

**Исследование стойкости к гидроабразивному износу полимерных и стальных труб.
Оценка основных параметров,
влияющих на интенсивность износа гидротранспортных систем.**

**Research of resistance to water-jet wear of plastic and steel pipes.
Assessment of the main parameters that affect the wear rate of hydraulic transport systems.**

В.И. СКРЕБНЕВ¹, С.Л. СЕРЖАН², Е.В. КАЛУГИНА³

V.I. SKREBNEV¹, S.L. SERJAN², E.V. KALUGINA³

¹ МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова)

² Санкт-Петербургский Горный университет

³ Группа ПОЛИПЛАСТИК

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies)

² Saint-Petersburg Mining University

³ POLYPLASTIC Group

vladimir.skrebnev@polyplastic.ru

Установлено, что применение определенных видов термопластичных эластомеров в качестве соэкструдированного покрытия внутренней поверхности полимерных трубных систем позволяет значительно увеличить время жизни трубопроводного гидротранспорта при воздействии гидросмесей, в частности, хвостов обогащения железных руд. Произведено сравнение стойкости к гидроабразивному износу с полиэтиленовых и стальных труб. Оценено влияние на интенсивность износа концентрации, дисперсности и скорости гидросмесей.

Ключевые слова: пульпа, гидротранспорт, пульпопроводы, износостойкость, эрозия труб, гидроабразивный износ, гидросмеси, хвосты обогащения

It has been found that the use of certain types of thermoplastic elastomers as a co-extruded coating of the inner surface of plastic pipe systems can significantly increase the lifetime of pipeline hydrotransport when exposed to hydraulic mixtures, in particular tailings of iron ore processing. The comparison of polyethylene and steel pipes resistance to water-jet wear is made. The influence of the concentration, dispersion, and speed of hydraulic mixtures on the wear rate is estimated.

Keywords: pulp, hydraulic transport, pulp pipelines, wear resistance, pipe erosion, water-jet wear, hydraulic mixtures, enrichment tails

DOI: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-40-44

Введение

Ввиду высокой экономической эффективности большое значение в мире сегодня придается развитию промышленных транспортных систем непрерывного действия. Широкое распространение для транспортировки минерального сырья и продуктов его переработки в химической промышленности, в частности, в горнодобывающем секторе, получил гидравлический трубопроводный транспорт. К основным аспектам, обуславливающим эффективность использования гидротранспортных систем, относятся трудоемкость работ при строительстве и эксплуатации, энергоемкость транспортировки гидросмесей и надежность трубопроводов. К одному из наиболее негативных факторов можно причислить простой производства по причине быстрого изнашивания транспортных трубопроводных систем взвесьми абразивных минеральных частиц, что приводит к уменьшению производительности и увеличению стоимости эксплуатации.

Использование в условиях гидротранспорта хвостовой пульпы трубопроводов, изготовленных с применением специальных полимерных материалов, способно повысить стойкость к гидроабразивному износу и повысить долговечность гидротранспортных систем.

Целью данной работы является оценка работоспособности полимерных труб с внутренним слоем из термопластичного эластомера в сравнении с традиционно используемыми для обустройства пульпопроводов трубами со стальными и полиэтиленовыми внут-

ренними стенками в условиях интенсивного гидроабразивного износа гидросмесями хвостов обогащения железных руд.

Работа выполнена совместно с кафедрой химии и технологии переработки пластмасс и полимерных композитов института тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова РТУ МИРЭА и кафедрой транспортно-технологических процессов и машин Санкт-Петербургского Горного университета.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали образцы напорной многослойной трубы с наружным несущим слоем из композиции полиэтилена высокой плотности и внутренним слоем повышенной износостойкости из термопластичного вулканизата (TPV), разработанного Научно-исследовательским институтом Группы ПОЛИПЛАСТИК; образцы трубы напорной однослойной из композиции полиэтилена высокой плотности с минимальной длительной прочностью MRS = 10 МПа (ПЭ 100), выпущенной в соответствии с требованиями ГОСТ 18599; образцы из трубы стальной Ст3сп электросварной прямошовной по ГОСТ 10704-91.

Исследуемые образцы были изготовлены в двух вариантах:

1. В виде секции трубопровода с внутренним диаметром 50 мм, длиной 200 мм и фланцевым соединением;
2. В виде вставки, монтируемой в специальную секцию трубопровода, с внутренним диаметром 25 мм и длиной 70 мм.

