

УДК 621.762

А.Ф. ИЛЬЮЩЕНКО, чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.

директор¹

E-mail: alexil@mail.belpak.by

А.В. ЛЕШОК, канд. техн. наук, доц.

старший научный сотрудник¹

E-mail: sdilav@tut.by

А.Н. РОГОВОЙ

заведующий лабораторией¹

E-mail: nil-12@inbox.ru

В.В. РЕГИНЯ, канд. техн. наук

инженер-конструктор 1-й категории КБ гидромеханических передач²

E-mail: ugk@belaz.minsk.by

¹Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа, г. Минск, Республика Беларусь²ОАО «БЕЛАЗ» — управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», г. Жодино, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 31.10.2023.

РАЗРАБОТКА СПЕЧЕННОГО ФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ГИДРОТРАНСФОРМАТОРА ГМП САМОСВАЛОВ БЕЛАЗ

Гидротрансформатор предназначен для передачи механической энергии от двигателя через циркулирующий поток жидкости, автоматически бесступенчато изменяет в определенных пределах угловую скорость и передаваемый крутящий момент в зависимости от нагрузки на колеса самосвала. Гидротрансформатор позволяет получить малые скорости движения самосвала с увеличенным тяговым усилием на ведущих колесах, обеспечивает устойчивую работу двигателя при изменении нагрузки, а также способствует снижению динамических нагрузок в трансмиссии самосвала. В работе представлены результаты исследования влияния порошка железохромистого сплава ПХ30 на повышение эксплуатационных свойств спеченного фрикционного материала для применения во фрикционе блокировки гидротрансформатора гидромеханической коробки передач. Это достигается за счет высоких физико-механических свойств ПХ30 и формируемого в процессе спекания слоя Cr_{23}C_6 толщиной до 6 мкм. Установлено, что введение 10–40 об.% порошка ПХ30 способствует повышению коэффициента трения с 0,042 до 0,075, при этом предельное содержание составляет 28 %. На основе полученных данных разработан и запатентован состав композиционного фрикционного материала ФМ-15. Изготовленные фрикционные диски, установленные и эксплуатируемые в гидротрансформаторе гидромеханической коробки передач карьерного самосвала БЕЛАЗ-7555Е грузоподъемностью 60 т, показали высокие эксплуатационные свойства. Разработанный состав фрикционного материала применен также во фрикционах погрузочно-доставочной машины МоАЗ-40751 грузоподъемностью 16 т и машины погрузочно-транспортной шахтной МоАЗ-75851 грузоподъемностью 50 т с электронно-гидравлической системой автоматического управления. Исследование триботехнических свойств осуществлялось на машине трения типа ИМ58. Морфологию поверхности трения изучали на сканирующем электронном микроскопе MIRA (Чехия) с микрорентгеноспектральной приставкой INCA 350 компании Oxford Instruments (Великобритания), фазовый состав — на рентгеновском дифрактометре Ultima IV компании Rigaku (Япония) в SiKa-излучении при напряжении на рентгеновской трубке 40 кВ, анодном токе 40 мА.

Ключевые слова: гидромеханическая коробка передач, фрикционный материал, коэффициент трения, износ, гидротрансформатор, граничная смазка

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-58-64>

Введение. Функциональное назначение гидромеханической передачи (ГМП), применяемой в трансмиссии карьерных самосвалов БЕЛАЗ, заключается в преобразовании параметров потока энергии, передаваемой от двигателя к ведущим колесам самосвала [1, 2].

В состав гидромеханической передачи входят гидродинамическая передача (гидротрансформатор) и многоступенчатая механическая коробка передач. Применение на автомобилях гидродинамических передач способствует увеличению срока службы двигателя и трансмиссии, уменьшению

количества ступеней в механической части трансмиссии, сокращению числа переключений передач, повышению проходимости автомобиля и комфортабельности за счет более плавного изменения момента на ведущих колесах и трогания с места [3–6].

На рисунке 1 *a* приведен внешний вид ГМП самосвала БЕЛАЗ-7555 грузоподъемностью 55–60 т. Гидротрансформатор (ГДТ) установлен на входе в гидромеханическую передачу и является гидродинамической передачей, которая передает механическую энергию от двигателя через циркулирующий поток жидкости и автоматически бесступенчато изменяет в определенных пределах угловую скорость и передаваемый крутящий момент в зависимости от нагрузки на колесах самосвала (см. рисунок 1 *b*). Гидротрансформатор позволяет получить малые скорости движения самосвала с увеличенным тяговым усилием на

ведущих колесах, обеспечивает устойчивую работу двигателя при изменении нагрузки, а также способствует снижению динамических нагрузок в трансмиссии самосвала.

В гидромеханической передаче карьерного самосвала БЕЛАЗ применяется комплексный, одноступенчатый, четырехколесный, блокируемый гидротрансформатор [7, 8]. Крутящий момент, передаваемый от двигателя, гидротрансформатор увеличивает при больших нагрузках, а при малых нагрузках он переходит на режим гидромукты. При переходе на режим гидромукты производится автоматическая блокировка гидротрансформатора посредством включения фрикционной муфты блокировки, в которой установлены четыре ведущих и четыре ведомых диска (см. рисунок 1 *b*). Фрикцион блокировки автоматически выключается и включается при переключении передач в ГМП.

