



ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

УДК 629.3

О.А. ШАПОВАЛОВА, канд. техн. наук
Белорусский автомобильный завод, г. Жодино

А.В. ЛЕШОК

Молодечненский завод порошковой металлургии, Республика Беларусь

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ ФРИКЦИОНОВ ГМП И ПУТИ ИХ СНИЖЕНИЯ

Определены основные отказы гидромеханической передачи БелАЗ; описана конструкция фрикционов ГМП, а также виды и причины их отказов. Рассмотрены пути решения проблемы повышения долговечности фрикционов предприятием-изготовителем.

Ключевые слова: фрикцион, гидромеханическая передача, отказы фрикционов, фрикционные диски

Введение. На карьерных самосвалах, имеющих дизельные двигатели мощностью 300...800 кВт, широкое применение получили гидромеханические передачи (ГМП) [1]. Ведущими производителями большегрузных самосвалов с ГМП являются: ОАО «БелАЗ», компании Caterpillar [2], Komatsu [3], Hitachi-Euclid [4] и Terex [5]. В последнее время появились и новые фирмы: Astra, Perlini, Aveling Barford [6]. При движении самосвала ГМП обеспечивает изменение тягового усилия на ведущих колесах автомобиля в зависимости от дорожных условий и изменение направления хода; облегчение труда водителя за счет освобождения его от манипуляций педалью сцепления; повышение безопасности движения за счет снижения утомляемости водителя и облегчения условий его труда; повышение безотказности и долговечности двигателя и механической части трансмиссии за счет значительного снижения ударных нагрузок (особенно на режимах разгона и трогания с места) путем отсоединения двигателя от трансмиссии при его пуске и работе двигателя при остановке самосвала. К недостаткам гидромеханической передачи можно отнести более сложную конструкцию по сравнению с механической, повышенные массу и стоимость.

Особенности конструкции. Карьерные самосвалы грузоподъемностью от 30 до 60 тонн, погрузчики, специальные транспортные средства производства Белорусского автомобильного завода (БелАЗ), а также самосвалы и машины Могилевского автомобильного завода (МоАЗ) комплектуются гидромеханической передачей. Гидромеханическая передача представляет собой единый агрегат, состоящий из согласующей передачи (компоновочного редуктора) (не во всех моделях ГМП), гидротрансформатора, коробки передач, гидродинамического тормоза-замедлителя и узлов гидравлической системы. Коробка

передач ГМП — вальная с прямозубыми шестернями постоянного зацепления. В зависимости от функции и расположения, шестерни коробки передач соединены неподвижно с валами или установлены на подшипниках. В качестве элементов управления в ГМП применяются работающие в масле многодисковые фрикционы. Переключение ступеней осуществляется посредством фрикционов, блокирующих соответствующие шестерни коробки передач с валами.

На рисунке 1 показана конструкция серийного фрикциона ГМП карьерного самосвала БелАЗ-7555 грузоподъемностью 55—60 тонн.

Пакет, состоящий из ведущих (20) (фрикционных) и ведомых (21) (промежуточных) дисков, расположен между жестко закрепленным упорным диском (19) и диском нажимным (11) гидроцилиндра управления. Ведомые диски (21) установлены на шлицах ступицы ведущего колеса передачи (на рисунке не показано) коробки передач, а ведущие диски (20) установлены на шлицах венца (13) барабана фрикциона (4). В момент включения фрикциона под действием усилия, передаваемого от гидравлического поршня (3), происходит осевое сжатие пакета, в результате чего диски сжимаются и блокируют шестерню с валом — происходит включение ступени коробки передач.

Расположение фрикционов в ГМП карьерного самосвала БелАЗ-7555 показано на рисунке 2.

Протекание процесса включения фрикциона обусловлено его конструктивными особенностями и характеристиками системы управления. Изменением момента трения фрикциона можно управлять специальными гидравлическими устройствами плавного включения фрикционов. Этот способ снижения динамических нагрузок является наиболее доступным и эффективным и поэтому широко применяется в конст-

