

Д.В. Ершов¹, Н.Э. Крохалева², В.М. Мусалимов²

¹Санкт-Петербургский монетный двор,

Санкт-Петербург, Россия, denis071200@mail.ru

²Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

УВЕЛИЧЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЧЕКАНОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА ЗА СЧЕТ НАНЕСЕНИЯ НАНОКОМПОЗИТНОГО ПОКРЫТИЯ Ti/TiN

Аннотация

В представленной работе описаны эксперименты по нанесению заданной величины нанокompозитных покрытий на чеканочный инструмент и выбору толщины слоев покрытия с целью увеличения ударно-циклической износостойкости инструмента. Установлено, что при повышенной толщине слоев и уменьшении их количества износостойкость повышается, что объясняется межслойным касательным взаимодействием. Использование системы «Трибал» позволило оценить межслойное конструкционное демпфирование и динамический коэффициент трения при циклическом фрикционном взаимодействии специально подготовленных образцов. Приведена модель передаточной функции динамической системы ударно-фрикционного взаимодействия и динамические характеристики данной системы. Результаты работы рекомендованы для внедрения на производстве.

Ключевые слова: нанокompозитное покрытие, износостойкость, коэффициент демпфирования, динамические характеристики.

Введение

Изготовление чеканочного инструмента является довольно сложным прецизионным процессом, что делает его дорогостоящим. Для производства штемпелей применяются различные марки инструментальной стали типа ШХ15 [1], а задача увеличения стойкости чеканочного инструмента остается актуальной. С точки зрения механики контактного взаимодействия необходимо фиксировать деградацию рельефа рабочей поверхности штемпелей в зависимости от количества циклов нагружения. Сама деградация отображается на изделиях (рис. 1), что позволяет визуально оценивать изменение рабочей поверхности штемпелей в реальном времени.

При этом степень изнашивания поверхностного рельефа не обязательно коррелируется со степенью объемного накопления повреждений в самом инструменте, то есть необходимо рассмотреть задачу по оценке степени износа при циклически повторяющихся ударах [2].

Одним из способов повышения износостойкости инструментов, рабочих элементов штампов, пресс-форм и подобных деталей является метод ионно-плазменной обработки, реализуемый преимущественно в вакуумных установках. Основные факторы, определяющие работоспособность поверхностей с покрытиями: материал основы, обеспечивающий прочность, сопротивление удару и деформации; сцепление между покрытием и основой; материал покрытия; толщина покрытия: слишком тонкое покрытие плохо сопротивляется изнашиванию, слишком толстое может скалываться; качество подготовки поверхности [3].

Целью работы является экспериментально-аналитическое обоснование выбора толщины слоев нанокompозитного покрытия, обеспечивающего повышенную ударно-циклическую износостойкость инструмента.