В ГМП серийно выпускаемых самосвалов серии БЕЛАЗ-7555 используются фрикционные диски со спеченным материалом МК-5 [9, 10]. Режимы эксплуатации фрикционного материала во фрикционе блокировки ГДТ являются: максимальное давление на материал — 4,5–6,0 МПа; начальная скорость скольжения — 450 мин⁻¹ (5,2 м/с); время включения фрикциона блокировки — 0,6–1,5 с; удельная работа трения — 154–230 КДж/м² [11]. В процессе эксплуатации самосвалов выявлено повышенное время (до 4...5 с) включения фрикциона ГДТ. Одной из задач, повышающей эффективность работы гидротрансформатора, является уменьшение времени буксования фрикциона блокировки.

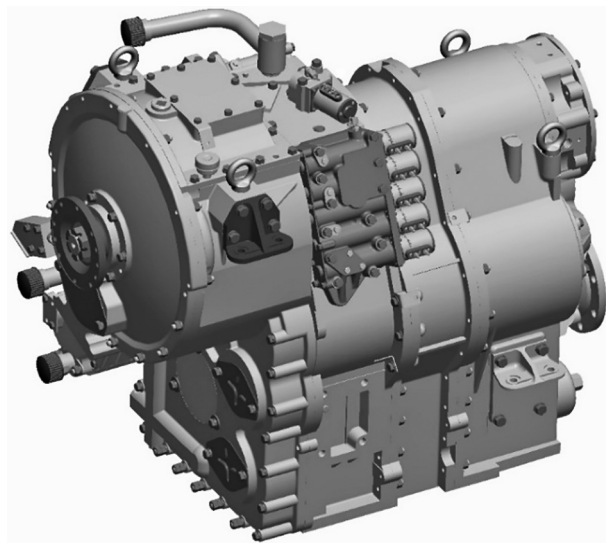
Цель работы — разработка спеченного фрикционного материала на основе меди для фрикциона гидротрансформатора самосвала БЕЛАЗ-7555 грузоподъемностью 55–60 т с повышенными эксплуатационными свойствами.

Материалы и методы исследования. В качестве основы композиционного фрикционного материала использовали оловянистую бронзу, полученную путем спекания порошков меди ПМС-1 со средним размером частиц 45 мкм, имеющих дендритную форму (рисунок 2 *a*), и олова со средним размером частиц 20 мкм (см. рисунок 2 *b*).

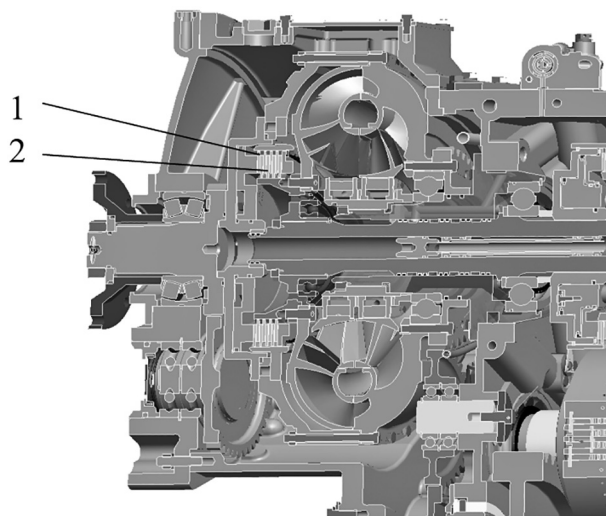
В качестве добавки использовался порошок железохромистого сплава ПХ30 (ГОСТ 13084-88) со средним размером частиц 100 мкм и разветвленной формой (см. рисунок 2 *c*). Содержание хрома в порошке — 28–32 %, хром находился в виде σ -фазы, благодаря чему порошок имел высокую твердость и хрупкость. Порошок ПХ30 вводился в основу фрикционного материала в количестве 10–40 % с интервалом варьирования 5 %.

В качестве углеродсодержащей добавки использовался порошок графита элементного марки ГЭ-1 (см. рисунок 2 *d*).

Шихту материала получали смешиванием исходных порошков в лопастном смесителе в течение 50 мин.

