

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.793.72

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-305-315

### Испытания на износ порошковых покрытий и исследования микрогеометрии поверхностей трения в условиях холода

Н.Ф. Стручков\*, Д.И. Лебедев, Г.Г. Винокуров

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия*  
*\*struchkov\_n@rambler.ru*

**Аннотация.** Интенсивная эксплуатация техники в природно-климатических условиях Севера часто приводит к преждевременному износу деталей ее узлов трения. При низкой температуре запуска техники происходят повторные термические расширения уже приработанных деталей узлов трения и изменения их геометрических размеров. Повышение вязкости технических смазочных материалов при холоде также снижает износостойкость узлов трения. Снижение ресурса рабочих элементов и деталей ходовой системы землеройной и горнодобывающей техники Севера обусловлено также мерзлыми грунтами в криолитозоне. Основной задачей трибологии для техники Севера становится исследование узлов трения машин и механизмов, эксплуатирующихся в условиях холода. Следует выявить, как низкие климатические температуры внешней среды будут влиять на процессы изнашивания материалов узлов трения, в том числе порошковых износостойких покрытий. Проведены испытания на износ при низких климатических температурах модифицированных порошковых покрытий, профилометрические и теплофизические измерения поверхностей трения. Исследования проводились на специальном низкотемпературном стенде в период зимних низких климатических температур в г. Якутск (ниже  $-40$  °С, декабрь 2020 г., январь и декабрь 2021 г.). Выявлены закономерности установления рабочей температуры узла трения «порошковое покрытие–стальное контртело» при холоде. Получены данные массового износа покрытий и стальных контртел, параметры шероховатости контактных поверхностей при их трении скольжения в условиях низких климатических температур.

**Ключевые слова:** испытания на износ, низкие климатические температуры, износостойкое покрытие, контртело, трение скольжения, износ, профиль

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность заведующему отделом теплообменных процессов ИФТПС СО РАН, к.т.н. К.Н. Большеву за помощь в проведении теплофизических измерений.

#### Введение

Решения задач трибологии материалов направлены на создание научных основ обеспечения высокой производительности и надежности машин и механизмов. Как известно, вследствие изнашивания узлов трения техники постоянно большие затраты расходуются на изготовление запасных частей, ремонт и восстановление изношенных деталей. Классическими трибологическими исследованиями давно установлено, что повышенный расход топлива и низкие показатели эффективности техники обусловлены, в основном, потерями на трение деталей узлов трения [1]. Проблемы трибологии материалов особенно актуальны для техники Севера, работающей в экстре-

мальных природно-климатических условиях. Интенсивная эксплуатация техники на Севере (низкие температуры запуска, мерзлый грунт криолитозоны и др.) приводит к преждевременному износу узлов трения [2].

Исследования показывают, что в северных регионах средняя производительность техники зимой на открытых работах падает в 1–2 раза, наработка на отказ снижается в 2–3 раза, средний срок службы сокращается в 2,5–3,5 раза. С 80-х годов прошлого столетия в Якутском научном центре СО РАН проводятся систематические исследования фундаментальных проблем трибологии в условиях низких климатических температур [3–7]. Были установлены физиче-

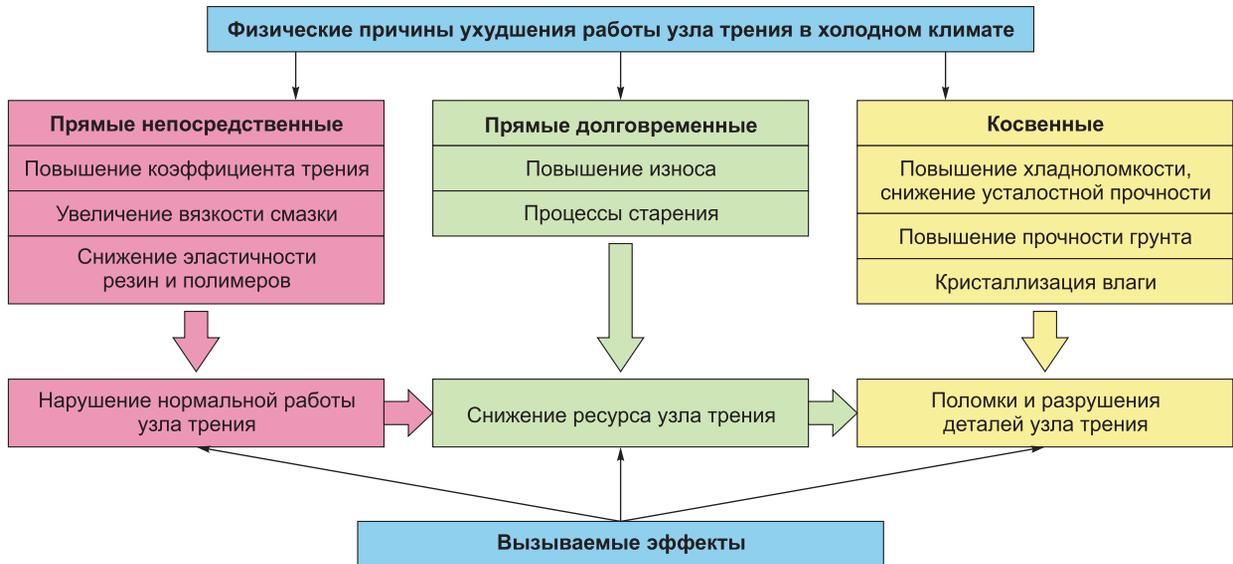


Рис. 1. Физические проблемы (причины) снижения работоспособности узла трения в условиях холодного климата [4].

Fig. 1. Physical problems (reasons) of reduced performance of the friction unit in a cold climate [4].

