,067
	0,092	0,083	0,065	0,087	0,081	0,067	0,087	0,082	0,067	0,084	0,080	0,067
25	0,094	0,083	0,066	0,088	0,081	0,067	0,088	0,082	0,068	0,085	0,080	0,067
	0,093	0,082	0,065	0,086	0,082	0,066	0,087	0,082	0,067	0,084	0,081	0,067
	0,093	0,083	0,065	0,087	0,081	0,067	0,088	0,082	0,067	0,084	0,080	0,067
30	0,093	0,083	0,065	0,088	0,081	0,067	0,088	0,082	0,067	0,085	0,081	0,067
	0,093	0,083	0,065	0,089	0,082	0,068	0,089	0,082	0,068	0,085	0,080	0,067
	0,094	0,084	0,065	0,089	0,081	0,067	0,088	0,083	0,067	0,086	0,081	0,068
35	0,094	0,084	0,065	0,090	0,081	0,068	0,087	0,082	0,068	0,086	0,081	0,067
	0,093	0,083	0,065	0,091	0,081	0,067	0,088	0,083	0,067	0,085	0,081	0,068
	0,093	0,083	0,065	0,090	0,081	0,067	0,088	0,083	0,067	0,085	0,081	0,067
40	0,094	0,084	0,065	0,091	0,081	0,067	0,088	0,083	0,067	0,086	0,081	0,067
	0,093,	0,083	0,065	0,091	0,081	0,066	0,088	0,082	0,067	0,085	0,080	0,068
	0,094	0,084	0,065	0,090	0,080	0,067	0,089	0,083	0,068	0,086	0,081	0,067
45	0,094	0,083	0,065	0,090	0,081	0,067	0,089	0,083	0,067	0,086	0,080	0,068
	0,093	0,084	0,066	0,091	0,081	0,067	0,088	0,082	0,068	0,085	0,081	0,067
	0,094	0,084	0,065	0,090	0,081	0,067	0,089	0,083	0,067	0,086	0,081	0,067
50	0,094	0,084	0,065	0,090	0,081	0,067	0,089	0,082	0,067	0,086	0,081	0,067
	0,094	0,084	0,064	0,090	0,080	0,067	0,089	0,082	0,067	0,086	0,080	0,066
	0,093	0,084	0,066	0,091	0,081	0,066	0,089	0,083	0,066	0,087	0,081	0,067
55	0,094	0,084	0,065	0,091	0,081	0,067	0,089	0,083	0,067	0,086	0,081	0,067
	0,094	0,084	0,066	0,091	0,080	0,067	0,089	0,083	0,068	0,085	0,080	0,067
	0,093	0,083	0,064	0,091	0,081	0,066	0,088	0,082	0,067	0,086	0,081	0,066
60	0,093	0,084	0,065	0,091	0,081	0,067	0,089	0,083	0,067	0,086	0,081	0,067
	0,093	0,084	0,065	0,091	0,081	0,067	0,089	0,083	0,067	0,086	0,081	0,067
	0,094	0,084	0,065	0,092	0,081	0,067	0,089	0,084	0,066	0,085	0,081	0,066
65	0,093	0,084	0,065	0,091	0,081	0,067	0,089	0,083	0,067	0,086	0,081	0,067
	0,093	0,083	0,064	0,091	0,080	0,066	0,089	0,083	0,067	0,087	0,080	0,066
	0,093	0,084	0,065	0,092	0,081	0,067	0,088	0,084	0,066	0,086	0,081	0,066
70	0,092	0,084	0,065	0,092	0,081	0,067	0,088	0,082	0,067	0,086	0,081	0,067
	0,093	0,083	0,065	0,092	0,080	0,067	0,089	0,083	0,067	0,086	0,081	0,067
	0,093	0,084	0,065	0,092	0,081	0,067	0,089	0,083	0,067	0,086	0,081	0,067

Аналіз отриманих результатів, перш за все, дозволяє зазначити, що на будь-яких швидкостях ковзання в досліджуваному діапазоні коефіцієнт тертя у пари сталь-«моглайс» нижчий, ніж у пари сталь-сталь, але самий кращий показник у пари тертя чавун-«моглайс». Відповідні графіки залежності коефіцієнта тертя від часу роботи зразка зображені на рис. 2.11, 2.12, 2.13, 2.14.

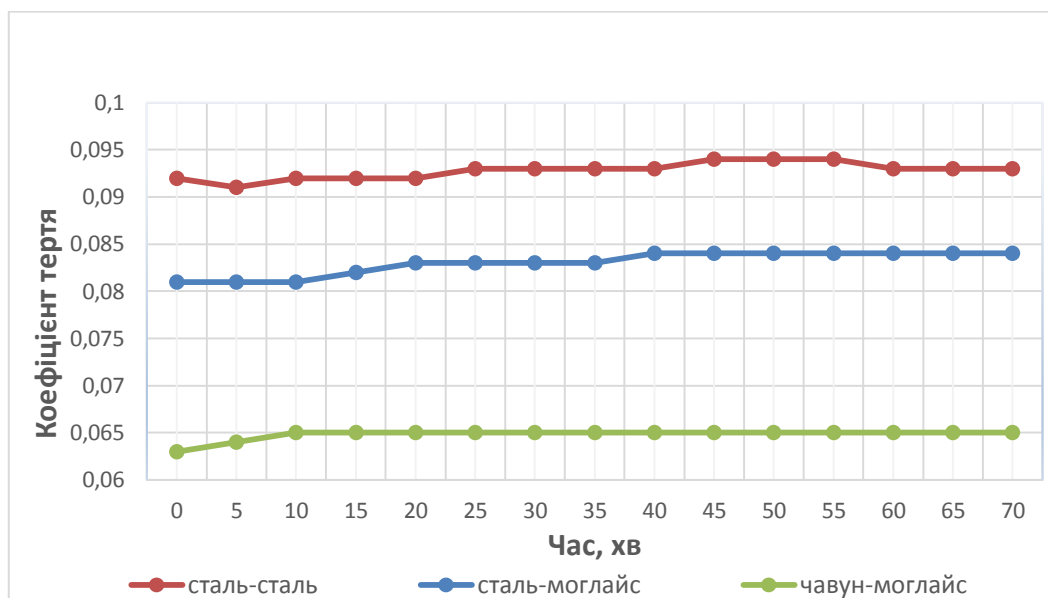


Рисунок 2.11 - Графік залежності коефіцієнта тертя пар сталь-сталь, сталь-«моглайс» та чавун-«моглайс» від часу роботи за умови швидкості ковзання 940 мм/хв та тиску P=0,5 МПа.

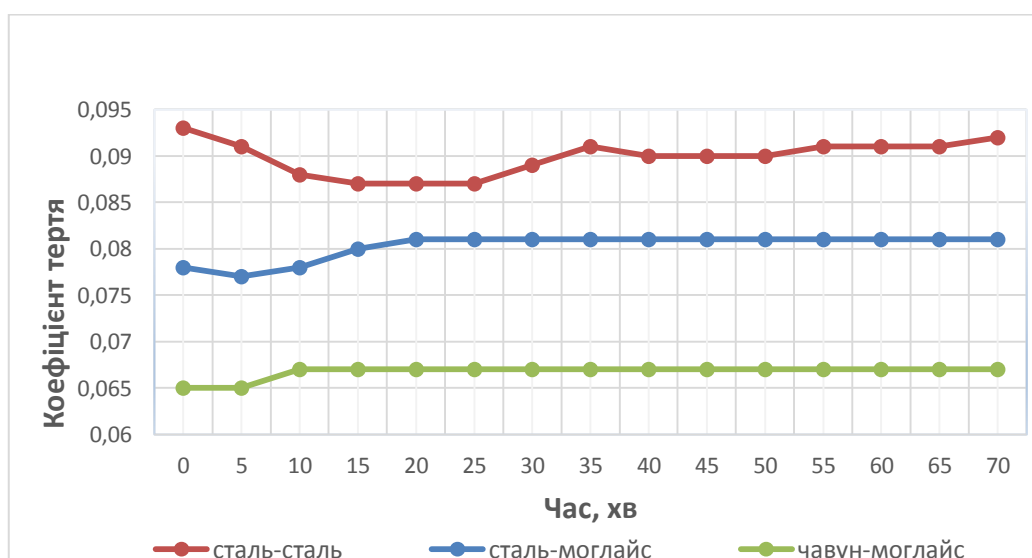


Рисунок 2.12 - Графік залежності коефіцієнта тертя пар сталь-сталь, сталь-«моглайс» та чавун-«моглайс» від часу роботи за умови швидкості ковзання 1880 мм/хв та тиску P=0,5 МПа.

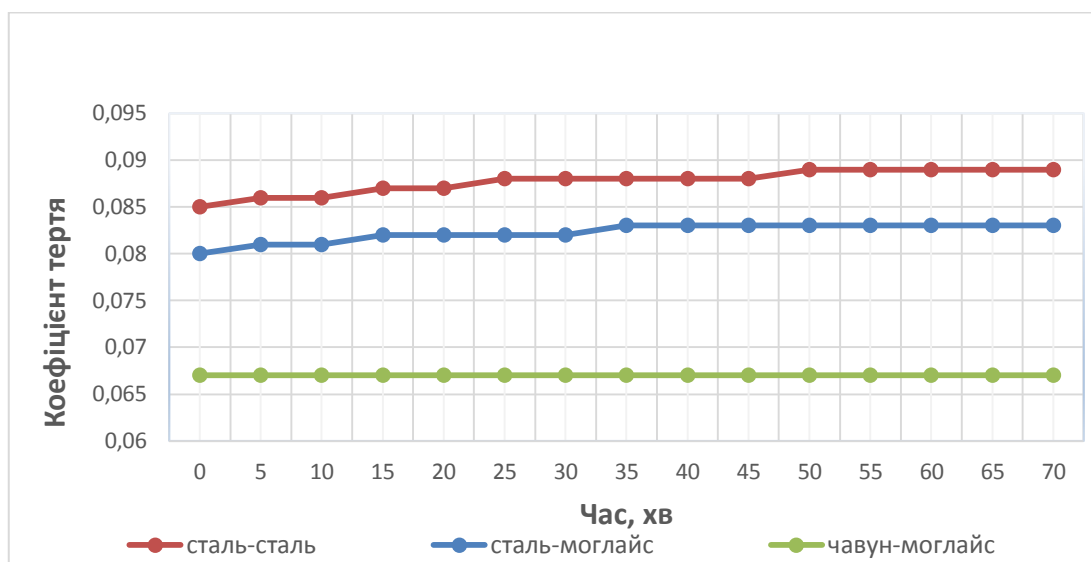


Рисунок 2.13 - Графік залежності коефіцієнта тертя пар сталь-сталь, сталь-«моглайс» та чавун-«моглайс» від часу роботи за умови швидкості ковзання 2830 мм/хв та тиску  $P=0,5$  МПа.

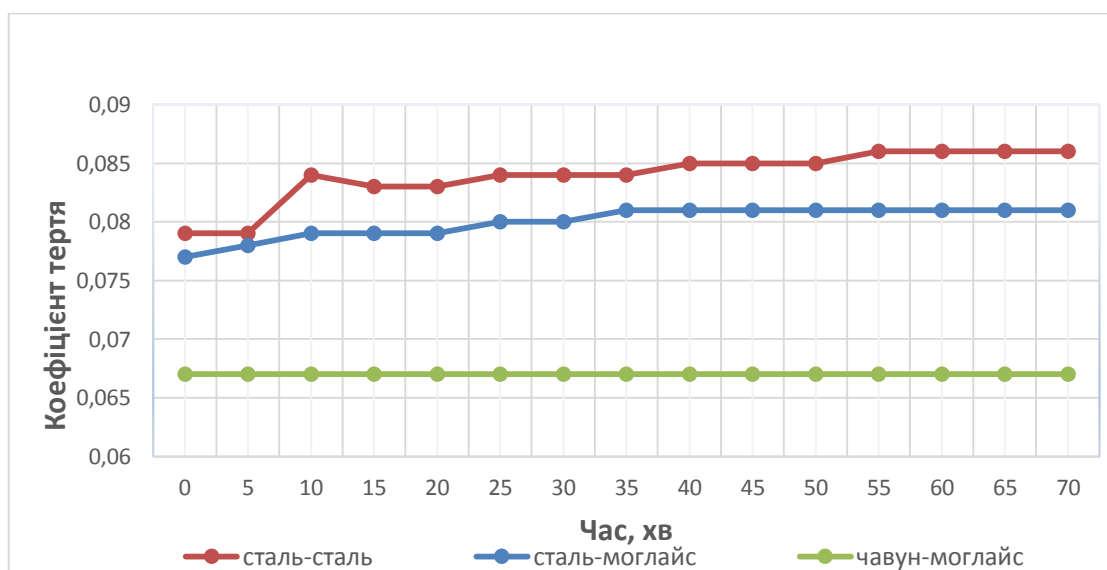


Рисунок 2.14 - Графік залежності коефіцієнта тертя пар сталь-сталь, сталь-«моглайс» та чавун-«моглайс» від часу роботи за умови швидкості ковзання 3770 мм/хв та тиску  $P=0,5$  МПа.

Як видно з наведених графіків, величина коефіцієнта тертя залишається стабільною протягом усього експерименту, а для швидкості 2830 мм/хв та 3770 мм/хв, початкову стадію експерименту, де коефіцієнт тертя повільно зростає, можна охарактеризувати як період припрацювання зразка.

Більш детальне вивчення характеристик поведінки отриманих залежностей дозволяє зазначити, що:

- зі зростанням швидкості ковзання коефіцієнт тертя плавно знижується, що у цілому, відповідає тенденціям, зазначеним на графіках, наведених у рекламних проспектах для матеріалу «моглайс» фірми виробника;

- за умови великих швидкостей спостерігається більш довгий період (30-40 хвилин) для виходу на стабільну величину коефіцієнта тертя, у той час, коли для швидкостей у 1880 мм/хв, 940 мм/хв та 380 мм/хв стабілізація коефіцієнта тертя настає вже через 5-15 хвилин роботи;

- зі зростанням швидкості ковзання переваги «моглайса» за коефіцієнтом тертя поступово зменшуються, наприклад, із 0,016 за швидкості 380 мм/хв до 0,005 при 3770 мм/хв;

- стабільно низькі коефіцієнти тертя для всього діапазону швидкостей ковзання при схемі вал-втулка та пари чавун-«моглайс» можливо частково пояснити тим, що в зазорі між втулкою та зразком знаходиться більше мастильного матеріалу, ніж між сталлюю стрічкою та зразком, і тому режим тертя стає ближчим до напіврідинного.

Підбиваючи підсумки аналізу отриманих результатів, можна зробити висновок, що матеріал «моглайс» має переваги під час тертя зі сталлюю та чавуном, що, з урахуванням наявності при цьому віброгасіння, плавного ковзання та ефекту самозмащування, дозволяє говорити про доцільність використання цього матеріалу в парах тертя металорізальних верстатів.

## **2.4 Обладнання та методика для визначення коефіцієнта тертя спокою**

Для визначення коефіцієнта тертя була спроектована й виготовлена експериментальна установка, представлена на рисунках 2.15, 2.16, 2.17. На основі 1 закріплений шарнір 4, що дозволяє пластині 3 змінювати кут нахилу. Вертикальне переміщення здійснюється ходовим гвинтом 7 через фланець 8, що обертається в нерухомій гайці 6. Гайка закріплена на стійці 5. Обертання гвинта

здійснюється колесом 9. Каретка 10 з трьома сферичними зразками 11 (радіус сфери - 4 мм) може встановлюватися на шліфовану площину ( $Rz\ 0,8$ ) пластини 3. На каретці розташований навантажувальний штир 12, на який надягають тягарці. Розташування штиря ( $1/3$  від відстані двох лінійно розташованих зразків) забезпечує рівномірне навантаження кожного зразка.

На торці каретки є пластина, яка замикає електричний ланцюг: контакти 15, затискач 17, світлодіод 16. На момент початку руху каретки ланцюг розмикається й світлодіод гасне.

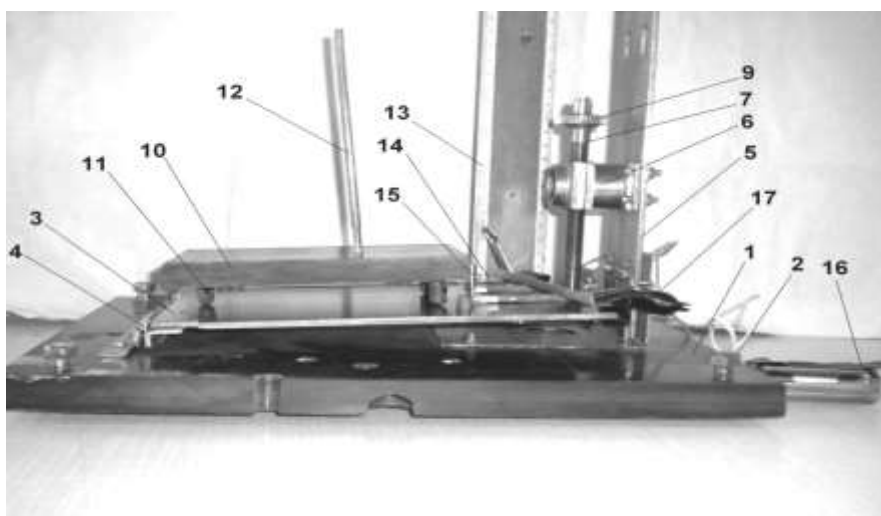


Рисунок 2.15 - Схема установки для визначення коефіцієнта тертя.

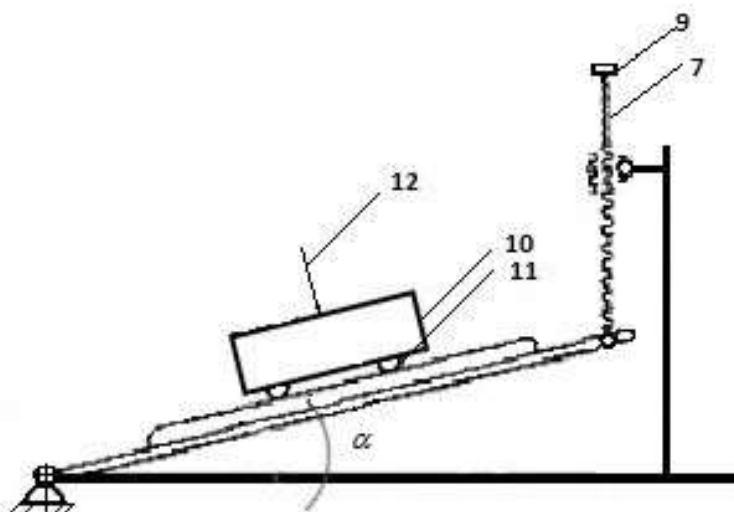


Рисунок 2.16 – Кінематична схема лабораторної установки.

Замірювання геометричних розмірів для розрахунку кута нахилу проводиться переміщенням лінійок 13 і 14, закріплених вертикально і на похилій площині. Горизонтально основа 1 виставляється опорними гвинтами 2 за допомогою рівня.

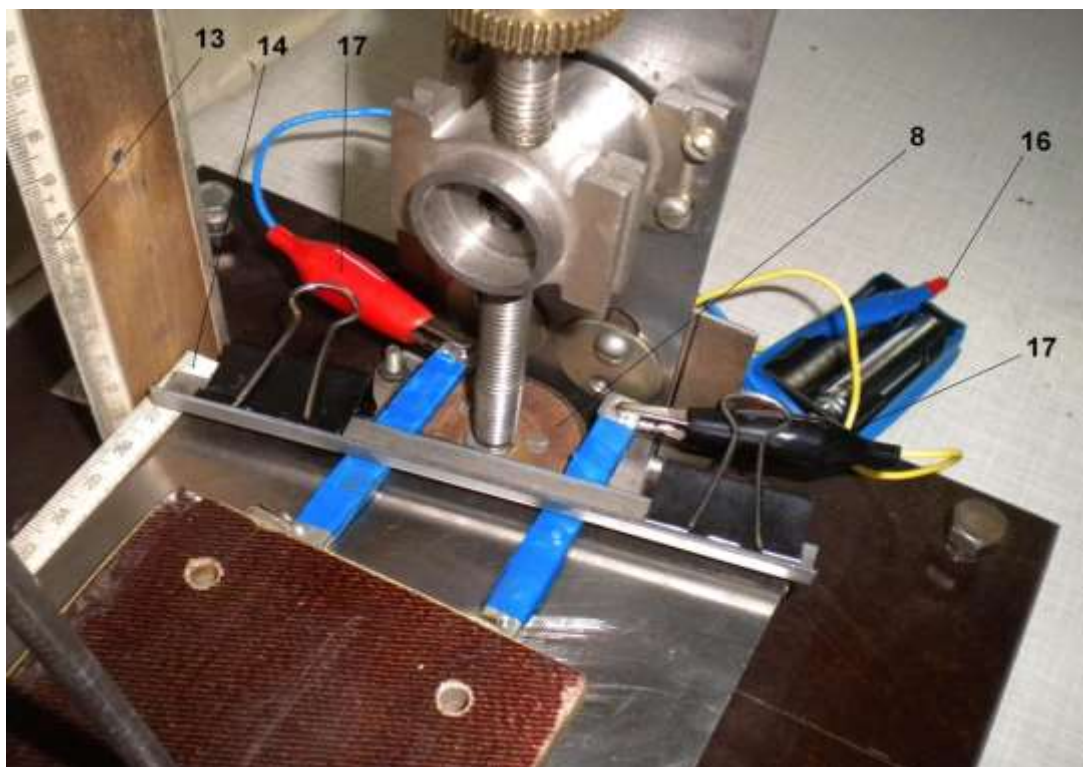


Рисунок 2.17 - Схема кріплення для визначення розмикання.

### Методика проведення експерименту:

- установка прилаштується на масивну плиту;
- основа 1 (рис. 2.15) за допомогою рівня виставляється горизонтально у двох перпендикулярних напрямках за допомогою гвинтів 2;
- пластина 3 переміщується в крайнє нижнє положення гвинтом 7;
- проводиться остаточне виставлення пластини за допомогою рівня і гвинтів 2;
- лінійка 13 виставляється нульовим діленням на поверхню пластини, а лінійка 14
- на вісь шарніра 4 і закріплюються в цих положеннях;
- зразки 11 закріплюються в отворах каретки 10;

- сферичні поверхні зразків і робочі доріжки пластини знежирюються медичним спиртом;
- каретка встановлюється зразками на шліфовану площину;
- на штир 12 надягають необхідні тягарці;
- плавним обертанням колеса 9 край пластини 3 переміщується вгору;
- початок руху каретки фіксується візуально - при згасанні світлодіода (здійснюється за рахунок розмикання контакту);
- по лінійці 14 відраховується вертикальне переміщення пластини  $h$ , а по лінійці 15 - довжина  $L$  похилої площини. Далі розраховується кут нахилу пластини до горизонту (він дорівнює куту тертя)

$$\rho = \arcsin\left(\frac{h}{L}\right) \quad (2.1)$$

та розраховується коефіцієнт тертя за формулою:

$$f = \operatorname{tg}(\rho) \quad (2.2)$$

Експеримент повторюється 5-6 разів на кожному рівні навантаження. Результати, які відрізняються від інших (більш, ніж на 20 %), відкидаються, бо пояснюються вони гальмуванням зразків у подряпинах на поверхні. Дані зводяться в таблицю.

## 2.5 Визначення коефіцієнта тертя спокою

За вище описаною методикою було визначено коефіцієнт тертя спокою із застосуванням таких мастил: індустріальне масло 40, індустріальне масло 12, індустріальне масло 50, масло ТП22 . Отримані дані були занесені в таблиці та за формулою (2.2) було розраховано коефіцієнт тертя спокою.

Аналіз отриманих результатів дозволяє констатувати, що величина коефіцієнта тертя в незначній мірі залежить від застосованих в експериментах марок мастил – різниця в коефіцієнті тертя не перевищує 15%. При цьому по мірі зростання навантаження на каретку величина коефіцієнта тертя, як правило, у незначній мірі знижується, незалежно від марки мастила.

Таблиця 2.3 - Результати експериментального дослідження коефіцієнта тертя спокою пари полімер-чавун з використанням індустріального масла 40 та 50.

Маса вантажу, г	Висота площини h, мм	Довжина площини L, мм	Коефіцієнт тертя f	Висота площини h, мм	Довжина площини L, мм	Коефіцієнт тертя f
	Масло індустріальне 40			Масло індустріальне 50		
Порожня каретка	26	164	0,160	27	164	0,16
	26	163	0,161	26	163	0,16
	26	163	0,161	27	164	0,16
200	26	164	0,161	27	164	0,16
	26	163	0,160	26	164	0,16
	26	164	0,161	26	164	0,16
300	26	164	0,161	26	164	0,16
	26	163	0,161	26	164	0,16
	27	164	0,167	25	165	0,15
400	27	164	0,167	25	163	0,15
	26	162	0,162	26	164	0,16
	27	163	0,168	25	164	0,15
500	26	164	0,161	25	164	0,15
	26	162	0,162	25	164	0,15
	25	161	0,159	26	164	0,16
600	26	164	0,161	26	164	0,16
	27	163	0,168	25	165	0,15
	27	163	0,168	26	164	0,16
700	26	164	0,161	26	164	0,16
	25	161	0,159	26	164	0,16
	26	163	0,161	26	164	0,16
800	26	164	0,161	27	164	0,16
	26	164	0,161	26	164	0,16
	25	161	0,159	27	164	0,16
900	25	163	0,155	27	164	0,16
	25	164	0,154	27	164	0,16
	24	162	0,150	26	164	0,16
1000	25	163	0,155	27	164	0,16
	26	164	0,161	27	164	0,16
	25	163	0,155	27	164	0,16



Таблиця 2.4 - Результати експериментального дослідження коефіцієнта тертя сферичних зразків з матеріалу «моглайс» по чавунній площині з використанням мастила індустріальне масло 12 та масло ТП22.