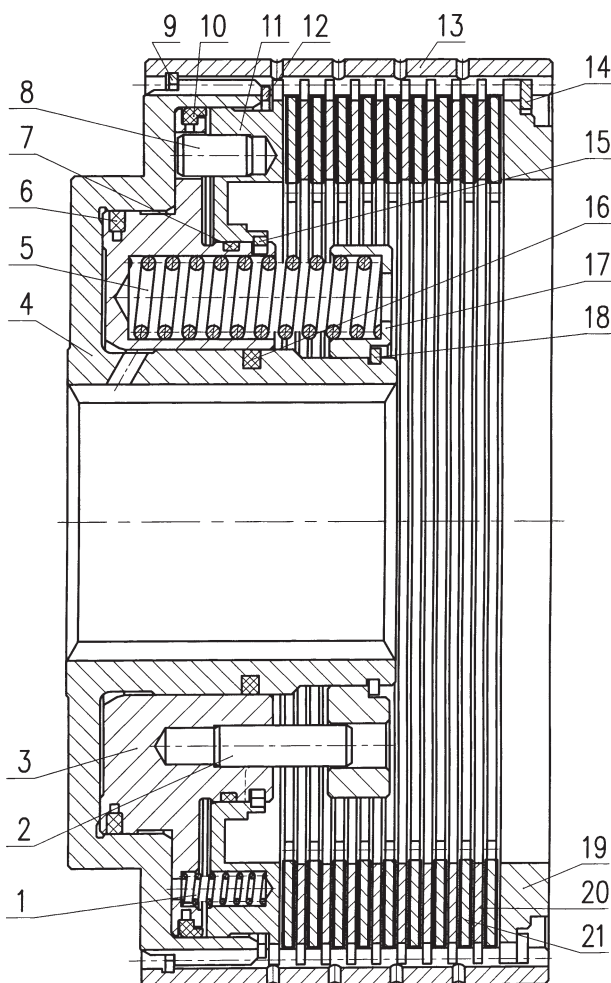


Рисунок 1 — Схема серийного фрикциона для ГМП карьерных самосвалов «БелАЗ» грузоподъемностью 55–60 тонн:
 1 — пружина нажимного диска; 2, 8 — штифты; 3 — поршень;
 4 — барабан; 5 — пружина отжимная; 6, 7, 10, 16 — кольца уплотнительные; 9, 14, 18 — кольца опорные; 11 — диск нажимной; 12, 15 — кольца стопорные; 13 — венец барабана;
 17 — опора пружин; 19 — диск упорный; 20 — диск ведущий;
 21 — диск ведомый

рукторской практике. Наиболее часто используются механизмы плавного включения золотникового типа. Эти механизмы регулируют давление рабочей жидко-

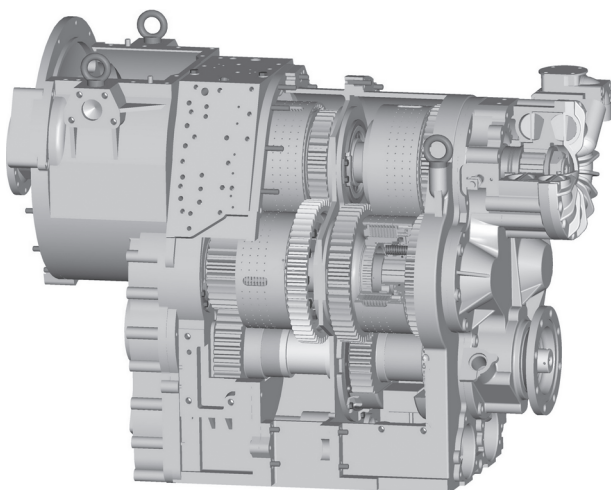


Рисунок 2 — Расположение фрикционов в ГМП карьерного самосвала БелАЗ-7555

сти в каналах подвода к гидравлическим исполнительным цилиндрам фрикционов или же непосредственно в самих цилиндрах, обеспечивая определенную закономерность изменения усилия сжатия дисков в процессе буксования фрикциона. Фрикцион ГМП БелАЗ имеет встроенный в поршень клапан плавного включения. Вопросы расчета и проектирования клапанов плавного включения детально рассмотрены в монографии [7]. Там же приведены многочисленные примеры конструктивного их исполнения.

Однако, как показывает опыт, гидравлические механизмы плавного включения фрикционных муфт с жесткой детерминированной характеристикой не могут в полной мере удовлетворять современным требованиям к качеству процесса переключения передач в различных условиях эксплуатации. Системы с «жесткой логикой» не могут адаптироваться к неизбежному изменению характеристик ГМП в эксплуатации. Это приводит к осложнениям, вызываемым дрейфом момента сжатия пакета дисков по мере уменьшения его толщины вследствие износа. А этот момент служит границей двух основных фаз процесса, в которых работают разные законы управления. Сложно обеспечить плавное (с небольшим динамическим моментом) переключение ступеней при значительном различии статического и динамического коэффициентов трения фрикционных пар. По этой причине в настоящее время существует тенденция отказа от устройств плавного включения фрикционных муфт. Это связано также с необходимостью упрощения конструкции коробки и снижения ее стоимости. Все дополнительные гидравлические элементы, такие как устройства плавного включения или гидроаккумуляторы усложняют конструкцию, увеличивают габариты и металлоемкость КП, а, следовательно, и ее стоимость.