ские проблемы (причины), которые представляют собой объективные закономерности изменения свойств материалов для узлов трения под влиянием низких температур и других факторов холодного климата (рис. 1). Этот многосторонний комплекс задач также подтверждается современными отечественными и зарубежными исследованиями, которые показывают актуальность исследования влияния низких температур на процессы изнашивания различных материалов и узлов трения [8–12].

В настоящее время для упрочнения и восстановления деталей техники в ремонтном производстве используются перспективные технологии нанесения износостойких порошковых покрытий [13–15]. Структура и физико-механические свойства порошковых покрытий существенно влияют на процессы изнашивания обработанной поверхности деталей техники [16–18].

Поэтому для разработки трибологических основ использования технологий нанесения покрытий для восстановления деталей техники Севера следует выявить, как низкие климатические температуры внешней среды будут влиять на изнашивание узлов трения с порошковым износостойким покрытием. Актуальными задачами в данном направлении являются проведение испытаний на износ пары трения «порошковое покрытие–стальное контртело» в условиях низких климатических температур, изучение установления рабочей температуры и изменения микро-

геометрии контактных поверхностей при трении в условиях холода.

Цель данной работы – выявление закономерностей установления рабочей температуры и процессов изнашивания узлов трения с модифицированными порошковыми покрытиями при трении в условиях низких климатических температур окружающей среды.

#### Материалы и методика экспериментальных исследований

Объектами исследования являются износостойкие порошковые покрытия с тугоплавкими и ультрадисперсными модифицирующими добавками – разработки Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС СО РАН) [19–21]. Для модифицирования износостойких покрытий были использованы порошки корунда  $Al_2O_3$  и ультрадисперсные порошки шпинелей  $CoAl_2O_4$  и  $CuAl_2O_4$ , получаемых методом плазмохимического синтеза производства Республики Латвия (средний размер частиц около  $\sim 100$  нм). Износостойкие покрытия из порошковых проволок с тугоплавкими добавками корунда  $Al_2O_3$  нанесены на промышленной установке электродуговой металлизации ЭДУ-500 ООО «Вежа-1» (г. Комсомольск-на-Амуре) при следующих технологических режимах: ток дуги  $I = 280–300$  А, дистанция напыления  $L = 130$  мм, напряжения дуги равны  $U = 30–40$  В. Основу порошкового материала

газопламенных покрытий с ультрадисперсными модифицирующими добавками составляет промышленный самофлюсующийся порошок ПР-Н70ХТ7С4Р4 системы Ni–Cr–Si–B [20, 21].

Для низкотемпературных исследований в работе использовался стенд для испытаний на износ порошковых покрытий в условиях низких климатических температур внешней среды, проведения профилометрических и теплофизических измерений контактных поверхностей трения. Низкотемпературный стенд изготовлен на основе машины трения СМЦ-2 с теплоизолированной камерой типа «обратный балкон»: обеспечение условий окружающей холодной среды предусмотрено открытием окна при низких климатических температурах в зимний период г. Якутск (рис. 2, а). Сначала был изготовлен прямоугольный деревянный каркас стенда из брусев длиной 100 см, который был обшит ориентированно-стружечной плитой толщиной 11 мм. Потом низкотемпературная рабочая камера стенда была покрыта четырьмя слоями из современных теплоизоляционных материалов: ветро-, влагозащитной пленки, утеплителя из минеральной ваты толщиной 100 мм и материала на основе вспененного полиэтилена, покрытого алюминиевой фольгой.

На экспериментальном стенде проведены триботехнические, теплофизические и профилометрические исследования поверхностей износостойких порошковых покрытий при трении скольжения со стальными контртелами в условиях низких климатических температур. Для испытаний на износ порошковые покрытия были нанесены на поверхность цилиндрических образцов-дисков диаметром 50 и толщиной 10 мм. На основе изучения методик испытаний на износ была выбрана схема трения «диск–колодка» (рис. 2, б). По данной схеме трения одному циклу машины трения СМЦ-2 соответствует путь трения, равный  $1,96 \times 10^{-2}$  м. По соответствующим размерам были изготовлены контртело-колодки из обычной и закаленной сталей марки ШХ15. При этом были измерены твердости контртел: твердость контртел из стали ШХ15 составляет 42–45 по шкале HRC; твердость контртел из закаленной стали ШХ15 составляет 62–64 HRC.

Испытания на износ проведены на машине трения СМЦ-2 низкотемпературного стенда при следующих режимах: нагрузка 147 Н, частота вращения вала 4 об./с, трение сухое. Массовый

износ измерялся взвешиванием дисков с покрытиями и стальных контртел-колодок на электронных весах «Vibra» с точностью до  $\pm 0,0001$  г. Измерения массового износа, профилометрирование поверхностей покрытий и стальных контртел на стенде проводились через 3600 циклов машины трения.

Микрогеометрия контактных поверхностей трения покрытий и контртел в работе исследовалась профилометром «Surftest SJ-201P» (Mitutoyo, Япония) и на стереоскопическом микроскопе «Stemi 2000C» (Carl Zeiss Microscopy, Германия). Измерения профилей порошковых покрытий проводились на четырех маркированных противоположных участках образцов, затем полученные данные усреднялись по всей поверхности трения.