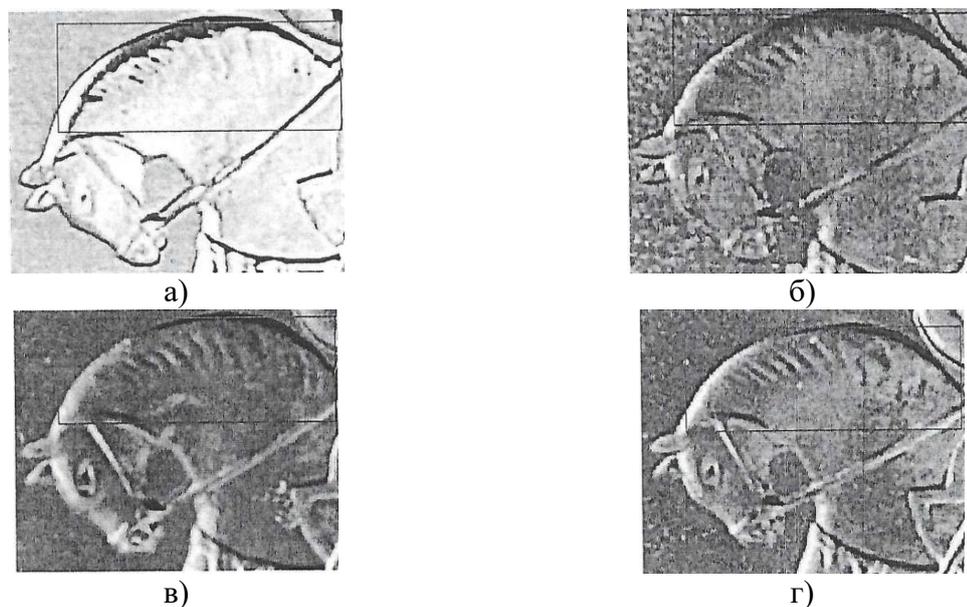


Рисунок 1 – Дегradация рельефа

Методы и материалы

Процесс нанесения подобного нанокompозита начинается с того, что перед осаждением покрытия поверхность детали, помещенной в вакуумную камеру установки, очищают путем интенсивной бомбардировки ее ионами осаждаемого вещества, имеющими большую энергию. Одновременно происходит нагрев детали до температуры конденсации, которая обеспечивает высокую адгезию покрытия[3]. Для выполнения поставленной задачи была использована современная универсальная вакуумная установка нанесения нанокompозитных покрытий «UNICOAT» научно-производственной фирмы (НПФ) «Элан-Практик» (рис. 2).



Рисунок 2 – Вакуумная установка «UNICOAT»

Данная вакуумная установка имеет гибкую автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУТП), прошедшую многолетнюю

промышленную обработку в условиях различных серийных производств. Система, решая типовые задачи АСУТП (проведение техпроцесса по заданной программе, диагностика оборудования, обработка аварийных ситуаций), позволяет при необходимости корректировать параметры во время процесса без его останова.

Схема процесса нанесения покрытий методом магнетронного распыления с использованием несбалансированных магнетронов (НМ) показана на рис. 3.

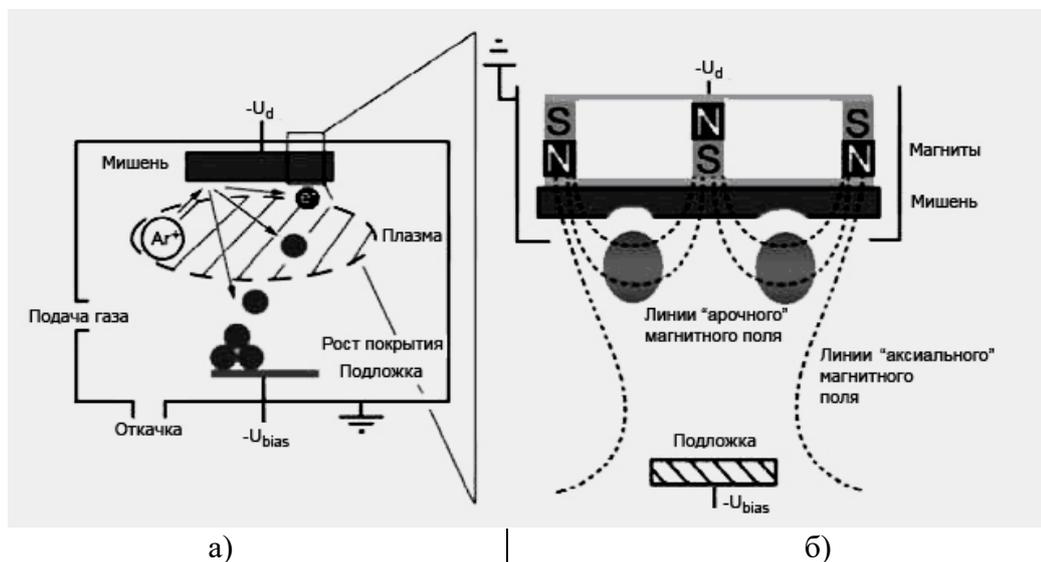


Рисунок 3 – Схема процесса нанесения покрытий методом магнетронного распыления (а), схема несбалансированного магнетрона (б)

