

Исследование стойкости материалов на основе полимочевины при гидроабразивном воздействии

Study of the resistance of polyurea-based materials to hydroabrasive effects

Ю.Ю. ФЕДОРОВ, Т.М. СОЛОВЬЕВ, О.Н. БУРЕНИНА

YU.YU. FEDOROV, T.M. SOLOVIEV, O.N. BURENINA

Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»,
обособленное подразделение Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск, Россия
Federal Research Center "Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences",
a separate division Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Yakutsk, Russia
yuristan@yandex.ru

Проведены исследования стойкости полимочевинных покрытий к воздействию гидроабразивной среды, содержащей 60 масс.% карбида кремния с дисперсностью частиц 1–3 мм и 40 масс.% воды. Эксперименты проведены согласно СТО 52483924-001-2026. Продолжительность каждого эксперимента – 1 час, скорость вращения образцов – 400 об/мин, размеры образцов – 50×50×2 мм. Результаты исследований показали, что максимальной стойкостью обладают полимочевины типа Экстраплан-501 производства Huntsman-NMG. Достаточно высокие показатели стойкости характерны также для полимочевин производства АО «Химтраст». Стойкость указанных материалов превышает стойкость ранее исследованных сверхвысокомолекулярного полиэтилена GUR 4150, полимочевины Elastocoat C6335/134 и полиуретана ЭП СКУ ПТ-74.

Ключевые слова: покрытие, полимер, полимочевина, гидроабразивостойкость, долговечность

The resistance of polyurea coatings to the effects of a hydroabrasive medium containing 60 wt.% silicon carbide with a particle size of 1–3 mm and 40 wt.% water was studied. Experiments were carried out according to STO 52483924-001-2026. The duration of each experiment was 1 hour, the rotation speed of the samples was 400 rpm, and the dimensions of the samples were 50×50×2 mm. According to the research results, Huntsman-NMG's Extraplan-501 polyureas have the highest resistance. Polyureas produced by Khimtrust JSC also have fairly high resistance properties. The resistance of these materials exceeds the resistance of the previously studied ultra-high molecular weight polyethylene GUR 4150, polyurea Elastocoat C6335/134 and polyurethane EP MCS PT-74.

Keywords: coating, polymer, polyurea, water-abrasive resistance, durability

DOI: 10.35164/0554-2901-2026-02-5-7

Введение

Защита от гидроабразивного воздействия является одной из актуальных задач повышения долговечности деталей машин, механизмов и технологического оборудования, эксплуатирующихся в горнодобывающей промышленности, особенно в процессах переработки и обогащения минерального сырья. Определение показателей стойкости защитных материалов и покрытий к гидроабразивному воздействию в лабораторных условиях является необходимым при выборе наиболее перспективных рецептурных составов для дальнейшего применения.

Наиболее широко в настоящее время в качестве защитных материалов и покрытий используют резины на основе натурального каучука и износостойкие марки стали и чугуна. Ранее проведенные исследования [1] показали перспективность применения для этих целей сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), полиуретана и полимочевины. Наибольшую стойкость в лабораторных исследованиях показал сверхвысокомолекулярный полиэтилен GUR 4150. Полимочевина Elastocoat C6335/134 и полиуретан ЭП СКУ Т-74 тоже показали достаточно высокую стойкость. Несмотря на высокую износостойкость СВМПЭ, возможности его

применения достаточно ограничены, так как его закрепление на защищаемую поверхность возможно только механическими способами. Поэтому при продолжении работ были изучены различные марки полимочевины, покрытия из которых могут наноситься на металлические поверхности путем напыления с применением специального оборудования и вручную при помощи кисти или валика.

Объекты исследования

Исследованиям были подвергнуты покрытия из следующих образцов полимочевин: «Химтраст ПМ твердая» и «Химтраст ПМ стандартная» (производство АО «Химтраст», г. Нижнекамск), Starflex HR-E (производство предприятия MPM-Russia, г. Екатеринбург), «Экстраплан 501» (производство ЗАО «Хантсман-НМГ», г. Обнинск), PUA-100 и PUA-400 (производство компании RUITU, КНР). Их основные физико-механические характеристики представлены в табл. 1 (данные были взяты с официального сайта производителя испытанных полимочевин).

В целом можно отметить, что полимочевины «Химтраст ПМ твердая», «Химтраст ПМ стандартная» и «Экстраплан 501» имеют близкие значения по таким показателям, как прочность при

Таблица 1. Основные физико-механические характеристики образцов полимочевин.