Испытания проводились на 6 образцах:

- образец №1 – секция трубопровода напорная многослойная;
- образец №2 – секция трубопровода напорная однослойная;
- образец №3 – секция трубопровода стальная;
- образец №4 – вставка напорная многослойная;
- образец №5 – вставка напорная однослойная;
- образец №6 – вставка стальная.

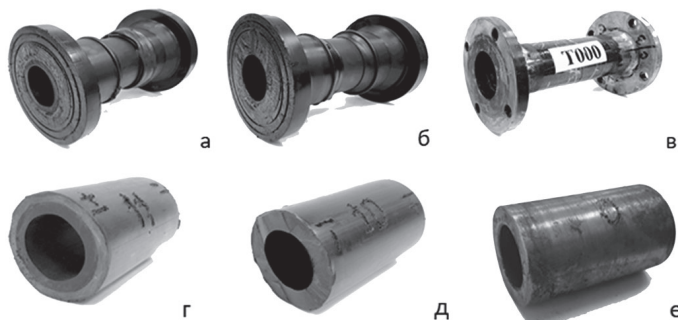


Рис. 1. Образцы для испытаний. а – образец №1, б – образец №2, в – образец №3, г – образец №4, д – образец №5, е – образец №6.

Испытания проводили на лабораторном стенде, разработанном в Санкт-Петербургском горном университете (рис. 2), который состоит из расходного бака 1, заполняемого исследуемой жидкостью, двух центробежных (песковых) насосов 2 типа П12,5/12,5СП, приводимых в движение асинхронными двигателями, системы трубопроводов и запорной арматуры (3, 6, 10) и измерительных приборов (4, 5, 7, 8, 9, 12). Исследуемая жидкость из расходного бака 1 подается в насосы 2 по всасывающему трубопроводу через шаровые краны 10 и далее по напорному трубопроводу, состоящему из секций трубопроводов, попадает обратно в бак. Наличие в системе двух насосов позволяет реализовать параллельную схему подключения.

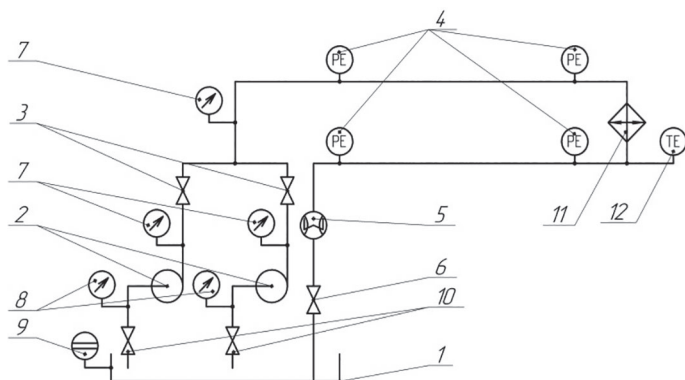


Рис. 2. Принципиальная гидравлическая схема лабораторного стенда. 1 – расходный бак; 2 – песковые насосы центробежного типа; 3, 6, 10 – шаровые краны; 4 – реле давления; 5 – расходомер; 7 – манометры с разделителями сред; 8 – вакуумметры с разделителями сред; 9 – указатель уровня; 11 – теплообменник; 12 – датчик температуры.

Испытуемые образцы № 4, 5 и 6 вставляли в подготовленную секцию трубопровода, которая вместе с образцами № 1, 2 и 3 монтировалась в систему трубопроводов посредством фланцевых соединений, образующих замкнутый гидравлический контур между насосом и расходным баком. В расходном баке подготавливалась гидросмесь из водопроводной воды и твердого абразивного материала. После запуска насоса гидросмесь, перемещаясь по системе трубопроводов, изнашивала внутреннюю поверхность образцов в ходе испытания. Величина гидроабразивного износа оценивалась

через потерю массы образцов [1, 2, 3, 4]. Для измерения массы образцов лабораторная установка останавливалась, производился демонтаж образцов и их просушка (искусственная и естественная).

Для получения гидросмеси в качестве абразивного материала были взяты отвальные хвосты обогащения железной руды двух видов с отличающимся средневзвешенным диаметром частиц:

- гидросмесь №1 – вода и хвосты обогащения со средневзвешенным диаметром частиц $d_{ср} = 0,07789$ мм;
- гидросмесь №2 – вода и хвосты обогащения со средневзвешенным диаметром частиц $d_{ср} = 0,491$ мм.

Лабораторные испытания проводились при следующих условиях:

- температура среды – до 40°C;
- давление в системе – до 0,125 МПа;
- скорость потока в образцах №1, 2 и 3 – до 3,5 м/с;
- скорость потока в образцах №4, 5 и 6 – до 8 м/с;
- массовая концентрация гидросмеси варьировалась в диапазоне 10–50%;
- время одного цикла испытания составляло от 50 до 300 часов.