Здесь, наряду с основным «арочным» магнитным полем, сформированным над поверхностью мишени, имеется дополнительное «аксиальное» магнитное поле, оттекающее от мишени к подложке. При подаче на мишень магнетрона отрицательного потенциала $-U_d$ над ее поверхностью зажигается аномальный тлеющий разряд. Электроны плазмы разряда, двигаясь по циклоиде вдоль силовых линий «арочного» магнитного поля, ионизируют рабочий газ – аргон (Ar). Ионы Ar^+ , ускоряясь в прикатодном электрическом поле мишени, бомбардируют ее поверхность. Происходит процесс распыления мишени, в результате которого с ее поверхности вылетают металлические атомы, соответствующие материалу мишени (например, Ti) со средней энергией 10-20 эВ, и дополнительные вторичные электроны. Металлические атомы перемещаются к поверхности подложки, на которой происходит их послойное осаждение и, тем самым, формирование покрытия. Магнетронное распыление является гораздо более гибкой и низкотемпературной технологией. Покрытие можно наносить не только при высоких, но и при относительно низких температурах плазмы, что расширяет диапазон упрочняемых материалов. Для получения нанокомпозитов использована оригинальная схема несбалансированных магнетронов НМРС-2D (рис. 4), запатентованная НПФ «Элан-Практик» (патент РФ №2308538), которая за счет вращения установочного кольца позволяет создавать многослойные структуры с тонкими границами при полном отсутствии смесового переходного слоя между нанослоями. При этом условии обеспечивается получение экстремально высоких свойств, присущих данному типу нанокомпозитов.

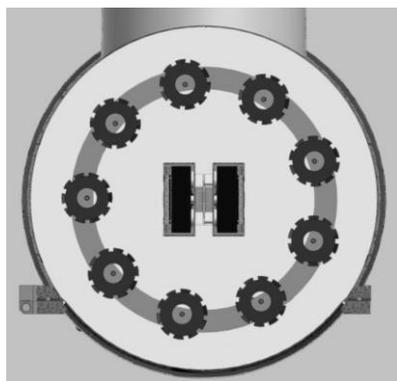


Рисунок 4 – Схема получения нанокompозитов с использованием системы HMPC-2D

Результаты и обсуждение

Согласно установочной технологии для исследования была задана общая толщина покрытия $h_{\text{общ.}}=3\text{мкм}$. Изменением скорости вращения кольца регулировалась толщина слоев и, соответственно, их число. В таблице 1 представлены усредненные значения предельных циклов нагружения и соответствующих им толщин слоев.

Таблица 1 – Замеры износостойкости нанокompозитных покрытий

№ штемпелей	Наименование покрытия	Толщина слоя за период, нм	Количество рабочих циклов нагружения
1	Ti/TiN	190	800000-1100000
2	Ti/TiN	40	500000-600000
3	Ti/TiN	30	400000-450000

На рис. 5 представлена корреляционная зависимость [4] ударно-циклической износостойкости штемпелей с нанопокpытиями от числа слоев, построенная на основании проведенных работ.