Маса вантажу, г	Висота площини h, мм	Довжина площини L, мм	Коефіцієнт тертя f	Висота площини h, мм	Довжина площини L, мм	Коефіцієнт тертя f
	Масло індустріальне 12			Масло ТП22		
Порожня каретка	25	163	0,155	22	162	0,137
	25	163	0,155	23	162	0,143
	25	164	0,153	23	162	0,143
200	26	164	0,161	22	162	0,137
	26	164	0,161	24	163	0,148
	25	164	0,153	23	162	0,143
300	26	164	0,161	23	162	0,143
	26	164	0,161	23	162	0,143
	26	164	0,161	24	163	0,148
400	26	164	0,161	23	162	0,143
	26	164	0,161	23	162	0,143
	25	163	0,155	24	163	0,148
500	25	163	0,155	24	163	0,148
	25	163	0,155	24	163	0,148
	25	163	0,155	24	163	0,148
600	25	163	0,155	24	163	0,148
	25	163	0,155	25	163	0,155
	24	162	0,148	25	164	0,154
700	23	162	0,143	25	164	0,154
	24	163	0,148	24	163	0,148
	23	162	0,143	25	163	0,155
800	23	162	0,143	23	162	0,143
	23	163	0,143	23	162	0,143
	23	162	0,143	23	163	0,143
900	22	162	0,137	23	163	0,143
	22	162	0,137	23	162	0,143
	23	163	0,143	22	162	0,137
1000	22	162	0,137	22	162	0,137
	23	162	0,143	23	162	0,143
	22	162	0,137	22	162	0,137

Цей експеримент дозволяє визначити коефіцієнт тертя спокою для подальшого визначення критичних швидкостей, за яких виникає явище фрикційних автоколивань.

## **2.6 Обладнання та методика визначення межі адгезійної міцності на зсув**

Напрявні, виготовлені за допомогою полімеру, будуть витримувати в процесі експлуатації зсувні навантаження, які можуть призвести до руйнування адгезійних зв'язків та виходу з ладу напрямних. У зв'язку з цим, важливим є вивчення адгезійних властивостей полімерного матеріалу та його здатність витримувати навантаження в процесі експлуатації верстата.

Адгезійна міцність вимірюється як питома сила руйнування зв'язку між полімером та металом. З практичної точки зору під час використання полімерів важлива не робота адгезії, а механічна міцність зв'язку полімеру з іншою поверхнею. Будь-яка система полімер-метал характеризується не тільки величиною адгезії, але й типом руйнування зв'язку між компонентами, тобто характером руйнування. Загальновідомою вважається така класифікація видів руйнування: адгезійне, когезійне та змішане. Адгезійне руйнування проходить безпосередньо по межі розподілу фаз (граничний шар) або в масі, де вплив поверхні розподілу не відчувається.

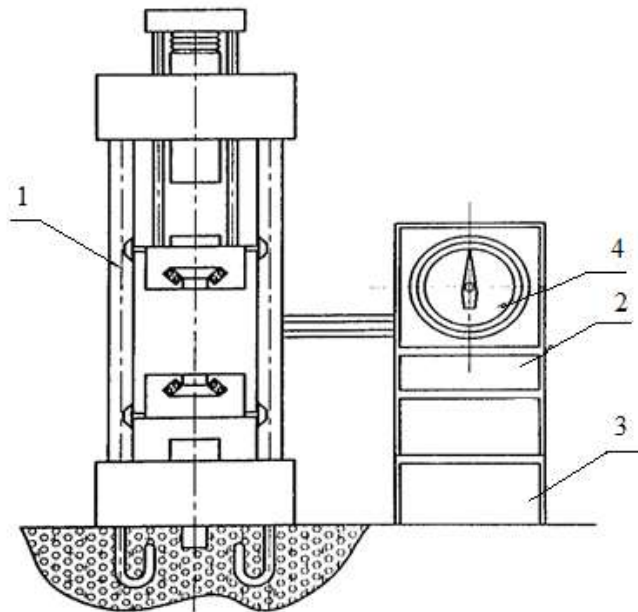
Методів знаходження адгезійної міцності дуже багато, але їх вибір залежить від того, яке навантаження буде зазнавати адгезійне з'єднання під час експлуатації. Але у цих способів можна виділити три, які найбільш часто використовуються, – адгезійна міцність за нормального відриву, за відшарування та під час зсуву. Для нанесення тонкого шару полімеру як напрямні вірогідність когезійного руйнування зводиться до нуля, тому в наступних експериментах знаходилась адгезійна міцність. У нашому випадку, враховуючи особливості роботи напрямних металорізальних верстатів, доцільним є знаходження адгезійної міцності при зсуві.

Дослідження адгезійних властивостей композитних матеріалів проводилось на розривній машині РМ-20, показаній на рисунку 2.18. Коротка технічна характеристика розривної машини наведена в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Технічні характеристики розривної машини РМ-20

Назва	Одиниці виміру	Величина
Найбільше граничне навантаження	Н	200000
Габарити машини Довжина Ширина Висота	мм	1553 912 2901
Маса машини, кг	кг	1822
Робочий хід активного захоплення (поршня)	мм	30
Швидкість ходу захоплення	мм/хв	300
Висота робочого простору під час випробування на розтягування	мм	900
Найбільша відстань між опорними поверхнями під час випробування на стискання	мм	210
Управління	Централізоване	- кнопкою, рукояткою, маховиком, перемикачем

Для експерименту були підготовлені чавунні пластини (рис 2.19), які попередньо прошліфували в зоні контакту з полімером.



1 - навантажувальний пристрій; 2 - пульт управління; 3 - насосна установка;  
4 - реєструючий пристрій

Рисунок 2.18 - Схема розривної машини РМ-20.



Рисунок 2.19 - Чавунні пластини.

Технологія виготовлення зразків для проведення випробувань:  
- на чавунних пластинах зазначаємо розміри робочої поверхні;

- зачищення робочої поверхні за допомогою абразивного інструмента;
- знежирюємо робочу поверхню;
- змішуємо компоненти полімерного матеріалу;
- у поверхню робочих площин ретельно втираємо тонкий шар полімеру;
- після витримки 10-15 хв на поверхню однієї робочої поверхні укладаємо дрiт товщиною в 2,5 мм (для обмеження товщини шару матеріалу) й наносимо підготовлений полімер з надлишком;
- другу пластину укладаємо зверху й притискаємо за допомогою струбцини до отримання шару потрібної товщини (поки пластини щільно не будуть прилягати до маячків), див. рис.2.20;
- витиснені надлишки матеріалу видаляємо й залишаємо зразки до повної полімеризації на 24 години.

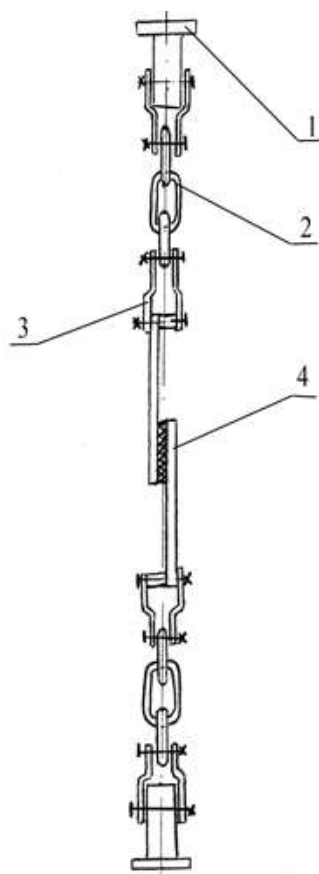
Для випробування адгезійної міцності при зсуві необхідно виключити будь-які навантаження на зразки, крім розтягування. Для цього було виготовлено спеціальний захоплюючий пристрій, показаний на рисунку 2.21, який дозволяє виключити з випробувань крутні та згинальні моменти.



Рисунок 2.20 – З'єднання двох зразків

У результаті проведення такого експерименту зможемо визначити адгезійну міцність полімеру. Для проведення експерименту використовувались зразки, які

навантажувались до руйнування шару полімеру, при цьому фіксувались значення зусилля розриву.



1 – захват, 2 – ланцюг, 3 – кріпильні планки, 4 – зразок

Рисунок 2.21 – Схема закріплення зразків.

Зразки встановлювалися в пристрій навантаження преса РМ-20 і в результаті докладання статичного навантаження вони руйнувалися. Завершальним етапом експерименту є оцінка адгезійної міцності полімерного матеріалу «моглайс».

Адгезійна міцність - руйнування відбувається на межі металополімерного матеріалу з поверхнею металу.

Під час роботи верстата нанесений шар полімерного матеріалу може зрушити в напрямку руху напрямних, для того, щоб цьому запобігти, розраховуємо адгезійну міцність матеріалу «моглайс» за формулою:  $\tau = F/S$  [МПа], де  $F$  - максимальне навантаження, Н;  $S$  - площа поверхні, мм<sup>2</sup>.

## 2.7 Визначення межі адгезійної міцності на зсув

Експериментальне визначення межі міцності проводилось за описаною вище методикою. Отримані дані були занесені до таблиці 2.6. Визначаємо адгезійну міцність полімеру за формулою:

$$\tau = F/S \text{ [МПа]}, \quad (2.3)$$

де  $F$ - максимальне навантаження, Н;

$S$  - площа поверхні, мм<sup>2</sup>.

Таблиця 2.6 - Результати визначення межі міцності.

Сила F, Н	Розмір зразка a×b, мм <sup>2</sup>	Адгезійна міцність полімеру τ, МПа
8800	27×27	12
7450	27×25	11
8100	26×26	12
7760	27×26	11
8750	27×27	12
7700	27×26	11
7360	27×24	11
7420	27×25	11
7430	26×26	11

Таким чином, можна зробити висновок, що адгезійна міцність полімерного матеріалу «моглайс» у середньому становить 11 МПа. Виконаємо оцінку сили зсуву, яка при отриманому значенні  $\tau$  може зсунути полімерні напрямні. Розрахуємо силу зсуву, що буде мати місце під час відновлення напрямних

токарно-гвинторізного верстата з сумарною шириною напрямних – 90 мм та довжиною каретки 600 мм.

Сила зсуву для зрушення адгезійного шару напрямних для розглянутих умов дорівнює:

$$F = \tau \times S = 11 \times 90 \times 600 = 594 \text{ кН.}$$

Таким чином, ця сила в багато разів перевищує будь-які можливі навантаження на напрямних цього верстата, але для гарантованого забезпечення надійного з'єднання полімеру з металом необхідно використовувати спеціальні засоби підготовки поверхні металу, зокрема застосовувати максимальний ступінь шорсткості поверхні, виконувати отвори невеликої глибини тощо.

## **2.8 Обладнання та методика визначення межі міцності на стискання**

Визначення необхідної товщини шару полімеру, що наноситься під час виготовлення напрямних ковзання є важливим аспектом, оскільки, з одного боку надмірний за товщиною шар буде призводити до невиправданої витрати матеріалу, а з іншого боку, тонкий шар полімеру може не витримати статичних навантажень у процесі роботи, та вийти з ладу через перегрівання й втрату міцності в процесі інтенсивної роботи. Тому до вивчення питання оптимальних значень товщини шару полімеру здійснено підхід як з урахуванням статичної міцності цього матеріалу, так і з урахуванням відведення тепла в металеву основу станини верстата через шар композита.

Дослідження межі міцності на стискання композитних матеріалів проводилось на розривній машині РМ-20 (рис. 2.18).

Для проведення статичних випробувань, які виконувалися на розривній машині Р20, описаній у розділі 2.6, були виготовлені зразки матеріалу «моглайс Fl/p» діаметром у 12 мм і товщиною від 1 до 6 мм (рис. 2.21).





Рисунок 2.21 – Зразки з полімерного матеріалу «моглайс».

Причому в одному випадку зразки знаходилися під час випробувань у вільному стані, тобто коли зразок під час деформації утримувався силами тертя по контактних поверхнях. А в другому випадку, який більш наближений до реальних умов роботи полімеру на напрямних верстата, одна контактна площа була заневолена, тобто з'єднана з металом за рахунок адгезійних зв'язків, вивчення яких у розділі 2.7 дозволило оцінити величину адгезійної міцності під час зсуві пари полімер-чавун у 11-12 МПа.

### 2.9 Визначення межі міцності на стискання

В експерименті на статичну міцність полімеру використовувалося 60 заготовок, а як критерій міцності було вибрано появу бічної тріщини і зміну товщини заготовки більше, ніж на 1%. Контроль за станом зразків, що навантажуються, проводився через кожні 2000 Н. При цьому зразок витягувався з місця навантаження, його обміряли по висоті й оглядали на предмет виявлення тріщин.

Результати проведення експерименту наведені в таблиці 2.7, а на рис.2.22 представлені залежності межі міцності матеріалу від товщини зразка у вільному стані та в разі адгезійного з'єднання з металом.

Таблиця 2.7 - Результати випробування зразків на стискання у вільному стані та під час з'єднання з металом.

№ зразка	Товщина зразка, мм	Гранична сила стискання, Н	Граничне напруження $\sigma$ , МПа	Товщина зразка, мм	Гранична сила стискання, Н	Граничне напруження $\sigma$ , МПа
	Зразки у вільному стані			Під час з'єднання з металом		
1	1,15	26000	229	1,11	34000	301
2	1,01	24000	211	1,01	34000	301
3	1,21	24000	211	1,22	36000	318
4	1,16	24000	211	1,15	34000	301
5	1,12	26000	229	1,18	34000	301
6	1,53	22000	194	1,52	32000	283
7	1,64	24000	211	1,69	30000	265
8	1,52	22000	194	1,61	32000	283
9	1,61	24000	211	1,50	28000	248
10	1,58	22000	194	1,63	30000	265
11	2,23	18000	159	2,21	26000	230
12	2,35	18000	159	2,31	24000	212
13	2,24	20000	176	2,25	24000	212
14	2,48	18000	159	2,41	22000	194
15	2,27	18000	159	2,29	24000	212
16	3,11	16000	141	3,22	18000	159
17	3,23	14000	125	3,20	20000	176
18	3,18	18000	159	3,25	18000	159
19	3,12	16000	141	3,11	16000	141
20	3,05	16000	141	3,15	18000	159
21	4,21	14000	125	4,28	16000	141
22	4,22	14000	125	4,25	14000	125
23	4,13	12000	106	4,16	16000	141
24	4,17	14000	125	4,22	16000	141
25	4,19	14000	125	4,20	16000	141
26	6,02	14000	125	6,05	14000	125
27	6,21	12000	106	6,21	12000	106
28	6,12	14000	125	6,15	12000	106
29	6,24	12000	106	6,25	14000	125
30	6,08	12000	106	6,18	16000	141

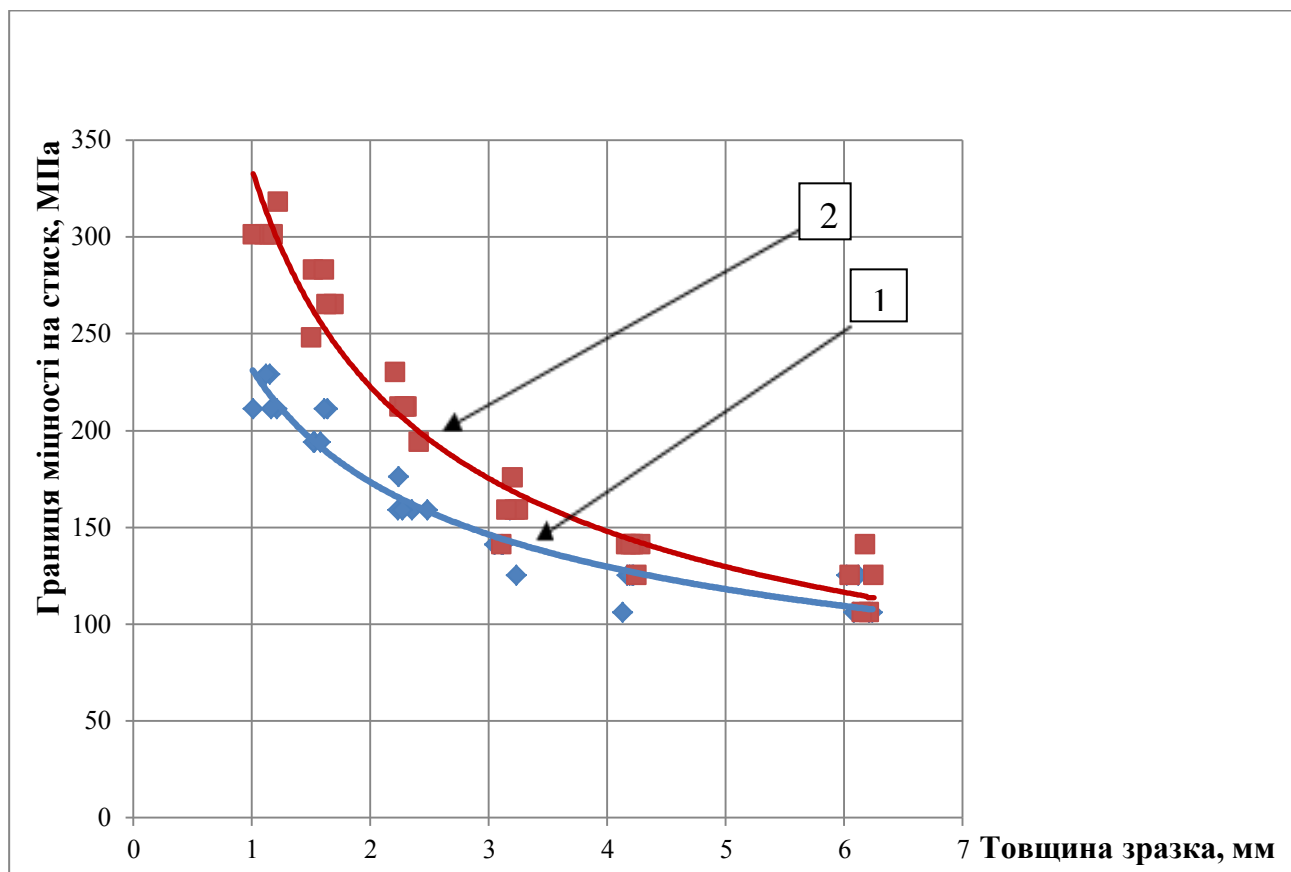


Рисунок 2.22 – Графіки залежності межі міцності матеріалу від товщини зразка у вільному стані (1) та в разі адгезійного з'єднання з металом (2).

Аналіз отриманих результатів дозволяє, перш за все, зазначити факт зниження міцності зразків по мірі зростання його товщини. Тому збільшення товщини шару полімеру буде призводити не тільки до підвищеної витрати матеріалу, а й до зниження його несучої здатності. У той же час значення в 130-140 МПа, що відповідає товщині зразка в 1,5 - 2,0 мм, повністю збігаються з величиною межі міцності цього матеріалу, що приводиться фірмою виробником у технічній характеристиці матеріалу «моглайс».

З'єднання зразків з металом шляхом адгезійних зв'язків, що в реальних умовах і відбувається під час відновлення напрямних ковзання верстатів, як видно з рис. 2.22, підвищує межу міцності матеріалу на 20-30 %, оскільки течія зразка перешкоджає адгезійному зв'язку на відміну від вільного зразка, коли в цьому процесі задіяні тільки сили тертя. Але в той же час у міру збільшення товщини

зразка ця різниця поступово сходить нанівець, що також свідчить на користь доцільності застосування шару полімеру в межах 1,5 - 2,0 мм.

Експеримент показав, що за умови пластичного деформуванні зразка відбувається його відривання від металевої підкладки. Цей факт необхідно обов'язково враховувати під час виготовлення напрямних верстатів. Перш за все, необхідно виконувати попередній розрахунок навантажень на напрямні й прагнути виключити їх наближення до критичного значення, виходячи як з розрахунку товщини шару «моглайса», що наноситься на поверхню, так і ваги супорта з діючими технологічними навантаженнями при різанні. Крім того, необхідно під час підготовки поверхні супорта під нанесення матеріалу «моглайс» застосовувати такі методи, які виключили б можливе відривання «моглайса» від металевої основи. Такими методами можна назвати виконання неглибоких (3-4 мм) отворів на поверхні підготовленої під нанесення «моглайса». Утворені після нанесення стовпчики «моглайса» в цих поглибленнях відіграватимуть роль штифтів і будуть виключати можливе зсування матеріалу. До таких способів відноситься і виконання на поверхні металу трикутних виступів із кроком у 1,5-2 мм і висотою в 1-1,5 мм, які можна отримати як шляхом обробки на стругальному верстаті, так і за допомогою кутової шліфувальної машини з абразивним кругом, товщиною у 2 мм.

## **2.10 Методика визначення стійкості полімеру до агресивних середовищ**

Суть цієї методики полягає в такому: із матеріалу виготовляють диски  $\varnothing 15,5$  мм і товщиною у 5 мм. Потім зразки занурюють у різні середовища (розчинник 647, масло індустріальне 40, бензин А95, вода морська, вода звичайна та концентрована соляна кислота) і витримують протягом 7-10 діб за температури 17-23 °С. Кількість зразків у кожному середовищі - не менше за три.



Рисунок 2.23 - Зразки полімеру в ємності з різною рідиною.

Експеримент проводився таким чином: перед початком випробування всі полімерні зразки зважуються на вагах (рис. 2.24).

В окремих ємностях із різними середовищами розміщують зразки з полімерного матеріалу. Після чого зразки накривають, щоб не було контакту з навколишнім середовищем та випаровування рідини, витримують 7-10 днів за умови постійної температури 17-23°C



Рисунок 2.24 – Ваги лабораторні електронні загального призначення  
ТВЕ-0,5-0,01.

Після закінчення часу, відведеного на експеримент, зразки вилучають із різних середовищ, дають їм просохнути від вологи й повторно зважують на вагах. Дані заносяться до таблиці та порівнюються.

## 2.11 Визначення стійкості полімеру до впливу агресивних середовищ

Методика проведення цього експерименту описана в попередньому розділі. Дані, отримані у ході експерименту, занесені у таблиці 2.8. Проведений експеримент (за температурі в діапазоні 17-23 °С) дозволив установити, що:

- у розчиннику 647 спостерігається збільшення маси зразків максимально на 0,41 грам. Габаритні розміри без змін;
- в індустриальному маслі 40 - маса і габаритні розміри без змін;
- у бензині - маса і габаритні розміри без змін;
- у морській воді - маса і габаритні розміри без змін;
- у звичайній воді - маса у зразка збільшилася на 0,01гр, габаритні розміри - без змін;
- у концентрованій соляній кислоті - спостерігається збільшення маси на 0,01 гр і невелике руйнування зразків.

Таким чином, незначні зміни зразків, окрім тих, що були в розчиннику та кислоті, перебувають у межі точності експериментальних вимірювань. Тому використання цих рідин (масло, вода, бензин) не впливає на роботу верстатного обладнання. Полімерний матеріал з успіхом може застосовуватись у верстатобудуванні, однак потрібно уникати його контакту з розчинниками та кислотами. На користь такого висновку свідчать результати випробування полімерних матеріалів, які проводили в Одеському інституті морського флоту [99].

Отримані результати оброблені з використанням коефіцієнта Стьюдента для визначення відносної похибки прямих вимірювань (таблиця 2.8).

Визначаємо стандартне відхилення окремого виміру:

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{(\Delta x_1)^2 + (\Delta x_2)^2 + \dots + (\Delta x_n)^2}{n-1}}, \quad (2.4)$$

де  $n=3$  – кількість вимірів,  $\Delta x_n$  – різниця між середнім значенням  $x_n$  та значенням  $x_n$ .

Таблиця 2.8 - Результати експерименту з визначення впливу експлуатаційних умов на полімерний матеріал.

Назва рідини	Вага до занурення полімеру в рідину, г	Відносна похибка, %	Вага після перебування в розчині, г	Відносна похибка, %
Розчинник	12,67	10	12,89	8
	11,97		12,25	
	11,79		12,20	
Індустріальне масло 40	12,41	6	12,40	7
	11,96		11,96	
	11,74		11,74	
Бензин	11,98	4	11,99	4
	12,34		12,34	
	12,22		12,21	
Вода морська	11,98	2,5	11,98	2,5
	12,15		12,16	
	12,21		12,21	
Вода звичайна	12,89	7	12,90	7
	12,23		12,23	
	12,77		12,78	
Кислота	11,12	10	11,13	10
	12,01		12,02	
	11,89		11,89	

Розраховуємо абсолютну похибку:

$$\Delta x = \frac{t_{\alpha,n}}{\sqrt{n}} \sigma_{n-1} + \Delta x_{\text{ін}}, \quad (2.5)$$

де  $t_{\alpha,n} = 4,3$  - коефіцієнт Стьюдента для  $n=3$ ,  $\Delta x_{\text{ін}}=0,005$  – інструментальна похибка.

Визначаємо відносну похибку

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\langle x \rangle} * 100\%, \quad (2.6)$$

де  $\langle x \rangle$  - середнє значення вимірів.

Як видно з табл. 2.8, відносна похибка не перевищує 10%, тому результати цих експериментів можна вважати такими, що виконані з достовірним ступенем точності.

Аналіз результатів наведених вище експериментів дає можливість зробити висновок про достатньо високу стійкість матеріалу «моглайс». Зокрема, виявлено відсутність змін маси та розмірів зразків у процесі взаємодії з такими середовищами, як: вода звичайна, вода морська, бензин, масло індустриальне 40.

У цілому знайдені в цьому експериментальному розділі такі параметри, як коефіцієнти тертя ковзання та спокою, а також показники механічної міцності матеріалу «моглайс», дозволяють виконати математичний аналіз процесу руху супорта по напрямних з полімеру та розробити математичну модель цього процесу, що і буде зроблено в наступному розділі.