Перед монтажом образцов в систему трубопроводов лабораторного стенда осуществлялось первичное взвешивание образцов с помощью высокоточных весов A&D DL-5000. Давление в системе трубопроводов лабораторного стенда измерялось с помощью реле давлений Wika PSD-4 (поз. 4, рис. 2), а расход и объем прокачанной гидросмеси – с помощью доплеровского расходомера PortoFlow D550 (поз. 5, рис. 2). После отключения насоса секции трубопровода демонтировались, затем проводилась промывка, очистка и естественная (при комнатной температуре 25°C в течение 24 часов) и/или искусственная (в печи при температуре 70–90°C в течение 20 часов) сушка образцов. Для изучения внутренней поверхности исследуемых образцов использовался световой микроскоп Leica DMILM. После сушки образцы взвешивались, и проводился запуск следующего цикла испытаний.

Лабораторные испытания проводили в несколько циклов, отличающихся временем наработки, массовой концентрацией гидросмеси, способом сушки образцов и видом используемой гидросмеси (табл. 1).

Общий объем прокачанной гидросмеси №1 для образцов №1 и №2 составил 4635 м³, для образцов №4 и №5 – 5704 м³, для образцов №3 и №6 – 6400 м³. Общий объем прокачанной гидросмеси №2 для всех образцов составил 840 м³.

Результаты и обсуждение

По завершении эксперимента с использованием гидросмеси №1 испытание образцов было продолжено на гидросмеси №2, характеризующейся большим размером частиц. По результатам проведенных испытаний построены графические зависимости массы исследуемых образцов от объема прокачанной пульпы (рис. 3, 4).

Представленные графические зависимости (рис. 3) демонстрируют, что образцы №3 и №6, выполненные из материала Сталь 3сп, на протяжении всего эксперимента теряют массу, причем зависимость потери массы от объема – линейная. Наиболее интенсивная потеря массы наблюдается у образца №6. При переходе на гидросмесь №2 для обоих образцов наблюдается увеличение интенсивности износа. Масса образцов №2 и №5 (рис. 3, 4), изготовленных из полиэтилена высокой плотности (ПЭ 100), линейно уменьшается в процессе эксперимента. При переходе на вторую гидросмесь интенсивность износа образца №5 также возрастает, а масса образца №2 остается практически неизменной. Для образцов №1 и №4 (рис. 3, 4) с внутренним слоем из термопластичного вулканизата наблюдается увеличение массы в процессе эксперимента, при этом для обоих образцов существует

Таблица 1. Этапы проведения лабораторных исследований.

№ цикла	Наработка, ч / Объем прокачанной гидросмеси, м ³	Гидросмесь	Массовая концентрация, %	Исследуемые образцы	Способ сушки
1	50/369	№1	10–25	№3, 6	Естественная
2	50/372	№1	30	№ , 6	Естественная
3	100/1069	№1	38–42	№3, 4, 5, 6	Естественная
4	100/1279	№1	38–42	№1, 2, 3, 4, 5, 6	Естественная
5	300/3356	№1	40–50	№1, 2, 3, 4, 5, 6	Искусственная и естественная
6	100/840	№2	40–50	№1, 2, 3, 4, 5, 6	Искусственная и естественная