$$C = 8.7 * 10^5 - 5009h \quad (1)$$

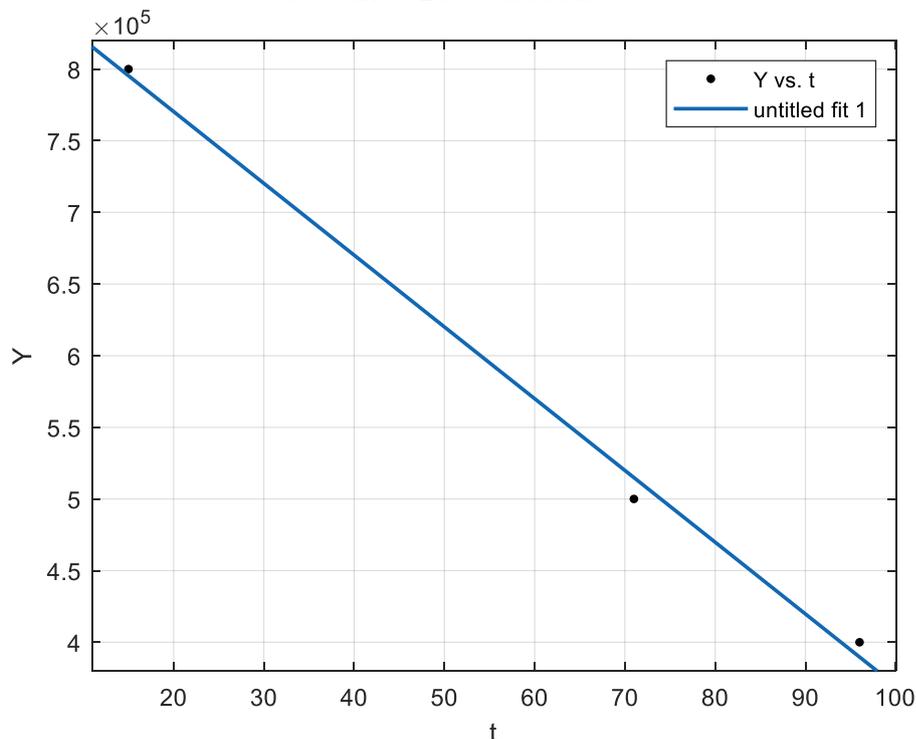


Рисунок 5 – Зависимость ударно-циклической износостойкости штемпелей с нанопокpытиями от числа слоев покрытий

Схематизируем задачу. На рис. 6 изображены штампея со слоями нанокompозитных покрытий.

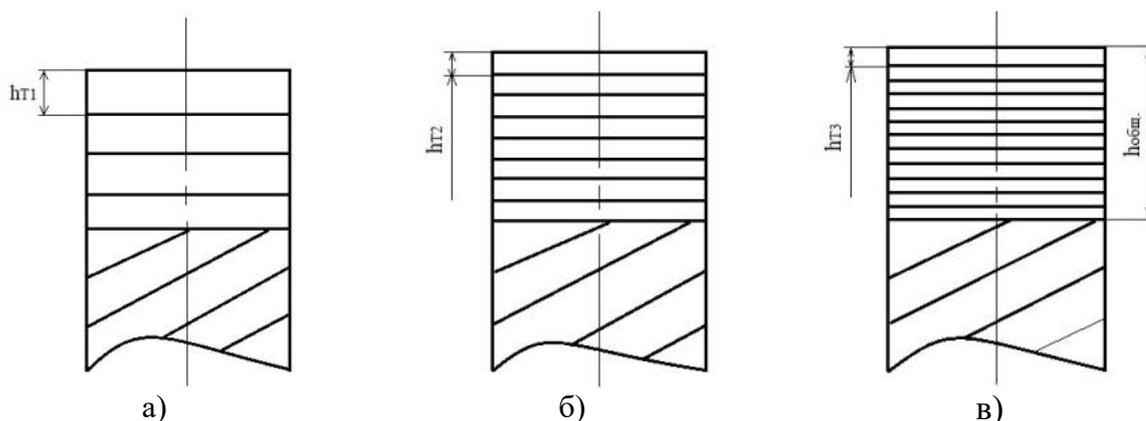


Рисунок 6 – Слои нанокompозитных покрытий ((а) - $h_{т1}=190\text{нм}$, (б) - $h_{т2}=40\text{нм}$, (в) - $h_{т3}=30\text{нм}$, $h_{\text{общ.}}=3\text{мкм}$)

Общая толщина покрытия определяется характерным линейным размером, в данном случае $h=3\text{мкм}$. Чем больше скорость вращения упрочняемых штампея, тем тоньше слой покрытия. Принимается, что интенсивность распыления постоянна. Число слоев определяется заданной толщиной слоя, то есть, заданной скоростью вращения. При определенной толщине слоя они становятся взаимодействующими как элементы отдельных оболочек с ярко выраженным конструкционным демпфированием. Итак, толщина покрытия задана. Задан материал покрытия. Настроена установка на вакуум, температуру. Необходимо выбрать толщину слоя, а отсюда и число слоев. В свою очередь, число слоев определяется скоростью вращения установочного кольца. Следует понимать, что большая толщина слоя формируется при меньшей скорости вращения. Для меньшей скорости данный параметр больше по величине, чем при большей скорости вращения. А за этот промежуток времени слои с большим значением параметра более длительное время взаимодействуют с окружающей средой.

Естественно, возникает проблема установления значений межслойных коэффициентов демпфирования - конструктивных коэффициентов демпфирования [5,6]. Для решения этого вопроса были изготовлены образцы с нанесенными нанокompозитами и проведены эксперименты на установке «Трибал» [7]. В итоге построена передаточная функция [8]:

$$T = \frac{-0.88s - 0.35}{s^2 + 0.27s + 1.08} \quad (2)$$

Определен коэффициент демпфирования: $k=0.13(1/\text{с})$.