## Висновки

1. Розроблені методики виконання експериментального дослідження механічних та триботехнічних властивостей полімерного матеріалу та визначені потрібні параметри цих показників для подільшого використання у роботі.

2. Удосконалена методика визначення коефіцієнта тертя ковзання пар сталь-сталь, сталь-«моглайс» і чавун-«моглайс» Розроблені оригінальні установки та методики: визначення коефіцієнта тертя спокою цих пар, визначення адгезійної міцності з'єднання "чавун-полімер" під час випробувань на зсув та стискання, а також визначення стійкості полімерного матеріалу до впливу агресивних середовищ.

3. Експериментально встановлено, що зі зменшенням швидкості ковзання переваги «моглайса» за коефіцієнтом тертя поступово зростають таким чином, що при швидкості 940 мм/хв коефіцієнт тертя ковзання становить 0,063...0,065. Це може сприяти перенесенню межі появи фрикційних автоколиваний у менший діапазон швидкостей. Окрім того, експериментально визначено коефіцієнт тертя спокою для пари чавун-«моглайс», що дасть змогу згодом використовувати цей результат для оцінки виникнення фрикційних коливаний.

4. Уперше встановлено межі можливого застосування композитного



матеріалу «моглайс» для виготовлення напрямних, що визначаються комплексом вимог, з-поміж яких стискаючі та зсувні навантаження на шар полімеру, а також стійкістю до впливу агресивних середовищ, що дозволить якісно та надійно виготовляти напрямні з полімеру. Для цього проведено експеримент із визначення адгезійної міцності та міцності на стиск полімеру. Отримані дані міцності на зсув  $\tau=11...12$  МПа та міцність на стискання  $\sigma=250$  МПа для шару матеріалу 2 мм, дозволяють спрогнозувати виключення вигогідності явища зсуву нанесеного полімерного шару в процесі експлуатації верстата та руйнування шару матеріалу в результаті стискних навантажень.

## РОЗДІЛ 3

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ НАПРЯМНИХ, ВИГОТОВЛЕНИХ З ПОЛІМЕРНОГО МАТЕРІАЛУ

У цьому розділі реалізована можливість виготовлення напрямних реального супорту станка з використанням двокомпонентного полімерного матеріалу та на цій основі проведено комплекс досліджень з метою виявлення закономірностей руху супорту по напрямним з парою тертя чавун-полімер.

#### **3.1. Методика та устаткування для проведення експерименту з виготовлення та дослідження процесів тертя напрямних**

##### **3.1.1 Технологія виготовлення напрямних експериментальної установки**

###### **Установка каретки в проектне положення**

Ця технологія призначена для виготовлення напрямних на каретці верстата із застосуванням металополімерних матеріалів:

- 1) перед установкою каретки в проектне положення необхідно:
  - а) загрубити поверхню, призначену для нанесення металополімерних матеріалів, струганням або фрезою;
  - б) закріпити в торцях каретки планки з регулювальними гвинтами.
- 2) виставити каретку в проектне положення за допомогою регулювальних болтів і рівня;
- 3) зазор між напрямними після установки в проектне положення становить 2-2,5 мм

###### **Знежирення поверхні**

Після встановлення каретки верстата в проектне положення необхідно обробити напрямні на верстаті і на каретці спеціальним знежирювальним засобом

або ацетоном. Знежирення поверхні за допомогою фірмового знежирювача або ацетону необхідно здійснювати чистою ганчіркою рясно змоченою в ацетоні. Промивання повторити кілька разів. Чистоту промитої поверхні контролювати чистою білою ганчіркою. На білій тканині не повинні залишатися сліди.

### **Обробка напрямних верстата відділювачем**

Після висихання знежирювача на поверхні напрямних верстата, на них наноситься відділювач за допомогою пензлика або аерозольного балончика.

Після висихання відділювача (20-30 хв.) поверхню напрямних верстата можна відполірувати м'якою тканиною.

### **Нанесення полімерного матеріалу**

Після висихання знежирювача на поверхні напрямних каретки шпателем наноситься шар матеріалу «моглайс Hart», що попередньо пройшов операцію перемішування двох компонентів, з яких він складається. Перший шар ретельно втирається шпателем в металеву поверхню. Наступний шар наноситься товщиною на 1-1,5 мм більше, ніж зазор між напрямними.

### **Формування відновлюваної поверхні на напрямних каретки**

Після нанесення необхідного шару матеріалу «моглайс Hart» каретка перевертається на 180° і встановлюється на регулювальні болти.

Опускання каретки перед моментом зіткнення болтів з напрямними має здійснюватися плавно без поштовхів і ударів. Для виключення стікання матеріалу в площині, перпендикулярній напрямним, між кареткою і верстатом встановлюються поролонові, або з іншого матеріалу, м'які прокладки по всій довжині напрямних каретки. Зайвий матеріал після встановлення на болти видавлюється вздовж напрямних по обидва боки каретки. Час застигання матеріалу - 24 години, після чого здійснюється рух каретки в напрямку її переміщення по напрямним легким ударом або за допомогою ручної лебідки.

### **Видалення залишків видавленого і застиглого матеріалу**

Після застигання «моглайса» і зрушення каретки, остання перевертається на 180° і здійснюється видалення надлишків видавленого на неробочі поверхні матеріалу «моглайс». Після видалення надлишків полімерного матеріалу, зняття

планок і очищення каретки, остання встановлюється на напрямні верстата. Операцію завершено.

Для експериментального виготовлення напрямних з полімерного матеріалу «моглайс» був обраний хрестовий супорт токарного автоматного комплексу (рис. 3.1)



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд хрестового супорта токарного автоматного комплексу ПАБ 130

Для цього були виготовлені спеціальні планки, які закріплювалися на каретці за допомогою болтів. У цих планках зроблені отвори з різьбою для установки каретки в проектне положення за допомогою установчих гвинтів. Каретку перевертають на  $180^\circ$ , кріплять планки та встановлюють юстирувальні та монтажні гвинти (рис. 3.2).

Для створення поверхні, яка сформує напрямні каретки, в змащувальні канавки на напрямних станини втирають шпаклювальний матеріал. Причому, шпаклювальний матеріал повинен бути нанесений на поверхню напрямних з надлишком.

Потім видаляють затверділий шпаклювальний матеріал шабером та виводять поверхню за допомогою перевірної лінійки. Далі цю поверхню обробляють розділовим засобом.

Наступний етап – зачищення напрямних каретки шліфувальним кругом для того, щоб поверхня набула необхідної шорсткості (рис. 3.3). На поверхні напрямних просвердлюють отвори для забезпечення більш надійного з'єднання полімерного матеріалу з поверхнею напрямних. Далі, цю поверхню обробляють знежирювачем.



Рисунок 3.2 – Встановлення юстирувальних та монтажних гвинтів.

Наступний крок – підготовка полімерного матеріалу «моглайс». Для початку визначаємо потрібну кількість матеріалу за формулою:

$$m = k \times V \times \rho, \quad (3.1)$$

де  $V = l \times a \times \delta$ ,

$m$  - маса необхідного матеріалу,

$k$  – коефіцієнт запасу,  $k=1,2$ ,

$V$  - об'єм порожнини, що заповнюється матеріалом,

$l$  – довжина напрямних,

$a$  – ширина напрямних,

$\delta$  – зазор, що заповнюється матеріалом,

$\rho$  – густина полімерного матеріалу,  $\rho=1,7 \text{ г/см}^3$ .

Далі змішують два компоненти полімерного матеріалу в необхідній пропорції до однорідного стану. Ретельно втирають перший шар матеріалу в поверхню напрямних на каретці, потім наносять увесь матеріал (рис. 3.4).



Рисунок 3.3 – Зачищення поверхні напрямних каретки шліфувальним кругом.



Рисунок 3.4 – «моглайс» нанесено на напрямні каретки.

Після цього каретку перевертають на  $180^\circ$  та встановлюють на монтажні гвинти, які викручують, каретку опускають на юстувальні гвинти. Через 24 години, каретку зрушують в поздовжньому напрямку і перевертають для видалення надлишків видавленого та застиглому матеріалу.



Рисунок 3.5 – Сформовані напрямні на каретці.

Після проведення усіх робіт отримують напрямні, сформовані з полімерного матеріалу. Потім очищують мастильні канавки на станині від шпаклювального матеріалу.

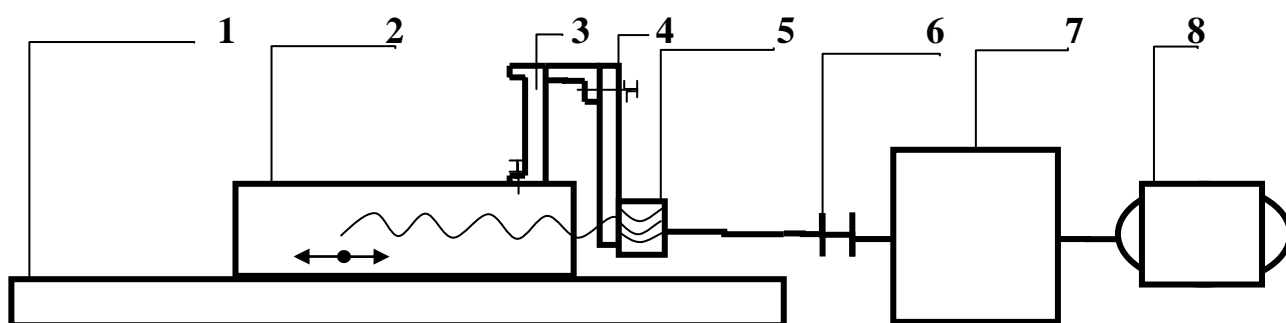
### **3.1.2. Устаткування та методика проведення експерименту**

Експерименти проводилися на верстаті токарного автоматного комплексу з виготовленими за допомогою матеріалу «моглайс» напрямними. Фотографію експериментального стенда подано на рис.3.6, а на рис. 3.7 наведено його кінематичну схему. Вона 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 30мм.



Рисунок 3.6 – Експериментальна установка.



1 – станина, 2 – супорт, 3 – стійка, 4 – пружна балка, 5 – пара гвинт-гайка, 6 – муфта, 7 – коробка швидкостей, 8 – електродвигун.

Рисунок 3.7 - Кінематична схема експериментальної установки.

Гайка розміщувалася в спеціально виготовленому металевому корпусі, який за допомогою болтів кріпився до двох пружних балок 4, що закріплені на каретці та на яких розміщувалися тензометричні датчики. При включенні приводу



обертання гвинта гайка тисне на балки 4, деформуючи їх, що дозволяє передати зусилля на супорт. Тензодатчики, кожен опором  $R = 200 \text{ Ом}$ , з'єднані в мостову схему (див. рис.3.8.) При цьому нижні тензодатчики відчують напруження розтягування, а верхні - стиснення. Сигнал від мостової схеми з тензодатчиками надходив через підсилювач на цифровий перетворювач.

Така схема підключення тензодатчиків дозволяє компенсувати можливі перекоси гайки під час руху каретки, тим самим підвищуючи точність вимірів.

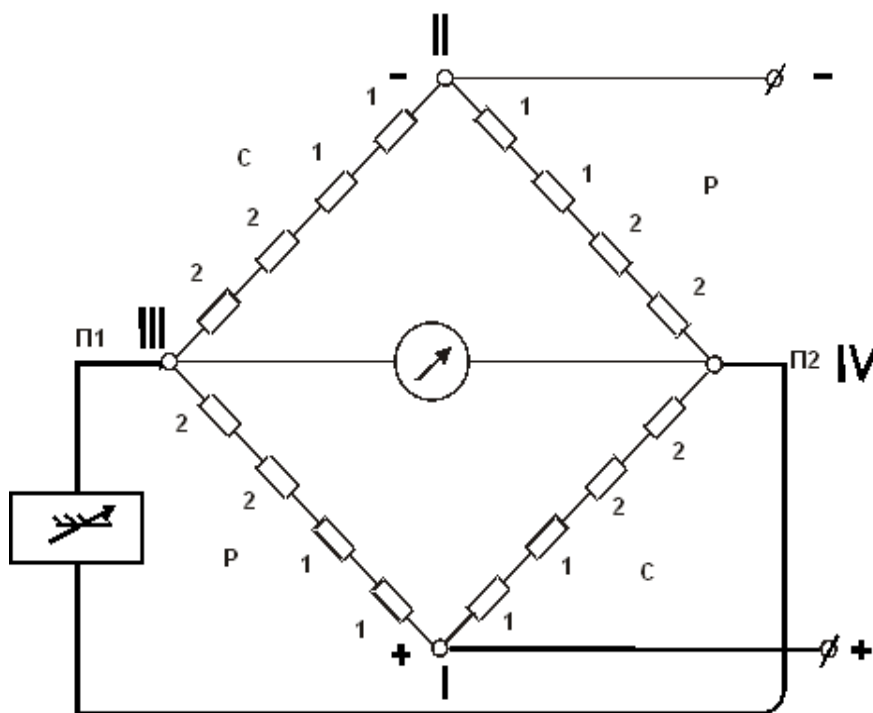


Рисунок 3.8 – Мостова схема з'єднання тензодатчиків.

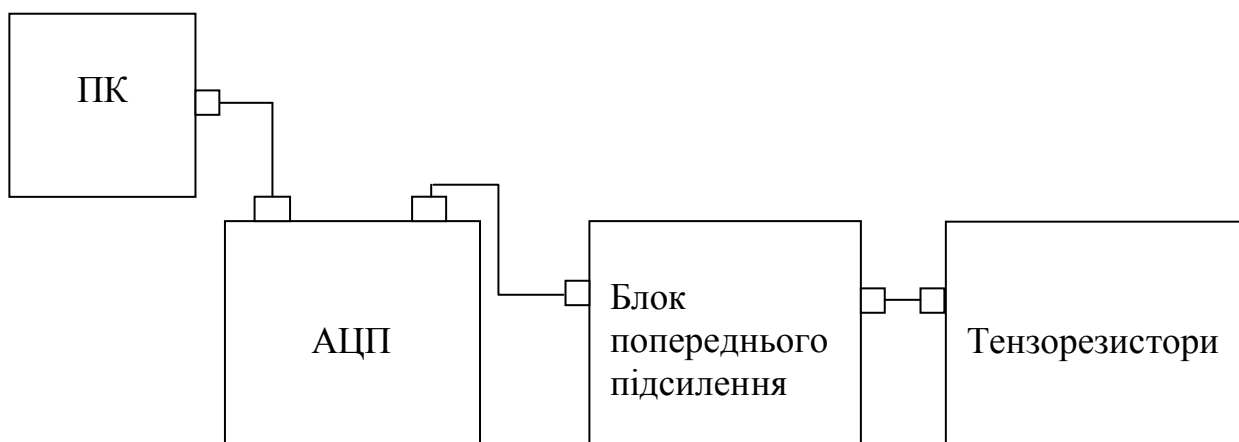


Рисунок 3.9 – Принципова схема вимірювання сили переміщення супорта верстата.

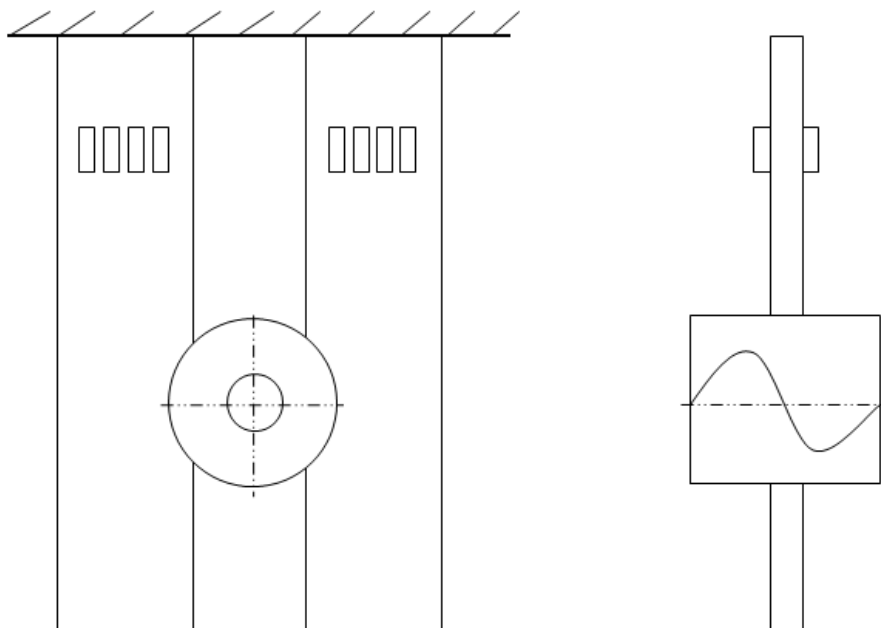


Рисунок 3.10 – Балки з тензодатчиками.

При включенні приводу обертання гвинта гайка тисне на балки, через них - на каретку, яка починає переміщатися в діапазоні швидкостей від 30 мм/хв до 4520 мм/хв. Сигнал з тензодатчиків передавався на аналогово-цифровий перетворювач (DSP-5000) через підсилювач сигналу, а далі – на комп'ютер.

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) вмикається за допомогою кнопки "мережа" (рис. 3.11), розташованої на задній панелі приладу. Кнопка вибору режиму 1 перемикає АЦП у режим запису приладу або при статичній дії навантаження, або при динамічній дії навантаження. Пуск і зупинка зчитування інформації здійснюється за допомогою кнопок 2 і 3, відповідно. На екран 5 виводяться значення вимірювань, що надходять з датчика. Кнопка 6 служить для регулювання посилення сигналу; регулювання можна здійснювати покроковим способом за допомогою вимикача або плавно - за допомогою ручки. На задній панелі приладу розташована кнопка «мережа», вхід 7 - для підключення провідників з акселерометра, вихід 8 - для підключення кабелю з входом в ЕОМ (порт RS -232). Також є місце для підключення осцилографа для спостереження процесу навантаження 9.

Технічна характеристика АЦП:

- розрядність АЦП – 14 битів;
- кількість вхідних сигналів – 2;
- діапазон вхідного сигналу –  $\pm 0,5\text{В}$ ;
- частота дискретизації – 100 МГц;

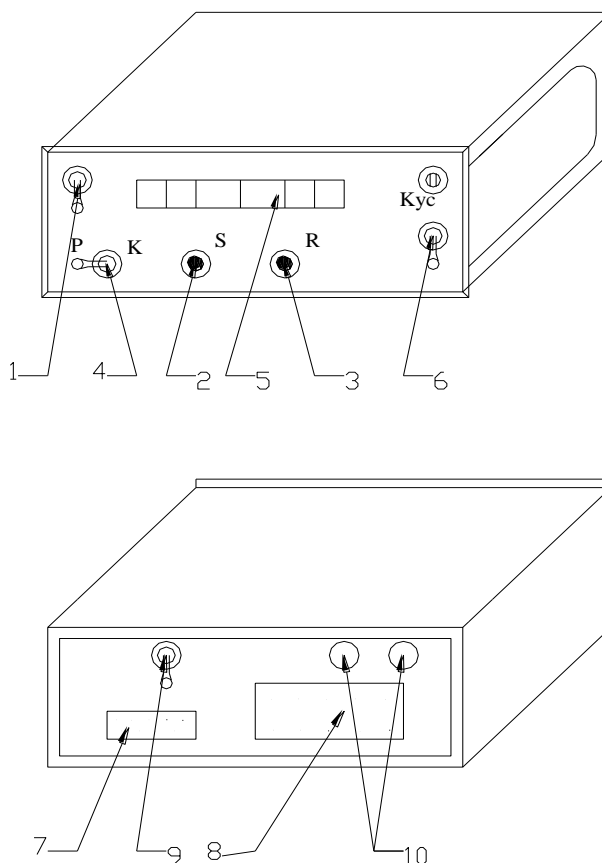


Рисунок 3.11 – Корпус аналого-цифрового перетворювача (передня та задня частини)

Сигнал передається через АЦП на комп'ютер, потім дані обробляються в програмі Паскаль – запис отриманих даних у стовпчик. У програмі Mathcad обробляються отримані результати та будуються графіки.

Далі проводять тарування даної установки. Для визначення тарування каретка звільняється від зв'язку з гвинтом, через звільнену гайку пропускається трос, який кріпиться до динамометра розтягування ДПУ 0.02-2УХЛ 4.2. ГОСТ 13837-79. До другого вушка динамометра прикладається фіксоване зусилля і визначається відповідне значення на АЦП.

Будуємо тарувальний графік, який зображено на рисунку 3.12 і визначаємо тарувальний коефіцієнт, за яким визначається сила, з якою переміщується каретка за допомогою троса та динамометра. Тарувальний коефіцієнт дорівнює: у першому експерименті  $k_1=16$  та  $k_2=1$  – у другому.

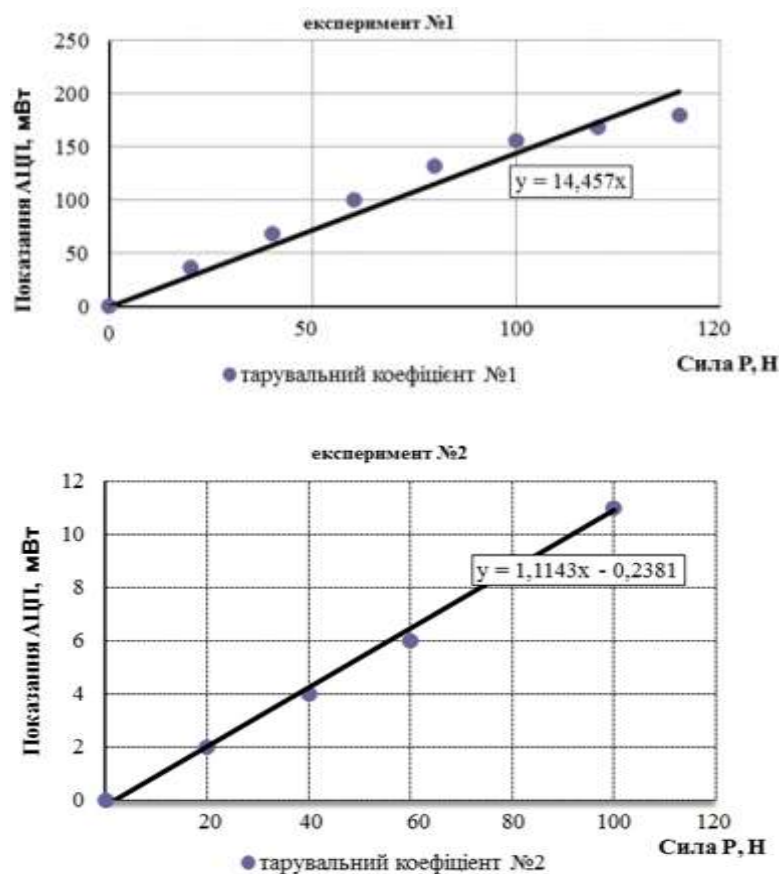


Рисунок 3.12 – Тарувальні графіки для балок з тензодатчиками

Для вивчення величини коефіцієнта тертя запланована серія експериментів, під час яких вимірювалася швидкість каретки. Це відбувалося так - у першому експерименті електродвигун підключався безпосередньо до гвинта напрямку, оминаючи редуктор, що дало змогу досягти швидкості переміщення каретки від 1370 мм/хв до 4520 мм/хв.

Для зниження швидкості був використаний редуктор із передаточним числом 35 та 50, що дозволило провести виміри на швидкостях від 30 мм/хв до 130 мм/хв та, таким чином, охопити широкий діапазон швидкостей подачі.

Для визначення коефіцієнта тертя необхідно було визначити вагу каретки. Спочатку визначали масу каретки. Маса визначалась за відомою формулою

$$m_{\text{кар}} = V \times \rho, \quad (3.2)$$

де,  $V$  - об'єм каретки,  $\text{мм}^3$ ,  $\rho$  – питома вага,  $\text{г}/\text{мм}^3$ ,  $\rho=7,8 \cdot 10^{-3} \text{г}/\text{мм}^3$

Об'єм каретки  $V$  визначали за допомогою лінійки, розбивши складну форму каретки на прості фігури та додавши їх розміри.

$$V=V_1+V_2+V_3+\dots+V_n, \quad (3.3)$$

де  $V_1 \dots V_n - 1 \dots n$  – об'єм  $1 \dots n$  частини каретки,

$$V=3072000+6912000+2088000+648000+60375+987334=12471709 \text{ мм}^3$$

$$m_{\text{кар.}} = 12471709 \times 7,8 \times 10^{-3} = 97279 \text{ г} = 97,3 \text{ кг}$$

Загальна маса каретки та додаткових устаткувань, що розташовуються на ній:

$$m = m_{\text{кар.}} + m_{\text{б.}} + m_{\text{г.}}, \quad (3.4)$$

де  $m_{\text{б.}}$  – маса балки та швелера, 4 кг,  $m_{\text{г.}}$  – маса гайки з корпусом, 4 кг.

$$m = 97,3 + 4 + 4 = 105,4 \text{ кг.}$$

Методика визначення коефіцієнта тертя наступна. Отримані на АЦП значення знижувались на показник нульового значення положення балок та ділилися на тарирувальний коефіцієнт. Отримані значення сили  $P$  заносились в таблицю та при відомій масі каретки визначається коефіцієнт тертя  $f$ .

$$f = P/m \times g \quad (3.5)$$

### **3.2. Результати експерименту з виготовлення та дослідження процесів тертя напрямних**

За описаною в розділі 3.1 методикою проведено серію експериментів, результати яких занесено до таблиці 3.1 [95]

Типові осцилограми запису процесу переміщення в першому та другому експериментах зображено на рисунку 3.13.

