

УДК 622.063.88

**ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗДЕЛА
МЕЖДУ ЗАМЕРЗШИМ УГЛЕМ И ТРАНСПОРТИРОВОЧНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ
В РЕГИОНАХ С ХОЛОДНЫМ КЛИМАТОМ**

Да Ан, Ифэй Чи, Чуньхуа Ван

*Шэньянский аэрокосмический университет,
E-mail: 897785216@qq.com, 110000, г. Шэньян, Китай*

Проведены испытания примерзания угля к типовым подложкам (металлическая, резиновая и пластиковая), изучены поверхности раздела между углем и подложкой и детально проанализированы прочностные характеристики примерзания угля. В устойчивой поверхности раздела между углем и подложкой образуется области замерзшего угольного шлама, непосредственного контакта и воздушные полости. Поверхности металлических и резиновых подложек имеют малый угол смачивания и являются гидрофильными. Отделение примерзшего угля от таких подложек происходит либо по замерзшему угольному шламу, либо непосредственно по замерзшему углю, поэтому адгезионная прочность примерзания угля определяется прочностью угольного шлама или прочностью самого угля. Поверхности пластиковых подложек имеют большой угол смачиваемости и являются гидрофобными; отделение угля происходит по поверхности контакта замерзшего угольного шлама с подложкой; прочность примерзания угля обусловлена прочностью сцепления шлама с подложкой. Адгезионная прочность примерзания угля к пластиковым подложкам в 4–12 раз меньше, чем к металлическим и резиновым.

Транспортировка угля, примерзание угля, поверхность раздела, адгезионная прочность примерзания угля

DOI: 10.15372/FTPRPI20230302

В США, России, Китае, Нидерландах и в других странах с холодным климатом при длительной открытой транспортировке в зимний период уголь, содержащий влагу, примерзает к поверхностям транспортировочного оборудования, образуя значительную адгезионную связь. Адгезия примерзшего угля негативно сказывается на безопасности и эффективности транспортировки. Обычно наблюдается переполнение угольных вагонов из-за примерзшего к их поверхностям угля и невозможность выполнения разгрузочных работ в требуемое время, что приводит к штрафам, увеличению простоя рабочей силы и значительным экономическим потерям. На угольном разрезе в регионе Внутренняя Монголия, принадлежащем угледобывающей

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (№51374120) Исследование механизма примерзания к карьерному ленточному конвейеру в регионах с холодным климатом.

компании Datang Xilinhaote, ленточный конвейер простаивал примерно 540 ч в год из-за примерзания угля к поверхностям натяжного барабана и ленты, что привело к снижению объема добываемого угля примерно на 1.35 млн т, чрезвычайным происшествиям на производстве и повреждению оборудования [1].

Для предотвращения адгезии угля при его примерзании к транспортировочному оборудованию используются химические, тепловые и механические методы. Химический метод предотвращает или замедляет примерзание угля путем добавления в него химических незамерзающих реагентов. Он широко применяется в производстве, но имеет высокую стоимость, вызывает коррозию оборудования и загрязняет окружающую среду. Тепловой метод используется при разгрузке вагонов с примерзшим углем. Вагон с углем загоняется в бокс с источником тепла в виде подачи пара, горячей воды или теплого воздуха, где замерзший уголь оттаивает, после чего осуществляется его разгрузка. При тепловом методе происходит медленное оттаивание угля и потребляется большое количество энергии. В рамках механического метода применяются очистительные установки, щетки и различные механизмы для удаления примерзшего угля с поверхностей транспортировочного оборудования. Данный метод является наиболее простым и широко распространенным. К его недостаткам относится легкость повреждения транспортировочного оборудования, например возникновение задиров на поверхностях вагона, ленты конвейера, роликах и т. д.

Для изучения адгезии замерзшего угля выполнен ряд теоретических исследований. Компаниями SRI International и H. G. Engineering дано объяснение образования адгезии примерзшего угля и механизма механической прочности, а также проанализировано влияние окружающей температуры, поверхностной влажности, размера частиц и других факторов [2, 3]. В [4, 5] изучено влияние химического незамерзающего реагента на прочность примерзания угля. В [6] методом конечных элементов разработана численная модель процесса оттаивания одиночной частицы угля в условиях естественной конвекции с учетом влияния конденсирования и испарения влаги на ее внешней поверхности. Показано, что влажность окружающей среды значительным образом влияет на время оттаивания замерзшего угля.