Были построены динамические характеристики трибосистемы «слой-слой», как показано на рис.7 и 8[9,10].

С помощью этой диаграммы определен динамический коэффициент трения системы: $K_{д}=0.41$.

Переходная характеристика характеризует включение в рабочий режим фрикционного взаимодействия слоев. Здесь просматриваются возможности управления фрикционным взаимодействием слоев.

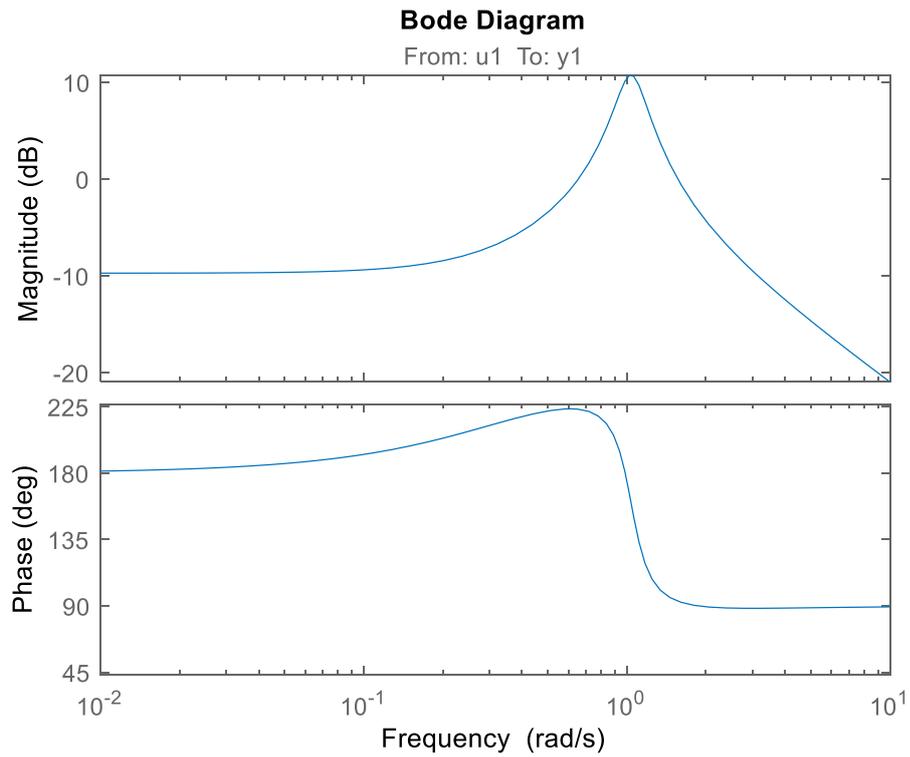


Рисунок 7 – Диаграмма Бode

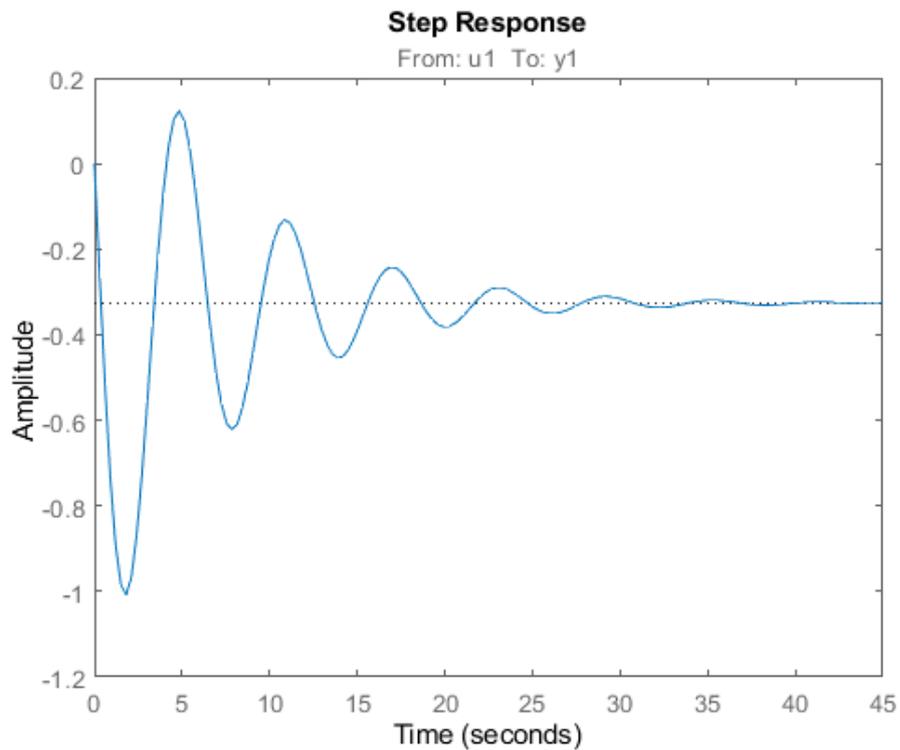


Рисунок 8 – Переходная характеристика системы

Заклучение

Установлена корреляционная зависимость ударно-циклической износостойкости чеканочного инструмента от толщины слоев нанокomпозитных покрытий Ti/TiN.

Показано, что при выборе рациональной толщины слоя покрытия при циклических ударно-фрикционных взаимодействиях инструмента с заготовкой изделия, между слоями покрытия происходит касательное взаимодействие.

Величина касательного взаимодействия – коэффициент демпфирования $k=0.13(1/c)$ оценена при проведении экспериментов с образцами на системе «Трибал».

Дана оценка динамическому коэффициенту трения: $K_d=0,41$.

Построена передаточная функция динамической системы межслойного взаимодействия и приведены динамические характеристики системы.

Результаты проведенных исследований рекомендованы для использования при подготовке и настройке оборудования для чеканки изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 801-78. Сталь подшипниковая. ТУ.
2. Орлов С.В. Циклическое ударно-фрикционное взаимодействие чеканочного инструмента с монетной заготовкой. Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. - СПб, 2007.
3. Полевой С.Н., Евдокимов В.Д. Упрочнение металлов: Справочник. – М.:Машиностроение, 1986. 320 с., ил. – (Серия справочников для рабочих).
4. Мещеряков В.В. Задачи по статистике и регрессионному анализу с MATLAB - М.:Диалог-МИФИ, 2009-448 с.
5. Мусалимов В.М., Сизова А.А. Основы трибоники.-С-Пб:СПбГУ ИТМО,2009,77с.