Наиболее полное выполнение требований по качеству процессов переключения передач может быть достигнуто при использовании электрогидравлических пропорциональных клапанов включения фрикционных муфт коробки передач, управляемых микропроцессорным контроллером [8].

Так же требования по плавности включения трансмиссий реализуются за счет уменьшения разницы между коэффициентами статического и динамического трения материалов, а также путем создания структуры фрикционного материала, снижающего вероятность перехода от жидкостного режима трения к трению без смазочного материала [9].

Фрикционы ГМП являются наиболее ответственным элементом гидромеханической передачи большегрузного самосвала, лимитирующим его срок службы и надежность. Поэтому задача улучшения плавности включения фрикциона для обеспечения работоспособности и повышения его долговечности чрезвычайно важна.

Анализ отказов фрикционов. ГМП является агрегатом автомобиля, во многом определяющим его технико-эксплуатационные характеристики и конкурентоспособность. Для снижения простоев, связанных с ремонтом ГМП, важно разобраться с причинами и факторами, снижающими надежность ГМП. Возникновение отказов ГМП является следствием развития дефектов под воздействием среды либо ее некачественной эксплуатации. Анализ отказов дает возможность выявить наиболее встречаемые повреждения, что позволяет оценить их значимость и принять меры по недо-

пущению их появления либо дальнейшего развития в процессе эксплуатации. Для оценки надежности ГМП самосвалов БелАЗ, эксплуатирующихся в условиях карьера, проведен анализ отказов по характеру повреждений гидромеханических передач, эксплуатирующихся в гарантийный период по данным 2005—2010 гг.

Отказы были классифицированы по 10 наименованиям. На рисунке 3 представлены наиболее значительные отказы. Повреждения, массовая доля которых в общем количестве отказов незначительна, были выделены в группу 10.

Как видно из полученных результатов анализа, наблюдается относительная стабильность по следующим группам отказов: фрикцион (1), гидравлика (4), валы (5). Динамика же снижения отказов по тормозу-замедлителю (2) обусловлена совершенствованием конструкции крепления корпуса тормоза-замедлителя с целью исключения разрушения шпилек крепления. Снижение отказов по креплению шестерни к барабану диапазонного фрикциона (8) также связана с изменением конструкции крепления, что позволило полностью исключить отказы по донной группе. Что касается резкого увеличения числа отказов по подшипникам (7) по данным 2010 года, то это объясняется качеством одного из типоразмеров подшипников коробки передач, поставляемого в данный период времени. В настоящее время ведется замена поставщика данного подшипника. По браку железа (6) процент отказов невелик и не имеет какой-либо явно выраженной закономерности, т.к. он связан, прежде всего, с процессом производства сложных литых заготовок картерных деталей, то есть является дефектом металлургического производства. Динамика отказов по резьбовым соединениям (3) (в большинстве случаев это обрыв болтов) обусловлена изменениями в технологии изготовления резьбы. Разрушение шестерен происходит вследствие износа и раковин на рабочей поверхности зуба. С целью снижения отказов, связанных с разрушением шестерен (9), ведутся работы по замене марки материала и повышению степени точности шестерен.

Таким образом, проведенный анализ отказов показал, что наиболее многочисленными и стабильными повреждениями гидромеханических передач, эксплуатируемых в гарантийный период, являются отказы по фрикционам, а именно, отказ фрикционов по дискам, вследствие их разрушения, спекания, коробления и износа. Отказы фрикционов, обусловленные разрушением других деталей фрикциона (венец, поршень, пружина клапана плавного включения, ступица) имеют разовый характер.

Фрикционы в процессе включения воспринимают статические и динамические нагрузки, их поверхности

трения подвергаются воздействию большой удельной тепловой энергии и интенсивному изнашиванию. Максимальное удельное давление на поверхности дисков для некоторых режимов работы ГМП может достигать 6 МПа. Наиболее характерными дефектами дисков фрикциона, которые имеют место в процессе эксплуатации гидромеханических передач, являются: коробление, отслоение металлокерамического слоя, чрезмерный износ, разрушение стальной основы (рисунок 4) [10].