Для измерения температуры узла трения использовались кабельные термоэлектрические преобразователи производства ПК «Тесей» типа КТХА (см. рис. 2, б). Для компенсации температуры холодного спая использован платиновый

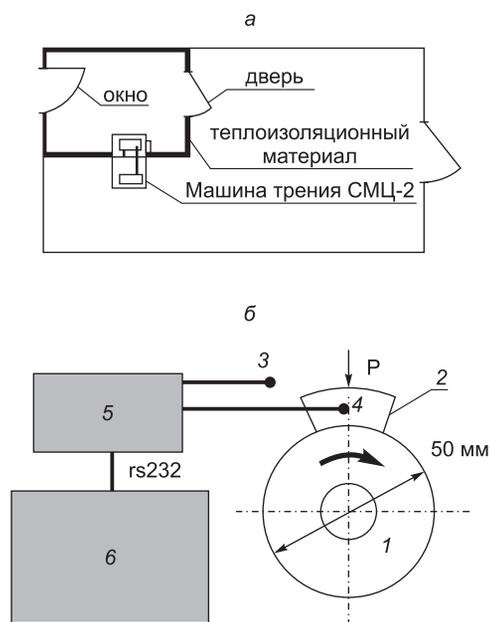


Рис. 2. Низкотемпературный стенд на базе машины трения СМЦ-2:

а – схема «обратный балкон»; б – схема измерений: 1 – образец-диск с покрытием, 2 – контртело-колодка, 3 и 4 – термопары, 5 – преобразователь сигналов Теркон, 6 – компьютер.

Fig. 2. Low-temperature stand based on the SMC-2 friction machine:

а – the «reverse balcony» scheme; б – test bench measurement scheme, 1 – coated disk sample, 2 – counterbody-block, 3 and 4 – thermocouples, 5 – Terkon signal converter, 6 – computer.

термометр сопротивления ТСП-100. Термопара 3 установлена в сквозное отверстие внутри контртела-колодки 1, просверленное до половины толщины образца; термопара 4 измеряет температуру внешней среды. Для преобразования и обработки сигналов термодатчиков использовался прецизионный преобразователь сигналов «Теркон» 5. Регистрация температурных данных осуществлялась с помощью компьютера 6 через интерфейс rs232 с периодом 2–3 с. Дальнейшая обработка температурных данных производилась в MS Excel.

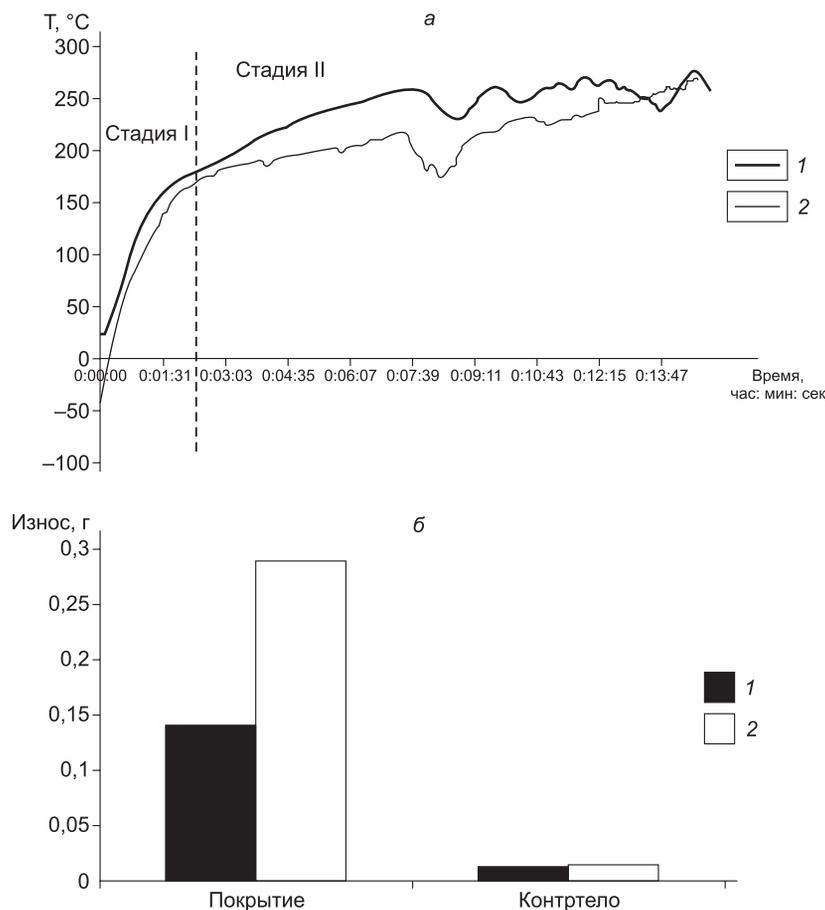
### Результаты теплофизических измерений и испытаний на износ узлов трения на низкотемпературном стенде

Исследования на стенде были проведены в период зимних низких климатических температур в г. Якутск (ниже  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , декабрь 2020 г.,

январь и декабрь 2021 г.). С целью сравнительного анализа результатов испытания на износ на стенде проведены с одинаковыми режимами трения при различных температурах окружающей среды: комнатной ( $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и отрицательной климатической (от  $-43$  до  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Таким образом, разница температур узла трения является существенной – около  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 3, а представлены сравнительные графики изменения температуры узла трения «покрытие с добавками корунда  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – контртело из стали ШХ15» по времени изнашивания в комнатных условиях ( $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и при холодном климате ( $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Как видно из графиков, изменение температуры узла трения состоит из двух качественно различных стадий:

– стадия I характеризуется начальным интенсивным ростом температуры узла трения (см. рис. 3, а). Резкое повышение температуры в



**Рис. 3.** Изменение температуры (а) и массовый износ (б) узла трения: 1 – в комнатных условиях ( $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); 2 – при холодном климате ( $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); покрытие с модифицирующими добавками  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , контртело из стали ШХ15; продолжительность испытаний 15 мин.

**Fig. 3.** Temperature change (а) and mass wear (б) of the friction unit: 1 – in room conditions ( $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); 2 – in cold climates ( $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); coating with modifying additives  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , counterbody made of steel ShKh15; test duration 15 min.