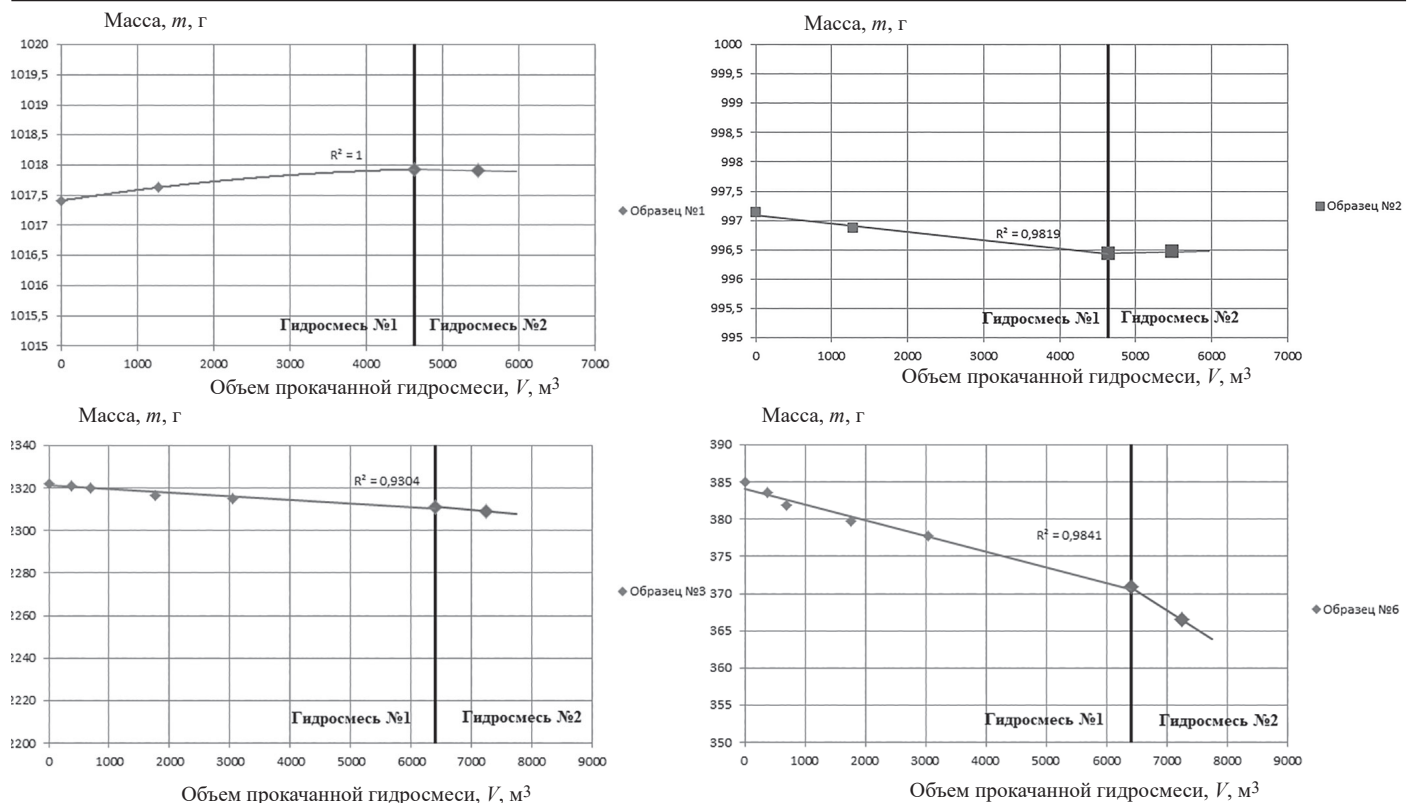


Рис. 3. Зависимость массы испытываемых образцов от объема прокачанной гидросмеси.

точка, в которой достигается максимальное значение массы (в рамках данного исследования эта точка совпадает с переходом на гидросмесь №2). При объеме прокачанной гидросмеси более 5000 m^3 видимой потери массы не наблюдается, однако набор массы для обоих образцов останавливается.

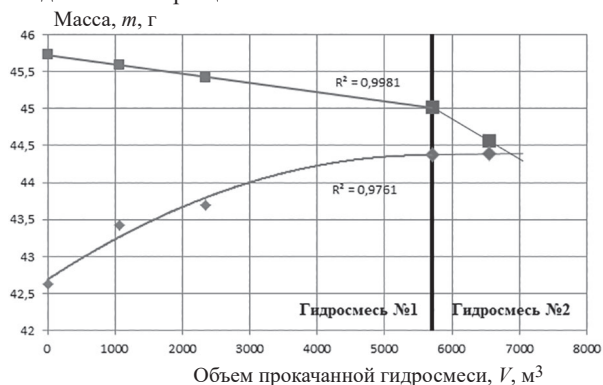


Рис. 4. Зависимость массы образцов №4 и №5 от объема прокачанной гидросмеси.

Абсолютное значение износа определяется взвешиванием образцов до и после проведения эксперимента [1, 2]:

$$\Delta m = m_1 - m_2, \quad (1)$$

где m_1 и m_2 – массы исследуемого образца до и после цикла испытания, г.

Зависимость абсолютного износа от объема перекачанной гидросмеси представлена на рис. 5. Поскольку плотность стали примерно в 8 раз больше плотностей полиэтилена и термопластичного вулканизата, абсолютный износ (рис. 5) представлен в объемных потерях ($\Delta m/\rho$, cm^3).