Модель прочности замерзшего угля с учетом его влажности разработана в [7]. Для оценки спрогнозированной прочности замерзшего угля в локальных зимних климатических условиях применен статистический анализ Монте-Карло. Исследовательской группой из Цзилиньского университета (Китай) изучен механизм образования адгезии замерзшего угля, рассмотрено влияние различных факторов на его адгезию к поверхностям угольных вагонов [8–10] и предложена гибкая бионическая технология для уменьшения адгезии [11, 12]. Ранее авторы настоящей работы исследовали влияние влажности угля, размера частиц и давления на адгезионную прочность примерзания угля [13–15] и разработали на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена конвейерный натяжной барабан, препятствующий образованию адгезии [16, 17].

Изучение прочностных характеристик поверхности раздела примерзания угля к различным подложкам является основой для общего исследования. В настоящей работе выполнен ряд испытаний по примерзанию угля к различным подложкам, изучена поверхность раздела между углем и подложкой и детально проанализированы прочностные характеристики и механизм примерзания угля. Данная работа может быть рассмотрена в качестве теоретической основы исследования морозостойких подложек, методов механического размораживания и методов предотвращения и устранения примерзания угля к транспортировочному оборудованию в регионах с холодным климатом.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Материал подложек. Материалом поверхностей, к которым обычно примерзает уголь (угольные вагоны, ковши погрузчиков, ролики, скребок и другие детали ленточного конвейера), является углеродистая сталь. Поверхность натяжного барабана и лента конвейера выполнены из резины, противопримерзающий натяжной барабан — из полимерного пластика.

Рассмотрены следующие материалы подложек: металл, резина и полимерный пластик. В качестве металлических подложек взяты подложки из стали Q235 (ближайшие аналоги СтЗкп и СтЗсп), алюминия и меди. В качестве резиновых подложек использовались подложки из резины, применяемой при изготовлении роликов и ленты конвейера. Пластиковыми подложками служили подложки из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, полиэтилена и политетрафторэтилена.

Установка для определения адгезионной прочности примерзания угля. Термокамера, создающая условия для примерзания угля, показана на рис. 1а; ее регулируемый температурный диапазон составляет $-65 \dots 310$ °С. Установка для испытания адгезионной прочности примерзания угля разработана исследовательской группой [18], ее внешний вид представлен на рис. 1б, а структурная схема — на рис. 2. Образец угля помещался в установку и замораживался на подложке в термокамере при заданных условиях. Для определения адгезионной прочности образец угля отделялся от подложки растяжением. Для анализа механизма примерзания угля к различным подложкам определены углы смачивания на их поверхностях.

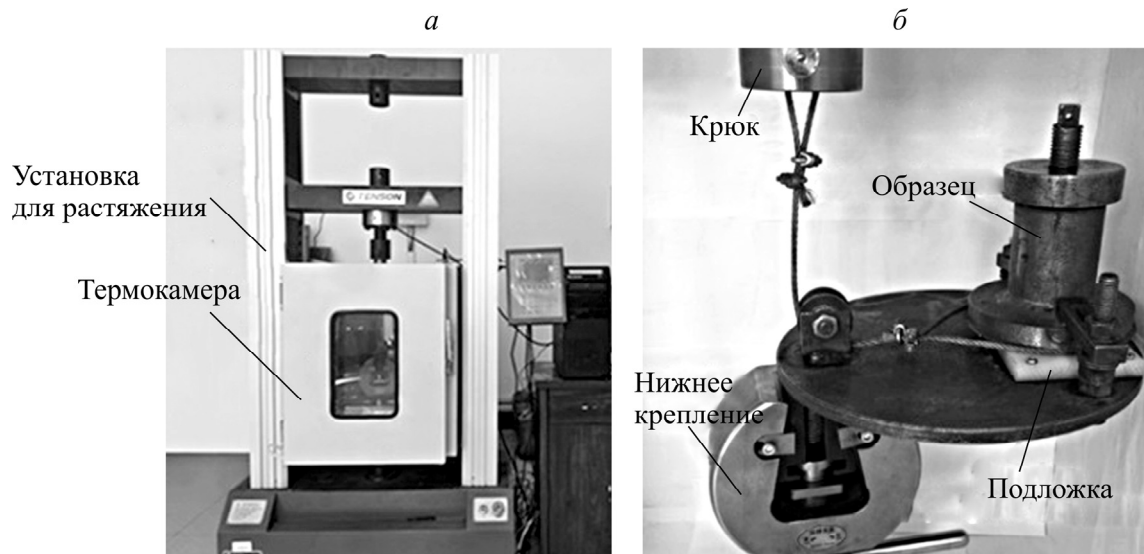


Рис. 1. Термокамера и установка для растяжения (а); установка для испытания адгезионной прочности примерзания угля (б)