Таблиця 3.1. Результати експерименту. Визначення коефіцієнту тертя

№ осцилограм	Сила переміщення Р, Н			Швидкість переміщення каретки V, мм/хв	Коефіцієнт тертя f
	Дані АЦП, ділення	Нульове значення, ділення	Сила Р, Н		
1-3	630	521	55,0	4200	0,052
	640		55,8		0,053
	650		56,7		0,054
4-6	632	521	56,0	1370	0,053
	618		54,7		0,052
	650		57,5		0,053
7-9	601	521	50,0	4520	0,047
	615		51,1		0,048
	630		52,4		0,049
10-12	610	521	58,0	4500	0,055
	630		59,9		0,057
	640		60,8		0,058
13-15	631	521	55,0	420	0,052
	645		56,2		0,054
	605		52,7		0,049
16-18	636	521	57,0	910	0,054
	610		54,7		0,052
	615		55,1		0,052
19-21	628	521	54,0	2250	0,051
	650		55,9		0,052
	605		53,5		0,050
22-24	633	521	56,0	3400	0,053
	650		57,5		0,054
	615		54,8		0,052
25-27	270	78	65,0	120	0,060
	280		67,4		0,062
	295		71,0		0,065
28-30	204	78	95,0	92	0,080
	200		93,4		0,078
	220		102,4		0,086
31-33	96	78	180,0	80	0,170
	90		155,5		0,146
	92		172,5		0,163
34-36	96	78	180,0	75	0,170
	95		178,1		0,168
	90		168,8		0,159
37-39	93	78	150,0	56	0,140

	90		145,2		0,135
	96		154,8		0,144
40-42	95	78	170,0	68	0,160
	99		177,2		0,167
	90		161,0		0,152
43-45	96	78	180,0	76	0,170
	99		185,6		0,175
	88		165,0		0,156
46-48	93	78	150,0	54	0,140
	90		145,2		0,136
	99		159,6		0,144

Виконаємо оцінку випадкових похибок вимірювань коефіцієнта тертя, наведених в табл. 3.1.

Визначаємо середнє арифметичне величини коефіцієнту тертя на прикладі осцилограм 1-3.

$$\tilde{f} = \frac{0,052 + 0,053 + 0,054}{3} = 0,0053$$

Обчислимо середньоквадратичне відхилення

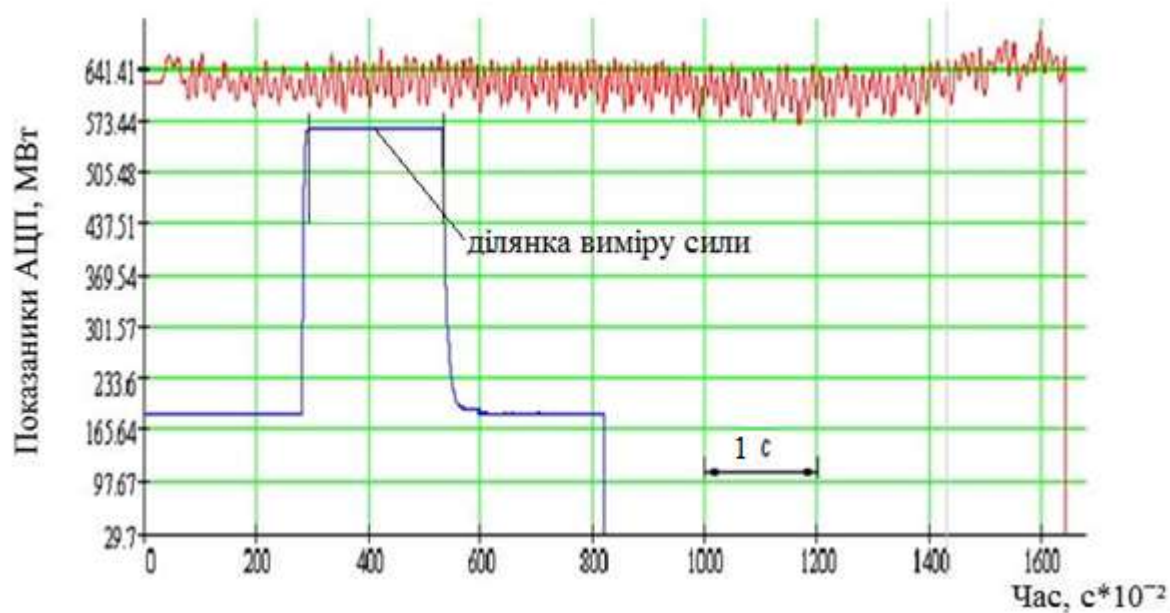
$$\tilde{\delta} = \sqrt{\frac{(0,053 - 0,052)^2 + (0,053 - 0,053)^2 + (0,054 - 0,052)^2}{3(3 - 1)}} = 9,3 \cdot 10^{-4}$$

Виберемо довірчу ймовірність  $\alpha=0,95$  і для неї вибираємо коефіцієнт Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,49$ .

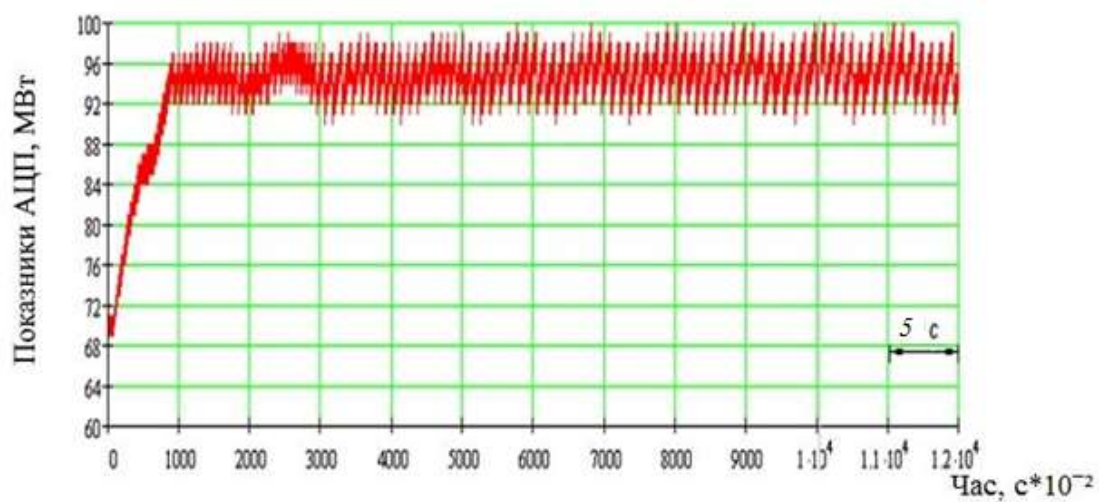
Після цього визначимо величину довірчого інтервалу  $\Delta\tilde{f} = t_{\alpha n} \cdot \tilde{\delta} = 2,49 \cdot 9,3 \cdot 10^{-4} = 0,002$ .

Тобто величина коефіцієнту тертя визначена як  $f = 0,052 \pm 0,002$  з довірчою ймовірністю 0,95.

Аналогічним чином були знайдені величини довірчого інтервалу для решти вимірювань та ці результати знайшли своє відображення на рис. 3.14, де наведений графік залежності коефіцієнту тертя від швидкості.



а)



б)

а) при швидкостях від 1370 мм/хв до 4500 мм/хв; б) при швидкості 92 мм/хв.

Рисунок 3.13 - Типові осцилограми процесу переміщення каретки

На рисунку 3.14 наведено графік залежності коефіцієнта тертя від швидкості.



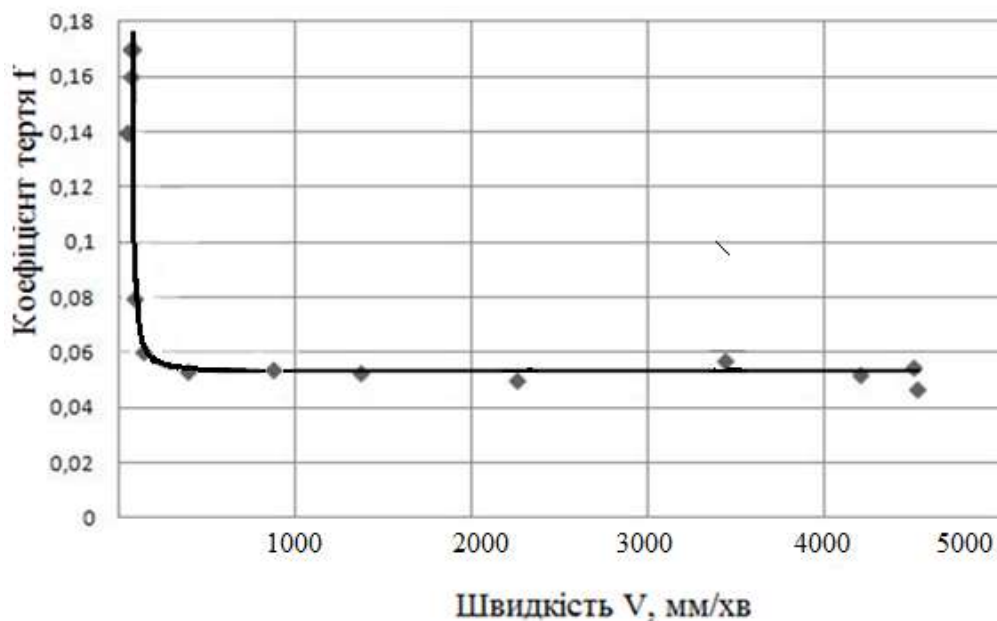


Рисунок 3.14 – Графічна апроксимація залежності коефіцієнта тертя від швидкості

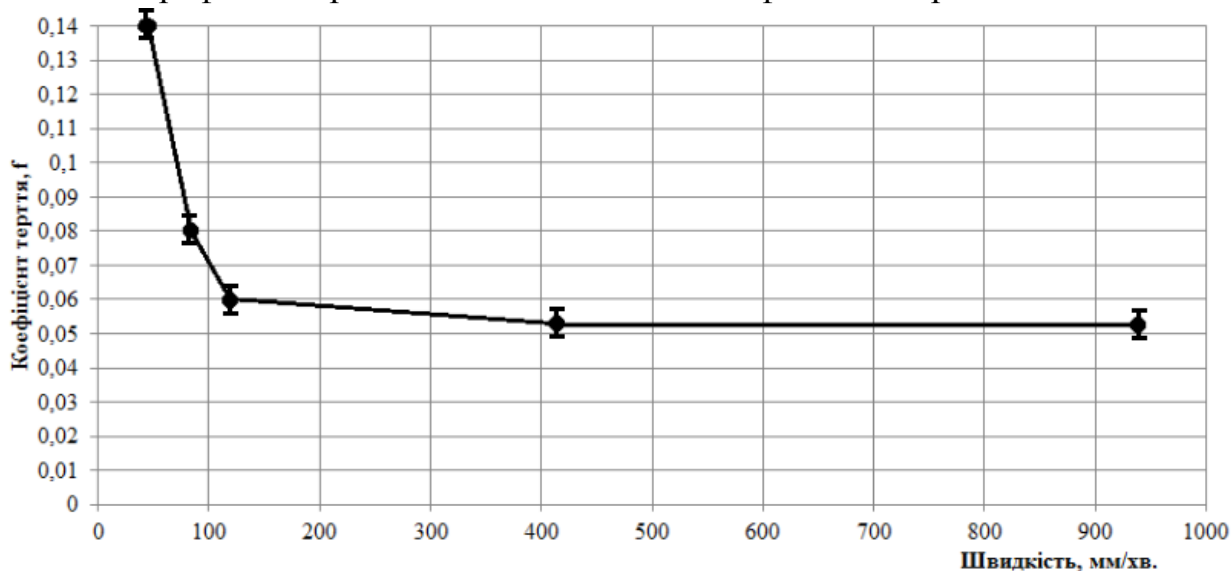


Рис. 3.15. Фрагмент графіку залежності коефіцієнта тертя від швидкості в діапазоні швидкостей від 50 до 900 мм/хв.

Аналіз цих графіків дає змогу зробити такі висновки:

- в області високих швидкостей подач (діапазон від 1370 мм/хв до 4520 мм/хв) спостерігається зниження сили в межах від 50 до 58Н 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;
- імовірно, необхідно позбутися від явища «стик-зліп» за допомогою застосування процесу шабрування однієї з контактних поверхонь, оскільки при застосуванні технології відновлення напрямних обидві контактні поверхні стовідсотково прилягають одна до одної.

### **Висновки**

1. В результаті експериментальних досліджень розроблена оригінальна технологія виготовлення напрямних з полімерного матеріалу та встановлені закономірності руху супорту по напрямним у широкому діапазоні швидкостей ковзання.
2. Розроблена оригінальна методика та відповідне обладнання для експериментального дослідження коефіцієнту тертя в широкому діапазоні швидкостей ковзання каретки токарного автоматичного комплексу з напрямними з композитного матеріалу.
3. Вперше експериментальним шляхом встановлено закономірності руху супорта металорізального верстата по напрямним, які виготовлені із металополімерного композитного матеріалу. Це дало змогу встановити, що зі зростанням швидкості ковзання коефіцієнт тертя плавно знижується, що загалом відповідає закономірностям, відомим в верстатобудуванні, та досягає на швидкостях 4300 мм/хв величини 0,047-0,055 для пар чавун-«моглайс».
4. Експериментально визначено, що коефіцієнт тертя при малих швидкостях подачі зростає, що можна пояснити явищем «стик-зліп». Це підтверджує стрибкоподібне переміщення каретки на швидкостях 50-80 мм/хв, яке спостерігається візуально та відображено в осцилограмі.

## РОЗДІЛ 4

### ДИНАМІЧНА ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ФРИКЦІЙНИХ АВТОКОЛИВАНЬ СУПОРТА ВЕРСТАТА НА НАПРЯМНИХ ІЗ ПОЛІМЕРУ

#### 4.1 Теоретичний аналіз автоколивань супорта

Актуальною є задача підвищення експлуатаційних характеристик металорізального верстата шляхом використання напрямних, виконаних із композитного матеріалу. Однією з форм коливань у верстатах є релаксаційні фрикційні коливання, які призводять до нестійкого стрибкоподібного переміщення супорта, до додаткових динамічних навантажень на вузли верстата та інструмент, а також до похибок при обробці деталей. Проведені нами експерименти дослідження фрикційних автоколивань супорта з полімерним шаром на напрямних [100, 78, 101] дозволяють встановити, що при зниженні швидкості переміщення супорту спостерігається значне збільшення коефіцієнта тертя з величини 0,047 до 0,17. Цей результат добре співвідноситься з результатами відомих робіт в галузі верстатобудування при терті металевих поверхонь [77, 83]. Однак, з огляду на різні механічні характеристики полімеру та металу, не можна екстраполювати результати, отримані раніше, на сферу застосування полімеру як однієї зі складових пари тертя. Водночас необхідним є знання закономірностей зміни коефіцієнту тертя від швидкості переміщення супорта і, передусім, знання тієї нижньої межі швидкості, за якою починається стрибкоподібний рух супорта, тобто перехід в зону явища "стик-зліп".

У лабораторії кафедри «Конструювання верстатів та машин» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» виготовлено напрямні на хрестовому супорті токарного автоматичного комплексу ПАБ 130 за допомогою матеріалу «моглайс Р» німецької фірми «Діамант» з подальшим експериментальним дослідженням залежності величини коефіцієнту

тертя в цій парі та оцінкою можливих «критичних» значень швидкостей уривчастого стрибкоподібного руху супорта [102].

Кінематична схема експериментальної установки супорта токарного автоматичного комплексу зображена на рис. 4.1.

Установка складалася із супорту, який переміщався по напрямних, виготовлених із полімерного матеріалу «Моглайс Р» за допомогою пари гвинт-гайка. Гвинт приводився в обертання електродвигуном через двошвидкісну коробку передач і муфту. Гайка була розміщена в спеціально виготовленому металевому корпусі, який за допомогою болтів кріпився до двох змонтованих на супорті пружних балок. При вмиканні приводу обертання гвинта гайка тиснула на балки, деформуючи їх і передаючи зусилля на супорт.

На основі аналізу конструкції об'єкту вивчення «супорт-привод» побудуємо його математичну модель. Для спрощення моделі виключимо вплив на досліджуваний рух сил різання, які за малих подач будуть значно меншими ваги супорта.

За ланку зведення вибираємо тіло 2 - супорт, який здійснює поступальний рух. Узагальнена координата  $x$  характеризує положення супорта відносно нерухомого глядача. За початок відліку координати  $x$  приймаємо момент зриву тіла 2 з місця. Кут повороту гвинта  $\varphi$  у передачі гвинт-гайка пов'язаний з координатою  $x$  формулою:

$$\varphi = \frac{2\pi}{h} x, \quad (4.1)$$

де  $h$  - крок гвинта, м.

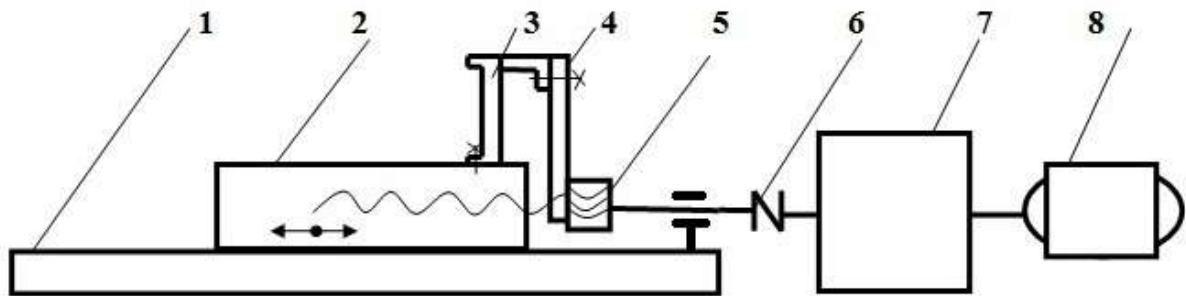
Досліджуваний об'єкт замінимо динамічною моделлю, масу якої і коефіцієнт жорсткості та дисипації зведемо до супорту. При цьому кінетична енергія динамічної моделі дорівнює:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}^2, \quad (4.2)$$

де  $m$  - зведена до супорту маса, величину якої можна знайти, виходячи з експериментальних даних або з теоретичних розрахунків.

При цьому вихідними будуть такі дані:

- маси і геометричні параметри супорта, гвинта та муфти;
- геометричні параметри та модуль пружності балок;
- статичний та кінематичний коефіцієнти тертя та коефіцієнт розсіювання енергії в площині контакту супорта з напрямними;
- динамічний коефіцієнт та твердість гуми муфти за Шором.



1 – станина, 2 – супорт, 3 – стійка, 4 – пружна балка, 5 – пара гвинт-гайка, 6 – муфта, 7 – коробка швидкостей, 8 – електродвигун.

Рисунок 4.1 - Кінематична схема експериментальної установки.

Щоб знайти зведену до супорту масу  $m_c$ , скористаємось тезою : кінетична енергія ланки зведення дорівнює кінетичній енергії механічної системи «супорт-привод», яка вивчається. Кінетична енергія системи складається з кінетичних енергій супорта, гвинта та муфти, тобто

$$T_{\text{системи}} = \frac{1}{2} m_c \dot{x}^2 + \frac{1}{2} I_{\Gamma} \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} I_M \dot{\varphi}^2 . \quad (4.3)$$

де:  $m_c$  - маса супорта, кг;

$I_{\Gamma}$  - осьовий момент інерції гвинта, кг м<sup>2</sup>;

$I_M$  - осьовий момент інерції муфти, кг м<sup>2</sup>;

Враховуючи залежність між координатами  $x$  та  $\varphi$ , маємо зв'язок між швидкостями :

$$\dot{\varphi} = \delta \dot{x} , \quad (4.4)$$

$$\text{де } \delta = \frac{2\pi}{h}$$

Тому:

$$T_{\text{системи}} = \frac{1}{2} \dot{x}^2 (m_c + (I_\Gamma + I_M) \delta^2), \quad (4.5)$$

Оскільки  $\dot{x}$  - узагальнена швидкість, зведена маса дорівнює:

$$m = m_c + (I_\Gamma + I_M) \delta^2, \quad (4.6)$$

$$\text{де } I_\Gamma = \frac{m_\Gamma d_\Gamma^2}{8}, I_M = \frac{GD^2}{4g},$$

де:  $GD^2$  - маховий момент муфти,  $\text{кг} \cdot \text{м}^3 / \text{сек}^2$ ;

$m_\Gamma$ , - маса, діаметр гвинта,  $\text{кг}$ ;

$d_\Gamma$  - діаметр гвинта,  $\text{м}$ .

Визначаємо потенціальну енергію деформацій об'єкту і виразимо її через узагальнену координату  $x$ .

Потенціальна енергія крутильної деформації муфти дорівнює [81]

$$P_{\text{кр}} = \frac{1}{2} C_{\text{кр}} (\varphi_B - \varphi)^2, \quad (4.7)$$

де  $\varphi_B = \omega_0 t$  - кут повороту приводного валу для дуже малого значення часу  $t$ , який відраховуємо з моменту зриву супорта з місця;

$$\varphi - \text{кут закручення гвинта, рад; } \varphi = x \cdot \delta \quad (4.8)$$

коефіцієнт  $\delta$ , який залежить від кроку гвинта  $h$ , дорівнює  $\delta = \frac{2\pi}{h}$ .

Муфта втулково-пальцева з гумовим ущільнювачем (гума БК - 5) має крутильну податливість, яка обчислюється за емпіричною формулою [103].

Крутильна жорсткість муфти дорівнює

$$C_{\text{кр}} = \frac{K_g \cdot d_B^3 \cdot \sqrt{H^3}}{1,7}, \quad (4.9)$$

де:

$d_B$  - діаметр валу;

$K_g$  - коефіцієнт динамічності;

$H$  - твердість гуми за Шором.

Коефіцієнт крутильної жорсткості муфти, який зведений до координати  $x$ , позначимо  $C_{\text{крзв}}$ . Він дорівнює  $C_{\text{крзв}} = C_{\text{кр}} \cdot \delta^2$  (4.10)

Визначимо коефіцієнти жорсткості інших пружних елементів експериментальної установки: гвинта та пружних балок. Гвинт довжиною  $l_\Gamma$  та діаметром  $d_\Gamma$  у з'єднанні «гвинт-гайка» має деформацію розтягнення-стискування, тому коефіцієнт його лінійної жорсткості дорівнює:

$$C_L = \frac{E\pi d_\Gamma^2}{4l_\Gamma}. \quad (4.11)$$

Пружні балки довжиною  $l_\delta$  мають прямокутні перерізи  $b \times h$ , розміщені паралельно, тому згинальна жорсткість жорстко защемлених двох балок дорівнює [84]:

$$C_{зг} = \frac{6EI_y}{l_\delta^2}, \quad (4.12)$$

де  $I_y = \frac{bh^3}{12}$ .

Враховуючи те, що пружні елементи об'єкту з'єднані послідовно і, розкривши формулу (4.7), з врахуванням формули (4.8), маємо потенціальну енергію деформації об'єкту вивчення для дуже малого значення  $t$ .

$$\Pi = \frac{1}{2}C \cdot x^2 - C_{кр} \cdot \delta \cdot \omega_0 t \quad (4.13)$$

$$\text{де } C = \frac{C_L \cdot C_{зг} \cdot C_{кр} \cdot \delta^2}{C_L \cdot C_{зг} + C_L \cdot C_{кр} \cdot \delta^2 + C_{зг} \cdot C_{кр} \cdot \delta^2} \quad (4.14)$$

Вважаємо, що розсіювання енергії має перевагу в площині контакту супорта з напрямними, на які нанесене полімерне покриття, коефіцієнт розсіювання енергії  $\psi$ , якого відомий. Відомі також значення коефіцієнту тертя спокою та коефіцієнтів тертя руху контактуючих матеріалів  $f_{сп}$ ,  $f_p$ .

Маємо спрощену динамічну модель, розрахункова схема якої зображена на рис. 4.2. Спрощена динамічна модель складається із: зведеної до супорту маси  $m$ ; в'язко-пружної ланки з коефіцієнтом жорсткості  $C$  та коефіцієнтом лінійного опору  $b$ ; ланки приводу, що рухається зі швидкістю  $V_0$ .

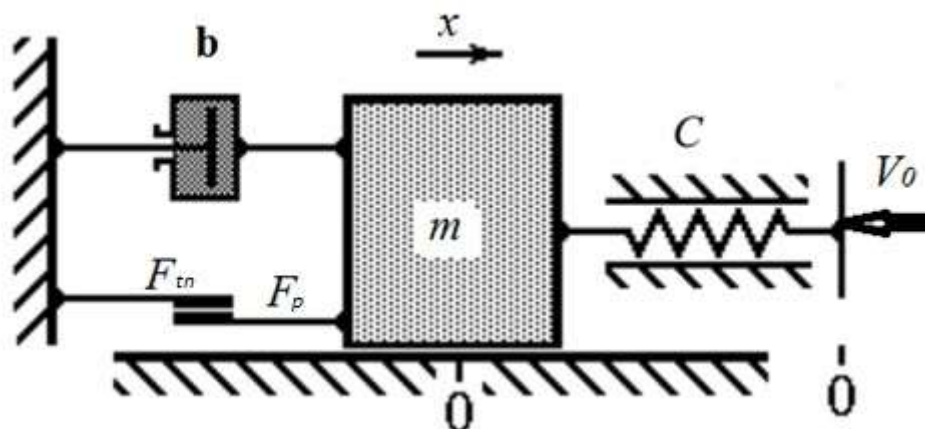


Рисунок 4.2 - Розрахункова схема спрощеної динамічної моделі експериментальної установки

Як відомо, [84], на практиці за малих швидкостей  $V_0$  супорту не завжди забезпечується плавний рух, який необхідний при подачі. Має місце стрібноподібний рух з періодичними зупинками. Це питання особливо важливе для верстатів, у яких рухомі вузли мають дуже велику вагу.