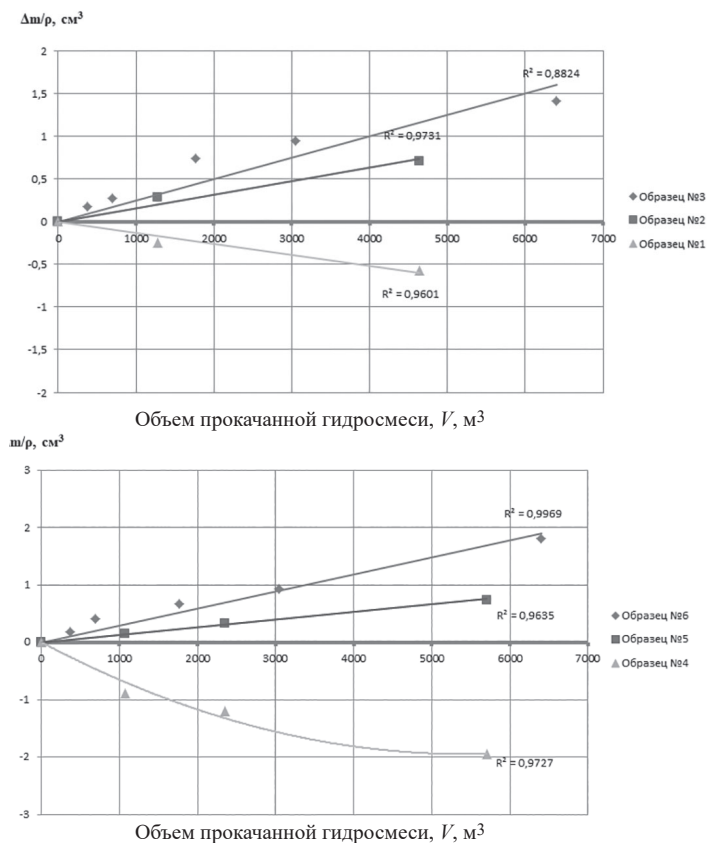


Рис. 5. Зависимость абсолютного износа образцов от объема прокачанной гидросмеси №1.

Таблица 2. Результаты расчета удельного гидроабразивного износа.

Образец	Объем прокачанной гидросмеси №1 V_1 , m^3	Объем прокачанной гидросмеси №2 V_2 , m^3	Плотность образца ρ , г/ cm^3	Удельный гидроабразивный износ I_1 , cm^3/m^3	Удельный гидроабразивный износ I_2 , cm^3/m^3
№1	4635	840	0,900	—	—
№2	4635	840	0,959	$0,15 \cdot 10^{-3}$	—
№3	6400	840	7,85	$0,22 \cdot 10^{-3}$	$0,32 \cdot 10^{-3}$
№4	5704	840	0,900	—	—
№5	5704	840	0,959	$0,13 \cdot 10^{-3}$	$0,57 \cdot 10^{-3}$
№6	6400	840	7,85	$0,28 \cdot 10^{-3}$	$0,66 \cdot 10^{-3}$

Абсолютное значение износа может быть представлено в объемной величине с учетом объема перекачанной гидросмеси и плотности ρ исследуемых образцов. Тогда удельный износ, выраженный в $\text{см}^3/\text{м}^3$, может быть определен по формуле:

$$I = \Delta m / \rho V, \quad (2)$$

где Δm – убыль массы исследуемого образца (абсолютный износ), г; ρ – плотность материала исследуемого образца, $\text{г}/\text{см}^3$; V – суммарный объем гидросмеси, прошедший через испытуемый образец, м^3 .

Результаты расчета удельного гидроабразивного износа испытываемых образцов при транспортировании гидросмесей №1 и №2 представлены в таблице 2.

Наибольшая величина удельного гидроабразивного износа наблюдается у стальных труб, в частности, у образца №6 – $0,28 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^3$ при работе на гидросмеси №1 и $0,66 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^3$ при работе на гидросмеси №2. Для образцов №1 и №4 с внутренним слоем из термоэластопласта удельный гидроабразивный износ не был определен, так как фактически представленные образцы имели отрицательную убыль массы, т.е. увеличивали свою массу на протяжении всего отведенного для эксперимента временного интервала. В работе [5] было установлено, что под ударным воздействием металлических шариков у хрупких полимеров, таких как полистирол, массовые потери можно было наблюдать с самого начала эксперимента, а отделение фрагментов материала у более пластичных полимеров начиналось только спустя определенный промежуток времени, при этом наблюдалось увеличение массы образцов вследствие внедрения эрозионных частиц. Однако по прошествии инкубационного периода масса образцов начинала линейно уменьшаться. В рамках настоящего исследования также был установлен факт внедрения частиц твердой фракции гидросмеси в материал внутреннего слоя образцов №1 и №4 (рис. 6, 7), а отсутствие весового износа в течение длительного времени объясняется наличием продолжительного инкубационного периода процесса разрушения, который обычно характерен для высокостойких при работе в контактно-динамическом режиме нагружения марок резин и резиноподобных материалов, таких как определенные виды термоэластопластов [3].