## ИСПЫТАНИЯ НА ИЗНОС ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

данной стадии объясняется начальной работой сил трения, которые интенсивно нагревают узел трения;

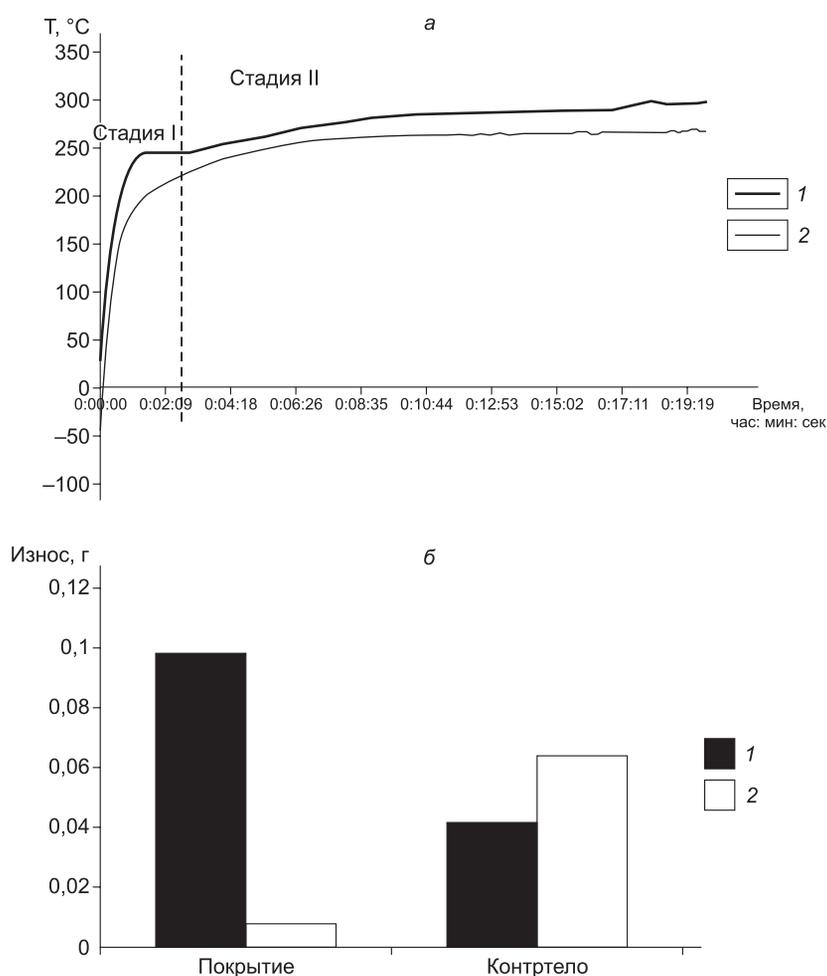
– в стадии II наблюдается равномерное повышение температуры узла трения, наблюдаются ее колебания. Далее, температура узла трения постепенно стабилизируется (см. рис. 3, а).

Как и следовало ожидать, при холодном климате температура узла трения в целом ниже, чем при комнатной температуре (см. рис. 3, а). В обоих случаях на начальном этапе трения (до ≈3 мин.) наблюдается быстрое повышение температуры узла трения примерно до ≈180–200 °С. Далее, вплоть до 12 мин. испытаний наблюдается различие в изменении температуры с разницей пример-

но ≈50 °С в комнатных условиях (+24 °С) и при холодном климате (–45 °С).

На рис. 3, б приведены сравнительные данные массового износа покрытия с модифицирующими добавками  $Al_2O_3$  и стального контртела из стали ШХ15 в комнатных условиях (+24 °С) и при холодном климате (–45 °С). Как видно из рисунка, при температуре –45 °С массовый износ модифицированного покрытия практически в два раза выше чем при комнатной температуре, а у контртела из стали ШХ25 массовый износ возрастает незначительно – примерно на ≈12 % (см. рис. 3, б).

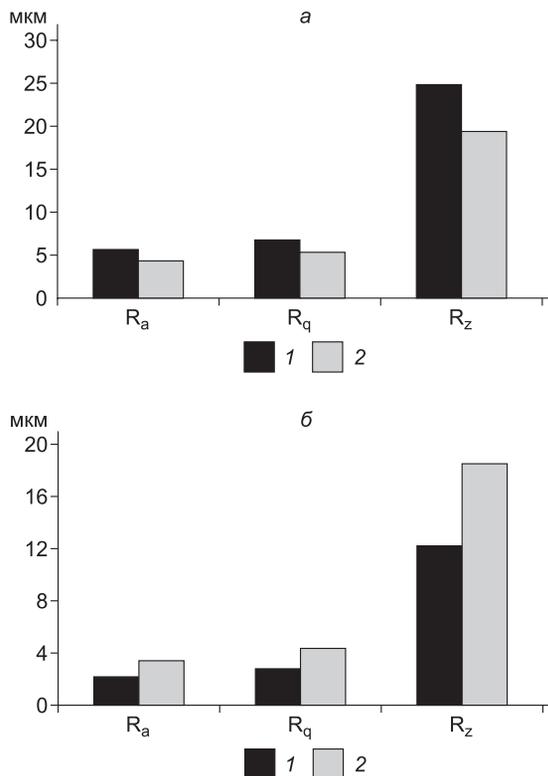
На рис. 4, а приведено изменение температуры узла трения в комнатных условиях (+24 °С) и при



**Рис. 4.** Изменение температуры (а) и массовый износ (б) узла трения: 1 – в комнатных условиях (+24 °С); 2 – при холодном климате (–43 °С); покрытие с ультрадисперсными добавками шпинели  $CoAl_2O_4$  0,2 мас. %, контртело из закаленной стали ШХ15; продолжительность испытаний 20 мин.

**Fig. 4.** Temperature change (а) and mass wear (б) of the friction unit: 1 – in room conditions (+24 °С); 2 – in cold climates (–43 °С); coating with ultrafine additives of spinel  $CoAl_2O_4$  0.2% wt., counterbody made of hardened steel ShKh 15; test duration 20 min.