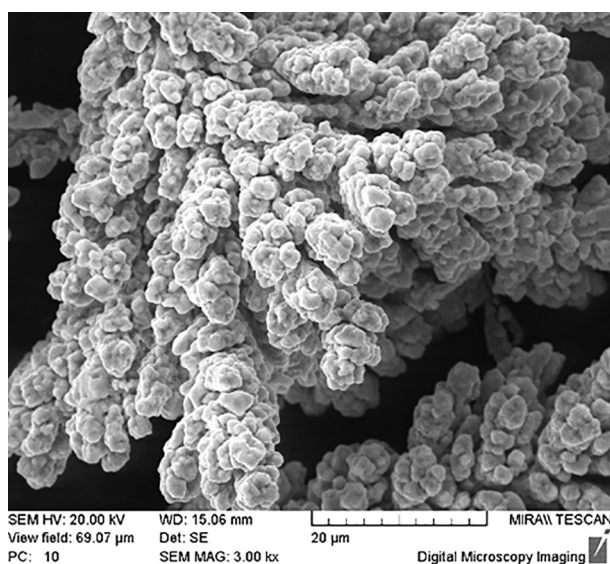


a

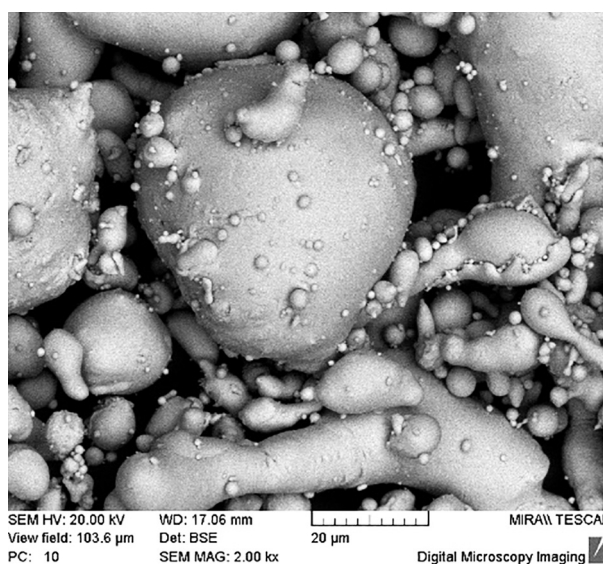


b

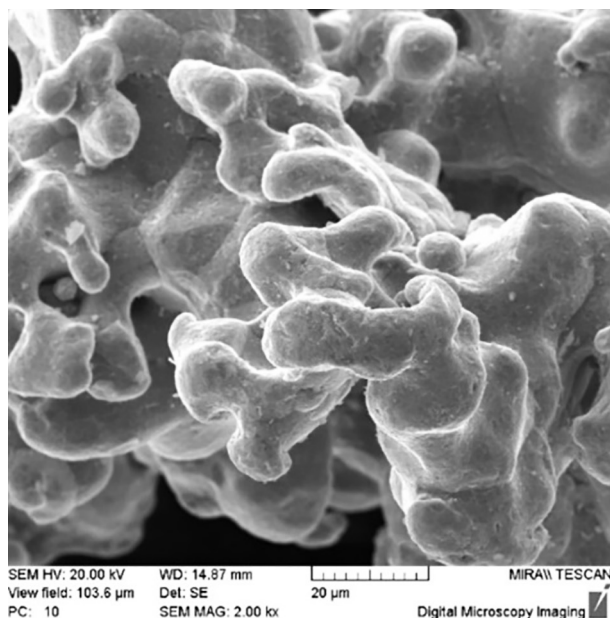
Рисунок 1 — Внешний вид ГМП (*a*), гидротрансформатора (*b*) самосвала БЕЛАЗ-7555: 1 — ведущий диск; 2 — ведомый диск
Figure 1 — External view of hydromechanical transmission (*a*), torque converter (*b*) of dump truck BELAZ-7555: 1 — driving disc; 2 — driven disc



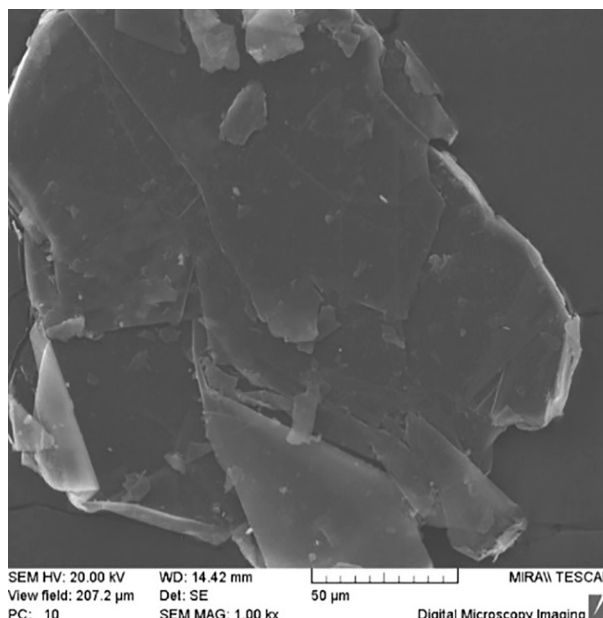
a



b



c



d

Рисунок 2 — Форма частиц порошков: *a* — ПМС-1; *b* — ПО-1; *c* — ПХ30; *d* — ГЭ-1
 Figure 2 — Particle shape of powders: *a* — ПМС-1 (PMS-1); *b* — ПО-1 (PO-1); *c* — РКх30; *d* — ГЭ-1 (GE-1)

Образцы фрикционных дисков для испытаний изготавливали следующим образом: полученную смесь исходных порошков методом свободной насыпки наносили на поверхность стальной основы с помощью специальной технологической оснастки, затем проводили предварительное спекание в защитно-восстановительной атмосфере эндогаза при температуре 840 °С в течение 50 мин. Спеченную заготовку подвергали пластической деформации (чеканке) пуансоном, имеющим на поверхности профиль в виде «сетки», для формирования на поверхности спеченного материала системы маслоотводящих каналов и пазов и получения пористости 12–18 %, после чего вторично спекали под давлением 0,1 МПа в атмосфере эндогаза при температуре 840 °С в течение 3 ч.