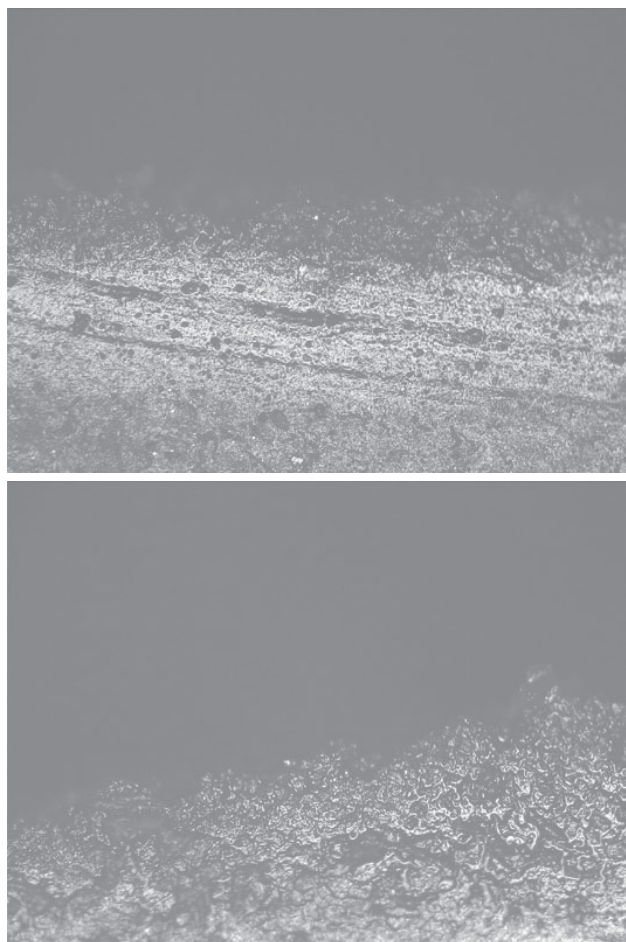


Рис. 6. Внутренняя поверхность образцов №1 и №4 до взаимодействия с гидросмесью (увеличение в 200 раз).

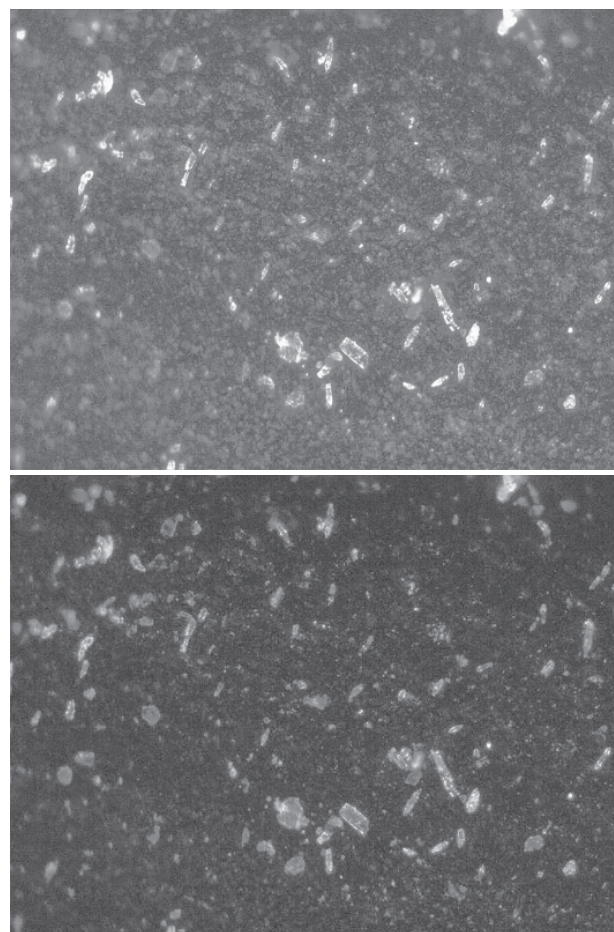


Рис. 7. Внутренняя поверхность образцов №1 и №4 после взаимодействия с гидросмесью (увеличение в 100 раз).