Марка	Прочность при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Твердость по Шору А	Стойкость к истиранию по Таберу, мг
Химтраст ПМ твердая	19–21	300–400	90–100	28,6 (Н-18, 1000 г, 1000 об.)
Химтраст ПМ стандартная	18–20	350–450	85–95	47 (Н-18, 1000 г, 1000 об.)
Starflex HR-E	14	600	70–80	40 (Н-22, 1000 г, 1000 об.)
Экстраплан 501	20	350	96	156 (Н-18, 1000 г, 1000 об.)
PUA-100	20	544	88	18 (750 г, 500 об.)
PUA-400	22	80	65–75	30 (750 г, 500 об.)

разрыве, относительное удлинение при разрыве, твердость по Шору А. При этом полимочевина «Экстраплан 501» обладает более низкой стойкостью к истиранию по Таберу [ГОСТ 20811–2025, метод В].

Полимочевина Starflex HR-E, по сравнению с остальными образцами полимочевин, характеризуется наименьшей прочностью при разрыве и наибольшим значением относительного удлинения при разрыве, а также имеет сравнительно низкую твердость по Шору А.

Марки полимочевин китайского производства имеют похожие значения по прочности при разрыве, однако существенно отличаются по показателю относительного удлинения при разрыве. Так, полимочевина марки PUA-400 имеет крайне низкую степень относительного удлинения при разрыве. Также следует обратить внимание на показатель их стойкости к истиранию по Таберу. К сожалению, в их техническом паспорте не указано, на каком абразивном диске проводилось испытание. Поэтому некорректно сравнивать по данному показателю полимочевин PUA-100 и PUA-400 с марками полимочевин российского производства.

Однако, как отметил автор статьи [2], показатель стойкости к истиранию по Таберу не подходит для оценки устойчивости материала к износу при гидроабразивном воздействии из-за различия в механизмах изнашивания материала в этих испытаниях. При испытании на приборе Табер-1700 (Taber Industries, США) действует абразивный механизм изнашивания материала в условиях трения скольжения закрепленным абразивом. При этом стойкость материала к истиранию больше зависит от его твердости. А при гидроабразивном воздействии на материал происходит сочетание абразивного механизма изнашивания с усталостным. При усталостном механизме изнашивания в условиях упругого и вязкоупругого контакта скорость изнашивания покрытия в значительной мере определяется его модулем упругости, с понижением которого она уменьшается. Этим объясняется успешное использование покрытий из эластомеров для внутренней изоляции трубопроводов, используемых для транспортирования жидкостей с высокой концентрацией механических примесей.

Метод исследования

В данной работе определение износостойкости материала проводилось по методике, разработанной в нашем институте. Методика экспериментов подробно изложена в стандарте организации СТО 52483924-001–2021 «Метод определения износостойкости материалов и покрытий при гидроабразивном воздействии» [2, 3].

Установка для определения износостойкости материалов и покрытий при гидроабразивном воздействии схематично представлена на рис. 1

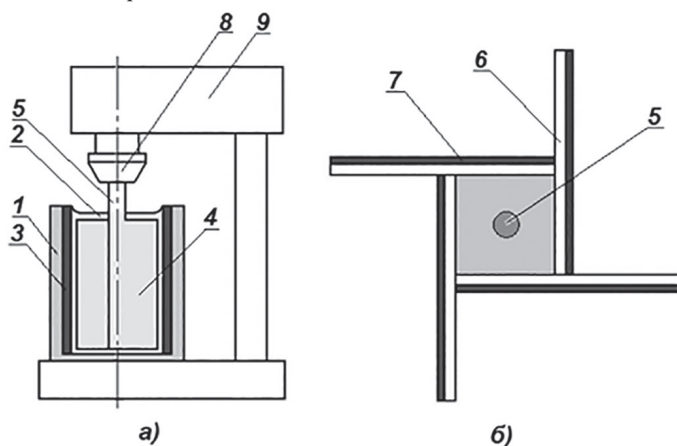


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для исследования гидроабразивной стойкости материалов и покрытий: а) схема устройства в разрезе; б) схема лопасти (вид сверху).

Устройство содержит цилиндрический корпус (1), заполняемый гидроабразивной средой (2). На внутреннюю поверхность корпуса наносится или прикрепляется исследуемое покрытие или материал (3). В корпус concentрично помещается смеситель (4), нижняя часть которого выполняется в виде многогранного стержня (5), к граням которого прикреплены пластины (6) с нанесенными на их поверхности исследуемыми покрытиями или образцами материалов (7). Смеситель закрепляется в патроне (8) вер-

тикального сверлильного станка (9). Исследуемые образцы покрытий и материалов (7) могут иметь различный состав, и в ходе одного эксперимента можно получить информацию об их износостойкости при одинаковых условиях испытаний. Сверлильные станки обеспечивают возможность проведения испытаний в широком диапазоне фиксируемых скоростей вращения смесителя и имитации перекачивания гидроабразивных средств с различной скоростью.