Можно выделить следующие причины возникновения отказов фрикционов ГМП по дискам:

1. Повышенное буксование фрикциона при включении, что приводит к высокому тепловыделению на поверхности дисков с их последующей деформацией. В этом случае выход из строя фрикциона происходит вследствие необратимой деформации дисков ведущих (стальных), после чего происходит пробуксовывание дисков во фрикционе, их разогрев и разрушение.

Повышенное буксование фрикциона, как причина необратимой деформации дисков, может произойти при пониженном уровне главного давления, недостаточном для сжатия пакета дисков в заданном времени включения (причины — засоренность фильтра-маслозаборника, негерметичность и утечки по уплотнительным кольцам фрикциона, расщепление тел, нарушение регулировки главного давления).

2. Неквалифицированное управление водителем переключением передач ГМП в процессе работы самосвала БелАЗ:

- трогание самосвала и переключение передач при высокой частоте вращения вала двигателя, что приводит к резкому включению фрикциона. Согласно заводской инструкции по эксплуатации при переключении с низшей ступени на высшую необходимо снижать частоту вращения вала двигателя для уменьшения скорости вращения ведущих и ведомых дисков фрикционных муфт, что увеличивает их долговечность;

- переключение передач при включенном тормозе-замедлителе и т.д.

3. Отслоение металлокерамического слоя дисков ведомых, вследствие недостаточной прочности его сцепления со стальной основой диска.

Пути снижения отказов фрикционов. Одним из определяющих путей по повышению работоспособности дисков фрикционов, и ГМП в целом, является внедрение системы автоматического управления ГМП. На кафедре «Автомобили» Белорусско-Российского университета совместно с НТЦ ОАО «Белорусский автомобильный завод» разработана мехатронная система автоматического управления и диагностирования гидромеханической передачей (МСАУД ГМП) [11]. В ГМП, оборудованной МСАУД, управление фрикционами при переключении передач и блокировании гидротрансформатора производится посредством электрогидравлических пропорциональных клапанов, которые осуществляют управление процессами включения и выключения фрикционов и регулирование давления в гидроцилиндрах фрикционов по командам электронного блока управления. Параметры алгоритма управления фрикционами выбраны из условия обеспечения переключения передач без рывка потока мощности и плавного изменения моментов трения фрикционов. Это необходимые условия для движения автомобиля без рывков и значительных динамических нагрузок в трансмиссии.

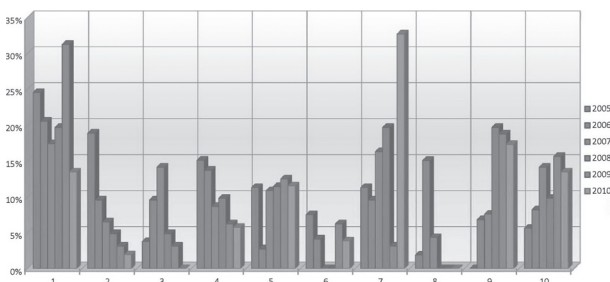
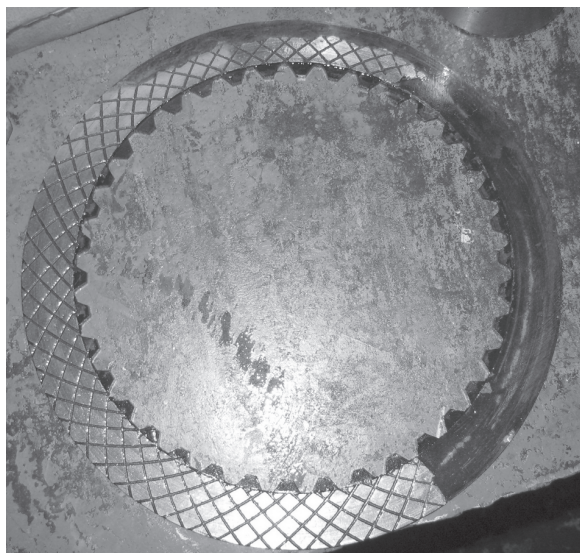


Рисунок 3 — Анализ основных отказов ГМП: 1 — фрикцион; 2 — тормоз-замедлитель; 3 — резьба; 4 — гидравлика; 5 — валы; 6 — брак железа; 7 — подшипники; 8 — крепеж шестерни к фрикциону; 9 — разрушение шестерен; 10 — другое



а



б



в

Рисунок 4 – Дефекты фрикционных дисков: а — отслоение металлокерамического слоя; б — разрушение стальной основы; в — коробление

Самосвалы с МСАУД ГМП в настоящее время проходят полигонные испытания. Автоматическое управление ГМП позволяет не только повысить эффективность использования потенциальных возможностей автомобиля, что достигается путем рационального управления скоростными и нагрузочными режимами двигателя, но и существенно улучшить условия работы фрикционов ГМП: предотвратить превышение предельно допустимых расчетных значений работы буксования фрикционов; снизить экстремальные значения температуры нагрева фрикционных дисков; уменьшить динамические нагрузки в трансмиссии при переключении передач; исключить возможность возникновения чрезмерно больших нагрузок, обусловленных ошибочными действиями водителя при командном управлении.