В общем виде на гидроабразивный износ оборудования трубопроводного транспорта, в том числе пульпопроводов, влияют следующие факторы [1, 2, 3, 6, 7]: минералогический и гранулометрический состав транспортируемого материала, скорость прохождения частиц, угол воздействия частиц на поверхность, форма частиц, концентрация гидросмеси, время воздействия частиц, свойства изнашиваемого материала.

По результатам ряда исследований доказано, что работа, вызывающая износ от воздействия частиц твердого материала, пропорциональна кинетической энергии частиц [3, 8], причем авторы [3] отмечают, что если величина износа пропорциональна количеству поглощенной энергии, то жизненный цикл стали должен быть выше, чем у резины, но на практике, как правило, наблюдается обратная картина. В связи с чем в [3] сообщается о необходимости учитывать деформированный объем, для чего предлагается использовать удельную характеристику – плотность поглощенной энергии:

$$e_n = \chi W_k / V_d \quad (3)$$

где e_n – плотность поглощенной энергии, W_k – кинетическая энергия частиц, V_d – деформированный объем, χ – коэффициент механических потерь.

В работе [9] представлено следующее обобщенное уравнение, отражающее физическую сущность процесса износа:

$$I = c \cdot k \cdot E_{\text{кин}} \cdot t, \quad (4)$$

где I – износ (количество разрушенного материала); c – коэффициент, учитывающий свойства материала детали и свойства твердых частиц; k – коэффициент пропорциональности, указывающий долю кинетической энергии, истраченную на разрушение; $E_{\text{кин}}$ – кинетическая энергия твердых частиц, t – время воздействия частиц.

При прочих равных условиях кинетическая энергия твердых частиц определяется их скоростью в потоке гидросмеси, что позволяет говорить о зависимости износа от скорости потока гидросмеси. Так, в работе [1] представлена следующая функциональная зависимость интенсивности износа от скорости:

$$I \sim s \cdot u^n, \quad (5)$$

где s – концентрация гидросмеси; u – скорость потока; n – показатель степени.

Показатель степени n для прямых труб по данным [1] равняется 3, по данным [8] – находится в пределах 2,5–3. В работе [3] интенсивность изнашивания резиновых материалов предлагается определять по эмпирической формуле $I = a \cdot u^{2,3}$, где a – коэффициент пропорциональности. С другой стороны, количество твердых частиц, соприкасающихся с изнашиваемой поверхностью, увеличивается пропорционально первой степени расхода или скорости гидросмеси [7].

Результаты представленных экспериментальных исследований подтверждают зависимость интенсивности износа от скорости потока гидросмеси для стальных образцов. Так для образца №6 удельный износ составляет $0,28 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^3$ (диаметр вставки – 25 мм), а для образца №3 – $0,22 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^3$ (диаметр образца – 50 мм). Интенсивность износа для образца, имеющего меньший диаметр, в 1,3 раза выше при скорости потока, большей в 4 раза. На второй гидросмеси для образца №6 также наблюдается более высокий уровень износа.

В работе [7] предлагается следующая эмпирическая формула, связывающая скорость изнашивания с концентрацией твердых частиц в гидросмеси:

$$I = k \cdot c^m, \quad (6)$$

где k – коэффициент, зависящий от материала; c – концентрация абразивных частиц в гидросмеси.

Результаты исследований [10, 11] показывают, что с увеличением концентрации износ возрастает линейно, т.е. показатель степени $m = 1$. Однако стоит отметить, что износ прямо пропорционален концентрации при значениях c только в диапазоне от 0 до 0,25% [1], а дальнейшее увеличение концентрации сказывается на износе значительно меньше. В работе [7] для образцов, изготовленных из различных марок чугунов и сталей (в т.ч. Ст3), рост интенсивности износа от концентрации по линейному закону наблюдается до концентраций 4–6%, а при значениях более 10–12% концентрация не оказывает влияния на износ. Среди возможных причин замедления скорости изнашивания при определенных значениях концентраций рассматриваются такие, как увеличение частоты соударений частиц друг с другом и экранирующий эффект по причине осаждения абразивного материала в трубопроводе [3, 12].

В наших исследованиях минимальная концентрация гидросмеси составляла 10%, а максимальная – 50%, и по полученным зависимостям массы от объема (рис. 3, 4) видно, что характер кривой, описывающей потерю массы, не менялся при разной концентрации, что подтверждает теорию.