Наближене теоретичне дослідження стрібноподібного руху можливе за допомогою спрощеної характеристики тертя, яку наведено на рис. 4.3. Ця характеристика дає два значення сили тертя: максимальну силу тертя спокою,  $F_{cn}$ , та максимальну силу тертя руху,  $F_p$ .

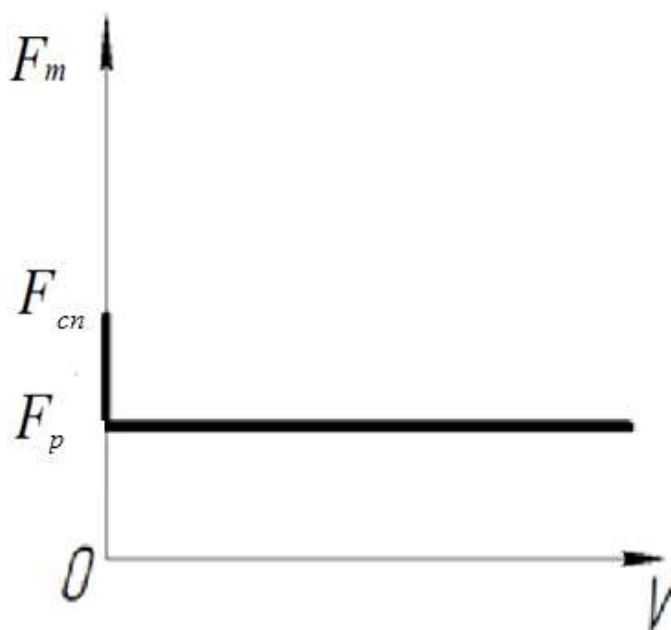


Рисунок 4.3 - Спрощена характеристика тертя



Розглянемо рух тіла масою  $m$  (рис. 4.2), яке зв'язане з ведучою ланкою пружним зв'язком з коефіцієнтом жорсткості  $C$ . Швидкість руху ведучої ланки є постійною та дорівнює  $V_0$ . При русі ведучої ланки пружина стискається доти, доки пружна сила стискання не зрівняється з максимальною силою тертя спокою та станеться «зрив» тіла.

У поточний момент часу довжина пружини зміниться на величину  $(x - V_0 t)$ , якщо  $x$  - поточне положення тіла. Як тільки почнеться рух, сила тертя зменшиться і ведуча ланка під дією пружної сили отримає переміщення зі змінною швидкістю та зупиниться. Далі цикли стрибків повторюються.

Можна досліджувати питання про те, скільки часу буде тривати зупинка, поки сила пружності знову не досягне значення максимальної сили тертя  $F_{cn}$ . Поки тіло стоїть на місці, ведуча ланка пройде певний шлях. Період автоколивань, що виникають, складається з тривалості руху до зупинки та часу простою. Чим менша швидкість  $v_0$  ведучої ланки, тим більш різко виражений процес автоколивань. Для різних значень швидкості  $v_0$  у джерелі [84] представлені графіки залежності швидкості  $\dot{x}$  від часу.

Для складання математичної моделі експериментальної установки застосуємо рівняння Лагранжу другого роду при узагальненій координаті  $x$ , яка характеризує положення супорта:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{\partial \Pi}{\partial x} + Q_x^{(оп)} + Q_x^{(неп)}, \quad (4.15)$$

де  $Q_x^{(неп)} = Q_x^{(тер)}$  - узагальнена сила тертя. У цьому випадку вона дорівнює

$$Q_x^{(тер)} = \Delta f \cdot m_c \cdot g = \Delta F. \quad (4.16)$$

$m_c$  – маса супорта

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

Узагальнена сила опору, враховуючи, що  $Q_x^{(оп)} = - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}}$ , де  $\Phi$  – функція розсіювання енергії Релея, дорівнює:

$$Q_x^{(оп)} = -b \cdot \dot{x}. \quad (4.17)$$

Знайдемо значення похідних, які входять до рівняння (4.15), враховуючи формули для кінетичної енергії (4.2) та для потенціальної (4.13).

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) &= m \cdot \ddot{x}, & \frac{\partial T}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial \Pi}{\partial x} &= +c \cdot x - c_{\text{кр}} \omega_0 \cdot \delta \cdot t. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Підставивши (4.16), (4.17) та (4.18) у (4.15), маємо диференціальне рівняння руху об'єкту

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2 x = \frac{\Delta F}{m} + \frac{c_{\text{кр}} \cdot \omega_0 \cdot \delta \cdot t}{m}, \quad (4.19)$$

де введені позначення:

$$2n = \frac{b}{m}, \quad k^2 = \frac{c}{m}, \quad (4.20)$$

$k$  - частота власних коливань об'єкта.

Для подальших досліджень вводимо нову змінну  $x_{\Delta}$

$$x_{\Delta} = x - v_0 t, \quad (4.21)$$

яка визначає відносне відхилення супорту. Враховуючи те, що рівномірне обертання гвинта забезпечує супорту постійну швидкість  $v_0$ , маємо  $v_0 = \frac{\omega_0}{\delta}$ .

Замість рівняння (4.19), маємо диференціальне рівняння відносного руху супорта:

$$\ddot{x}_{\Delta} + 2n\dot{x}_{\Delta} + k^2 x_{\Delta} = \left( \frac{\Delta F}{m} - 2nv_0 \right) + v_0 \left( \frac{c_{\text{кр}} \cdot \delta^2}{m} - k^2 \right) t. \quad (4.22)$$

У разі малого опору, коли  $n < k$ , загальний розв'язок рівняння (4.22) має вигляд [102]:

$$x_{\Delta} = e^{-nt} (C_1 \cos k_1 t + C_2 \sin k_1 t) + A + Bt, \quad (4.23)$$

$$\text{де } k_1 = \sqrt{k^2 - n^2}. \quad (4.24)$$

Підставивши частинний розв'язок неоднорідного рівняння  $x_{\text{час}} = A + Bt$  в диференціальне рівняння, отримаємо значення постійних  $A$  та  $B$ :

$$A = \frac{\Delta F}{c} - \frac{2n}{k^2} \bar{c} v_0, \quad B = v_0 (\bar{c} - 1), \text{ де } \bar{c} = \frac{c_{\text{крЭВ}}}{c}. \quad (4.25)$$

Для знаходження постійних інтегрування  $C_1$  та  $C_2$  використовуємо початкові умови: при  $t = 0$ , у момент зриву супорта з місця, його швидкість та початкова координата дорівнюють нулю:

$$\left. \begin{aligned} x|_{t=0} &= 0, & x_{\Delta}|_{t=0} &= 0 \\ \dot{x}|_{t=0} &= 0, & \dot{x}_{\Delta}|_{t=0} &= -v_0 \end{aligned} \right\}, \quad (4.26)$$

Маємо:

$$C_1 = -A, \quad C_2 = -\frac{A \cdot n}{k_1} - \frac{\bar{c} v_0}{k_1}. \quad (4.27)$$

Отже, закон відносного руху зведеної маси має вигляд:

$$x_{\Delta} = A + v_0(\bar{c} - 1) \cdot t - e^{-nt} \left[ A \cos k_1 t + \left( \frac{An}{k_1} + \bar{c} \frac{v_0}{k_1} \right) \sin k_1 t \right]. \quad (4.28)$$

Коефіцієнт  $n$ , що пов'язаний з узагальненим коефіцієнтом опору  $b$  формулою (4.20), може бути визначений через коефіцієнт розсіювання енергії  $\psi$  за формулою, згідно з [103]

$$n = \frac{\psi}{4\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}. \quad (4.29)$$

Визначимо, чому дорівнюють швидкість та прискорення відхилення супорта від рівномірного руху в довільний момент часу. Для цього візьмемо першу та другу похідні за часом з закону руху (4.28) та підставимо значення (4.25) і (4.27).

Швидкість дорівнює

$$\dot{x}_{\Delta} = v_0 \left[ (\bar{c} - 1) - \left( \bar{c} \cos k_1 t + \frac{n\bar{c}}{k_1} \sin k_1 t \right) e^{-nt} \right] + \frac{\Delta F e^{-nt}}{mk_1} \sin k_1 t \quad (4.30)$$

Прискорення дорівнює

$$\ddot{x}_{\Delta} = e^{-nt} \left[ \frac{1}{k_1} \left( k^2 v_0 \bar{c} - \frac{\Delta F}{m} n \right) \sin k_1 t + \frac{\Delta F}{m} \cos k_1 t \right] \quad (4.31)$$

Оскільки експеримент і практика експлуатації верстатів показує, що іноді супорт рухається з зупинками, поставимо завдання: визначити той момент часу,  $t_1$ , за якого відбудеться перша зупинка супорта. У цей момент часу  $t_1$  і швидкість, і прискорення будуть дорівнювати нулеві. У формули (4.30) та (4.31) замість поточного часу  $t$ , поставимо конкретне значення  $t_1$ . Тоді рівняння  $\dot{x}_{\Delta}(t_1) = 0$  та  $\ddot{x}_{\Delta}(t_1) = 0$  забезпечать систему рівнянь (4.28), у яких буде дві невідомі:  $t_1$  та  $v_0$ .

Швидкість  $v_0$  назвемо «критичною», через те, що рух зі швидкістю, меншою, ніж  $v_{кр}$ , буде стрибкоподібним [77]. Маємо систему трансцендентних рівнянь (4.32) з невідомими  $t_1$  та  $v_{кр}$ .

$$\begin{cases} \frac{\Delta F}{m} \cos k_1 t_1 - \left( \frac{\Delta F}{m} \cdot \frac{n}{k_1} - \frac{k^2}{k_1} v_{кр} \bar{c} \right) \sin k_1 t_1 = 0 \\ v_{кр} \left[ (\bar{c} - 1) e^{nt_1} - \bar{c} \cos k_1 t_1 - \frac{n\bar{c}}{k_1} \sin k_1 t_1 \right] + \frac{\Delta F}{mk_1} \sin k_1 t_1 = 0 \end{cases} \quad (4.32)$$

Отже, поставлене завдання про визначення тієї величини швидкості поступального руху супорта, за якої виникають релаксаційні автоколивання, звелася до розв'язання системи двох трансцендентних рівнянь (4.32) з невідомими  $t_1$  і  $v_{кр}$ .

Для теоретичного дослідження залежності величини «критичної» швидкості, що має місце в експериментальній установці (рис. 3.6, 3.7), динамічна модель якої зображена на рис. 4.2, розв'яжемо систему трансцендентних рівнянь (4.32), в яких введені наступні позначення:

$m$  - зведена маса;

$$\Delta F = \Delta f \cdot m_c \cdot g, \quad (4.33)$$

$\Delta f$  - різниця коефіцієнтів тертя;

$m_c$  - маса супорта;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ .

$$n = \frac{\psi}{4\pi} \cdot k, \quad (4.34)$$

$\psi$  - коефіцієнт розсіювання енергії;

$k$  - власна частота коливань;  $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$

$$k_1 = \sqrt{k^2 - n^2} \quad (4.35)$$

$$\bar{c} = \frac{C_{кр} \cdot \delta^2}{c} \quad (4.36)$$

$\delta$ ,  $C_{кр}$ ,  $C$  визначаються за формулами (4.4), (4.9) та (4.14) відповідно.

## 4.2 Чисельний аналіз задачі з визначення «критичної» швидкості руху супорта

Реалізацію запропонованої вище методики дослідження релаксійних коливань з метою визначення оптимального поєднання параметрів, що забезпечують плавний, без зупинок, рух супорта, після визначення «критичної» швидкості з рівнянь (4.32) рекомендується проводити за допомогою алгоритму, схема якого показана на рисунку 4.4.

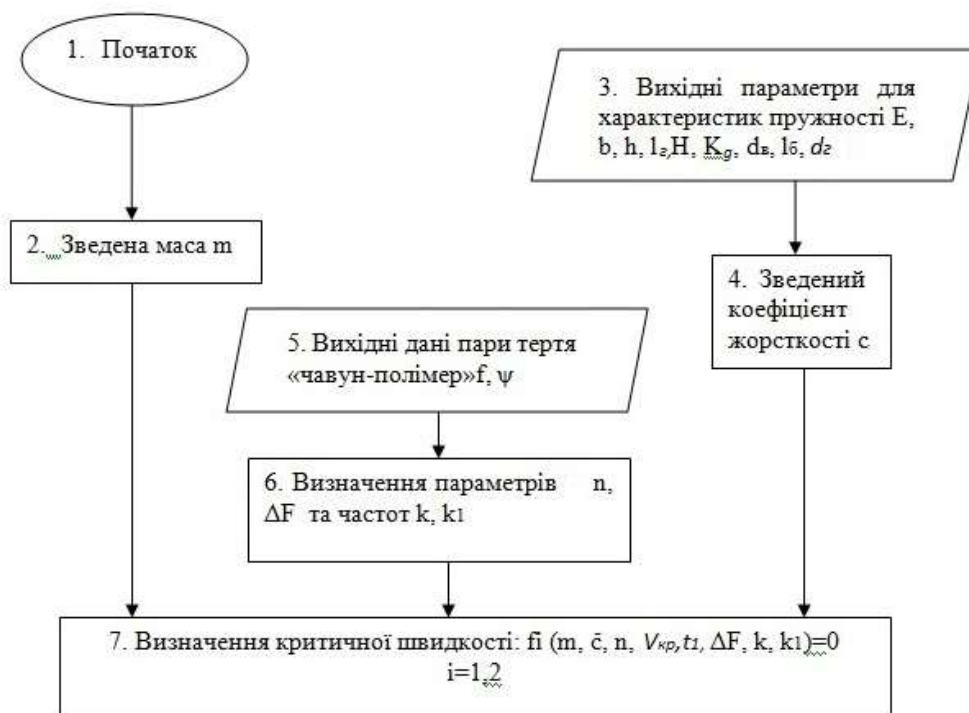


Рисунок 4.4 - Схема алгоритму для визначення «критичної» швидкості

Коментарі для реалізації алгоритму.

1. Маємо три пакети даних:

- геометричні параметри та модулі пружності матеріалів для визначення зведеного коефіцієнта жорсткості (блок 3)

- статичний і кінематичний коефіцієнти тертя та коефіцієнт розсіювання енергії конкретної пари тертя (блок 5).

2. Визначається зведена маса  $m$  (блок 2).

3. Визначається зведений коефіцієнт жорсткості  $c$  (блок 4).

4. Визначаються коефіцієнти диференціального рівняння руху об'єкта та рівнянь для визначення моменту зупинки і «критичної» швидкості (блок 6).

5. Розв'язується система трансцендентних рівнянь (4.32) з невідомими  $t_1$  та  $u_{кр}$  (блок 7).

На рисунках 3.14, 3.15 представлені результати залежності величини «критичної» швидкості від різниці коефіцієнтів тертя, отримані експериментальним шляхом. Щоб порівняти цю залежність з аналогічною теоретичною залежністю, скористаємось алгоритмом, зображеним на рис. 4.4 та програмним пакетом MathCad.

Для чисельної реалізації алгоритму визначення «критичної» швидкості маємо наступні вихідні дані.

Маса супорту  $m_c=104,5$  кг; коефіцієнти тертя  $f_{сп} = 0,12$ ;  $f_p = 0,04 \div 0,07$ . ( $\Delta f = 0,05 \div 0,08$ ).

Ходовий гвинт:  $m_c=1,5$  кг,  $d_r=0,025$ м,  $l_r=0,465$ м,  $h=0,004$ м.

Муфта втулково-пальцева з гумовим ущільненням:  $m_m=0,38$ кг,  $D=0,052$ м,  $K_d=3,8$ ,  $H=86$ ,  $d_v=0,015$ м.

Пружні балки:  $l_b=0,175$ м,  $b \times h=0,04 \times 0,005$ м.

Модулі пружності:  $E = 2,1 \cdot 10^{11} \frac{H}{m^2}$ ,  $G = 8 \cdot 10^{10} \frac{H}{m^2}$ .

Отримаємо за формулою (4.6) зведену масу з врахуванням формул осьових моментів інерції гвинта та муфти і значення коефіцієнту  $\delta$ , формула (4.4). Маємо  $m=1026,62$ кг.

Коефіцієнти жорсткості пружних елементів, застосованих в експерименті, визначимо за формулами (4.9)-(4.12). Зведену жорсткість визначимо за формулою (4.14); інші величини, що мають місце в рівняннях (4.32) за формулами (4.33)-(4.36).

Проведені дослідження,[77], для пари тертя чавун-композитний матеріал свідчать про те, що коефіцієнт розсіювання енергії  $\psi - 0,3 \dots 0,5$ :  $\psi = 0,3$  - без змащування поверхонь,  $\psi = 0,5$  - зі змащуванням поверхонь. Для розрахунків

беремо значення  $\psi = 0,5$ , яке відповідає застосованій в експерименті парі тертя із змащуванням.

Результати теоретичних розрахунків представлені в таблиці 4.1 та відображені на рисунках 4.5 у вигляді значень коефіцієнту тертя, знайдених як різниця між коефіцієнтом тертя спокою 0,14 (табл.2.3) та показниками  $\Delta f$ .

Таблиця 4.1 - Залежність «критичної» швидкості від  $\Delta f$ , при  $\psi=0,5$

Значення $\Delta f$	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

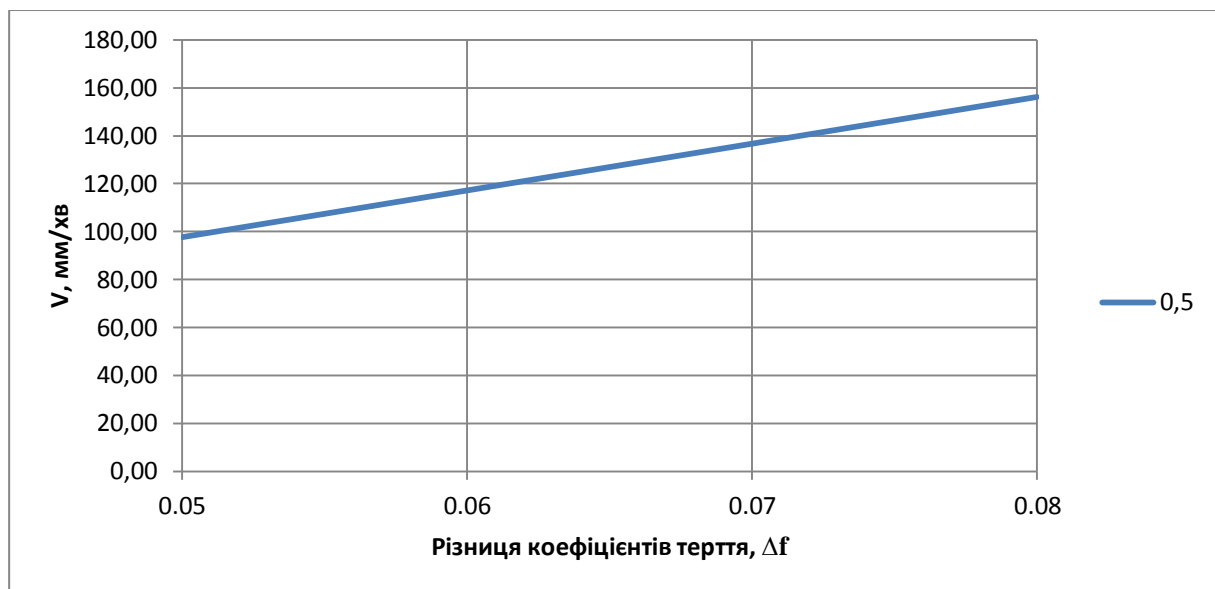


Рисунок 4.5 - Залежність «критичної» швидкості руху супорта ( $V$ ) від різниці коефіцієнтів тертя для  $\psi=0,5$ .

З урахуванням отриманих результатів виконаємо порівняння експериментально знайденої залежності коефіцієнта тертя від швидкості з результатами теоретичних розрахунків (рис. 4.6)

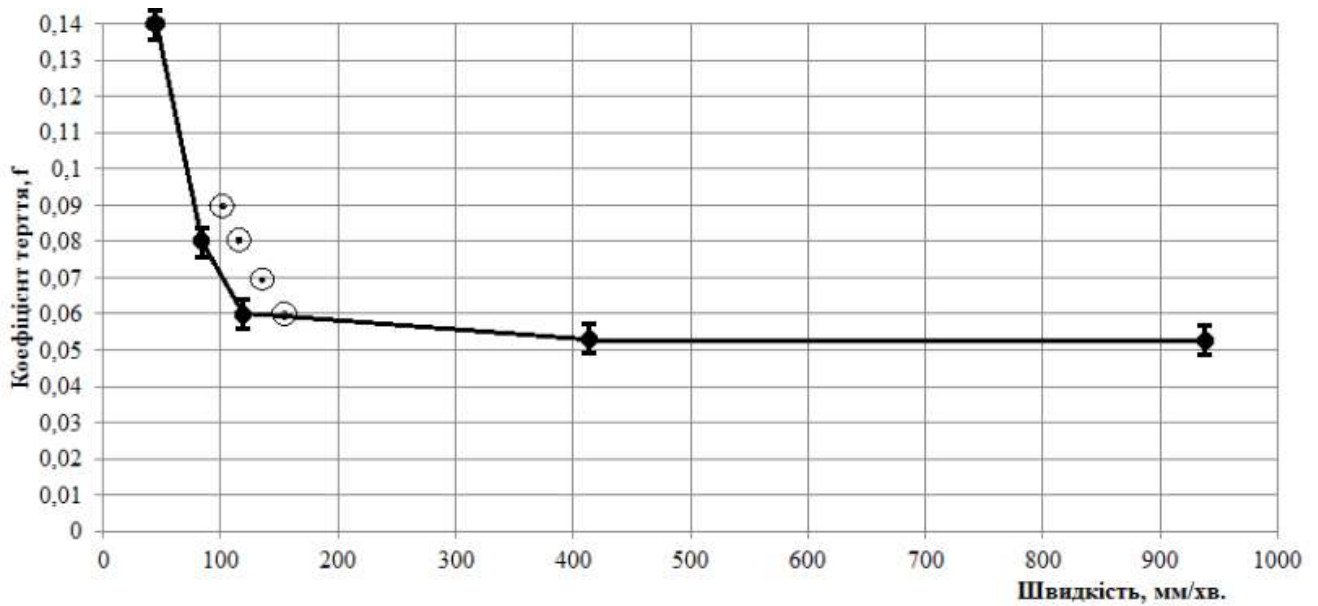


Рисунок 4.6 - Фрагмент еспериментального графіку залежності коефіцієнта тертя від швидкості в діапазоні швидкостей від 50 до 900 мм/хв (символи ◆ - експериментальні дані) в порівнянні з результатами розрахунків критичної швидкості для  $\psi = 0,5$  (символи ○ - дані, що були отримані теоретичним шляхом)

Таким чином, межа стрибкоподібного руху нашої моделі знаходиться в діапазоні від 150 до 97 мм/хв. В той же час експериментальне значення при такому підвищенні коефіцієнту тертя знаходяться у діапазоні 92-120 мм/хв. Порівняння середнього арифметичного цих швидкостей показує, що розбіжність експериментальних та теоретичних значень не перевищує 20%. З іншого боку, якщо враховувати більш точно початок різкого підвищення коефіцієнта тертя ( $f=0,06$ ), то порівняння швидкостей 150мм/хв та 120мм/хв (табл. 4.1) також дає похибку, яка не перевищує 20%.

Отже, можна констатувати, що запропонована математична модель дозволяє з достатнім ступенем точності визначити величину «критичної» швидкості, оскільки експериментально встановлено (див. рис. 4.14, 4.15), що цей показник дорівнює 100-120 мм/хв і при подальшому зниженні швидкості починається позначатися вплив коефіцієнту тертя спокою, що призводить до зросту коефіцієнту тертя ковзання. Тобто процес ковзання починає



супроводжуватися явищем стрибкоподібного руху, який підвищує коефіцієнт ковзання до максимального значення, близького до коефіцієнту тертя спокою.

Водночас, експериментальна установка, для якої виконувалися числові розрахунки, має діаметр гвинта значно менший, ніж той, що використовується на реальному супорті токарно-автоматичного комплексу ПАБ 130. Отже, величина жорсткості останнього буде більшою, ніж у експериментальної установки не тільки по цій причині, а і по причині відсутності пружних балок, і тому значення «критичних» швидкостей з одного боку будуть значно зменшуватися, а з іншого, з урахуванням сил різання, будуть зростати, залишаючись в межах, які менші тих, що мають місце в парі тертя «чавун - сталь».

Оскільки запропонована математична модель дозволяє виконати попередню оцінку величини «критичних» швидкостей подачі залежно від застосованої пари тертя, тому вона може бути рекомендована для дослідження релаксійних коливань супорта верстата з врахуванням сили різання. Для цього необхідно побудувати динамічну модель домінуючого, з цієї точки зору, вузла верстата, що складається з:

- приводного вала двигуна;
- муфт;
- супорта, що рухається по нерухомих напрямних.

Як відомо [ 75], динамічна система верстата - це пружна система, у якій при врахуванні процесів, що відбуваються в двигуні, здійснюється процес різання за наявності сил тертя та інших сил опору.

Досліджувана механічна система, як будь-яка машина, має нескінченне число ступенів вільності тому, що пружні деталі (ланки) об'єкту деформуються в різних напрямках і мають розподілену масу. Для спрощення завдання необхідно зменшити число ступенів вільності. За ланку зведення обираємо супорт, тоді узагальненою буде координата  $x$  - переміщення супорта щодо нерухомого спостерігача. Побудова динамічної моделі базується на чотирьох базових тезах. Перші три тези стосуються еквівалентності кінетичної, потенціальної енергій і дисипативної функції досліджуваного об'єкта і моделі. Четверте твердження дає

змогу знайти узагальнену силу з умови еквівалентності суми можливих робіт сил, які діють на систему і можливої роботи сили, яка прикладена до ланки зведення [104].