Второе направление — это мероприятия, направленные на повышение качества самих фрикционных дисков. С этой целью на предприятии проводятся опытно-экспериментальные работы с дисками-аналогами зарубежных фирм. Наряду с этим, ведутся работы по совершенствованию технологического процесса с целью повышения прочности соединения металлокерамики со стальной основой фрикционного диска. Кроме того, совместно с учеными Института порошковой металлургии ведутся исследовательские работы по использованию новых фрикционных материалов, обладающих достаточной износостойкостью, прочностью, устойчивостью к температурным колебаниям, высоким и стабильным коэффициентом трения, независимым от вязкости смазочного материала, что позволит значительно снизить динамические нагрузки в ГМП и повысить надежность и долговечность деталей фрикционов.

В Институте порошковой металлургии для проведения ресурсных испытаний фрикционных дисков разработан и эксплуатируется инерционный стенд «УЛИС», позволяющий воспроизводить условия работы реальных узлов и механизмов большинства современных тракторов, автомобилей, дорожно-строительных машин и обеспечивающий проверку работоспособности их узлов в экстремальных и чрезвычайных (аварийных) условиях. На данном стенде были проведены испытания фрикционных дисков ГМП БелАЗ различных материалов (традиционный материал МК-5, материал на основе латуни, ФМ-12, и материал на целлюлозно-бумажной основе) и производителей (таблица 1).

Структура фрикционного материала МК-5 используемого на БелАЗе представляет собой однородный раствор олова в меди с равномерным распределением частиц графита, свинца и железа (рисунок 5).

Структура фрикционного материала на основе латуни, производимого фирмой «Miba», представляет собой порошковый тройной сплав (Cu-Zn-Sn). Графит расположен хаотично, относительно крупными частицами. В качестве твердых включений, применяется оксиды кремния и циркония, размер которых 7—40 мкм (рисунок 6).

Структура фрикционного материала на целлюлозно-бумажной основе фирмы «Miba» представляет собой хлопьевидную массу, волокнистая структура которого выявляется при большом увеличении $\times 2000$ (рисунок 7). Пористость материала неоднородна, имеются отдельные области с высокой пористостью.

Структура фрикционного материала на основе бронзы фирмы «Wellman» аналогичная материалу МК-5 (рисунок 8).

Таблица 1 — Материалы фрикционных дисков разных производителей

№ диска	Производитель	Состав	Твердость, НВ
1	БелАЗ	М-5	26—40
2	Miba	на основе латуни	35—46
3	Miba	на целлюлозно-бумажной основе	9—15
4	Wellman	на основе бронзы	24—29
5	ИПМ	ФМ-12	9—11

На рисунке 9 представлена микроструктура фрикционного материала ФМ-12, перспективной разработки Института порошковой металлургии. Структура представляет собой основу на основе бронзы с включениями частиц графита, титана.

Численные значения показателей работы дисков приведены в таблице 2.

Фрикционный материал МК-5 обладает относительно низким коэффициентом трения 0,033—0,037 из всех исследованных материалов, при этом материал имеет более высокую износостойкость. При экстремальных условиях практически не наблюдается перенос материала на диск стальной.

Фрикционный материал на основе латуни имеет относительно высокий коэффициент трения и более стабильный. Однако, при недостаточной смазке, материал склонен к быстрому схватыванию и катастрофическому износу. Такие особенности износа фрикционного материала по-видимому связаны с его химическим составом (7—8 % Zn) и структурой характерной для латуней.

Фрикционный материал на целлюлозно-бумажной основе обладает высоким и стабильным коэффициентом трения, практически не происходит схватывания. Однако, при недостаточной смазке происходит деструкция фрикционного слоя и его разрушение.

Фрикционный материал на основе бронзы фирмы «Wellman» имеет характеристики аналогичные фрикционному материалу МК-5, относительно низкий коэффициент трения 0,037—0,044, более высокую износостойкость.

Фрикционный материал ФМ-12 имеет наиболее высокий коэффициент трения, порядка 0,050—0,054, значение которого весьма стабильно. Недостаток смазки вызывает его повышенный износ, что связано, по видимому, с относительно мягкой матрицей.