Определение адгезионной прочности примерзания угля. Прочность примерзания угля по касательному направлению к поверхности адгезии влияет на фактическое отделение примерзшего угля. Таким образом, адгезионная прочность примерзания рассчитана следующим образом:

$$c_{\tau} = \frac{F_{\tau}}{S_{coal}},$$

где F_{τ} — растягивающая сила, действующая на образец при касательном отделении; S_{coal} — площадь адгезии (примерзания) угольного образца к подложке.

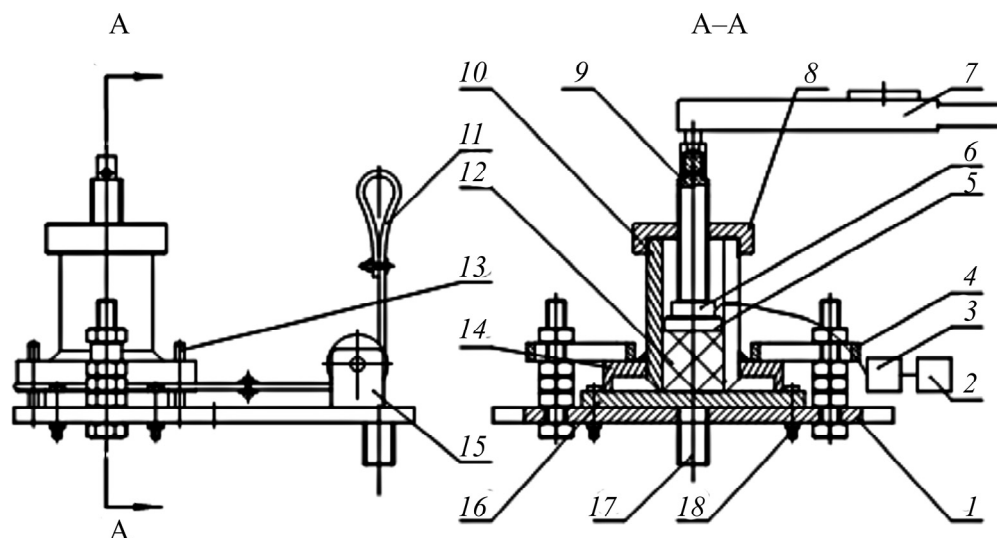


Рис. 2. Схема установки для определения адгезионной прочности примерзания угля: 1 — основание; 2 — монитор компьютера; 3 — датчик деформации; 4 — прижимные лапки; 5 — уплотнительная прокладка; 6 — датчик давления; 7 — динамометрический ключ; 8 — торцевая крышка; 9 — резьбовое соединение; 10 — корпус; 11 — трос; 12 — образец угля; 13 — направляющий штифт; 14 — основание корпуса; 15 — блок; 16 — подложка; 17 — зафиксированная ось основания; 18 — болтовое соединение

Образец угля 12 с установленным значением внешней влажности и размером частиц помещается в установку и замораживается на подложке при определенных температуре, времени и давлении. После снятия прижимных лапок 4 и направляющего штифта 13 запускается растягивающая установка. Через трос 11 прикладывается тяговое усилие к основанию корпуса 14 для отделения примерзшего образца угля от поверхности подложки. Пиковое растяжение на кривой «сила – смещение» представляет собой растягивающую силу касательного отделения образца угля F_t , адгезионная прочность примерзания угля c_t рассчитана по приведенной формуле. Для каждой группы образцов выполнено более 15 испытаний, значения с большим отклонением или инструментальными ошибками исключены из дальнейшего анализа. Среднее значение успешных испытаний принято в качестве окончательного результата.

ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ПРИМЕРЗАНИЯ УГЛЯ К РАЗЛИЧНЫМ ПОДЛОЖКАМ

Поверхности раздела примерзания угля к различным подложкам изучены и проанализированы на основе большого количества испытаний при различных факторах, таких как внешние условия, характеристики угля и характеристики подложки.