Вихідними для побудови динамічної моделі системи «супорт-привод» верстату з врахуванням сили різання будуть такі дані:

- міри інертності (маси, геометричні параметри, осьові моменти інерції деталей об'єкта);
- коефіцієнти жорсткості з'єднань і деталей залежно від домінуючих видів пружних деформацій (модулі пружності матеріалів, геометричні параметри);
- особливості сил шкідливих опорів руху ланок (властивості і матеріали контактуючих поверхонь, залежності сил опору від швидкості);
- характеристики сили різання і характеристики сили тертя;
- кінематичні залежності між швидкостями мас, які рухаються.

Зведену масу  $m$  визначають з умови еквівалентності кінетичних енергій об'єкта  $T$  і ланки зведення. Зведений коефіцієнт жорсткості визначають з умови еквівалентності потенціальних енергій деформацій пружних в'язей та з'єднань об'єкта і ланки зведення,  $P$ .

Пружність кожної в'язі характеризується жорсткістю (коефіцієнтом жорсткості), яка може бути отримана з формул, що відображають закони Гука за різних деформацій: розтягуванні - стисканні, крученні, згинанні. Динамічна система головного приводу верстата з багатоступеневою коробкою швидкостей являє собою складну згинально-крутильну систему. Ця система розглядається спрощено шляхом приведення згинальної і крутильної податливостей до лінійної. Податливість різних валів на кручення визначається за формулами, наведеними в [84]. При розрахунку муфт з гумовими пружними елементами необхідно враховувати відмінність між жорсткістю гуми при статичному і динамічному навантаженнях. У верстатах застосовують паралельне, послідовне або змішане з'єднання пружних елементів. Як відомо [104], у разі  $n$  пружних елементів, що зводяться, маємо формули для зведеної жорсткості:  $c_{зв}$

- за послідовного з'єднання  $n$ -елементів

$$\frac{1}{c_{зв}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{c_i},$$

-за паралельного з'єднання елементів

$$c_{зв} = \sum_{i=1}^n c_i.$$

Якщо пружна в'язь, що зводиться, рухається зі швидкістю, яка відрізняється від швидкості руху зведеної в'язі, маємо залежність

$$c_{зв} = c \cdot U, \quad (4.37)$$

де  $U$  - передавальна функція.

Вивчення динаміки верстата неможливе без врахування дисипації енергії з різних причин. Теоретичному та експериментальному дослідженню дисипативних сил присвячена обширна наукова література [84, 86, 102, 103, 105].

Зведений коефіцієнт опору,  $b$ , визначають з умови еквівалентності дисипативних функцій,  $\Phi$ , які враховують демпфірувальні властивості в'язей об'єкта і ланки зведення.

Дисипація енергії в металорізальних верстатах залежить від різних чинників, тому діапазони змін параметрів дисипації енергії достатньо великі. Оскільки на коливальні процеси у верстатах впливає не тільки характер процесів різання, а й пружна система верстата, зазначимо основні причини дисипації енергії, які характерні для верстатів [84]:

- розсіювання енергії приводним двигуном;
- тертя в кінематичних парах за відносного проковзування поверхонь;
- дисипація енергії в спеціально введених демпфірувальних пристроях (фрикційних, гідравлічних);
- внутрішнє тертя в нерухомих з'єднаннях деталей (конструкційне демпфірування).

Інтенсивність останнього, четвертого, виду дисипації енергії оцінюється площею петлі гістерезиса [86], яка визначає енергію, що розсіюється в

конструкції за один цикл навантаження - розвантаження. Як зазначено в роботі [84], коефіцієнт розсіювання енергії  $\psi$  в матеріалі деталей можна не враховувати, оскільки величина відносного розсіювання енергії в металі відносно мала ( $\psi=0,01\dots0,02$ ).

Три інші причини дисипації енергії враховують, ввівши узагальнений коефіцієнт опору  $b$ , вважаючи при цьому, що всі сили в'язкого опору прямо пропорційні першому ступеню швидкості. Це пояснюється, [83], невеликими значеннями швидкостей деформацій, що виникають в системі. Тому, як відомо [90], [86], умовні амплітуди коливань у цьому випадку утворюють геометричну прогресію. Логарифм відношення двох послідовних амплітуд  $A_i$  та  $A_{i+1}$  дорівнює логарифмічному декременту  $\eta$ , який визначається експериментально за допомогою графіка, що відображає залежність узагальненої координати від часу, та зв'язаний з коефіцієнтом розсіювання енергії  $\psi$  наближеною формулою [84]  $\eta = \psi/2$ . Отже, узагальнений коефіцієнт опору можна визначити, отримавши з експериментальної кривої логарифмічний декремент  $\eta$  (або коефіцієнт розсіювання) за формулою [103]

$$b = \frac{\sqrt{mc}}{\pi} \cdot \eta \quad \text{або} \quad b = \frac{\sqrt{mc} \cdot \psi}{2\pi}. \quad (4.38)$$

Зазначимо, що значення коефіцієнту  $\psi$  для багатьох типових елементів металорізальних верстатів наведено в джерелі [77]. Також є інші, уточнені, залежності для визначення коефіцієнта розсіювання  $\psi$  [84], [87]. У [84] є таблиця похибок значень  $\psi$ , що обчислюються за наближеною формулою.

Через те, що у верстаті є декілька пружно-дисипативних елементів, які з'єднані послідовно або паралельно, маємо формули для визначення зведених коефіцієнтів  $\psi$  [84].

- при послідовно з'єднаних  $n$  елементах

$$\psi_{зв} = \frac{\sum_{i=1}^n \psi_i \cdot c_i}{\sum_{i=1}^n c_i},$$

- при паралельно з'єднаних  $n$  елементах

$$\psi_{зв} = \sum_{i=1}^n \frac{\psi_i}{c_i \sum_{i=1}^n e_i},$$

де  $e_i = \frac{1}{c_i}$  - податливості - ого елемента.

Отже, при вивченні фрикційних автоколивань супорта на напрямних верстата з врахуванням сили різання маємо динамічну модель, зображену на рис.4.7, де

$m$  – зведена маса,

$c$  – зведений коефіцієнт жорсткості,

$b$  – узагальнений коефіцієнт опору вузла верстата.

Для складання диференціального рівняння руху динамічної моделі фрагменту верстата скористаємось рівнянням Лагранжа II роду, у якому, крім сил потенціальних, сил лінійного опору та сили тертя  $Q_x^{(тер)}$ , будуть сили різання, що відповідають координаті  $x$ .

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{\partial \Pi}{\partial x} - \frac{\partial \Phi}{\partial x} + Q_x^{(тер)} + Q_x^{(різ)} \quad (4.39)$$

Тому необхідно визначити узагальнену силу тертя  $Q_x^{(тер)}$  й узагальнену силу різання  $Q_x^{(різ)}$ .

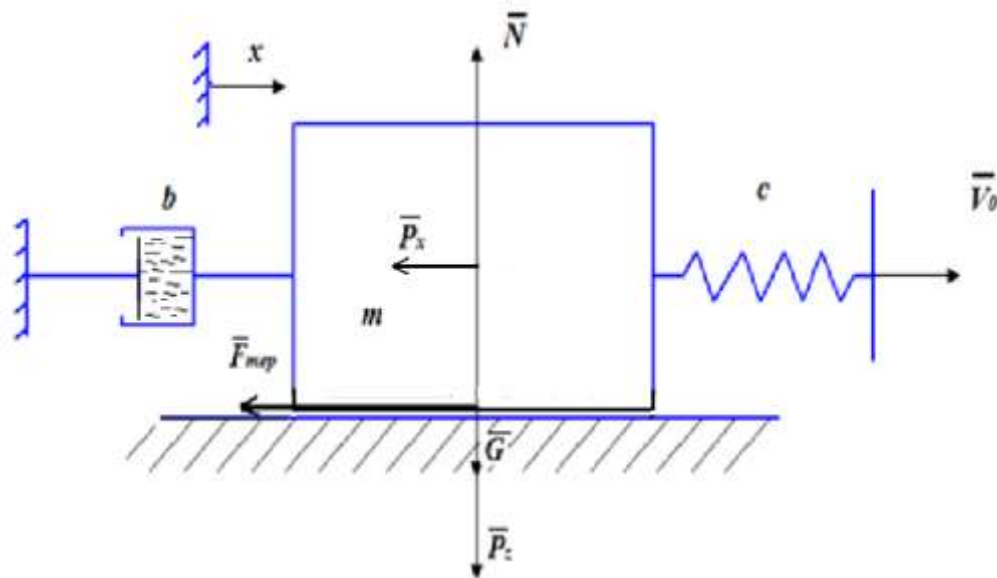


Рисунок 4.7 - Розрахункова система динамічної моделі супортної групи верстата з урахуванням сили різання

Для визначення узагальненої сили тертя задаємо можливе переміщення  $\delta x > 0$  з розглянутого поточного положення об'єкта. За початок відліку координати  $x$  приймаємо момент зриву супорта з місця. Якщо величина швидкості подачі  $u_0$  досить мала, то сили тертя  $F_{\text{тертя спокою}}$  достатньо для того, щоб маса  $m$  залишилась у спокої. Але ланка-привод продовжує рух доти, доки сила пружної в'язі не зрівняється з силою тертя спокою. Через те, що сила тертя руху буде меншою ніж сила тертя спокою, відбудеться «зрив» супорта з місця. При цьому сила тертя миттєво зменшилася до значення  $F_{\text{тертя руху}}$ , тоді як пружна сила стискання в'язі миттєво змінитися не може (вона дорівнює  $F_{\text{пружності}} = F_{\text{тертя спокою}}$ ). Тому на масу  $m$  у першу мить діє сила, що дорівнює

$$\Delta F = F_{\text{тертя спокою}} - F_{\text{тертя руху}} = \Delta f \cdot N, \quad (4.40)$$

де:  $\Delta f = f_{\text{сп}} - f_{\text{р}}$  – різниця коефіцієнтів тертя спокою і руху.

Визначаємо можливу роботу сил тертя на заданому можливому переміщенні  $\delta x$

$$\delta A(\overline{F_{\text{тер}}}) = \Delta f \cdot N \cdot \delta x, \quad (4.41)$$

$N$  - нормальна реакція, яка дорівнює сумі проєкцій на вертикаль діючих на об'єкт сил: ваги супорта  $\vec{G}$  і сили різання  $\vec{P}$ .

$$N = G + P_z, \quad (4.42)$$

Тому узагальнена сила тертя дорівнює

$$Q_x^{(\text{тер})} = \Delta f \cdot (G + P_z). \quad (4.43)$$

Для визначення узагальненої сили різання задаємо можливе переміщення  $\delta x > 0$  й обчислюємо можливу роботу сили різання на цьому переміщенні

$$\delta A(\overline{P}) = -P_x \cdot \delta x. \quad (4.44)$$

Тому узагальнена сила різання дорівнює

$$Q_x^{(\text{різ})} = -P_x. \quad (4.45)$$

Припускаємо, що складові сили різання  $P_x$  та  $P_z$  відомі для конкретного режиму металообробки. Їх величини, найчастіше, [8] визначаються степеневими

залежностями від подачі, від глибини і швидкості різання. При чисельному аналізі поставленого завдання рекомендується брати їх максимальні значення.

Підставивши відомі значення функцій  $T$ ,  $\Pi$ ,  $\Phi$  і узагальнених сил тертя та різання, у формулу (4.41) можна отримати математичну модель для дослідження руху динамічної моделі вузла реального верстата, тобто диференціальне рівняння руху. Замість рівняння відносного руху супорта (4.22) маємо наступне рівняння:

$$\ddot{x}_\Delta + 2n\dot{x}_\Delta + k^2 x_\Delta = \left(\frac{\Delta F + Px}{m} - 2nv_0\right) + v_0 \left(\frac{c_{кр} \cdot \delta^2}{m} - k^2\right) t, \quad (4.46)$$

де  $\Delta F = \Delta f(m_c g + P_z)$

Використавши методику розв'язання рівняння (4.22), отримаємо закон відносного руху маси  $m$  з урахування сили різання

$$x_\Delta = A - v_0(\bar{c} - 1) \cdot t - e^{-nt} \left[ A \cos k_1 t + \left(\frac{An}{k_1} + \bar{c} \frac{v_0}{k_1}\right) \sin k_1 t \right], \quad (4.47)$$

де  $A = \frac{\Delta F + Px}{c} - \frac{2n}{k^2} \bar{c} v_0$

Критичну швидкість  $V_{крі}$  перший момент зупинки  $t_1$  отримаємо, розв'язавши систему рівнянь (з прийнятими раніше позначеннями)

$$\begin{cases} \frac{\Delta F + Px}{m} \cos k_1 t_1 - \left(\frac{\Delta F + Px}{m} \cdot \frac{n}{k_1} - \frac{k^2}{k_1} v_{кр} \bar{c}\right) \sin k_1 t_1 = 0 \\ v_{кр} \left[(\bar{c} - 1)e^{nt_1} - \bar{c} \cos k_1 t_1 - \frac{n\bar{c}}{k_1} \sin k_1 t_1\right] + \frac{\Delta F + Px}{mk_1} \sin k_1 t_1 = 0. \end{cases} \quad (4.48)$$

Нижче наведено приклад використання розробленої моделі для розрахунку межі критичної швидкості токарно-гвинторізного верстату 16К20 з наступними вихідними даними:

маса супорта  $m_c=80$  кг, маса ходового гвинта  $m_{гв}=16,7$  кг, діаметри гвинта  $D_{гв}=4,4 \cdot 10^{-2}$  м,  $d_{гв}=3 \cdot 10^{-2}$  м, крок гвинта  $h=0,012$  м, модулі пружності  $E = 2,1 \cdot 10^{11} \frac{H}{м^2}$ ,  $G = 8 \cdot 10^{10} \frac{H}{м^2}$ , довжина гвинта  $l = 1,7$  м, фланцева муфта

$$I_M = 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Коефіцієнт розсіювання  $\psi = 0,5$ , . Різниця коефіцієнтів тертя змінюється в інтервалі  $\Delta f = 0,05 \div 0,08$ .

Складові сили різання дорівнюють  $P_x=50\text{Н}$ ,  $P_z=143\text{ Н}$ .

Далі діємо за алгоритмом (рис. 4.4).

1) Визначення зведеної маси. Застосовуємо формулу (4.6), в якій моменти інерції гвинта дорівнюють

$$I_z = \frac{m_{z\theta}}{2} \left( \frac{D_{z\theta}^2}{4} + \frac{d_{z\theta}^2}{4} \right), I = 59,2 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

З врахуванням (4.6), зведена маса дорівнює  $m=1853,2\text{ кг}$ .

2) Визначення коефіцієнту жорсткості. Лінійний коефіцієнт жорсткості гвинта дорівнює  $c_{л} = \frac{E\pi(D_{гв}^2 - d_{гв}^2)}{4l} = 10,046 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ . Коефіцієнт крутильної

жорсткості фланцевої муфти дорівнює  $c_{кр} = \frac{G\pi D_2^4}{32} \cdot 0,5\pi \frac{d_6^2}{D_2^2} = 94,985 \cdot 10^2 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$ . З

врахуванням коефіцієнта  $\delta$ , отримаємо зведений коефіцієнт жорсткості:

$$c = \frac{c_{л} \cdot c_{кр} \cdot \delta^2}{c_{л} + c_{кр} \cdot \delta^2} = 9,672 \cdot 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

3) Визначивши параметри рівнянь (4.48), скориставшись математичним редактором MathCad, отримаємо значення  $t_1$  та  $v_{кр}$ , які дуже малі та знаходяться в діапазоні від  $0,067\text{мм/хв}$  до  $0,086\text{мм/хв}$  в залежності від різниці коефіцієнтів тертя. Отримані результати величин критичної швидкості, при якій починається стрибкоподібний рух суппорта токарно-гвинорізного верстата, свідчать про те, що застосування полімерного матеріалу дозволяє для цього типу верстата фактично виключити явище «стик - зліп» та прогнозувати зниження цієї межі і для інших типів верстатів, перш за все, важконавантажених.

Таким чином, розроблена математична модель адекватно відображає процеси тертя, які мають місце у верстаті с парою тертя полімер-чавун оскільки процент відхилення експериментальних результатів від розрахункових не перевищує 20% і тому цю математичну модель з достатнім рівнем точності, можливо використовувати для попередньої оцінки умов можливої появи стрибкоподібного руху суппорту верстатів різного призначення, які працюють з



використанням полімерного матеріалу «моглайс» або іншого в якості покриття напрямних супорту, або станини верстату у парі з чавуном, або зі сталлю.

## Висновки

1. Вперше розроблено методику визначення межі критичної швидкості, яка розділяє плавний і стрибкоподібний рух, для каретки, що переміщується по полімерних напрямних за допомогою математичного моделювання процесу руху по напрямним. Ця методика дозволяє спрогнозувати цю межу для інших типів верстатів ( токарно-гвинторізних, розточувальних).

2. Для побудування в'язко-пружної динамічної моделі системи «супорт - привод» металорізального верстата, напрямні якого мають полімерне покриття, складено і розв'язано диференціальне рівняння руху не вводячи ніяких обмежень стосовно функцій розсіювання енергії. Отримана система двох трансцендентних рівнянь, за якою можуть визначатися:

- момент першої зупинки супорта;
- «критична» швидкість руху супорта, менше якої мають місце фрикційні автоколювання.

3. Встановлено адекватність розроблених динамічної та математичної моделей реальним процесам тертя в умовах роботи напрямних, виконаних з полімерного матеріалу «моглайс», тому що відхилення розрахункових результатів відносно експериментальних не перевищує 20%. Це дозволяє рекомендувати її використання для розрахунків «критичної» швидкості руху металорізальних верстатів у разі виконання однієї поверхні тертя з полімерного матеріалу.

## РОЗДІЛ 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ Й РОЗРОБКА СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ТА ПРОМИСЛОВЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РОЗРОБЛЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

#### 5.1 Вивчення та розробка способів нанесення матеріалу, які підвищують якість поверхні

Нааявні полімерні матеріали передбачають два основні способи нанесення матеріалу залежно від їх консистенції. Для матеріалу з пастоподібною текстурою вважається за доцільне наносити матеріал шпателем. Другий спосіб передбачає нанесення матеріалу нагнітанням. І в першому, і в другому випадку є вірогідність появи бульбашок на виготовленій поверхні, що є категорично не допустимим для напрямних ковзання. Поява бульбашок пов'язана з потраплянням повітря в суміш під час перемішування та природного подальшого їх виходу на поверхню.

Окрім різних методів нанесення матеріалу, існує два способи розмішування матеріалу – ручний та механічний. Від обраного способу залежить кількість бульбашок: при ручному перемішуванні вірогідність отримати бульбашок менша, ніж при механічному. Водночас перемішати велику кількість матеріалу вручну дуже складно.

У зв'язку з цим можна запропонувати два способи уникнути цих складнощів. Перший спосіб – це переливання матеріалу тонким струменем, другий – розтирання матеріалу по поверхні тонким шаром.

Для виявлення найкращого способу проведено експеримент з використанням різноманітних прийомів зниження вірогідності появи бульбашок.

Зважування компонентів для виготовлення експериментальних зразків проводилося на високоточних електронних вагах ТВЕ - 0,5-0,01.

Технічні дані:

1. Ваги відповідають вимогам ДСТУ EN 45501: 2007 «Прилади неавтоматичні, які використовуються для зважування. Загальні технічні вимоги та методи випробування» та технічної документації ТзОВ НВП «Техноваги».

2. Живлення ваг здійснюється від мережі змінного струму, напругою від 187 В до 242 В, частотою  $(50 \pm 1)$  Гц через виносний нестабілізований блок живлення з вихідною напругою від 9 В до 24 В або від акумуляторів з номінальною напругою 6 В.

3. Використовувана потужність - не більше  $10 \text{ В} \cdot \text{А}$ .

4. Габаритні розміри ваг, мм не більше  $410 \times 580$ .

5. Робочий діапазон температур  $10 - 35^\circ\text{C}$ .

6. Відносна вологість навколишнього повітря - не більше 80% при температурі  $25^\circ\text{C}$ .

7. Середнє значення напрацювання на відмову - не менше 25000 годин.

Таблиця 5.1 – Метрологічні характеристики ваг ТВЕ - 0,5-0,01

Межі зважування	Min, г	0,5
	Max, кг	0,5
Дискретність відліку d, г		0,01
Ціна повірочної поділки, г		0,1
Кількість повірочних поділок, n		5000
Клас точності за ДСТУ EN 45501		II
Межі допустимої похибки під час первинної перевірки (в експлуатації), г	Інтервал 1	$\pm 0,05(\pm 0,1)$
	Інтервал 2	-
	Інтервал 3	-

Для отримання необхідних зразків використовувався промисловий фен потужністю 2 кВт та створюваною температурою 350-550°C, залежно від встановленого режиму.

Для перевірки температури в експериментах також застосовувалася цифрова портативна установка - термометр PU525 (табл. 5.2)

Таблиця 5.2 - Технічна характеристика термометра цифрового PU525

Найменування	Значення характеристик
Діапазон вимірювань	від -50°C до +150°C
Основна абсолютна похибка	$\pm 1^\circ\text{C}$
Температурний коефіцієнт у діапазоні робочих температур	максимально 0.1°C/K або максимально 0.1 mV/K
Живлення	батарея 9V типу "Крона"
Споживчий струм	максимально 6mA (аналоговий вихід без навантаження)
Додаткова похибка при заміні датчика	$\pm 1.5^\circ\text{C}$
Аналоговий вихід	10 mV/°C, при цьому 0°C відповідає 0mV, максимальний вихідний струм 2mA, тривалість закорочення аналогового виходу - необмежена (до розряду батареї)
Тривалість безперервної роботи, не менше	40 год. при ненавантаженому аналоговим виході; 30 год. при струмі аналогового виходу 2mA
Маса	300 г



Рисунок 5.1 - Термометр цифровий портативний PU525

Експеримент проводився для визначення кращого способу запобігання появи раковин на виготовленій поверхні; способу, що поєднує різні методи як переміщення матеріалу, так і його нанесення. В експерименті були застосовані два види матеріалу moglice - FL/P – рідкоплинний та Hart – пастоподібний.

Експеримент проводився дев'ятьма різними способами:

1. Переміщення складових матеріалу moglice FL/P вручну.
2. Переміщення складових матеріалу moglice FL/P вручну та переливання матеріалу тонким струменем.
3. Переміщення складових матеріалу moglice FL/P вручну і нагрівання зразка феном для прискорення часу застигання матеріалу.
4. Переміщення складових матеріалу moglice FL/P механічним способом.
5. Переміщення складових матеріалу moglice FL/P механічним способом і переливання його тонким струменем.

6. Перемішування складових матеріалу moglice FL/P механічним способом і нагрівання зразка феном для прискорення часу застигання матеріалу та виходу на поверхню бульбашок.

7. Перемішування складових матеріалу moglice Hart вручну.

8. Перемішування складових матеріалу moglice Hart та розтягування матеріалу вздовж металевої пластини.

9. Перемішування складових матеріалу moglice Hart вручну та нагрівання зразка феном для прискорення часу застигання матеріалу та виходу на поверхню бульбашок.



Рисунок 5.2 - Заповнення першого зразка матеріалом методом ручного перемішування двох компонентів матеріалу moglice FL/P



Рисунок 5.3 - Заповнення другого зразка матеріалом шляхом змішування його компонентів вручну і переливання матеріалу тонким струменем



Рисунок 5.4 - Нагрівання третього зразка феном

Згідно з наведеним вище переліком способів виконано змішування і нанесення матеріалу у формувальні ємності діаметром 40 мм і товщиною 4 мм, по три зразки для кожного випадку. Після полімеризації полімеру розроблено порівняльний аналіз способів нанесення даного матеріалу через порівняння раковин на зразках після зняття з них шліфуванням 0,5 мм їх товщини.



Рисунок 5.5 - Механічне перемішування матеріалу

У результаті аналізу встановлено, що ручне перемішування, як і механічне, рідких матеріалів призводить до появи мікробульбашок на шліфованій поверхні деталі. При цьому на сформованій поверхні під шаблон вони можуть бути не помітні, а при знятті невеликого шару матеріалу в результаті експлуатації вони проявляються, як показано на рис.5.6 а, б.



а

б

Рисунок 5.6 - Зразки, отримані в результаті ручного (а) і механічного (б) перемішування.

Спроба усунути ці бульбашки повітря переливанням тонким струменем не дала істотних змін, як це видно з рис. 5.7 а, б.





а

б

Рисунок 5.7 - Зразки, отримані в результаті ручного (а) і механічного (б) перемішування матеріалу при переливанні тонким струменем.

Застосування поверхневого підігріву матеріалу призводить до зменшення бульбашок повітря через більш інтенсивний вихід їх на поверхню, як це ми бачимо на рис. 5.8. Водночас, механічне перемішування (рис. 5.8 б) призводить до більш активного насичення матеріалу бульбашками повітря і неможливості їх повного усунення в результаті нагрівання. Ручне перемішування в поєднанні з нагріванням дає кращий результат і дозволяє фактично ліквідувати наявність мікрораковин на поверхні, як видно з рис. 5.8 а.



а

б

Рисунок 5.8 – Зразки, отримані в результаті ручного (а) і механічного (б) перемішування матеріалу при нагріванні феном.