Проведенные исследования поведения фрикционных дисков различных материалов и производителей на инерционном стенде «УЛИС» показали, что режимам эксплуатации ГМП БелАЗ (это относительно жесткие условия эксплуатации: перебои подачи масла, кратковременные аварийные изменение скорости и нагрузки) наиболее соответствуют фрикционный материал МК-5 и материал фирмы «Wellman». Фрикционный материал на целлюлозно-бумажной основе, материал на основе латуни и материал ФМ-12 может быть применен только в узлах трения с гарантированно стабильной и обильной смазкой, или высокой скоростью отвода тепловой энергии.

Наряду с разработкой новых материалов ведутся работы по совершенствованию технологии крепления

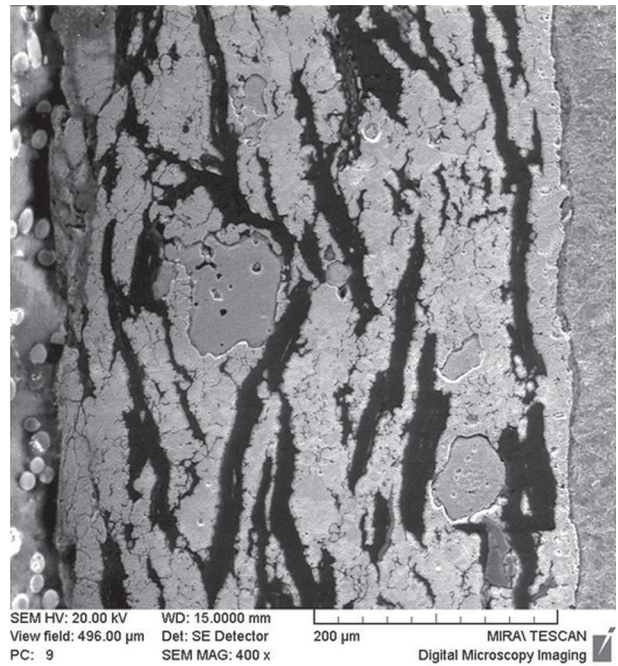


Рисунок 5 — Микроструктура фрикционного материала МК-5 (x200)

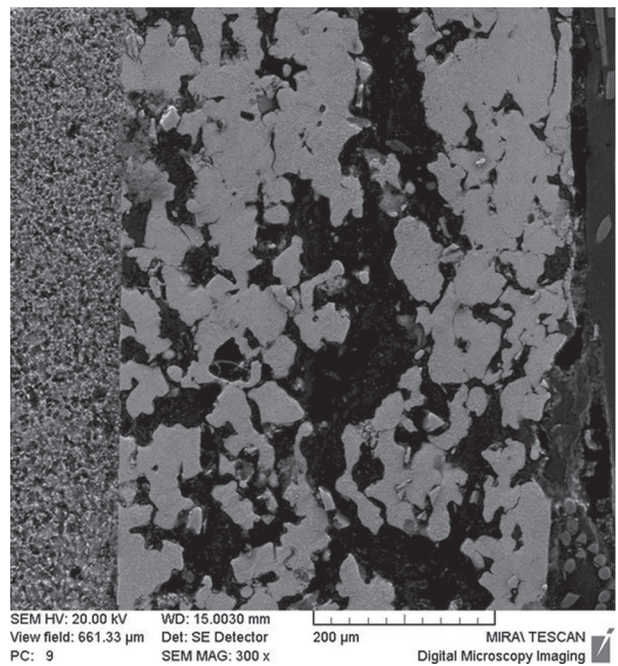


Рисунок 6 — Микроструктура фрикционного материала на основе латуни (x200)

фрикционной накладки к стальной основе. На Молодечненском заводе порошковой металлургии предложен способ пайки — припекания фрикционной накладки из материала МК-5 к стальной основе без гальванического медного покрытия [12—14]. В качестве припоя здесь выступает легированный медью оловянно-свинцовый расплав, формирующийся из компонентов фрикционной шихты в процессе нагрева. При этом образующий расплав припоя под действием капиллярных сил и сил тяжести поступает в зону контакта фрикционной накладки и, обработанной флюсом, стальной поверхностью стальной основы, обеспечивая при кристаллизации зону спаивания. В настоящее