6. Li S., Sedakova E.V. Modeling the influence of nanosized fillers on the mechanical properties and wear resistance of a composite based on polyether ether ketone//Journal of Manufacture and Reliability. 2023, V.52, N3, pp.241-245.
7. Ершов Д.В., Орлов С.В., Король Д.В. Использование трибометрической системы «Трибал» для имитации процесса чеканки. Программа и доклады Восьмой сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов». - С-Пб, 22-37 октября 2007 г. ИПМашРАН, 2007. С.158-161.
8. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. - 408 с.
9. Капалин В.И., Макеенкова Д.С., Скоболева Е.Ю. Ядро MATLAB в теории линейных систем управления.-М.:ЛЕНАНД, 2016.-168 с.
10. Kalapyshina I.I., Nuzhdin K.A., Musalimov V.M. Modeling of nonlinear dynamic of mechanic system with the force tribological interaction.// Tribology in Indurtry.2015.T.37,N3-pp.350-365.

D.V. Ershov¹, N.E. Krokhaleva², V.M. Musalimov²

¹Saint Petersburg Mint, Saint Petersburg, Russia, denis071200@mail.ru

²Institute for Problems in Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF COINING TOOLS THROUGH THE APPLICATION OF A Ti/TiN NANOCOMPOSITE COATING

Abstract

The presented work describes experiments on the application of a specified thickness of nanocomposite coatings to coining tools and the selection of coating layer thicknesses to increase the impact-cyclic wear resistance of the tool. It was found that increasing the layer thickness and reducing the number of layers enhances wear resistance, which is explained by interlayer shear interaction. The use of the "Tribal" system enabled the evaluation of interlayer structural damping

and the dynamic coefficient of friction during cyclic frictional interaction of specially prepared samples. A model of the transfer function of the dynamic system of impact-friction interaction and the dynamic characteristics of this system are presented. The results of the study are recommended for industrial implementation.

Keywords: nanocomposite coating, wear resistance, coefficient of damping, dynamic characteristics.