При застосуванні пастоподібного матеріалу для усунення бульбашок матеріал розтирали шпателем тонким шаром по рівній пластині. Результати експерименту зі змішування, розтирання і підігріву поверхні показали, що в разі пастоподібного матеріалу раковин на поверхні в усіх випадках менше, ніж у разі застосування рідких матеріалів. Однак розмір цих раковин набагато більший (у 4-5 разів). При цьому розтирання тонким шаром дає певний ефект щодо усунення раковин, як це можна побачити на рисунку 5.9 (а, б, в). Застосування підігріву (рис. 5.9 в) у разі пастоподібного матеріалу не дає істотного ефекту щодо усунення раковин внаслідок більшої тиксотропності цього матеріалу, що ускладнює процес виходу бульбашок на поверхню при нагріванні поверхневого шару зразка.



Рисунок 5.9 – Зразки, отримані в результаті ручного змішування пастоподібного матеріалу (а), розтирання матеріалу по пластині (б), нагрівання зразка феном (в).

Для усунення раковин на поверхні ковзання в рамках нашої роботи запропоновано усунути це явище за допомогою способу виготовлення напрямних полімерним матеріалом, який описано у способі на корисну модель [106]. Цей спосіб (рис. 5.10) включає: зачистку поверхні під нанесення полімеру, її знежирення, установку лінійки-шаблону, який відрізняється тим, що на напрямні наклеюють шайби з полімерного матеріалу однакової товщини, більшу кількість композитного матеріалу наносять на відновлювану поверхню, а залишок – на лінійку-шаблон.

На поверхні, виготовленій із полімерного матеріалу за цим способом, раковини будуть відсутні внаслідок ретельного нанесення адгезійного шару матеріалу за допомогою шпателя.

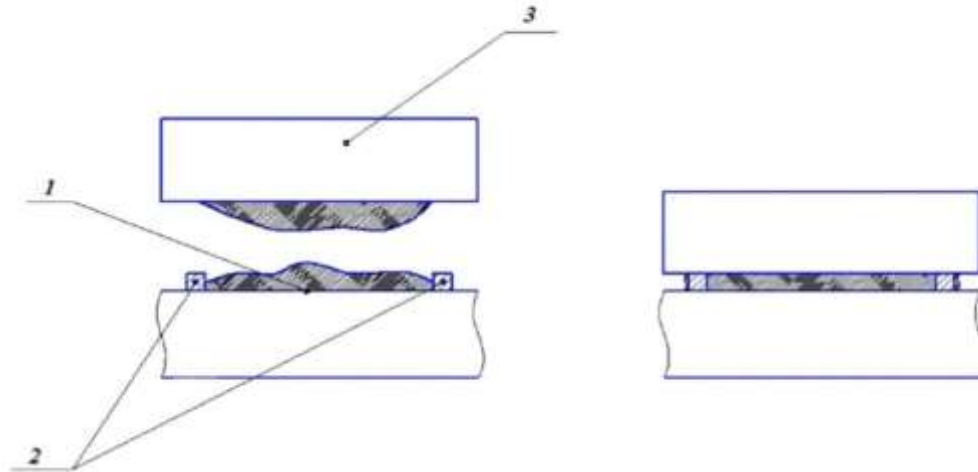


Рисунок 5.10 – Спосіб виготовлення напрямних з полімерного матеріалу пастоподібної консистенції: 1 – напрямна ковзання, 2 – шайби однакової товщини з полімерного матеріалу, 3 – напрямні на рухомій частині.

Отже, для застосування пастоподібного матеріалу проблема може бути вирішена використанням заявленого вище способу, а для використання рідких матеріалів і необхідності усунення бульбашок повітря шляхом підігріву можна скористатися запропонованим в рамках нашої роботи порційним нагнітанням рідкоплинного матеріалу, який попередньо підігрівали. Як це описано в патенті на корисну модель [107]. Спосіб відновлення поверхонь напрямних ковзання полімерним матеріалом здійснюється у такій послідовності. Напрямна 1 (рис.5.11), на якій є дефектна зона піддається фрезеруванню з метою виконати на дефектній зоні П-подібний паз, 2. Паз знежирюють. На підготовлену шліфовану поверхню шаблону 3 з отворами 4 наноситься роздільна рідина. Шаблон встановлюється на базову поверхню та притискається до неї. Полімерний матеріал за допомогою ін'єктора 5 подається поступово в отвори, починаючи з першого. Після заповнення першого отвору на нього встановлюється заглушка 6.

Процес відбувається від отвору до отвору, поки увесь паз не заповниться полімерним матеріалом.

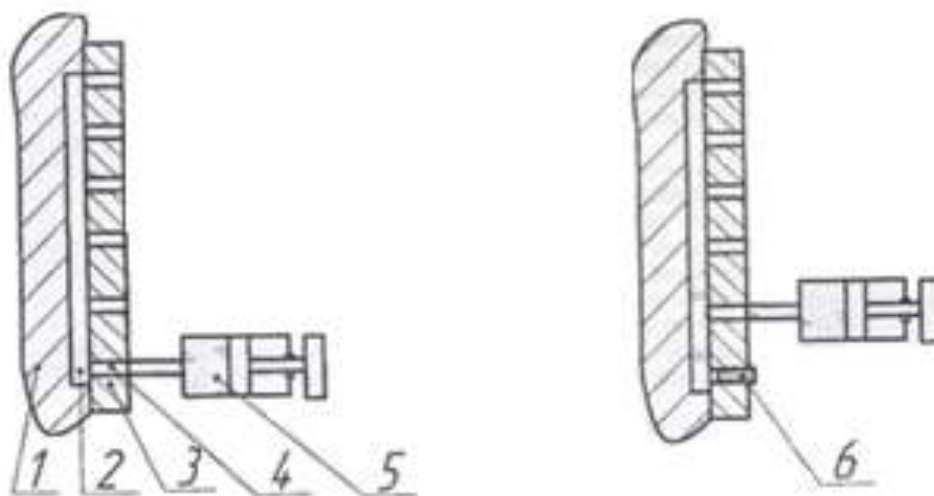


Рисунок 5.11 – Спосіб відновлення поверхонь напрямних ковзання рідкоплинним полімерним матеріалом: 1– напрямні ковзання, 2 – паз, 3 – шаблон з отворами, 4,5 – ін’єктор, 6 – заглушка.

Крім того, удосконалено технологію виготовлення напрямних на супорті токарних верстатів [108] з урахуванням розроблених способів, описаних вище.

## **5.2. Рекомендації по практичному застосуванню технології виготовлення напрямних полімерним матеріалом.**

### **5.2.1. Загальні рекомендації щодо підготовки поверхні та нанесення полімерного матеріалу.**

Правильне виконання операції підготовки поверхні є запорукою успішного виготовлення напрямних.

Обробка поверхні здійснюється вручну - абразивною шкіркою, напилком чи механізованими інструментами із застосуванням дротяних щіток, шліфувальних кругів та борфрез. Іржу з поверхні необхідно видалити за допомогою

перетворювача іржі. Шорсткість підготовленої поверхні повинна бути в межах  $Rz > 160$  мкм.

Міцність зчеплення між полімером і металом значною мірою залежить від якості знежирення. Найкращий результат досягається при використанні знежирювача. За його відсутності можна використовувати трихлоретилен, вайт-спірит або технічний ацетон. Знежирення здійснюється витиранням поверхні ганчіркою, змоченою в знежирювачі. Після механічної обробки металеву поверхню в будь-якому випадку необхідно знежирювати. Після піскоструминної обробки знежирення обов'язкове, оскільки стиснене повітря може містити крапельки мастила. Поверхні із сірого чавуну, які протягом тривалого часу перебували в маслі, після першого знежирення необхідно висушити на повітрі протягом кількох годин для видалення з поверхневого шару залишків мастила, а потім їх потрібно повторно знежирити. За необхідності цю операцію слід повторити кілька разів. Проміжок часу між знежиренням і нанесенням композиту повинен бути не менше  $15 \div 20$  хвилин для забезпечення повного випаровування знежирювача з поверхні. Для видалення залишків ацетону місце ремонту нагрівається до  $+100 \div 120$  °C протягом  $2 \div 3$  годин.

Полімер готують шляхом змішування компонентів в заданих пропорціях, у кількості, яка за час його життєздатності може бути використана. Загалом підготовка складається з таких операцій:

- визначення маси композиту і його компонентів окремо;
- перемішування компонентів окремо у своїх тарах;
- зважування компонентів;
- змішування компонентів між собою до отримання однорідної суміші;
- видалення повітряних включень (бульбашок) з суміші.

Маса композиту визначається за обсягом матеріалу, необхідного для ремонту, за результатами вимірювання товщини шару полімеру, що наноситься з урахуванням питомої ваги полімеру, наприклад у «моглайс»  $1,6-1,7$  г/см<sup>3</sup>.

Компоненти полімеру перед застосуванням, повинні бути перемішані в своїй тарі для рівномірного розподілу в їх об'ємі легких і важких фракцій. Вони

виймаються з тари чистими шпателями і зважуються на технічних вагах, похибка вимірювання яких не повинна перевищувати 5% від загальної маси використовуваного композиту.

Компоненти між собою змішуються до отримання однорідної суміші безпосередньо перед нанесенням на поверхню: полімер пастоподібний - на чистій гладкій поверхні за допомогою шпателя, рідкоплинний - у змішувальному посуді за допомогою шпателя або механічної мішалки. Вміст упаковок «моглайса» бажано використовувати повністю за один раз. Цим забезпечуються їх точні пропорції без зважування. Перемішувати компоненти необхідно у великому посуді.

Час затвердіння залежить від температури навколишнього середовища: з підвищенням температури він зменшується, а зі зниженням - збільшується. Час затвердіння можна зменшити нагріванням місця, що ремонтується до температури  $+40 \dots +60^{\circ}\text{C}$ , що одночасно сприяє і збільшенню міцності ремонтного шару.

Якщо ремонт проводиться за низької температури ( $+10^{\circ}\text{C}$  і нижче), при якій компоненти помітно згущуються, суміш слід готувати в теплому приміщенні. Після змішування компонентів із суміші видаляються повітряні включення (бульбашки) вакуумуванням, відповідно до результатів досліджень, отриманих в розділі 5.1. При пастоподібній суміші - розтиранням суміші перехресними рухами на великій площі широким шпателем без відриву кромки від поверхні; при рідкій суміші - переливанням суміші з одного посуду в іншій 3-4 рази тонким нерозривним струменем, довжиною до одного метра. При цьому інтенсифікувати процес можна подаючи тепле повітря на поверхню або на струмінь «моглайса».

Полімер у вигляді суміші компонентів наноситься на металеву поверхню в часових межах його життєздатності. Необхідно враховувати, що табличні значення життєздатності дійсні при температурі 22-25 градусів Цельсія і що при низькій температурі життєздатність збільшується, а при високій - зменшується. Нормальними умовами роботи з композитами є температура  $+15 \div +25^{\circ}\text{C}$ , відносна вологість не вище 75%. Проте полімер можна використовувати і при температурах нижче  $+5^{\circ}\text{C}$  і вище  $+30^{\circ}\text{C}$ , за умови дотримання певних

технологічних прийомів, що дозволяють створити локальну зону підігріву місця виконання робіт при знижених температурах навколишнього середовища і спеціального охолодження полімеру в холодильнику перед змішуванням і нанесенням при підвищених температурах навколишнього повітря.

Пастоподібний полімер наноситься на поверхню шпателем, рідкоплинний - пензлем, заливанням або нагнітанням (ін'єктуванням). Приготовану суміш рекомендується наносити негайно після змішування компонентів. Для забезпечення міцного зчеплення композиту з поверхнею спочатку суміш тонким шаром втирається в поверхню, створюючи таким чином ґрунтовку. Потім на неї наноситься інша маса композиту необхідної товщини. Як ґрунтовку можна застосовувати рідкоплинний полімер. Мінімальна товщина шару рідкоплинного моглайсу повинна бути не менше 0,5 мм, а пастоподібного - не менше 1 мм. Максимальна товщина не обмежена.

Поверхня під нанесення полімеру формується різними способами. Для отримання шліфованої поверхні необхідно прикласти до нього шліфовану пластину або шаблон, заздалегідь оброблені антиадгезивним розчином - відділювачем. Таким матеріалом може бути рідина або пастоподібні суміші на основі тефлону. Наприклад, фірма "Diamant metallplastic GmbH" рекомендує застосовувати відділювач: "Trennmitell" - рідкий, "Trennmitell" - аерозоль і "Trennmitell" - пастоподібний. Поверхня шаблону знежирюється, просушується і лише потім відділювач наноситься одним або двома шарами.

### **5.2.2. Технологія виготовлення напрямних**

#### **Установка каретки в проектне положення**

Дана технологія призначена для відновлення напрямних на каретці верстата із застосуванням металополімерних матеріалів.

- 1) Перед установкою каретки в проектне положення необхідно:
  - а) заґрубити поверхню, призначену для нанесення металополімерних матеріалів струганням або фрезою, як показано на рисунку;

- b) закріпити в торцях каретки бобишки з регулювальними гвинтами.
- 2) виставити каретку в проектне положення за допомогою регулювальних болтів і рівня;
- 3) забезпечити оптимальний зазор між напрямними після установки в проектне положення – 1,5-2,5 мм.

#### Знежирення поверхні

Після встановлення каретки верстата в проектне положення необхідно обробити напрямні на верстаті і на каретці спеціальним розчином «Reigner» або ацетоном. Знежирення поверхні за допомогою фірмового розчину або ацетону здійснювати чистою ганчіркою, рясно змоченою в рідині. Промивання повторити кілька разів. Чистоту промитої поверхні контролювати чистою білою ганчіркою. На білій тканині не повинні залишатися сліди. Слід також уникати появи на поверхні напрямних після обробки залишків тканини у вигляді окремих нитяних смужок. Якщо немає названих вище розчинів, використовують або розчинник 646, або спиртові розчини. Однак при їх використанні, на відміну від рекомендованих очисників, потрібно ввести додаткову операцію – висушування поверхні напрямних за допомогою теплого повітря або фену.

#### Обробка напрямних верстата відділювачем

Після висихання знежирювача на поверхні напрямних верстата на останні наноситься фірмовий відділювач «Trennmittel» за допомогою пензлика або аерозольного балончика. Після висихання відділювача (20-30 хв.), поверхню напрямних верстата можна відполірувати м'якою тканиною. Також можливе використання цього відділювачу у вигляді мазі, яку потрібно ретельно розполірувати при нанесенні. Якщо розчин наноситься пензликом та після висихання не буде виконуватись операція полірування, необхідно виконати операцію нанесення відділювачу повторно таким чином, щоб напрямок руху пензлика був змінений від попереднього на 90°.

#### Нанесення полімерного матеріалу



Після висихання знежирювача на поверхні напрямних каретки шпателем наноситься шар пастоподібного полімеру, що попередньо пройшов операцію перемішування двох компонентів, з яких він складається.

Перший шар ретельно втирається шпателем в металеву поверхню. Наступний шар наноситься товщиною на 1-1,5 мм більше, ніж зазор між напрямними, отриманий в результаті попередньої операції.

Переміщування компонентів потрібно виконувати окремими порціями для кожної напрямної, щоб уникнути нерівномірного розподілу полімеру між ними. Для рівномірного розподілу по довжині напрямних необхідно використовувати спеціальний шаблон-пластину, яка буде спиратися на необроблені поверхні та формувати шар полімеру потрібний по висоті. Час на виконання цих операцій не повинен перевищувати 20-30 хвилин. Якщо цей час перевищено та матеріал почав полімеризуватися, можна на кілька хвилин повернути йому пластичність шляхом підігріву промисловим феном. Для підвищення якості виготовлених напрямних доцільно частину полімеру нанести на поверхню на станині, а частину – на напрямні на каретці відповідно до запропонованої корисної моделі (патент України № 98887).

#### Формування відновлюваної поверхні на напрямних каретки

Після нанесення необхідного шару пастоподібного полімеру каретка перевертається на 180° і встановлюється на регулювальні болти.

Опускання каретки перед моментом зіткнення болтів з напрямними має здійснюватися плавно без поштовхів і ударів. Якщо неможливо уникнути поштовхів, необхідно зробити отвори для монтажних гвинтів поряд з регулювальними болтами. Ці гвинти встановлюються з перекриттям потрібного зазору та приймають на себе поштовхи під час монтажу каретки. Після встановлення каретки монтажні гвинти вигвинчують та повільно опускають каретку на регулювальні болти.

Для виключення стікання матеріалу в площині, перпендикулярній напрямним, між кареткою і верстатом встановлюються поролонові (або з іншого

матеріалу) м'які прокладки 1 за всією довжиною напрямних каретки. Це дозволяє плавно розподілити полімер по довжині напрямних.

Зайвий матеріал після встановлення на болти видавлюється уздовж напрямних по обидва боки каретки. Час застигання матеріалу 24 години. Через зазначений час зрушити каретку в напрямку її переміщення по напрямних легким ударом або за допомогою ручної лебідки.

#### Видалення надлишків видавленого і застиглого матеріалу

Після застигання полімеру і зрушення каретки вона перевертається на 180° і відбувається видалення надлишків видавленого на неробочі поверхні каретки пастоподібного полімеру.

Після видалення надлишків полімерного матеріалу, зняття бобишок і очищення каретки, остання встановлюється на напрямні верстата.

Операція відновлення напрямних завершена.

#### Техніка безпеки при виконанні робіт

При довгостроковій роботі з полімерним матеріалом необхідно робити місцеву вентиляцію, використовувати індивідуальні засоби захисту – окуляри, рукавички.

При потраплянні полімеру на шкіру потрібно зняти його ватним тампоном, а потім змити теплою водою з милом. У разі потрапляння на слизову очей потрібно негайно промити їх водою та звернутися до лікаря.

Коли полімерний матеріал застигає, він стає безпечним для здоров'я людини. Водночас поява дрібнодисперсного пилу, який може з'являтися при механічній обробці полімеру, вимагає використання захисної маски.

### **5.2.3. Види дефектів, що можуть виникати під час виготовлення напрямних**

Зроблена спроба класифікації можливих дефектів, що можуть з'являтися при використанні композитного матеріалу :

1. На виготовленій ковзаючій поверхні можуть з'явитися помітні пори та раковини. Причина цього може полягати в поганому пристрої для перемішування або у великій швидкості перемішування, або у невідповідній ємності для розмішування, або в тому, що композиція не була розтягнута шпателем на площині перед нанесенням.

Усунути цей недолік можна шляхом змішування складових композита тільки в фірмових упаковках, спочатку шпателем, а далі механічно від 3 до 5 хв, або шляхом розтягування пастоподібного полімеру шпателем на чистій поверхні, щоб видалити бульбашки повітря, або шляхом переливання рідкоплинного «моглайса» тонким струменем з однієї ємності в іншу.

2. Поява на поверхні м'яких місць після затвердіння полімеру може бути зумовлена поганим змішуванням складових композита, або неправильно підібраним співвідношенням обох складових (у разі використання частини упаковки).

Усунути цей недолік можна шляхом використання всього об'єму компонентів, що знаходяться у фірмових упаковках виробника. Також потрібно стежити, щоб матеріал не залишався на стінках упаковки.

3. Неякісний відбиток, що формує поверхню, може з'явитися внаслідок неправильно використаного відділювача, або неточної установки супорта на станині верстата, або через погане ущільнення (у разі використання методу нагнітання).

Щоб уникнути такого недоліку потрібно копіювальну поверхню покрити 2- або 3-и кратно відділювачем з проміжком 3 хв. і кожного разу злегка відполірувати м'якою тканиною. Або при недостатній вазі копіюваного елемента довантажити його, або використовувати ущільнення, що відповідають тиску, створюваному при нагнітанні.

4. Інколи на відновленій поверхні з'являються відколи нанесеного шару полімеру.

Причинами такого явища можуть бути погано очищена поверхня металу під нанесення полімеру або недостатня шорсткість поверхні перед нанесенням полімерного матеріалу.

Уникнути такого явища можна, якщо жирні, покриті застарілим мастилом місця кілька разів помити знежирювачем або зробити потрібну зачистку поверхні, довести її до металево чистої.

5. Передчасне затвердіння полімеру можливе, якщо температура навколишнього повітря або поверхні, на яку наноситься полімерний матеріал, набагато вища за 20 °С.

Щоб не допустити передчасного твердіння, необхідно виконувати роботи при ідеальній температурі +15...+20 °С, або, у разі необхідності, перед розмішуванням охолодити обидві складові композиції.

6. Матеріал неможливо застосувати, бо він вже застиг, або після змішування не твердіє.

Причина може бути в погано закритій упаковці, або якщо полімеризація почалася перед закінченням нанесення матеріалу, або тому, що матеріал старий.

Щоб усунути можливість появи такого явища не треба використовувати матеріали, вичерпаним терміном (максимально рекомендований час зберігання 18 місяців), а також спланувати роботу так, щоб всі операції, пов'язані з нанесенням і монтажем, виконати протягом 50 хвилин.

### **5.3. Промислове впровадження розроблених технологій**

За допомогою розроблених способів виготовлено кілька промислових об'єктів, зокрема робоча поверхня гідроциліндрів [109] та напрямних верстатів [108, 110-113].

Нижче наведено приклад виготовлення напрямних на розточувальній бабці великого розточувального верстата "Skoda" W200HA [108], який через тривалий простій, зберігання в поганих умовах і пошкодження поверхні ковзання потребував відновлення напрямних для поновлення його працездатності верстата.

Ускладнилися ці роботи насамперед габаритами розточувальної бабки: довжина напрямних - 2000 мм, кількість - 3, вага розточувальної бабки - 24 т. Тому для виконання такої роботи потрібно було розробити спеціальне оснащення для нагнітання матеріалу полімерного матеріалу «моглайс FL/P».

Для виготовлення напрямних бабку зняли за допомогою крана і встановили на фундаментну плиту. Потім поверхні трьох напрямних розточувальної бабки обробили шліфмашинами для надання необхідної шорсткості поверхні, що забезпечує кращу схоплюваність матеріалу з поверхнею. Потім прорізували пази на поверхні, що покривається, і розсвердлили отвори  $\varnothing 12\text{мм}$  для посилення з'єднання полімеру з бабкою. Уздовж напрямних закріпили обмежувачі товщини шару матеріалу, виготовлені з тефлону товщиною 2 мм, і за допомогою гвинтів з потайними головками притягли до металевої поверхні по обидва боки від відновлюваних напрямних (рис. 5.12).



Рисунок 5.12 – Три зачищені напрямні на бабці, по краях яких закріплені обмежувачі товщини шару матеріалу (тефлонові смуги товщиною 2 мм).

Після виконання цих операцій частина композитного матеріалу була підготовлена шляхом змішування двох компонентів і нанесена на металеву поверхню за допомогою металевого шпателя. Таким чином був створений перший адгезійний шар композиту на поверхні напрямних (рис. 5.13).



Рисунок 5.13 - Процес втирання першого адгезійного шару матеріалу «моглайс FL/P» у поверхню напрямних.

Потім напрямні на станині обробили спеціальним відділювачем, як виключає адгезію полімеру з напрямними. Після проведення викладених вище робіт розточувальну бабку за допомогою крана змонтували на станині і притягнули до неї притискними планками (рис. 5.14).

Для заповнення матеріалом «моглайс» необхідного об'єму, обмеженого пластинами із фторопласта й металевими поверхнями напрямних на бабці і станині, використовували заздалегідь виготовлений стаціонарний металевий шприц з нижньою подачею нагнітання матеріалу.

Після заповнення шприца матеріалом його закрили кришкою і за допомогою ключа і гвинтової пари нагнітали матеріал «моглайс FL/P» у зазор

між напрямними на станині і підготовленою поверхнею на розточувальній бабці по підводній мідній трубці знизу вгору через спеціально встановлений штуцер (рис.5.15).



Рисунок 5.14 – Розточувальна бабка встановлена на станину та притягнута до неї притискними планками.

Повне заповнення зазору між станиною та бабкою контролювалося зверху виходом матеріалу назовні .

Через 24 години після закінчення операції нагнітання розточувальну бабку зрушують уздовж напрямних униз для виключення взаємного схоплювання полімеру з металом. Потім знімають розточувальну бабку і тефлонові смужки - обмежувачі товщини шару полімеру. Результат ремонту зображено на рис. 5.16.

Відновлений верстат перебуває в експлуатації і претензій до його роботи немає (див. у додатку акт впровадження у виробництво).



Рисунок 5.15 - Нагнітання матеріалу «моглайс FL/P» у зазор між напрямними на станині та металевою поверхнею на розточувальній бабці.



Рисунок 5.16 – Поверхня виготовлених напрямних на розточувальній бабці після полімеризації матеріалу.



Отже, застосування полімерних матеріалів дозволяє знизити витрати на виготовлення та ремонт обладнання. Коефіцієнт тертя при цьому сприяє більш плавному руху розточувальної бабки вздовж напрямних при малих швидкостях. Також ці матеріали мають високу міцність і зносостійкість, а запропонований метод їх заповнення матеріалом дозволяє отримати ідеальну поверхню контакту напрямних розточувальної бабки і станини.

### **Висновки**

1. Досліджено способи нанесення композиту на металеву поверхню напрямних під час їх виготовлення. Встановлено шляхи підвищення якості виготовлення поверхні як з допомогою запропонованих технологічних засобів, так і з допомогою застосування запропонованих у роботі нових способів нанесення композиту (патенти на корисну модель № 66441 та №98887).

2. Розроблені рекомендації виготовлення напрямних верстатів різноманітних конструкцій, які дозволяють виконувати ці операції найзручнішим та швидким способом з усуненням можливих дефектів, що можуть з'явитися при виконанні потрібних операцій.

3. Проаналізовано дефекти, які можуть виникнути при виготовленні напрямних, а також причин їх появи та запропоновано шляхи усунення цих недоліків.

4. Розроблено та впроваджено у виробництво спосіб виготовлення напрямних на розточувальній бабці розточувального верстату Skoda W200 HA, який знаходиться в експлуатації 3,5 роки та працює у 3-змінному графіку. Зауважень на роботу виготовлених напрямних немає.