холодном климате ( $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) для покрытия с ультрадисперсными добавками шпинели  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  0,2 мас.% и контртела-колодки из закаленной стали ШХ15; продолжительность испытаний 20 мин. Как видно из графиков, при обоих температурных режимах ( $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) изменение температуры узла трения состоит также из двух качественных стадий I и II. В начальной стадии I (до  $\approx 2$  мин.) происходит резкое повышение температуры узла трения до  $\approx 220\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Далее, начиная со  $\approx 2$ -й минуты, наблюдается стадия II, когда рост температуры резко снижается и происходит более равномерное медленное повышение. Как видно из графиков, сохраняется различие в изменении температуры с разницей  $\approx 20\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$  в комнатных условиях ( $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и при холодном климате ( $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



**Рис. 5.** Параметры шероховатости контактных поверхностей трения покрытия (а) и контртела (б): 1 – в комнатных условиях ( $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); 2 – при холодном климате ( $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); покрытие с модифицирующими добавками  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , контртело из стали ШХ15; продолжительность трения скольжения 15 мин.

**Fig. 5.** Roughness parameters of the contact friction surfaces of the coating (a) and the counterbody (b): 1 – in room conditions ( $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); 2 – in a cold climate ( $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); coating with modifying additives  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , counterbody made of steel ShKh 15; duration of sliding friction 15 min.

На рис. 4, б приведены сравнительные данные массового износа покрытия с ультрадисперсными добавками шпинели  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$  0,2 мас. % и контртела-колодки из закаленной стали ШХ15 в комнатных условиях ( $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и при холодном климате ( $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Как видно из графиков, массовый износ в комнатных условиях значительно (примерно на порядок) больше, чем при отрицательной температуре внешней среды, в противоположность закономерности массового износа покрытия с модифицирующими добавками  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (см. рис. 3, б). Массовый износ контртела из закаленной стали ШХ15 при холоде, наоборот, возрастает примерно в  $\approx 1,5$  раза. Это свидетельствует, видимо, о большей чувствительности структуры закаленной стали ШХ15 к снижению температуры внешней среды при трении скольжения (см. рис. 4, б).

#### Результаты профилометрических измерений микрогеометрии контактных поверхностей трения на низкотемпературном стенде

Как известно, сложные многофакторные процессы изнашивания материалов при трении скольжения отражаются на особенностях формирования профилей контактных поверхностей трения [22–26]. Поэтому в работе исследованы параметры микрогеометрии контактных поверхностей в узлах трения «порошковое покрытие–стальное контртело» при трении скольжения в условиях низких климатических температур. При испытаниях на износ на экспериментальном низкотемпературном стенде определены следующие параметры профилей: шероховатость  $R_a$ , среднеквадратическое отклонение  $R_q$ , размах отклонений  $R_z$ , параметр  $R_y$ . Обработка профилометрических данных проводилась в электронных таблицах Excel.

На рис. 5 приведены измеренные параметры микрогеометрии поверхностей трения покрытия с модифицирующими добавками  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и контртела из стали ШХ15. Испытания на износ проведены также при комнатной  $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$  и низкой климатической  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  исходных температурах узла трения в течение 15 минут. Как видно из графиков, параметры шероховатости поверхности трения покрытия при комнатной температуре больше, чем при отрицательной температуре (см. рис. 5, а). У поверхности трения контртела из стали ШХ15 наблюдаются обратные законо-

мерности – параметры шероховатости выше при отрицательной температуре (см. рис. 5, б).

Профилометрическими измерениями установлено, что у контртела из стали ШХ15 наблюдается особенно большой размах профиля  $R_z$  при отрицательной температуре (см. рис. 5, б). Как известно, параметр  $R_z$  представляет собой сумму средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов профиля и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины. Это означает, что высокий уровень данного параметра по сравнению с среднеарифметическим и среднеквадратичным отклонениями  $R_a$  и  $R_q$  характеризует увеличение неоднородности микрогеометрии поверхности трения стального контртела. Таким образом, изменение микрогеометрии поверхности трения контртела показывает большую чувствительность структуры контртела – колодки из стали ШХ15 к снижению исходной температуры трения.

В заключение следует отметить, что проведенные эксперименты выявили неоднозначный характер влияния низких температур на изнашивание трибосопряжений «порошковое покрытие–стальное контртело». Как показывают многочисленные трибологические исследования, влияние температуры окружающей среды на процессы трения скольжения неоднозначно отражается на значениях коэффициента трения и массового износа контактных поверхностей материалов узла трения [3–12, 22–26]. Как показано выше, что для покрытия с модифицирующими добавками шпинели  $CoAl_2O_4$  износ в комнатных условиях значительно больше, чем при трении скольжения в условиях низкой климатической температуры окружающей среды (см. рис. 4, б). Поэтому объяснение полученных результатов требует подробного изучения, в первую очередь, металлургических аспектов многофакторного процесса изнашивания, как на этапе приработки, так и на стадии установившегося трения с учетом физико-механического поведения контактирующих материалов при изначально низкой температуре внешней среды.

### Заключение

1. Проведены испытания на износ, теплофизические и профилометрические исследования узлов трения с модифицированными порошковыми покрытиями и стальными контртелами при

трении скольжения в условиях холода. Исследования проводились на экспериментальном стенде на базе машины трения СМЦ-2, который имеет теплоизолированную камеру для создания зимой условий низких климатических температур. Испытания на износ покрытий проведены в период зимних низких температур в г. Якутск (декабрь 2020 г., январь и декабрь 2021 г.) при одинаковых режимах трения и различных температурах: комнатной (+24 °С) и низкой климатической (от –43 °С до –45 °С); разница температур составляет ~70 °С.