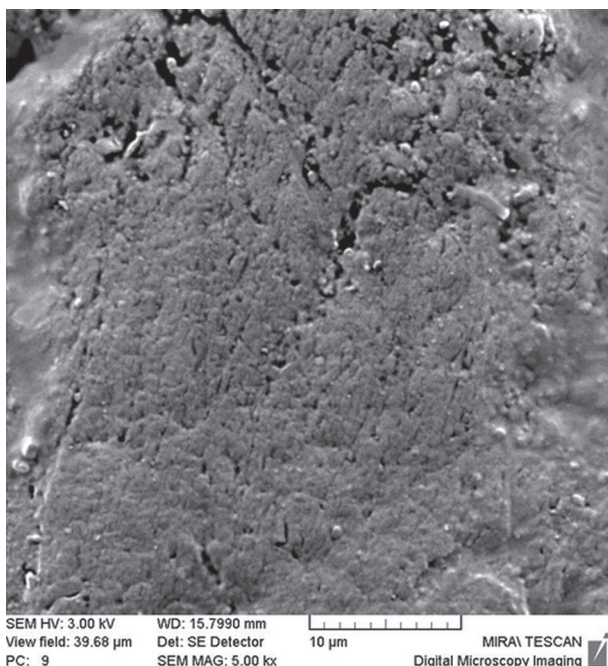


Рисунок 7 — Микроструктура фрикционного материала на целлюлозно-бумажной основе (x2000)

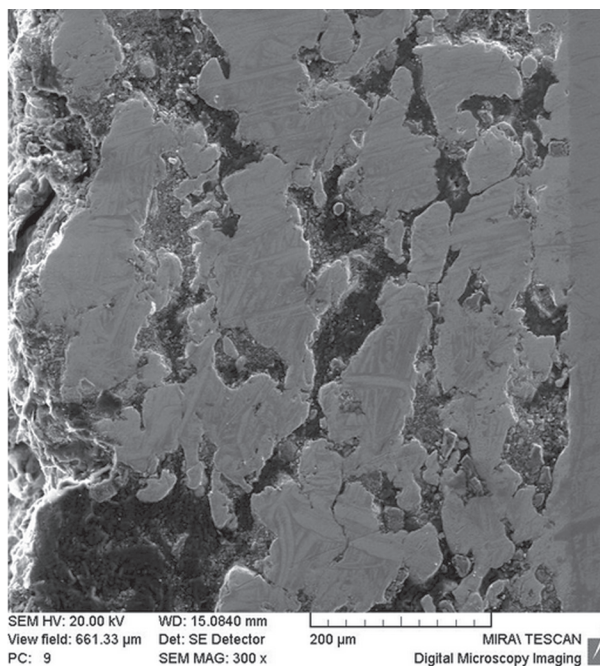


Рисунок 9 — Микроструктура фрикционного материала ФМ-12 (x200)

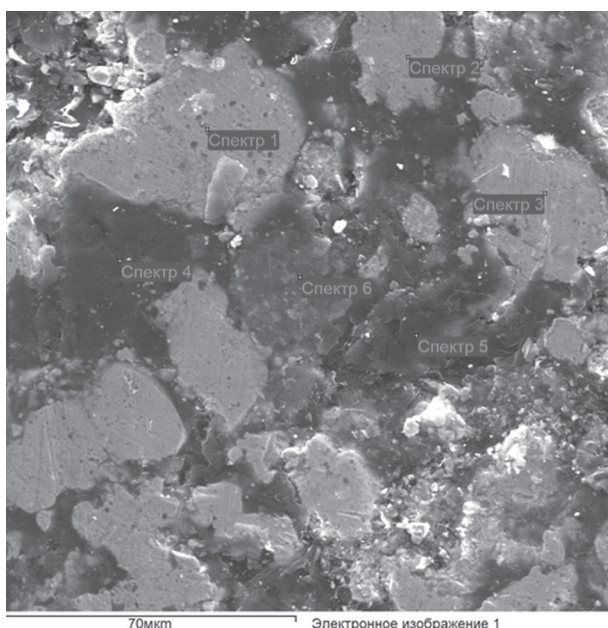


Рисунок 8 — Микроструктура фрикционного материала на основе бронзы фирмы «Wellman» (x200)

время планируется изготовление опытной партии фрикционных дисков для техники БелАЗ. Результаты оценки прочности крепления металлокерамической фрикционной накладке к стальной основе представлены на рисунке 10.