Исследование триботехнических свойств осуществлялось на машине трения типа ИМ58 при следующих режимах:

- начальная скорость торможения — 10 м/с;
- удельная нагрузка — 4,0 МПа;
- момент инерции маховых масс — 0,56 Н·м·с²;
- работа трения — 27,5 кДж.

В качестве контртела использовали диск из стали 65Г твердостью 260–320 НВ и шероховатостью рабочей поверхности Ra 0,7–0,8.

Исследование структуры осуществляли с помощью оптического микроскопа MEF-3 (Австрия). Морфологию поверхности трения фрикционного диска и его микроструктуру изучали на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения MIRA (Чехия) с микрорентгеноспек-

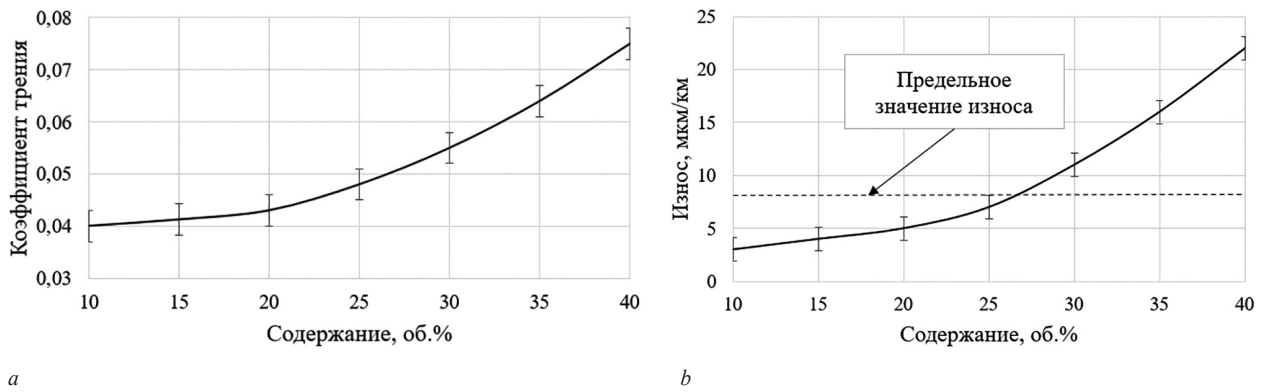


Рисунок 3 — Влияние порошка железо-хромистого сплава ПХ30 в составе композиционного фрикционного материала на основе меди на триботехнические свойства: *a* — коэффициент трения; *b* — износ
 Figure 3 — Influence of powder of iron-chromium alloy PKh30 in the composition of composite friction material based on copper on tribotechnical properties: *a* — friction coefficient; *b* — wear

тральной приставкой INCA 350 компании Oxford Instruments (Великобритания). Фазовый состав исследовался на рентгеновском дифрактометре Ultima IV компании Rigaku (Япония) в $\text{CuK}\alpha$ -излучении при напряжении на рентгеновской трубке 40 кВ, анодном токе 40 мА. Параметры кристаллической решетки сплавов определялись по дифракционным линиям, расположенным на больших углах рассеяния. Для фазового анализа использовалась стандартная картотека PDF.

Результаты исследований и их обсуждение. Экспериментальные работы показали, что использование порошка ПХ30 позволяет не только увеличить значение коэффициента трения, но и стабилизировать его значение. Так, в интервале 10–20 об.% значение коэффициента трения увеличилось с 0,042 до 0,046 (рисунок 3 *a*), а в интервале 20–40 % — с 0,046 до 0,074.

С увеличением содержания ПХ30 отмечается рост износа фрикционного материала, который в интервале 10–25 об.% не превысил 7 мкм/км. Дальнейшее увеличение содержания добавки приводит к существенному росту износа, носящего катастрофический характер при содержании более 28 об.% (см. рисунок 3 *b*).

Металлографические исследования показали, что после спекания на поверхности частицы ПХ30 формируется переходный слой переменной толщины, максимальный размер которого 4 мкм (рисунок 4 *a*). Результаты микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) показали, что в слое присутствует медь, олово (см. рисунок 4 *b*). Это позволило сделать предположение о возможности формирования интерметаллидов Fe_xSn_y переменной состава.

Анализ морфологии частиц ПХ30 показал, что после спекания на поверхности образуются округлые светлые включения размером до 1 мкм, концентрация которых увеличивается ближе к частице графита с возможным их объединением, а МРСА частиц показал, что в них содержится хром, железо и углерод (рисунок 5). Это может являться сфор-

мированной в процессе спекания карбидной фазой, что согласуется с данными работы [12].

Рентгенофазовый анализ показал, что карбиды имеют состав, соответствующий формуле Cr_{23}C_6 .