Поверхность раздела примерзания угля к подложке. На рис. 3а представлено схематичное изображение поверхности раздела примерзания угля к подложке. При контакте угля с подложкой в условиях низкой температуры некоторое количество влаги смещается к поверхности подложки и образуется область замерзшего угольного шлама, т. е. происходит образование центров кристаллизации мельчайших частиц угля частично или по всей поверхности раздела. Слой замерзшего угольного шлама прочно сцепляется с поверхностью подложки под воздействием силы сцепления, которая состоит из микроскопической силы химических связей, межмолекулярной силы, силы электростатического взаимодействия, механической силы и т. д. Толщина и размер области замерзшего шлама на поверхности раздела зависят от ряда факторов: содержания влаги в угле, размера частиц угля, давления и т. д. На поверхности раздела между углем и подложкой может образоваться как область непосредственного контакта, так и воздушные полости.

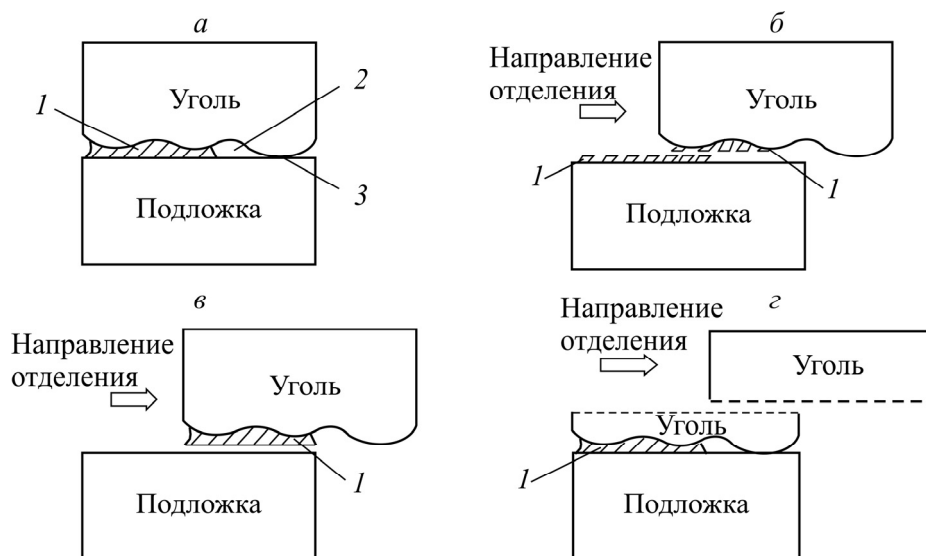


Рис. 3. Поверхность раздела между примерзшим углем и подложкой (а); отделение примерзшего угля от металлической и резиновой подложки (б); от пластиковой подложки (в); от металлической или резиновой подложки непосредственно по углю (г): 1 — область замерзшего угольного шлама; 2 — воздушная полость; 3 — область непосредственного контакта

Отделение примерзшего угля от подложки. При удалении примерзшего угля с поверхности транспортировочного оборудования разрушается устойчивая поверхность раздела, определяемая прочностными характеристиками примерзания угля. На основании экспериментальных наблюдений сделан вывод о том, что отделение угля от подложки по поверхности раздела реализуется в трех формах.

Отделение примерзшего угля от металлических и резиновых подложек обычно происходит по слою замерзшего угольного шлама (рис. 3б). Это означает, что прочность сцепления между замерзшим угольным шламом и поверхностью подложки превышает прочность самого угольного шлама. Кроме того, отделение в области непосредственного контакта протекает по поверхности сцепления примерзшего угля и подложки.

Отделение примерзшего угля от пластиковых подложек происходит по поверхности контакта замерзшего шлама с поверхностью подложки (рис. 3в). Следовательно, прочность сцепления между замерзшим угольным шламом и поверхностью подложки меньше, чем прочность самого замерзшего шлама. Отделение в области непосредственного контакта осуществляется по поверхности сцепления примерзшего угля и подложки.

В некоторых случаях отделение примерзшего угля от металлических и резиновых подложек происходит непосредственно по углю (рис. 3г). В реальных условиях удаление примерзшего угля от металлических или резиновых подложек может наблюдаться, когда внешняя сила воздействует на уголь, а не на поверхность сцепления или, когда прочность замерзшего угольного шлама превышает прочность примерзшего угля. При использовании пластиковых подложек такая форма отделения отсутствовала из-за низкой прочности сцепления между угольным шламом и поверхностью подложки. По сравнению с первыми двумя формами отделения, такое отделение угля приводит к остаткам примерзшего угля на поверхности подложки.

ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОНЫ ПРИМЕРЗАНИЯ УГЛЯ К РАЗЛИЧНЫМ ПОДЛОЖКАМ

Адгезионная прочность примерзания угля к различным подложкам. Различие в форме отделения угля от подложки определяется адгезионной прочностью его примерзания. В общем виде адгезионную прочность примерзания угля можно представить суммой прочности примерзания

угольного шлама и прочности примерзания самого угля. Отделение угля от металлических и резиновых подложек происходит по слою замершего угольного шлама или непосредственно по углю. Таким образом, адгезионная прочность примерзания угля определяется прочностью примерзания угольного шлама или самого угля. Отделение угля от пластиковых подложек происходит по поверхности контакта замершего угольного шлама с подложкой, т. е. адгезионная прочность примерзания угля определяется прочностью сцепления замершего угольного шлама с подложкой. Также следует отметить, что адгезионная прочность примерзания угля в области непосредственного контакта обусловлена прочностью сцепления, которая формируется микроскопической физико-химической абсорбцией между профилем поверхности подложки и мельчайшими частицами угля.

Анализ адгезионной прочности примерзания угля к различным подложкам. На адгезионную прочность примерзания угля влияет множество факторов, которые могут быть разделены на внешние условия, характеристики угля и характеристики подложки. Для исследования влияния материала подложки на прочность примерзания угля другие факторы в ходе исследования оставались неизменными. Для приближения к реальным условиям выбраны следующие значения задаваемых факторов: температура замерзания $T = -25$ °C; продолжительность замерзания $t = 2.0$ ч; давление на уголь $P = 1.0$ МПа, создаваемое динамометрическим ключом и измеряемое соответствующим датчиком; размер частиц угля $d = 0.5 \sim 1.0$ мм; внешнее содержание влаги в угле $\delta = 30$ %; масса образца угля $m = 0.04$ кг; упаковочная плотность образца угля $\rho = 1.061$ г/см³; шероховатость поверхности подложек $Ra = 1.86$ мкм.

Испытания различных подложек выполнены согласно методике определения адгезионной прочности примерзания угля. На рис. 4 приведены значения адгезионной прочности примерзания угля к различным подложкам. Видно, что адгезионная прочность примерзания угля к металлическим и резиновым подложкам достаточно велика (1.46–2.04 МПа) по сравнению с адгезионной прочностью примерзания угля к пластиковым подложкам (0.165–0.345 МПа), т. е. больше в 4–12 раз. Выявлено значительное различие прочности примерзания угля к металлическим, резиновым и пластиковым подложкам.

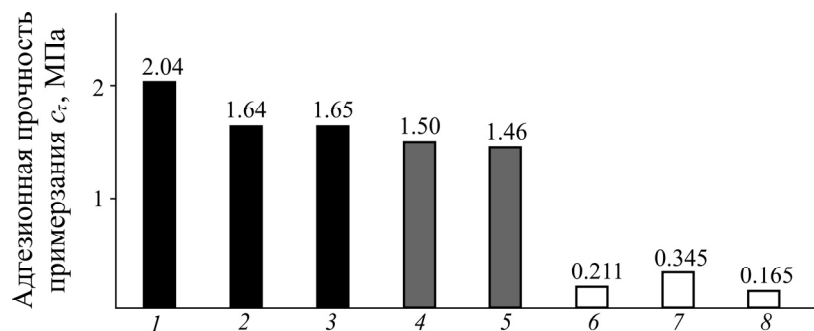


Рис. 4. Адгезионная прочность примерзания угля к различным подложкам: 1 — сталь Q235; 2 — алюминий; 3 — медь; 4 — резина роликов; 5 — резина ленты; 6 — сверхвысокомолекулярный полиэтилен; 7 — полиэтилен; 8 — политетрафторэтилен

Наблюдения показали, что отделение угля от металлических, резиновых и пластиковых подложек отличается друг от друга и адгезионная прочность примерзания к этим подложкам различна. В ходе постепенного примерзания угля к подложке происходит замерзание влаги, содержащейся в угле, и сцепление с поверхностью подложки. Контакт между влагой и подложкой влияет на контакт между замерзшим угольным шламом и подложкой, что определяет форму отделения угля от подложки и его прочностные характеристики. Контакт между водой и поверхностью зависит от условий смачивания данной поверхности, которая характери-

зуется углом смачивания (рис. 5). Угол смачивания θ образуется каплей воды в свободном состоянии на поверхности твердого тела. Если он менее 90° , то капля стремится растечься по поверхности, такая поверхность называется гидрофильной (рис. 5а). Если угол смачивания более 90° , то капля стремится удержать сферическую форму и такая поверхность называется гидрофобной (рис. 5б). Угол смачивания различных подложек определен с помощью соответствующего измерительного инструмента.