2. Теплофизическими измерениями узла трения установлено, что изменение температуры состоит из двух качественно различных стадий:

первая короткая стадия (~1–3 мин.) характеризуется быстрым ростом температуры узла трения, это объясняется началом работ сил трения, которые интенсивно нагревают узел трения;

во второй стадии происходит медленное равномерное повышение температуры узла трения. Далее температура постепенно стабилизируется, но при холодном климате температура до 15–20 мин. трения остается в целом ниже, чем при комнатной температуре.

3. Испытаниями на износ установлено, что при температуре –45 °С массовый износ покрытия с корундом  $Al_2O_3$ , практически в два раза выше, чем при комнатной температуре, а массовый износ контртела из стали ШХ25 возрастает незначительно (на ~12 %). Массовый износ покрытия с добавками шпинели  $CoAl_2O_4$  в комнатных условиях на порядок выше, чем при холоде. При этом массовый износ соответствующего контртела из закаленной стали ШХ15 при холодном климате возрастает примерно в ~1,5 раза. Это свидетельствует о большей чувствительности структуры закаленной стали ШХ15 к снижению температуры узла трения.

4. Проведены сравнительные профилометрические исследования контактных поверхностей узлов трения «порошковое покрытие–стальное контртело» при испытаниях на износ в условиях комнатных и низких климатических температур. Параметры шероховатости поверхности трения покрытия с тугоплавкими добавками при комнатной температуре больше, чем при отрицательной температуре. У соответствующего контртела из стали ШХ15 наблюдаются обратные закономерности – параметры шероховатости выше при от-

рицательной температуре. При этом наблюдается большой размах профиля  $R_z$  при низкой климатической температуре  $-45\text{ }^\circ\text{C}$ , это отражает большую чувствительность структуры стали ШХ15 к процессам изнашивания при низкой температуре окружающей среды.

### Литература

1. *Ишлинский А.Ю., Белый В.А.* Развитие науки о трении и износе в СССР // Трение и износ. 1980. Т. 1, № 1. С. 7–12.
2. *Ермолаев С.В., Болдаев А.П.* Прогнозирование износа деталей тяжелых бульдозеров // Колыма. 1981. № 2. С. 24–26.
3. *Ларионов В.П., Ковальчук В.А.* Хладостойкость и износ деталей машин и сварных соединений. Новосибирск: Наука, 1976. 206 с.
4. *Черский И.Н.* О критериях работоспособности и прогнозирования долговечности металлополимерных узлов трения // Трение и износ. 1980. Т. 1, № 6. С. 1021–1026.
5. *Исследование триботехнических систем в условиях холодного климата.* Сборник научных трудов. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1985. 120 с.
6. *Черский И.Н., Мороз В.А.* Прогнозирование долговечности и оптимизация подшипников и уплотнений из полимерных и композитных материалов // Механика композитных материалов. 1980. № 6. С. 1094–1102.
7. *Богатин О.Б., Мороз В.А., Черский И.Н.* Основы расчета полимерных узлов трения. Новосибирск: Наука, 1983. 213 с.
8. *Пернебеков С.С., Балабеков З.А., Асылбек Г.У., Рахимберды Б.К., Манкараева М.А.* Анализ факторов, определяющих интенсивность износа двигателя при низких температурах // Молодой ученый. 2017. № 1 (135). С. 76–77.
9. *Андреева И.А., Хомич А.И.* Пластические свойства и износ материалов при низких температурах // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. Технические науки. С. 5–6.
10. *Gradt T., Schneider T., Hübner W., Börner H.* Friction and wear at low temperatures // International Journal of Hydrogen Energy. 1998. Vol. 23, Iss. 5. P. 397–403. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00070-0](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00070-0)
11. *Ma L., Shi L.B., Guo J., Liu Q.Y., Wang W.J.* On the wear and damage characteristics of rail material under low temperature environment condition // Wear. 2018. Vol. 394–395. P. 149–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.10.011>
12. *Khadem M., Kim Dae-Eun.* Friction and wear behaviors of bare and diamond-like carbon/chromium bilayer coated SKH51 steel at low temperatures // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 412. 127018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127018>
13. *Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белащенко В.Е., Солоненко О.П., Сафиуллин В.А.* Нанесение покрытий плазмой. М.: Наука, 1990. 408 с.
14. *Бороненков В.Н., Коробов Ю.С.* Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2012. 268 с.
15. *Архипов В.Е.* Газодинамическое напыление. Структура и свойства покрытий. М.: Красанд, 2017. 239 с.
16. *Тушинский Л.И., Плохов А.В., Токарев А.О., Синдеев В.И.* Методы исследования материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий. М.: Мир, 2004. 384 с.
17. *Усольцев А.А., Кибко Н.В., Козырев Н.А., Бащенко Л.П., Гусев А.И.* Исследование качества металла, наплавленного порошковыми проволоками системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2018. № 1 (23). С. 4–9.
18. *Капралов Е.В., Райков С.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Ващук Е.С., Иванов Ю.Ф.* Структурно-фазовые состояния и свойства покрытий, наплавленных на поверхность стали порошковыми проволоками // Известия РАН. Серия Физическая. 2014. Т. 78, № 10. С. 1266–1272. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0367676514100093>
19. *Патент 93019989/02* Российская Федерация. Порошковая проволока для получения покрытий; заявл. 14.04.1993; опубл. 20.11.1995, Бюл. № 32. 3 с.
20. *Патент 2040570* Российская Федерация, МПК С22С19/05, С23С4/06. Порошковый материал для газотермического напыления / Болотина Н.П., Милохин С.Е., Ларионов В.П., Виноградов А.В., Стафецкий Л.П., Цилен У.А., Смилга А.А., Лобзов С.Н. // заявитель и патентообладатель Ин-т физико-техн. проблем Севера СО РАН; заявл. 06.07.92; опубл. 25.07.95.
21. *Патент 2042728* Российская Федерация, МПК С22С19/05, С23С4/06. Порошковый материал для газотермического напыления / Болотина Н.П., Милохин С.Е., Ларионов В.П., Виноградов А.В., Стафецкий Л.П., Цилен У.А., Смилга А.А., Лобзов С.Н. // заявитель и патентообладатель Ин-т физико-техн. проблем Севера СО РАН; заявл. 06.05.93; опубл. 27.08.95.
22. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
23. *Трение, изнашивание и смазка: Справочник.* В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисына. М.: Машиностроение, 1978. кн. 1, 2. 400 с.
24. *Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин / В.Д. Зозуля, Е.Л. Шведков, Э.Д. Браун и др.* Киев: Наукова думка, 1990. 264 с.
25. *Каржавин В.В., Зимин А.И.* Трение, износ, смазочные материалы: Учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2003. 83 с.