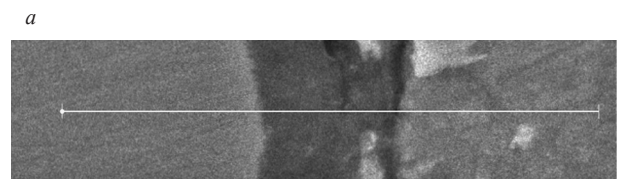
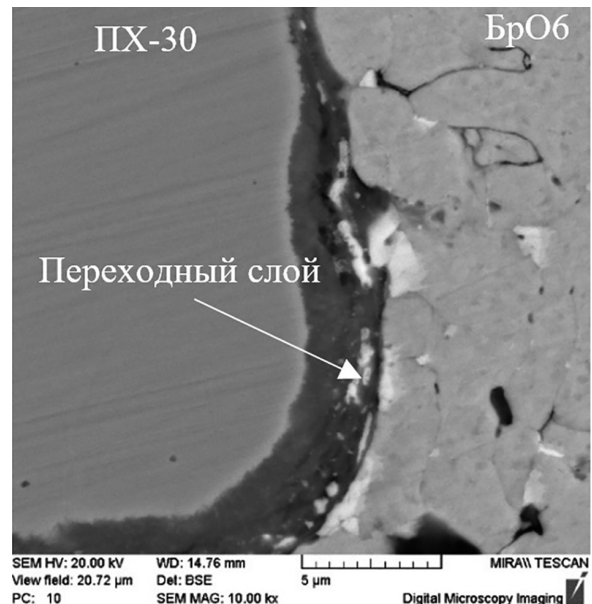


Рисунок 4 — Слой на поверхности ПХ30 (*a*) и результаты его микрорентгеноспектрального анализа (*b*)
 Figure 4 — Layer on the surface of PKh30 (*a*) and results of its micro-X-ray spectral analysis (*b*)

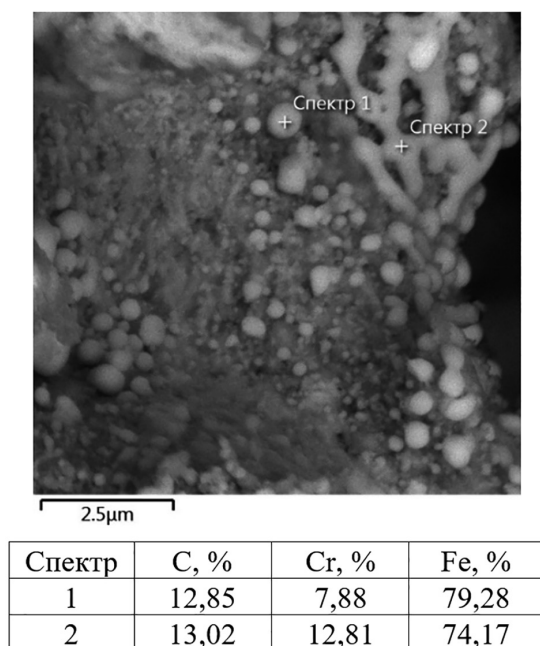


Рисунок 5 — Частицы на поверхности ПХ30 и результаты МРСА

Figure 5 — Particles on the surface of PKh30 and micro-X-ray spectral analysis results

Это согласуется с результатами работы [13], в которой авторы показали, что, при наличии хрома, железа и углерода, последний в большей степени взаимодействует с хромом, образуя карбиды.

Исследование морфологии поверхности трения фрикционного материала указало на наличие внедрившихся микрочастиц карбида хрома, модифицирующих поверхность трения (рисунок 6). Это позволило сделать вывод, что на изменение триботехнических свойств пары трения оказывает влияние не только применение железохромистого сплава ПХ30 в составе фрикционного материала, а также формирование модифицированного слоя керамическими частицами.

Путем оптимизации был разработан состав фрикционного материала ФМ-15 [14]. Диски ведомые 40751-1711484 (рисунок 7) с разработанным составом фрикционного материала проходили эксплуатационные испытания на РУПП «Гранит» на карьерном самосвале БЕЛАЗ-7555Е грузоподъ-

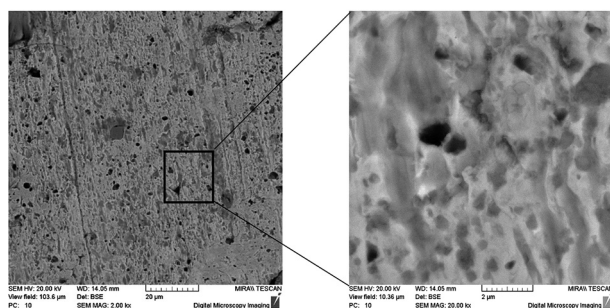


Рисунок 6 — Морфология поверхности трения фрикционного материала после 100 циклов испытаний

Figure 6 — Friction surface morphology of friction material after 100 test cycles