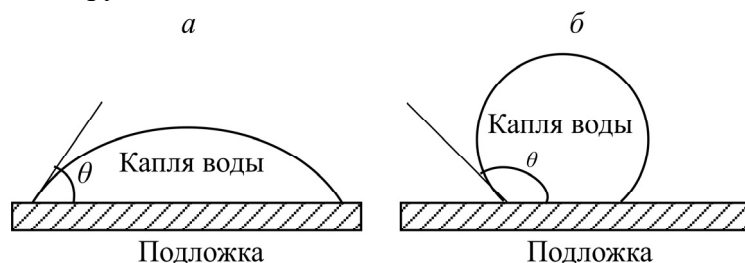


Рис. 5. Угол смачивания на поверхности подложки: а — гидрофильная поверхность; б — гидрофобная

На рис. 6 показаны результаты измерения угла смачивания каждой подложки; отчетливо просматривается гидрофильное или гидрофобное поведение капли воды на поверхности подложек. В верхнем левом углу показаны значения угла смачивания поверхности подложек после одного измерения.

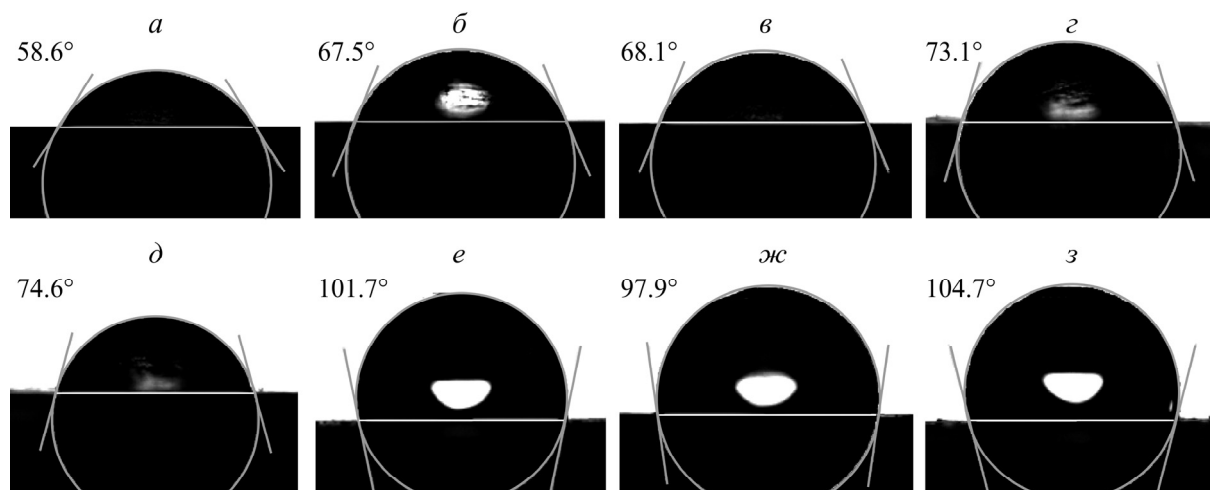


Рис. 6. Измерение угла смачивания на поверхностях различных подложек: а — сталь Q235; б — алюминий; в — медь; г — резина роликов; д — резина ленты; е — сверхмолекулярный полиэтилен; ж — полиэтилен; з — политетрафторэтилен

Для каждой подложки выполнено три измерения углов смачивания, и их среднее значение принято окончательным. Материалы подложек по возрастанию угла смачивания распределились следующим образом: сталь Q235, алюминий, медь, резина роликов, резина ленты, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, полиэтилен, политетрафторэтилен со значениями 58.1 ; 67.2 ; 68.8 ; 73.8 ; 74.5 ; 101.4 ; 97.9 ; 104.9° соответственно. Углы смачивания на всех металлических и резиновых подложках оказались менее 90° . Это означает, что поверхности данных подложек являются гидрофильными и обладают высоким смачиванием. Углы смачивания пластиковых подложек были более 90° , т. е. их поверхности являются гидрофобными и обладают низким смачиванием.