Заключение. Как показывает опыт эксплуатации самосвалов, наиболее слабыми элементами ГМП, ограничивающими ее надежность и долговечность, являются фрикционы. При переключении передач на поверхностях трения фрикционных элементов возникают тепловые потоки высокой интенсивности, приводящие к нагреву фрикционных дисков, их быстрому износу или короблению, отслаиванию фрикционных накладок, разрыву дисков. Для повышения надежно-

Таблица 2 — Результаты испытаний фрикционных материалов на стенде «УЛИС» (давление 2 и 4 кгс/см², расход масла 0,3 м³/с и 8,8 м³/с, скорость скольжения 2400 мин⁻¹, длительность цикла торможения не более 120 сек)

№ диска	Коэффициент трения (динамический)	Максимальный коэффициент трения	Стабильность коэффициента трения	Средний износ мкм/км
1	0,033—0,037	0,069	0,47	4,0
2	0,044—0,049	0,085	0,55	8,9
3	0,03	0,075	0,46	12,5
4	0,037—0,044	0,088	0,50	2,6
5	0,050—0,054	0,082	0,70	6,9

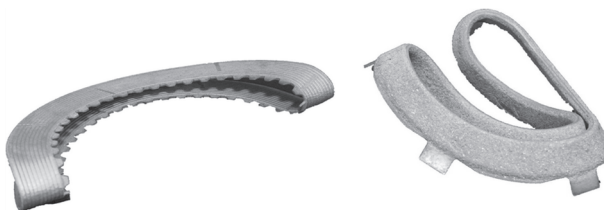


Рисунок 10 — Фрикционные диски с паяным фрикционным слоем после испытаний на прочность соединения

сти работы фрикционов предприятием-изготовителем ведутся работы по двум основным направлениям: внедрение системы автоматического управления ГМП и повышение качества фрикционных дисков.

Список литературы

1. Автомобили: Машины большой единичной мощности: учеб. пособие / М.С. Высоцкий [и др.]; под ред. М.С. Высоцкого, А.И. Гришкевича. — Минск: Выш. шк., 1988. — 160 с.
2. Mode of access: <http://www.cat.com>. — Data of access: 04.03.2011.

3. Mode of access: <http://www.komatsu.com>. — Data of access: 10.03.2011.
4. Mode of access: <http://www.hitachiminin.com>. — Data of access: 11.03.2011.
5. Mode of access: <http://www.terex.com>. — Data of access: 04.03.2011.
6. Mode of access: <http://bv.stroicar.com/postdetail.php?id=64>. — Data of access: 04.03.2011.
7. Тарасик, В.П. Фрикционные муфты автомобильных гидромеханических передач / В.П. Тарасик. — Минск: Наука и техника. — 1973. — 320 с.
8. Тарасик, В.П. Новые механизмы управления фрикционными гидромеханических передач / В.П. Тарасик, К.Н. Кусков // Теория и практика машиностроения. — 2004. — № 3. — С. 15—19.
9. Сергиенко, В.П. Фрикционное взаимодействие в маслоохлаждаемых металлополимерных узлах трения / В.П. Сергиенко, Н.К. Мышкин, А.В. Купреев // Композиционные фрикционные материал: свойства, производство, применение: сб. докл. Междунар. специализир. науч.-техн. семинара, Минск, 15—16 апр. 2008 г. — Минск: Беларус. наука, 2008. — С. 28—36.
10. Повышение долговечности многодискового фрикциона гидромеханической передачи мобильной машины / С.А. Рынкевич [и др.] // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. — 2011. — № 1. — С. 65—74.
11. Фрикцион гидромеханической передачи с мехатронной системой автоматического управления / В.П. Тарасик [и др.] // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. — 2011. — № 1. — С. 75—83.
12. Сыроежко, Г.С. Производство спеченных фрикционных дисков на Молодечненском заводе порошковой металлургии / Г.С. Сыроежко, С.Е. Пашук, А.В. Лешок // Композиционные фрикционные материал: свойства, производство, применение: сб. докл. Междунар. специализир. науч.-техн. семинара, Минск, 15—16 апр. 2008 г. — Минск: Беларус. наука, 2008. — С. 23—27.
13. Фрикционный диск полученный процессом пайки слоя порошкового материала к стальной основе / Г.С. Сыроежко [и др.] // Сварка и родственные технологии. — 2005. — № 7. — С. 65—67.
14. Звонарев, Е.В. К вопросу пайки фрикционного материала к стальной основе / Е.В. Звонарев, Г.С. Сыроежко, А.В. Лешок // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. — 2004. — № 4. — С. 69.

Shapovalova O.A., Leshok A.V

Analysis of hydromechanical transmission friction clutch failures and ways to reduce them

The author determines the main failures of BELAZ hydromechanical transmission; describes the design of hydromechanical transmission friction clutches as well as the types and causes of their failures. The author also considers the ways to solve the problem of increasing of friction clutches operating life by the manufacturer.

Поступила в редакцию 01.05.2011.