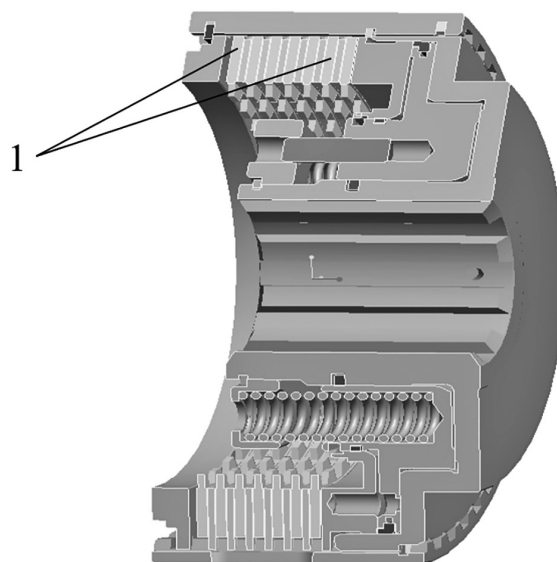


Рисунок 7 — Фрикцион гидромеханической передачи:
1 — ведомые диски 40751-1711484

Figure 7 — Hydromechanical transmission friction clutch:
1 — driven discs 40751-1711484

емностью 60 т с гидромеханической передачей. Результаты испытаний показали высокие эксплуатационные свойства, эффективность управления. Нарботка фрикционных дисков составила более 150 тыс. км пробега машины при сохранении эффективности управления.

Диски ведомые 40751-1711484 также были установлены во фрикционах гидромеханических передач опытно-промышленной партии машин погрузочно-доставочных МоАЗ-40751 грузоподъемностью 16 т и машин погрузочно-транспортных шахтных МоАЗ-75851 грузоподъемностью 50 т с электронно-гидравлической системой автоматического управления, которые прошли приемочные испытания.

Закключение. Установлено, что использование порошка железохромистого сплава ПХ30 позволило увеличить и стабилизировать коэффициент трения фрикционного материала. В интервале 10–20 об.% значение коэффициента трения увеличилось с 0,042 до 0,046, при 20–40 % — с 0,046 до 0,074. С увеличением содержания ПХ30 отмечается рост износа фрикционного материала, который в интервале 10–25 об.% не превысил 7 мкм/км. Дальнейшее увеличение содержания добавки приводит к существенному росту износа, носящего катастрофический характер.

Разработан состав фрикционного материала на основе меди с добавкой порошка ПХ30 под обозначением ФМ-15. Диски ведомые 40751-1711484 с разработанным составом фрикционного материала прошли эксплуатационные испытания на карьерном самосвале БЕЛАЗ-7555Е грузоподъемностью 60 т с гидромеханической передачей; погрузочно-доставочной машине МоАЗ-40751 грузоподъемностью 16 т и машине погрузочно-транспортной шахтной МоАЗ-75851 грузоподъемно-

стью 50 т с электронно-гидравлической системой автоматического управления.

Список литературы

1. Региня, В.В. Комплексная система диагностирования технического состояния гидромеханической передачи с мехатронной системой управления самосвалов БелАЗ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / В.В. Региня; Бел.-Рос. ун-т. — Минск, 2018. — 23 с.
2. Шарипов, В.М. О величине момента трения фрикционного сцепления при разгоне автомобиля или тракторного агрегата с места / В.М. Шарипов, М.И. Дмитриев, Е.В. Климова // Изв. МГТУ «МAMI». — 2017. — Т. 11, № 2. — С. 78–83. — DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66930>.
3. Тарасик, В.П. Теория движения автомобиля: учеб. для вузов / В.П. Тарасик. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 478 с.
4. Альгин, В.Б. Ресурсная механика трансмиссий мобильных машин / В.Б. Альгин, С.Н. Поддубко. — Минск: Бел. навука, 2019. — 549 с.
5. Красневский, Л.Г. Современная теория и техника управления гидромеханическими передачами мобильных машин / Л.Г. Красневский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол. Д.А. Дюжев [и др.]. — Минск, 2013. — Вып. 2. — С. 53–62.
6. Белабенко, Д.С. Тенденции развития исполнительных механизмов и алгоритмов управления гидромеханическими передачами / Д.С. Белабенко // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол. С.Н. Поддубко [и др.]. — Минск, 2017. — Вып. 6. — С. 106–117.
7. Тарасик, В.П. Фрикционные муфты автомобильных гидромеханических передач / В.П. Тарасик. — Минск: Наука и техника, 1973. — С. 320.
8. Региня В.В. Гидромеханические передачи самосвалов БЕЛАЗ: конструктивные особенности систем автоматического управления и диагностирования // Горный журнал. — 2013. — № 1. — С. 69–74.
9. Исследование ведомых дисков ГМП БЕЛАЗ с новым маслом LZ G-Base и фрикционными материалами ФМ-15 и МК-5 / В.В. Региня [и др.] // Изв. МГТУ «МAMI». — 2018. — Т. 12, № 1. — С. 24–32. — DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66834>.
10. Ильющенко, А.Ф. Исследование триботехнических свойств фрикционного материала МК-5 для гидромеханической передачи БелАЗ, полученного по технологии свободно насыпанного слоя / А.Ф. Ильющенко, А.В. Лешок, О.А. Шаповалова // Трение и износ. — 2012. — Т. 33, № 5. — С. 500–507.
11. Диагностирование гидромеханических передач: моногр. / Н.Н. Горбатенко [и др.]; под общ. ред. В.П. Тарасика. — Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2010. — 510 с.
12. Механизм фазообразования и особенности механохимического синтеза карбида хрома / О.Н. Приписнов [и др.] // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. — 2014. — № 3. — С. 8–15. — DOI: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2014-3-8-15>.
13. Триботехнические свойства порошкового фрикционного материала на основе меди с добавкой порошка железо-хромистого сплава / А.В. Лешок [и др.] // Трение и износ. — 2021. — Т. 42, № 1. — С. 5–12.
14. Изделия фрикционные порошковые. Технические условия: ТУ ВУ 100219793.431-2015. — Введ. 24.09.2015. — Минск: Ин-т порошок. метал. имени акад. О.В. Романа, Госстандарт, 2015. — 25 с.
15. Использование влияния порошка железо-хромистого сплава ПХ-30 в составе фрикционного материала на основе меди для ведомых дисков гидромеханической передачи погрузочно-доставочной машины МОАЗ-40751 / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: мат. 14-й Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 60-летию порошковой металлургии Беларуси, Минск, 9–11 сент. 2020 г. — Минск, 2020. — С. 195–199.