Далее методом противопоставления проведен анализ зависимости между углом смачивания и адгезионной прочностью примерзания угля (рис. 7). Угол смачивания на металлических и резиновых подложках имеет низкое значение, а адгезионная прочность примерзания угля к таким подложкам — высокое, тогда как угол смачивания на пластиковых подложках имеет высокое значение, а адгезионная прочность примерзания угля — низкое. Таким образом, чем меньше угол смачивания, тем больше адгезионная прочность примерзания, и наоборот. На металлических и резиновых подложках, обладающих хорошим смачиванием, при одинаковом объеме влаги площадь ее контакта с подложкой будет больше, следовательно увеличится площадь контакта замерзшего угольного шлама с подложкой, в результате чего прочность сцепления замерзшего угольного шлама с подложкой будет выше. Отделение примерзшего угля от металлической или резиновой подложки будет происходить по относительно непрочному угольному шламу или по самому углю, а адгезионная прочность примерзания угля будет определяться прочностью замерзшего угольного шлама или прочностью самого угля.

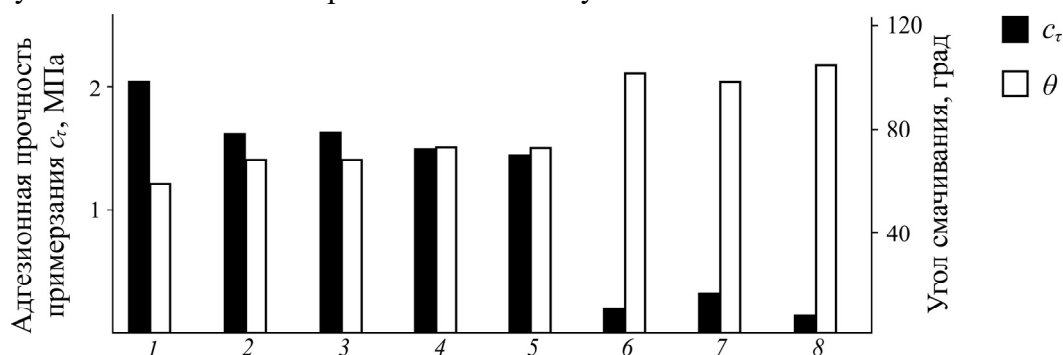


Рис. 7. Сравнение угла смачивания и адгезионной прочности примерзания угля к различным подложкам: 1 — сталь Q235; 2 — алюминий; 3 — медь; 4 — резина роликов; 5 — резина ленты; 6 — сверхвысокомолекулярный полиэтилен; 7 — полиэтилен; 8 — политетрафторэтилен

На пластиковых подложках, обладающих плохим смачиванием, при одинаковом объеме влаги площадь ее контакта с подложкой будет меньше, значит площадь контакта замерзшего угольного шлама с подложкой уменьшится, в результате чего прочность сцепления замерзшего угольного шлама с подложкой будет относительно невысокой. Отделение угля от пластиковой подложки будет происходить по относительно непрочной поверхности контакта между замерзшим угольным шламом и поверхностью подложки, а адгезионная прочность примерзания угля будет определяться прочностью сцепления угольного шлама с подложкой, которая гораздо ниже, чем у металлических и резиновых подложек. Отметим, что удаление примерзшего угля от пластиковых подложек происходит без остатков угля.

Таким образом, пластиковые подложки являются противопримерзающими. Для дальнейшей проверки полученных результатов разработан натяжной барабан, поверхность которого вместо традиционной резины выполнена из сверхвысокомолекулярного полиэтилена. На поверхности традиционного натяжного барабана из резины наблюдается значительное примерзание угля, и скребок не в состоянии полностью удалить примерзший уголь из-за высокой адгезионной прочности примерзания. На поверхности барабана, выполненной из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, примерзший уголь почти отсутствует. Это объясняется гидрофобностью поверхности и низкой адгезионной прочностью примерзания, к такой подложке уголь почти не примерзает. Даже если уголь примерзнет к такому барабану, то будет вовремя удален скребком благодаря низкой прочности примерзания.

ВЫВОДЫ

При примерзании угля к подложке между углем и поверхностью подложки образуется область замерзшего шлама, также могут образоваться области непосредственного контакта и воздушные полости.

Поверхность раздела и прочностные характеристики примерзания угля к подложке тесно связаны со смачиванием поверхностей подложек. Поверхности металлических и резиновых подложек обладают хорошим смачиванием; отделение примерзшего угля от таких подложек происходит по слою замерзшего угольного шлама или непосредственно по углю. В этом случае адгезионная прочность примерзания угля определяется прочностью угольного шлама или прочностью угля. Поверхности пластиковых подложек обладают плохим смачиванием; отделение примерзшего угля от них происходит по поверхности контакта замерзшего угольного шлама с поверхностью подложки. В этом случае адгезионная прочность примерзания угля определяет прочность сцепления. Адгезионная прочность примерзания угля к пластиковым подложкам в 4–12 раз меньше, чем к металлическим и резиновым.