Результаты исследований, представленные в работе [3], показывают влияние дисперсности на износ: интенсивность изнашивания возрастает с уменьшением дисперсности – увеличением содержания крупных частиц. На графических зависимостях (рис. 3 и 4), полученных согласно данным настоящего исследования, видно, что при переходе от гидросмеси №1 (средневзвешенный диаметр частиц $d_{cp} = 0,07789 \text{ мм}$) на гидросмесь №2, имеющую средневзвешенный диаметр абразивных частиц $d_{cp} = 0,491 \text{ мм}$, наблюдается увеличение потери массы образцами. Так, для образца №3, изготовленного из Ст3сп, интенсивность износа возрастает с $0,22 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^3$ до $0,32 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^3$, а для образца №6 – с $0,28 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^3$ до $0,66 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^3$. Для образца №5, изготовленного из композиции полиэтилена высокой плотности интенсивность возрастает с $0,13 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^3$ до $0,57 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^3$. В литературе отмечается, что при достижении определенных значений размера абразивных частиц может наблюдаться и снижение интенсивности износа [3, 12, 13, 14].

Заключение

После прокачивания гидросмеси объемом более 5700 м³ и общей наработки более 600 часов образцы многослойной напорной трубы с TPV-покрытием продемонстрировали высокую стойкость к гидроабразивному износу. Сравнительный анализ интенсивности изнашивания показал, что в условиях потока гидросмесей хвостов обогащения железных руд стойкость к гидроабразивному износу напор-

ной полимерной трубы с внутренним слоем из термопластичного вулканизата значительно превышает износостойкость напорной трубы из полиэтилена высокой плотности (ПЭ 100) и трубы из стали Ст3сп, причем полиэтилен высокой плотности и сталь 3 характеризуются близкими значениями объемных потерь. Результаты исследований показали, что специально разработанная экструзионная марка TPV для работы в условиях ударно-динамического нагружения является одним из ближайших аналогов резины, что подтверждается наличием достаточно продолжительного инкубационного периода процесса разрушения. В рамках настоящего исследования также была проведена оценка основных параметров, влияющих на скорость изнашивания. Отделение фрагментов материала для стальных и полиэтиленовых образцов можно было наблюдать с самого начала эксперимента. Длительный инкубационный период разработанного TPV обуславливает долговечность труб, изготовленных с применением данного материала, но для установления фактических значений степени износа в текущих условиях эксперимента требуется воздействие использованных в данной работе гидросмесей в течение значительно более длительного времени, выходящего за рамки инкубационного периода.

Литература

- Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт. Изд. 3, перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. – 293 с.
- Долганов А.В., Тимухин С.А. Гидроабразивный износ насосов рудничного водоотлива: научная монография. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2016. – 180 с.
- Пенкин Н.С., Копченков В.Г. и др. Гуммированные детали машин. Изд. 2, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2013. – 245 с.
- Долганов А.В. Влияние гидроабразивного износа элементов проточной части на эксплуатационные качества центробежных насосов медно-колчеданных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №8. – С. 181–186.
- Klaus Frisdrich. Erosive wear of polymers surfaces by steel ball blasting // Journal of Materials Science. – 1986. – V. 21 (9). – P. 3317–3332.
- Волгина Л.В., Медзвелья М.Л., Чемерис О.Г. Влияние мелкодисперсных включений на расчет критической скорости двухфазного потока // Вестник МГСУ. – 2014. – №11. – С. 145–153.
- Борохович А.И. и др. Некоторые вопросы износа, расчета и конструирования углесосно-насосного оборудования. – Новокузнецк, 1968. – 148 с.
- Тимербулатов М.Г. Роторная установка для испытания металлов на гидроабразивный износ // Заводская лаборатория. – 1964. – Т. XXX. – №1. – С.95.
- Кашеев В.Н. Абразивное зерно и абразивное разрушение поверхности твердого тела. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. Наук. Томский государственный университет им. В.В. Куйбышева, 1953 г.
- Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. – М.: Машиностроение, 1964. – 139 с.
- Смолдырев А.Е., Архипова Л.А. Гидравлический напорный транспорт угля с высокими концентрациями // Уголь. – 1963. – №2.
- Barkoula N-M., Karger-Kocsis J. Review. Processes and influencing parameters of solid particle erosion of polymers and their composites// Journal of materials science. – 2002. – № 37. – P. 3807–3820.
- Zhang S.W., Wang Deguo, Yin Weihua. Investigation of abrasive erosion of polymers // Journal of materials science. – 1995. – № 30. – P. 4561–4566.
- Кашеев, В.Н. Износ при наличии абразива / В.Н. Кашеев, Г.Я. Ямпольский // Трение, изнашивание и смазка: Справочник: в 2-х т. / ред. И.В. Крагельский, В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. – 2 т. – С. 323–337.