## 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  $0,1 \dots 0,12$  у пари сталь-чавун та чавун-загартований чавун до  $0,06 \dots 0,08$  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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ковальов В.Д. Розробка систем управління якістю роботи важких верстатів і інструментів / В.Д. Ковальов, Я.В. Васильченко // Сборник научных трудов. Качество, стандартизация. – Киев, 2014.
2. Kovalev V. Adaptive optimal control of a heavy lathe operation / V. Kovalev, Y. Vasilchenko, P. Dašić // Journal of Mechanics Engineering and Automation (JMEA), April 2014. – Vol. 4, Issue 4. – P. 269-275.
3. Детали и механизмы металлорежущих станков / под ред. Д.Н. Решетова: в 2т. – М.: Машиностроение, 1972. – 520 с.
4. Металлорежущие станки / под ред. В.В. Бушуева – М.: Машиностроение, 2012. – т.1, 608 с.
5. Ефремов В.Д. Металлорежущие станки / В.Д. Ефремов, В.А. Горохов, А.Г. Схиргладзе. — М.: изд. ТНТ, 2016. – 695 с.
6. Минаков А.П. Анализ способов повышения износостойкости направляющих металлорежущих станков / А.П. Минаков, И.М. Юшкевич, И.Д. Камчицкая и др. // Вестник Белорусско-Российского университета. Машиностроение, 2016. – № 3 (52), С. 40-50.
7. Мусохранов М.В. Технологические предпосылки повышения эксплуатационных характеристик направляющих элементов / М.В. Мусохранов, В.В. Калмыков, М.Ю. Авраменко // Фундаментальные исследования, 2016. – № 8 (часть 1), С. 55-58.
8. Бушуев В.В. Металлорежущие станки. – М.: Машиностроение, 2014. – т.2, 608 с.
9. Браиловский М.И. Оптимальные современные материалы для изготовления базовых конструкций и элементов металлорежущих станков / М.И. Браиловский, А.Г. Воскобойник, А.А. Дьяконов, И.В. Шмид // СТИН, 2016. – № 4, С. 2-7.

10. Проников А. С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: В 3-х томах. Т.1: Проектирование станков – М: Машиностроение, 1994. – 444 с.

11. Xiong Yao Machining process parameters optimization for heavy-duty CNC machine tools in sustainable manufacturing / Xiong Yao, Wu Jun, Deng Chao, Wang Yuanhang // International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 2016. – Vol. 87, P. 1237-1246.

12. Шоучэн Цзи Оптимизация компоновок станков на основе расчета эпюры давления по поверхности направляющих / Шоучэн Цзи, В.М. Утенков, А.А. Молчанов // Известия ВУЗов. Машиностроение, 1917. – № 9, С. 8-15.

13. Логутенкова Е.В. Роль направляющих элементов в машиностроении и их классификация / Е.В. Логутенкова, Ю.А. Савина, А.А. Сухарева // Научный альманах, 2016. – № 8-1 (22), С. 229-232.

14. Григорьев С.Н. К проблеме построения прецизионных станков для изготовления изделий с нанометровой точностью / С.Н. Григорьев, В.Н. Телешевский, А.Г. Андреев и др. // Вестник МГТУ. СТАНКИН, 2015. – № 3, С. 9-14.

15. Харламов Ю.А. Трибологическая надежность металлорежущих станков: Монография / Ю.А. Харламов, В.Н. Соколов, О.С. Кроль // Северодонецк, ВНУ им. В. Даля, 2017. – 320 с.

16. Федоров В.А. Требования к направляющим элементам в машиностроении / В.А. Федоров, Е.Б. Логутенкова, А.В. Кабанов, В.Б. Сидоров // Научный альманах, 2016. – № 8-1 (22), С. 250-253.

17. Леванцевич М.А. Улучшение эксплуатационных характеристик деталей поверхностным модифицированием методом планирования гибким инструментом / М.А. Леванцевич, Н.Н. Максимченко // Упрочняющие технологии и покрытия, 2015. – № 10, С. 16-24.

18. Каминская В.В. Станины и корпусные детали металлорежущих станков / В.В. Каминская, З.М. Левина, Д.Н. Решетов / Рипол Класик, 2013. – 378 с.

19. Силин Д.В. Особенности в подборе материалов при изготовлении направляющих / Д.В. Силин, А.Ю. Тараховский // Вестник современных исследований, 2018. – № 1, С. 129-131.

20. Пекелис Г.Д. Технология ремонта металлорежущих станков / Г.Д. Пекелис, Б.Т. Гельберг. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.

21. Максимченко Н.Н. Методы улучшения равномерности перемещения станочных узлов по направляющим скольжения / Н.Н. Максимченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения, 2016. – № 3 (54), С. 70-78.

22. Сысоев П.В. Антифрикционные эпоксидные композиты в станкостроении / П.В. Сысоев, М.М. Близнец, А.К. Погосян и др. – Мн.: Наука и техника, 1990. – 231с.

23. Применение полимерных материалов для направляющих металлорежущих станков / под ред. А.С. Лapidуса, П.Ж. Дюшена, 1983. – 76 с.

24. Памфилов Е.А. Перспективные материалы для узлов трения деревообрабатывающего оборудования / Е.А. Памфилов, Е.В. Алексеева // Известия ВУЗов. Лесной журнал, 2015. – № 4, С. 90-94.

25. Бурлаченко О.В. Исследование новых технологий и материалов для повышения работоспособности узлов строительных машин / О.В. Бурлаченко, А.М. Буров, М.В. Иванов // Вестник Волгоградского архитектурно – строительного университета. Серия Строительство и архитектура, 2016. – № 62, С. 112-120.

26. Кахраманов И.Т. Износостойкие полимерные материалы. Структура и свойства / И.Т. Кахраманов, Г.Ш. Касумова, В.С. Осипчук, Р.Ш. Гаджиева // Пластические массы, 2017. – № 11-12, С. 8-15.

27. Иванов В.А. Исследование триботехнических характеристик самосмазывающих полимерных композиций / В.А. Иванов, В.А. Авдеев, Д.А. Харченко, Д.В. Доменюк // Вестник ТОГУ, 2015. – № 2 (37), С. 77-88.

28. Машков Ю.К. Разработка и исследование износостойких полимерных нанокompозитов / Ю.К. Машков, О.А. Кургузова, А.С. Рубан // Вестник

Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии, 2018. – т.15, № 1 (59), С. 36-43.

29. Машков Ю.К. Исследование полимерных нанокомпозитов для узлов трения / Ю.К. Машков, О.А. Кургузова, С.В. Клименко // Вестник Сибирского отделения Академии военных наук, 2017. – № 46, С. 53-56.

30. Hutchings Jan. Tribology Friction and Wear of Engineering Materials / Jan Hutchings, Philip Shipway // Butterworth – Heinemann, 2017. – 377p.

31. Бартнев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. М., 1972. – 240 с.

32. Gnecco E. Fundamentals of Friction and Wear on the Nanoscale / Gnecco E, Meyer E – Springer, 2015. – P.704.

33. Цзи Ш. Методика повышения точности системы позиционирования металлорежущих станков / Ш. Цзи, П.М. Чернявский // Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – № 10, С. 36-46.

34. Katnam K.B. Bonded repair of composite aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities / K.B. Katnam, L.F.M. Da Silva, T.M. Young // Progress in Aerospace Sciences, 2013. – Vol. 61, P. 26-42.

35. Мышкин Н. Трение, смазка, износ. Физические основы и технологическое приложение трибологии / Н. Мышкин, М. Петроковец – М.: Физматлит, 2007. – 368 с.

36. Halwan A. In State of Art: Mechanical and tribological behaviour of polymeric composites based on natural fibres / A. Halwan, B.F Yousif // Materials & Design, 2013. – Vol. 48. – P. 14-24.

37. <http://www.naukaspb.ru/spravochniki/SovrMashStroyMat.htm>

38. [http://www.vseslovari.com.ua/hie/page/antifriktsionnyie\\_materialyi.352](http://www.vseslovari.com.ua/hie/page/antifriktsionnyie_materialyi.352)

39. <http://www.inpolimer.ru/about/1613/antifriktsionnye-polimernye-materialy>

40. [http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article\\_272.html](http://www.chemport.ru/data/chemipedia/article_272.html)

41. [http://umu.vstu.ru/files/umo/page/727/a\\_150100\\_68\\_2\\_o\\_p\\_ftkm.pdf](http://umu.vstu.ru/files/umo/page/727/a_150100_68_2_o_p_ftkm.pdf)

42. <http://ikomnn.ru/zedex-sinteticheskie-materialy.html>
43. Старов В.Н. Влияние структуры полимеров на эксплуатационные свойства материалов / В.Н. Старов, Ю.Н. Зенни, А.В. Калач // Вестник Воронежского института, 2015. – № 1 (14), С. 11-17.
44. Негий А.Л. Восстановление и защита направляющих материалами зедекс / А.Л. Неглий // Оборудование и инструменты, 2005. – № 2, С. 46-47.
45. Баюрова Н.И. Применение полимерных композитных материалов при производстве и ремонте машин / Н.И. Баюрова, В.А. Зорин – М.: МАДИ, 2016. 264 с.
46. Хабибулина Л.Ф. Свойства композиционных пленочных материалов / Л.Ф. Хабибулина, Ю.Д. Сидоров, М.А. Поливанов, С.В. Василенко // Вестник Казанского технического института, 2016. – т.19, № 2, С. 109-113.
47. Косточко А.В. Прогнозирование совместимости в системе полимер – растворитель / А.В. Косточко, З.Г. Валишина, О.Т. Шипина // Казань, изд. КНИТУ, 2014. – 84 с.
48. Михайлов Ю.А. Специальные композиционные материалы / Ю.А. Михайлов // Металлика, 2009. – 660 с.
49. Muller M. Impact strength of filled polimer materials / M. Muller, P. Valasek // Materials Science Forum, 2017. – Vol. 883, P. 46-50.
50. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
51. <http://www.himtrade.com.ua/description/chester/102.html#products>
52. <http://diamantik.com.ua/production>
53. Ищенко А.А. Ремонт деталей и узлов энергетического оборудования композитными материалами / А.А. Ищенко, Е.В. Дашко – Мариуполь: ПГТУ, 2016. – 201 с.
54. 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.



55. Михайлов А.С. Влияние метода формирования на характеристики изделий из композитных материалов / А.С. Михайлов, Ю.И. Федоров, В.А. Михайлов // Вестник КНИТУ, 2013. --№18,С.20-22

56. [skleeno.ru/kley/kleybutakrilat](http://skleeno.ru/kley/kleybutakrilat)

57. Савчук П.П. Закономірності тертя та зношування епоксидних композитів з різним ступенем наповнення / П.П. Савчук, А.Г. Косторнов // Проблеми тертя та зношування, 2009. – № 51, С. 101-107.

58. Antonova N. Developing of porous composites on the basis of bi-polimers wich aluminium particles and ALOOH nanoparticles for getting antifriction coating / N. Antonova, I. Lisnichenko, I. Sibirka // MATEC Web of conferences, 2017. – v.129, №02008.

59. Данилаев М.П. Модификация фторопластовых пленок и лент для повышения их адгезии / М.П. Данилов, Е.А. Богослов, Е.М. Зуева и др. // Вестник КНИТУ, 2016. – № 15, С. 81-84.

60. Sunderam A.S. Ballistic Impact Performance Study on Thermoset and Thermoplastic Composites / A.S Sunderam, A.A. Franezhuth, P.K. Kumar, V. Sivakumar // Journal of Failure Analysis and Prevention, 2017. – Vol. 17 (6), P. 1260-1267.

61. Близнец М.М. Особенности изнашивания эпоксидных полимеров / М.М. Близнец, Н.П. Богданович, П.Д. Стухляк // Трение и износ, 1988. – т.9, № 3. С. 549-553.

62. Квашнин Б.Н. Восстановление направляющих скольжения металлорежущих станков / Б.Н. Квашнин, Ю.Э. Симонова, Ю.С. Ткаченко, В.Н. Гадалов // Известия Юго-Западного государственного университета, 2013. – № 5 (50), С. 139-141.

63. Сердобинцев Ю.П. Механизмы изнашивания направляющих скольжения металлообрабатывающего оборудования / Ю.П. Сердобинцев, А.Г. Схиртладзе // Ремонт, восстановления, модернизация, 2006. – № 5, С. 41-46.

64. Леванцевич М.А. Исследование влияния покрытий на антискачковые свойства направляющих скольжения / М.А. Левацевич, Н.Н. Максимченко, В.Н. Калач // СТИН, 2012. – № 9, С. 4-8.

65. Гусев В.Г. Конструкции и расчет металлорежущих станков, учебное пособие / В.Г. Гусев, В.Н. Жарков, Л.В. Беляев // Владимир, 2011г. – 96с.

66. Струтинський В.Б. Вібраційні процеси механічної обробки: монографія / В.Б. Струтинський, І.В. Перфілов – К.: Хімджест, 2015. –579 с.

67. Ишлинский А.Ю. О скачках при трении / А.Ю. Ишлинский, И.В. Крагельский – ГГФ, 1944. – т.14, вып. 45, С. 276-282.

68. Mao Xinyong A complete methodology for identifying dynamics of heavy machine tool through operational modal analysis / Mao Xinyong, Yan Ruizhi, Cai Hui, Li Bin, Luo Bo, He Songping // Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part B-Journal Of Engineering Manufacture, 2015. – Vol. 230, P. 1406-1416.

69. Халимов Р.Ш. Исследование виброустойчивости металлорежущих станков с измененными условиями трения в направляющих скольжения // СТИН, 2015. – № 1, С. 11-13.

70. Цзи Ш. Методика повышения точности системы позиционирования металлорежущих станков / Цзи Ш., П.П. Чернявский // Наука и образование МВГУ им. Баумана, 2015. – № 10, С. 36-46.

71. Mahdi Rahmani Experimental Investigations on Stick-Slip Phenomenon and Characteristics of LinearGuides / Mahdi Rahmani, Stephan Krall, Friedrich Bleicher // 25<sup>th</sup> DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Procedia Engineering, 2015. – Vol. 100, P. 1023-1031.

72. Bianch G. Analysis of vibration damping in machine tools / G. Bianch, S. Ganga, N. Cau, F. Paolucci // Procedia CIRP, 2014. – Vol. 21, P. 367-372.

73. Tomaš Bakša Durability of Cutting Tools during Machining of Very Hard and Solid Materials / Tomaš Bakša, Tomaš Kroupa, Pavel Hanzl, Miroslav Zetek // 25<sup>th</sup> DAAAM International Symposium of Intelligent Manufacturing and Automation, 2015. – Vol. 100, P. 1414-1423.

74. Вейц В.Л. Основы динамики и прочности машин / В.Л. Вейц // Изд. Лен. Университета, Ленинград, 1978. – 285 с.
75. Кудинов В.А. Динамика металлорежущих станков – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
76. Dyakonov A.A. Automated Proceesing of Vibration Test Results for Basic Metal-concrete Components of the Cutting Machins / A.A. Dyakonov, L.V. Shipulin, A.S. Ovsienko // Procedia Engineering, 2007. – Vol. 206, P. 1205-1210.
77. Пуш В.Э. Малые перемещения в станках – М.: ГНТИМЛ., 1961. – 123 с.
78. 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 .
79. Bianchi G. Analysis of vibration damping in machine tools / G. Bianchi, S. Canga, N. Cau, F. Paolucci // Procedia CIRP, 2014. – Vol. 21, P. 367-372.
80. Khalimov R.S. Vibrational stability of metal – cutting machines with modified frictional conditions in the slipping guides / R.S. Khalimov // Russian Engineering Research, 2015. – Vol. 35 (7), P. 539-540.
81. Струтинський В.Б. Динамічні процеси в металорізальних верстатах / В.Б. Струтинський, В.М. Дрозденко // Київ Основа- Принт, 2010. – 440 с.
82. Василевич Ю.В. Модальный анализ несущей системы тяжелого горизонтального многоцелевого станка с помощью метода конечных элементов / Ю.В. Василевич, С.С. Давнар, И.И. Шумский // Наука и техника, 2014. – № 4, С. 14-24.
83. Мурашкин Л.С. Прикладная нелинейная механика станков / Л.С. Мурашкин, С.Л. Мурашкин. – Л.: Машиностроение, 1977. – с. 192.
84. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний / Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1967. – 316 с.
85. Basu S.K. Analysis of optimum velocity in case of stick – slip slidind under normal oscillating force applied on the slide / S.K. Basu // Mech. Engng. Bull (India), 2017. – № 7, P. 117-119.

86. Ле Суан Ань Экспериментальное исследование механических автоколебаний при трении / Ле Суан Ань // Известия АН СССР. Механика твердого тела, 1972. – №3.

87. Кедров С.С. Колебание металлорежущих станков / С.С. Кедров. – М.: Машиностроение, 1978. – 144 с.

88. Мур Д. Основы применения трибоники / Д. Мур // Мир, 1978. – 483 с.

89. Song J. Reciprocating friction and wear of polyimide composites with solid lubricants / J. Song, G. Zhoo, Q. Ding, I. Qiu // Journal of Polymer Engineering, 2018. – Vol. 38, P. 363-370.

90. Василевич Ю.В. Анализ резонансного поведения несущей системы крупногабаритного станка типа «Подвижная стойка» / Ю.В. Василевич, С.С. Довгар // Наука и техника, 2015. – № 5, С. 10-17.

91. Mahdi R. Experimental investigations on stick – slip phenomenon and friction characteristics on linear guides / R. Mahdi, K. Stephan, B. Friedrich // Procedia Engineering, 2015. – Vol. 100 (january), P. 1023-1031.

92. Пановко Я.Г. Введение в теорию производческих колебаний / Я.Г. Пановко. – М.: Наука, 1971. – 239 с.

93. Кузнецов Ю.Н. Динамика станочно – инструментальной оснастки для высокоэффективной токарной обработки / Ю.Н. Кузнецов, О.Н. Драчев, И.В. Луцив, А.В. Шевченко, В.Н. Волошин // Старый Оскол ТНТ, 2015. – 432с.

94. Радіоненко О.В. Механізм граничного змащування поверхонь тертя з регулярним мікрорельєфом та їх технологічне забезпечення. Дис. на здоб. канд. тех.наук, 05.02.04 – Київ, 2006. – 223 с.

95. 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, 2015. – т.2, вип. 30, С. 91-97.

96. 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.

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

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

99. Болотов А.Н. Магнитная разгрузка узлов трения станков / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Символ науки, 2015. – № 9-1, С. 47-49.

100. Асмолова Л.В. Улучшение динамики электромеханических систем в условиях срывных фрикционных автоколебаний. Дис. на соиск. канд. техн. наук, 05.09.03 – Харьков, 2015. – 207 с.

101. Balaz Barna. Badanie syntetycznych powlokna powierzchniach par slizgowych / Balaz Barna, Laslo Molnar, Diero Tokacs, Antal Towt // Technologia i automatyzacja montazy, 1995. – № 2, P. 34-38.

102. Сизый Ю.А. Моделирование фрикционных автоколебаний при малых перемещениях в станках / Ю.А. Сизый, Э.Г. Чайка, А.Н. Ушаков // Вестник НТУ ХПИ. Серія технології в машинобудуванні, 2016. № 33, С. 13-17.

103. Ривин Е.И. Динамика привода станков / Е.И. Ривин. – М.: Машиностроение, 1966. – 2004 с.

104. Кожевников С.Н. Динамика машин с упругими звеньями / С.Н. Кожевников // АН УСРР, К., 1961. – 160 с.

105. Ершов Д.Ю. Причины возникновения динамических процессов в технологических системах механической обработки / Д.Ю. Ершов, И.Н. Лукьяненко // Journal of advanced research in technical science, 2017. – № 4, С. 39-43.

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

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

108. Гришко В.П. Восстановление направляющих скольжения на рассточной бабки станка фирмы Шкода W200 НА / В.П. Гришко, В.Ю. Колда, Е.А. Ищенко, А.Н. Просветова // Вестник ПГТУ «Сборник научных трудов», 2011. – № 21, С. 84-88.

109. Ishchenko A.A. Technological bases of use of polymers in case of reconstruction hydraulic cylinders // A.A. Ishchenko, V.P. Grishko, M. Barna, E.A. Ishchenko // Metallurgical and Mining Industry, 2016. – № 5, С. 62-65.

110. Ishchenko A. Tribotechnical research of friction surfaces on the basis of polymer composite materials / A. Ishchenko, A. Radionenko, E. Ischenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. – №6.

111. 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.

112. 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.

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

Додаток А  
Акти впровадження у виробництво



Затверджую:  
Директор машинобудівного  
підприємства ТОВ «Магма»  
Булі С.А.

Акт

про впровадження результатів дисертаційної роботи Іщенко О.А.:  
«Підвищення якості відновлення напрямних металорізальних верстатів із  
металополімерного композиту».

Ми, комісія у складі головного інженера Савінкіна С.Є., головного  
механіка Колди В.Ю., начальника техвідділу Вороніна А.В. склали цей акт в  
тому, що в практику відновлення напрямних верстатів машинобудівного  
підприємства «Магма» (м. Маріуполь) впроваджені наступні результати  
дисертаційної роботи «Підвищення якості відновлення напрямних  
металорізальних верстатів із металополімерного композиту».

1. Технологія відновлення напрямних розточувальної бабки  
горизонтально- розточувального верстату «Skoda» 200W шляхом нагнітання  
матеріалу «моглайс FL / P» під час відновлювального ремонту верстату в  
2011 році.

2. Технологія відновлення направляючої втулки повзуна  
зубодовбального верстату 5B161П шляхом нагнітання матеріалу  
«моглайс FL / P» під час поточного ремонту в 2014 році.

За період експлуатації станом на 05.03.2015 р було виявлено:

- нанесений полімерний шар (товщиною 1,7 мм) на поверхнях ковзання зберіг свою цілісність;
- величина зносу полімерного шару відповідає величині зносу інших невідновлювальних чавунних поверхонь, що забезпечує гарні зносостійкі показники;

- мала величина коефіцієнта тертя ковзання забезпечує плавність і рівномірність переміщення виконавчого механізму необхідного для забезпечення якісної металообробки.

Даний метод відновлення поверхонь напрямних ковзання дозволив відновити паспортні характеристики геометричної точності вузлів, які підлягали ремонту при значному зниженні вартості ремонту (зниження трудомісткості, скорочення термінів ремонту) в порівнянні з традиційним методом розбирання вузла та шліфування напрямних.

Орієнтовний ефект від впровадження розробок становить 125000 грн. Зазначений економічний ефект не є підставою для розрахунку і виплати грошової винагороди.

Підписи:



05.03.2015

Савінкин С.С.



05.03.15

Колда В.Ю.



05.03.14

Воронін А.В.



Затверджую  
 Директор ремонтного  
 підприємства  
 ТОВ «Южстанкомаш»  
 Волощук Є.В.



2017р.

Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи  
 аспіранта Іщенко О.А. у практику відновлення та виготовлення  
 напрямних токарно - гвинторізних верстатів.

Ми, комісія у складі представників ТОВ «Южстанкомаш» : ст.. майстра Подгайного В.С., майстра Трифонова В.В. та аспіранта НТУУ «Київський політехнічний інститут» Іщенко О.А., склали наступний акт у тому, що при відновленні та виготовленні напрямних токарно- гвинторізних верстатів типа 16К20 з 2016 року по наступний час використовуються розроблені в дисертації Іщенко Е.А. технології нанесення полімерних матеріалів, зокрема метод їх нагнітання , згідно с патентом України №66441, а також спосіб підвищення якості нанесення покриття напрямних , згідно с патентом України № 98887.

Практика виконання робіт по відновленню пар тертя верстатів довела, що використання вказаних технологій дозволяє забезпечити якісні показники напрямних. В цілому використання полімерного матеріалу при виготовленні та відновленні напрямних суттєво підвищує продуктивність ремонтного процесу за рахунок виключення процесу шабрування поверхонь, які були виготовлені альтернативними методами , наприклад, шляхом встановлення накладних фторопластових стрічок.

Від ТОВ «Южстанкомаш»

Від НТУУ «Київський політехнічний інститут»

Подгайний В.С.

Іщенко Е.А.

Трифонов В.В.

## Додаток Б

## Акт впровадження в навчальний процес

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
 Директор механіко-  
 машинобудівного інституту  
 Національний технічний  
 університет України  
 «Київський політехнічний інститут  
 імені Ігоря Сікорського»  
 М.І. Бабир  
 2018 р.

**АКТ**  
**впровадження результатів дисертаційної роботи**  
**Іщенко Олени Анатоліївни**  
**в навчальний процес**

Комісія в складі: голови завідувача кафедри Конструювання верстатів та машин Струтинського В.Б.; членів комісії: доц. Верба І.І., к.т.н., доц. Даниленко О.В. склали цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи на тему «Підвищення експлуатаційних характеристик напрямних ковзання металорізальних верстатів» у навчальний процес.


Результати роботи впроваджено в навчальний процес при викладанні дисциплін: Конструювання верстатів, роботів та машин; Металорізальні верстати-2. Розрахунок і конструювання; Експлуатація верстатів.

Використані наступні результати роботи:

Методика виготовлення напрямних металорізальних верстатів з використанням композитних матеріалів.

1. Способи підвищення якості поверхні напрямних виконаних за допомогою композитних матеріалів.
2. Знайдені автором значення коефіцієнтів тертя пар «чавун-композит» та методики визначення меж виникнення появи стрібокподібного руху каретки верстатів.

Комісія встановила відповідність результатів роботи навчальним та робочим програмам вище перелічених дисциплін.

Голова комісії  Струтинський В.Б.  
 Члени комісії  Верба І.І.  
 Даниленко О.В.