Установлена общая закономерность, которая заключается в том, что чем хуже смачивание поверхности подложки, тем меньше адгезионная прочность примерзания угля к ней. Отделение и удаление примерзшего угля от подложек со слабым смачиванием происходит без остатков. Для предотвращения примерзания угля в качестве подложек могут быть выбраны гидрофобные материалы с плохим смачиванием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ren Y. L., Ma Y. H., Zhang D. J., Wang T. M., Wu L., and Zhang H. L. Research and development on anti-freezing and sticking drum and application to surface mine, *Coal Sci. and Technol*, 2012.
2. H. G. Engineering Ltd: A study of the mechanical properties of frozen westerncanadian coals, Montreal, 1978, Vol. 57. — P. 26–32.
3. Taglio S. Analysis of the market for a new frozen coal release device, SRI Int. Corp. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19830013082>. Accessed 1 December 1981
4. Glanville J. O. and Haley L. H. Physical chemistry of frozen coal, *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences* (1982). [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(82\)91414-0](https://doi.org/10.1016/0148-9062(82)91414-0)
5. Richardson P. F., Roe W. J., and Perisho J. L. Influence of coal porosity on the effectiveness of freezeconditioning agents, *Min. Eng.*, 1985, Vol. 37. — P. 1057–1061.
6. Raymond J. F. and Rubinsky B. A numerical study of the thawing process of a frozen coal particle, *J. Heat Transfer*, 1983. <https://doi.org/10.1115/1.3245544>
7. Juha S., Auerkari P., Holmstr M. S., Itkonen J., and Aaltonen K. Freezing of coal in the underground storage of a power plant, *Cold Regions Science & Technology*, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2012.03.007>
8. Yang X. D., Chai X. L., and Cong Q. Adhesion law and adhesion mechanism analysis for tub, J. Jilin University, 2000. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.2000.04.018>
9. Yang X. D., Chai X. L., and Cong Q. Experimental research on freezing adhesive between mine car model and coal particles, J. Jilin University, 2002. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.2002.02.010>
10. Cong Q., Wang W. T., Yan B. Z., and Ren L. Q. Experimental study of coal on normal adhesion and reducing adhesion by surface electroosmosis, *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 1999, Vol. 6. — P. 93–96.
11. Cong Q., Chai X. L., Yang X. D., and Jin J. F. Coal adhesion reduction on tramcar by flexible bionics technique, J. Jilin University, 2005. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.2005.04.019>

12. **Cong Q., Yang X. D., Chai X. L., and Ren L. Q.** Experiment on reducing coal adhesion by bionic flexible technology, Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2007. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1298.2007.03.054>
13. **Wang C. H., An D., Qu H., Han C., and Heng X. H.** Analysis of the influence on coal freezing adhesive strength of surface waviness of steel plate, Machine Design & Research, 2017. <https://doi.org/10.13952/j.cnki.jofmdr.2017.0271>
14. **Wang C. H., An D., Qu H., Han C., and Heng X. H.** The test analysis of influence of granularity on coal freezing adhesive strength of coal transportation equipmen, Machine Design & Research, 2017. <https://doi.org/10.13952/j.cnki.jofmdr.2017.0264>
15. **An D. and Wang C. H.** Regression analysis for coal freezing adhesive strength in transportation, J. Min. Sci., 2022, Vol. 58, No. 5. — P. 731 – 740.
16. **Wang C. H., Chi Y. F., An D., and Qu H.** Regression forecasting and influence factor analysis of freezingadhesive strength on UHMWPE material of anti-freezingadhesion roller, Chinese J. of Applied Mechanics, 2019. <https://doi.org/10.11776/cjam.36.05.B101>
17. **Wang C. H., Qu H., Xu H. W., and Wang Z. X.** Experiment study on anti-freezing adhesive turnabout roller, J. Mech. Strength, 2015. <https://doi.org/10.16579/j.issn.1001.9669.2015.01.009>
18. **Wang C. H., Qu H., Xu H. W., Wang Z. X., An D., and Li H. J.** Test specimen of coal freezing adhesive strength, China Patent CN204855337U, filed July 29, 2015, and issued December 9, 2015.

Поступила в редакцию 18/XI 2022

После доработки 25/III 2023

Принята к публикации 18/V 2023