## ИСПЫТАНИЯ НА ИЗНОС ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

26. Лужнов Ю.М., Калачев Ю.Н., Александров В.Д., Морщилов М.В. Анализ видов изнашивания рабочих поверхностей деталей: учебно-методическое пособие. М.: Изд-во МАДИ, 2018. 48 с.

Поступила в редакцию 22.12.2021

Поступила после рецензирования 17.03.2022

Принята к публикации 20.04.2022

### Об авторах

СТРУЧКОВ Николай Федорович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, e-mail: struchkov\_n@rambler.ru

ЛЕБЕДЕВ Дмитрий Иосифович, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, <https://orcid.org/0000-0003-4176-4771>, e-mail: uranhai@rambler.ru

ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, <https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, e-mail: g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru

### Для цитирования

Стручков Н.Ф., Лебедев Д.И., Винокуров Г.Г. Испытания на износ порошковых покрытий и исследования микрогеометрии поверхностей трения в условиях холода // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 2. С. 305–315. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-305-315>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-2-305-315

## Wear testing of powder coatings and investigations of microgeometry of friction surfaces under cold conditions

N.F. Struchkov\*, D.I. Lebedev, G.G. Vinokurov

*V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia*

*\*struchkov\_n@rambler.ru*

**Abstract.** *Intensive operation of the machinery in the natural and climatic conditions of the North often leads to premature wear of the elements of its friction units. A start-up of the equipment at low temperatures brings repeated thermal expansions of already run-in elements of friction units and changes in their geometric dimensions. An increase in the viscosity of technical lubricants in cold weather also reduces the wear resistance of friction units. The decrease in the resource of working elements and parts of the running system of earth-moving and mining equipment in the North is also due to frozen soils in the permafrost zone. Therefore, the main task of tribology for the technology of the North is the study of friction units of machines and mechanisms operated in cold conditions. The low climatic temperatures effect on the wear processes of materials of friction units, including wear-resistant powder coatings is also a task. We carried out the wear tests of modified powder coatings, profilometric and thermophysical measurements of friction surfaces on a special low-temperature stand during winter in Yakutsk (below  $-40$  °C, December 2020, January and December 2021). We have revealed the regularities of establishing the operating temperature*

*of the friction unit «powder coating–steel counterbody» in the cold. We have also obtained the data of mass wear of coatings and steel counterbodies, roughness parameters of contact surfaces during their sliding friction at low climatic temperatures.*

**Keywords:** wear tests, low climatic temperatures, wear-resistant coating, counterbody, sliding friction, wear, profile

**Acknowledgements.** *The authors are grateful to Konstantin Bolshev for the help in carrying out thermo-physical measurements.*