ILYUSHCHANKA Alexander Ph., Corresponding Member of the NAS of Belarus, D. Sc. in Eng., Prof.

Director¹

E-mail: alexil@mail.belpak.by

LIASHOK Andrei V., Ph. D. in Eng., Assoc. Prof.

Senior Researcher¹

E-mail: sdilav@tut.by

ROGOVOY Alexander N.

Head of the Laboratory¹

E-mail: nil-12@inbox.ru

REGINYA Vladimir V., Ph. D. in Eng.

First Category Design Engineer of the Design Bureau of Hydromechanical Transmissions²

E-mail: ugc@belaz.minsk.by

¹State Scientific Institution “Powder Metallurgy Institute”, Minsk, Republic of Belarus

²OJSC “BELAZ” — Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Republic of Belarus

Received 31 October 2023.

DEVELOPMENT OF SINTERED FRICTION MATERIAL FOR THE HYDROMECHANICAL TRANSMISSION TORQUE CONVERTER OF BELAZ DUMP TRUCKS

The torque converter is designed to transmit mechanical energy from the engine through a circulating fluid flow and automatically steplessly changes, within certain limits, the angular speed and transmitted torque depending on the load on the dump truck wheels. The torque converter makes it possible to achieve low speeds of the dump truck with increased traction on the drive wheels, ensures stable engine operation when the load changes, and also helps reduce dynamic loads in the dump truck transmission. The paper presents

the results of a study of the effect of iron-chromium alloy powder ПХ30 (PKh30) on increasing the performance properties of sintered friction material for use in the torque converter locking clutch of a hydromechanical transmission. This is achieved due to the high physical and mechanical properties of PKh30, and the Cr_{23}C_6 layer formed during the sintering process with a thickness of up to 6 μm . It is established that the introduction of 10–40 vol.% of PKh30 powder helps to increase the friction coefficient from 0.042 to 0.075, with the maximum content being 28 %. Based on the data obtained, the composition of the composite friction material ФМ-15 (FM-15) was developed and patented. The manufactured friction discs, installed and operated in the hydromechanical transmission torque converter of the BELAZ-7555E mining dump truck with a load capacity of 60 tons, showed high performance properties. The developed composition of the friction material is also used in the friction clutches of the loading and hauling machine MoAZ-40751 with a load capacity of 16 tons and the loading and transport mine machine MoAZ-75851 with a load capacity of 50 tons with an electronic-hydraulic automatic control system. The study of tribological properties was carried out on a friction machine ИМ 58 (IM 58). The morphology of the friction surface was studied on a scanning electron microscope MIRA (Czech Republic) with an INCA 350 micro-X-ray spectral attachment from Oxford Instruments (United Kingdom). Phase composition was determined on an Ultima IV X-ray diffractometer of Rigaku Company (Japan) in $\text{CuK}\alpha$ radiation at an X-ray tube voltage of 40 kV, anode current of 40 mA.

Key words: hydromechanical transmission, friction material, friction coefficient, wear, torque converter, boundary lubrication