### References

1. *Ishlinskiy A.Yu., Belyy V.A. Razvitiye nauki o trenii i iznose v SSSR // Treniye i iznos. 1980. Vol. 1, No. 1. P. 7–12.*
2. *Yermolayev S.V., Boldayev A.P. Prognozirovaniye iznosa detaley tyazhelykh bul'dozеров // Kolyma. 1981. No. 2. P. 24–26.*
3. *Larionov V.P., Koval'chuk V.A. Khladostoykost' i iznos detaley mashin i svarnykh soyedineniy. Novosibirsk: Nauka, 1976. 206 p.*
4. *Cherskiy I.N. O kriteriyakh rabotosposobnosti i prognozirovaniya dolgovechnosti metallopolimernykh uzlov treniya // Treniye i iznos. 1980. Vol. 1, No. 6. P. 1021–1026.*
5. *Issledovaniye tribotekhnicheskikh sistem v usloviyakh kholodnogo klimata. Sbornik nauchnykh trudov. Yakutsk: Izd-vo YAF SO AN SSSR, 1985. 120 p.*
6. *Cherskiy I.N., Morov V.A. Prognozirovaniye dolgovechnosti i optimizatsiya podshipnikov i uplotneniy iz polimernykh i kompozitnykh materialov // Mekhanika kompozitnykh materialov. 1980. No. 6. P. 1094–1102.*
7. *Bogatin O.B., Morov V.A., Cherskiy I.N. Osnovy rascheta polimernykh uzlov treniya. Novosibirsk: Nauka, 1983. 213 p.*
8. *Pernebekov S.S., Balabekov Z.A., Asylbek G.U., Rakhimberdy B.K., Mankarayeva M.A. Analiz faktorov, opredelyayushchikh intensivnost' iznosa dvigatelya pri nizkikh temperaturakh // Molodoy uchenyy. 2017. No. 1(135). P. 76–77.*
9. *Andreyeva I.A., Khomich A.I. Plasticheskiye svoystva i iznos materialov pri nizkikh temperaturakh // Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavтики. 2014. Tekhnicheskkiye nauki. P. 5–6.*
10. *Gradt T., Schneider T., Hübner W., Börner H. Friction and wear at low temperatures // International Journal of Hydrogen Energy. 1998. Vol. 23, Iss. 5. P. 397–403. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00070-0](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00070-0)*
11. *Ma L., Shi L.B., Guo J., Liu Q.Y., Wang W.J. On the wear and damage characteristics of rail material under low temperature environment condition // Wear. 2018. Vol. 394–395. P. 149–158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.10.011>*
12. *Khadem M., Kim Dae-Eun. Friction and wear behaviors of bare and diamond-like carbon/chromium bilayer coated SKH51 steel at low temperatures // Surface and Coatings Technology. 2021. Vol. 412. 127018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127018>*
13. *Kudinov V.V., Pekshev P.YU., Belashchenko V.Ye., Solonenko O.P., Safullin V.A. Nanoseniye pokrytiy plazmoy. M.: Nauka, 1990. 408 p.*
14. *Boronkov V.N., Korobov Yu.S. Osnovy dugovoy metallizatsii. Fiziko-khimicheskkiye zakonomernosti. Yekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2012. 268 p.*
15. *Arhipov V.Ye. Gazodinamicheskoye napyleniye. Struktura i svoystva pokrytiy. M.: Krasand, 2017. 239 p.*
16. *Tushinskiy L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sindeyev V.I. Metody issledovaniya materialov: Struktura, svoystva i protsessy nanoseniya neorganicheskikh pokrytiy. M.: Mir, 2004. 384 p.*
17. *Usol'tsev A.A., Kibko N.V., Kozyrev N.A., Bashchenko L.P., Gusev A.I. Issledovaniye kachestva metalla, naplavlennogo poroshkovymi provolokami sistemy Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta. 2018. No. 1 (23). P. 4–9.*
18. *Kapralov Ye.V., Raykov S.V., Budovskikh Ye.A., Gromov V.Ye., Vashchuk Ye.S., Ivanov YU.F. Strukturno-fazovyye sostoyaniya i svoystva pokrytiy, naplavlennykh na poverkhnost' stali poroshkovymi provolokami // Izvestiya RAN. Seriya Fizicheskaya. 2014. Vol. 78, No. 10. P. 1266–1272. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0367676514100093>.*
19. *Patent 93019989/02 Rossiyskaya Federatsiya. Poroshkovaya provoloka dlya polucheniya pokrytiy; zayavl. 14.04.1993; opubl. 20.11.1995, Byul. No. 32. 3 p.*
20. *Patent 2040570 Rossiyskaya Federatsiya, MPK C22C19/05, C23C4/06. Poroshkovyy material dlya gazotermicheskogo napyleniya / Bolotina N.P., Milokhin S.Ye., Larionov V.P., Vinogradov A.V., Stafetskiy L.P., Tsiyelen U.A., Smilga A.A., Lobzov S.N. // zayavitel' i patentoobladatel' In-t fiziko-tekhn. problem Severa SO RAN; zayavl. 06.07.92; opubl. 25.07.95.*
21. *Patent 2042728 Rossiyskaya Federatsiya, MPK C22C19/05, C23C4/06. Poroshkovyy material dlya gazotermicheskogo napyleniya / Bolotina N.P., Milokhin S.Ye., Larionov V.P., Vinogradov A.V., Stafetskiy L.P., Tsiyelen U.A., Smilga A.A., Lobzov S.N. // zayavitel' i patentoobladatel' In-t fiziko-tekhn. problem Severa SO RAN; zayavl. 06.05.93; opubl. 27.08.95.*
22. *Kragel'skiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschetov na treniye i iznos. M.: Mashinostroyeniye, 1977. 526 p.*
23. *Treniye, iznashivaniye i smazka: Spravochnik. V 2-kh kn. / Pod red. I.V. Kragel'skogo, V.V. Alisina. M.: Mashinostroyeniye, 1978. kn. 1, 2. 400 p.*

## ИСПЫТАНИЯ НА ИЗНОС ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ

24. *Slovar'-spravochnik po treniyu, iznosu i smazke detaley mashin* / V.D.Zozulya, Ye.L. Shvedkov, E.D. Braun i dr. Kiyev: Naukova dumka, 1990. 264 p.

25. *Karzhavin V.V., Zimin A.I. Treniye, iznos, smazochnyye materialy: Ucheb. Posobiye. Yekaterinburg: Izd-vo RGPPU, 2003. 83 p.*

26. *Luzhnov Yu.M., Kalachov Yu.N., Aleksandrov V.D., Morshchilov M.V. Analiz vidov iznashivaniya rabochikh poverkhnostey detaley: uchebno-metodicheskoye posobiye. M.: Izd-vo MADI, 2018. 48 p.*

*Submitted 22.12.2021*

*Revised 17.03.2022*

*Accepted 20.04.2022*

### *About the authors*

STRUCHKOV, Nikolay Fedorovich, senior researcher, Cand. Sci. (Eng.), V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia,

<https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, e-mail: [struchkov\\_n@rambler.ru](mailto:struchkov_n@rambler.ru)

LEBEDEV, Dmitriy Iosifovich, researcher, Cand. Sci. (Eng.), V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia,

<https://orcid.org/0000-0003-4176-4771>, e-mail: [uranhai@rambler.ru](mailto:uranhai@rambler.ru)

VINOKUROV, Gennady Georgievich, leading researcher, Cand. Sci. (Eng.), V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Oktyabrskaya st., Yakutsk 677980, Russia,

<https://orcid.org/0000-0003-1454-6293>, e-mail: [g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru](mailto:g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru)

### *For citation*

*Struchkov N.F., Lebedev D.I., Vinokurov G.G. Wear testing of powder coatings and investigations of microgeometry of friction surfaces under cold conditions // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 2. P. 305–315. (In Russ.)* <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-2-305-315>