DOI: <https://doi.org/10.46864/1995-0470-2024-1-66-58-64>

References

- Reginya V.V. *Kompleksnaya sistema diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya gidromekhanicheskoy peredachi s mekhatronnoy sistemoy upravleniya samosvalov BelAZ*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Comprehensive system for diagnosing the technical condition of a hydromechanical transmission with a mechatronic control system for BelAZ dump trucks. Extended abstract of Ph. D. thesis]. Minsk, 2018. 23 p. (in Russ.).
- Sharipov V.M., Dmitriev M.I., Klimova E.V. O velichine momenta treniya friktsionnogo stsepleniya pri razgone avtomobilya ili traktornogo agregata s mesta [The magnitude of frictional clutch moment during the start acceleration of automobile or tractor]. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2017, vol. 11, no. 2, pp. 78–83. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66930> (in Russ.).
- Tarasik V.P. *Teoriya dvizheniya avtomobilya* [Theory of car movement]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2006. 478 p. (in Russ.).
- Algin V.B., Poddubko S.N. *Resurnaya mekhanika transmis-siy mobilnykh mashin* [Lifetime mechanics of mobile machine transmissions]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2019. 549 p. (in Russ.).
- Krasnevskiy L.G. *Sovremennaya teoriya i tekhnika upravleniya gidromekhanicheskimi peredachami mobilnykh mashin* [Modern theory and technique of control of hydromechanical transmissions of mobile machines]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2013, iss. 2, pp. 53–62 (in Russ.).
- Belabenko D.S. *Tendentsii razvitiya ispolnitelnykh mekhanizmov i algoritmov upravleniya gidromekhanicheskimi peredachami* [Trends in the development of actuators and control algorithms for hydromechanical transmissions]. *Aktualnye voprosy mashinovedeniya*, 2017, iss. 6, pp. 106–117 (in Russ.).
- Tarasik V.P. *Friktsionnye mufty avtomobilnykh gidromekhanicheskikh peredach* [Friction clutches of automotive hydromechanical gears]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1973. 320 p. (in Russ.).
- Reginya V.V. *Gidromekhanicheskie peredachi samosvalov BELAZ: konstruktivnye osobennosti sistem avtomaticheskogo upravleniya i diagnostirovaniya* [Hydromechanical transmissions of BELAZ dump trucks: design features of automatic control and diagnostic systems]. *Gornyy zhurnal*, 2013, no. 1, pp. 69–74 (in Russ.).
- Reginya V.V., Il'yushchenko A.F., Leshok A.V., Rogovoy A.N., Gryazev D.A., Petrov V.A. *Issledovanie vedomykh diskov GMP BELAZ s novym maslom LZ_G-Base i friktsionnymi materialami FM-15 i MK-5* [Investigation of the driven disks of hydromechanical transmission BELAZ with the new LZ_G-Base oil and the friction materials FM-15 and MK-5]. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2018, vol. 12, no. 1, pp. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-66834> (in Russ.).
- Il'yushchenko A.F., Leshok A.V., Shapovalova O.A. *Issledovanie tribotekhnicheskikh svoystv friktsionnogo materiala MK-5 dlya gidromekhanicheskoy peredachi BelAZ, poluchennogo po tekhnologii svobodno nasypannogo sloya* [Study of tribological behavior of metal-ceramic friction material MK-5 obtained by freely spread layer technique for hydromechanic transmissions]. *Friction and wear*, 2012, vol. 33, no. 5, pp. 500–507 (in Russ.).
- Gorbatenko N.N., et al. *Diagnostirovanie gidromekhanicheskikh peredach* [Diagnosis of hydromechanical transmissions]. Mogilev, Belorussko-Rossiyskiy universitet Publ., 2010. 511 p. (in Russ.).
- Pripisnov O.N., Shelekhov E.V., Rupasov S.I., Medvedev A.S. *Mekhanizm fazoobrazovaniya i osobennosti mekhanokhimicheskogo sinteza karbida khroma* [The mechanism of phase formation and peculiarities of mechanochemical synthesis of chromium carbide]. *Powder metallurgy and functional coatings*, 2014, no. 3, pp. 8–15. DOI: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2014-3-8-15> (in Russ.).
- Leshok A.V., Ilyushchanka A.P., Dyachkova L.N., Pinchuk T.I. *Tribotekhnicheskie svoystva poroshkovogo friktsionnogo materiala na osnove medi s dobavkoy poroshka zhelezo-khromistogo splava* [Tribotechnical properties of a copper-based powder friction material with the addition of iron-chromium alloy powder]. *Friction and wear*, 2021, vol. 42, no. 1, pp. 5–12 (in Russ.).
- TU BY 100219793.431-2015. *Izdeliya friktsionnye poroshkovye. Tekhnicheskie usloviya* [Friction powder products. Technical conditions]. Minsk, Institut poroshkovoy metallurgii imeni akademika O.V. Romana Publ., Gosstandart Publ., 2015. 25 p. (in Russ.).
- Ilyushchanka A.P., Leshok A.V., Rogovoy A.N., Pinchuk T.I., Reginya V.V. *Ispolzovanie vliyaniya poroshka zhelezo-khromistogo splava PKh-30 v sostave friktsionnogo materiala na osnove medi dlya vedomykh diskov gidromekhanicheskoy peredachi pogruzochno-dostavochnoy mashiny MOAZ-40751* [Using the effect of iron-chromium alloy powder PKh-30 as part of a copper-based friction material for driven discs of the hydromechanical transmission of the MOAZ-40751 loading and delivery machine]. *Materialy 14 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu poroshkovoy metallurgii Belarusi "Novye materialy i tekhnologii: poroshkovaya metallurgiya, kompozitsionnye materialy, zashchitnye pokrytiya, svarka"* [Proc. 14th International scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of the powder metallurgy of Belarus "New materials and technologies: powder metallurgy, composite materials, protective coatings, welding"]. Minsk, 2020, pp. 195–199 (in Russ.).