Для проведения исследований из каждого вида полимочевин изготавливалось по 8 образцов с размерами 50×50×2 мм. Одновременно на экспериментальной установке испытывали четыре образца. Показатели гидроабразивной стойкости определяли как среднее арифметическое по результатам изменений веса. Гидроабразивная среда представляла собой смесь 60 масс.% карбида кремния с дисперсностью частиц 1–3 мм и 40 масс.% воды. Скорость вращения образцов составляла 400 об/мин. Продолжительность испытаний – один час.

Обсуждение результатов

Результаты определения гидроабразивной стойкости испытанных марок полимочевин представлены в табл. 2. В качестве сравнения также представлены значения гидроабразивной стойкости сверхвысокомолекулярного полиэтилена марки GUR 4150. Как видно из табл. 2, из всех марок полимочевин наибольшей стойкостью к воздействию гидроабразивной среды обладают образцы полимочевин «Химтраст ПМ твердая», «Химтраст ПМ стандартная» и «Экстраплан 501». Образцы двух последних из указанных марок полимочевин показали даже более высокую стойкость, чем аналогичный показатель для сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

Таблица 2. Гидроабразивная стойкость различных полимерных материалов.

№ п/п	Материал	Интенсивность износа	
		мг·час ⁻¹	мг·час ⁻¹ м ⁻²
1	СВМПЭ GUR 4150	8,1	0,324
2	Полимочевина Elastocoat C6335/134	12,8	0,512
3	Полиуретан ЭП СКУ Т-74	15,7	0,628
4	Полимочевина Химтраст ПМ твердая	8,0	0,320
5	Полимочевина Химтраст ПМ стандартная	5,6	0,224
6	Полимочевина PUA-100	31,0	1,240
7	Полимочевина PUA-400	33,4	1,336
8	Полимочевина Starflex HR-E	14,3	0,572
9	Полимочевина Экстраплан 501	4,7	0,188

Сравнительно более сильный массовый износ материала происходит у образцов покрытий из полимочевин марок PUA-100 и PUA-400.

В полученных данных наблюдается определенная взаимосвязь между физико-механическими свойствами и показателем гидроабразивной стойкости полимочевин. Так, отмеченные выше марки полимочевин «Химтраст ПМ твердая», «Химтраст ПМ стандартная» и «Экстраплан 501» характеризуются близкими физико-механическими свойствами (по разрушающему напряжению при сжатии, по относительному удлинению при разрыве и твердости по Шору А).

Кроме того, стоит отметить, что у всех испытанных образцов на их изношенной поверхности наблюдалось изменение цвета материала вследствие импрегнирования абразивными частицами. Данный факт также был установлен в других работах [4–7] по исследованию гидроабразивной стойкости полимерных материалов. Внедрение частиц абразива внутрь материала во время гидроабразивного испытания характерно для более пластичных полимерных материалов. По этой причине в таких случаях определить абсолютное значение износа довольно трудно. Для решения этой проблемы предлагается применять различные подходы. Например, при обработке результатов испытаний учитывать плотность

исследуемого материала и объем перекаченной гидросмеси, или определять износ материала по деформированному объему, или оценивать гидроабразивостойкость материала по зависимости износа от скорости потока гидросмеси, и т.д. [4, 8–10].

Выводы

Представленные в настоящей работе данные по гидроабразивному износу (табл. 1) не отражают абсолютный износ материала. Полученные данные использованы для сравнительного анализа и предварительной оценки гидроабразивного износа исследованных марок полимочевины. Разработанная методика определения гидроабразивостойкости материалов может быть применена как экспресс-анализ для предварительной сравнительной оценки исследуемых образцов, так как не требует большого объема перекачиваемой гидросмеси и длительных испытаний.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWRS-2025-0045, рег. № 125121014137-4 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра Якутского научного центра СО РАН.

Литература

1. Антоев К.П., Попов С.Н., Заровняев Б.Н. Исследование стойкости к гидроабразивному воздействию перспективных футеровочных материалов // Известия Тульского государственного университета. Наука о земле. 2019. №1. С. 185–191. EDN: HGWRDJ.
2. Штырев О.О. О недопустимости использования установки Taber Abraser и подобных ей для контроля сопротивления материалов внутренних полимерных покрытий труб нефтяного сортамента гидроабразивному износу при воздействии потока жидкой среды, содержащей механические примеси // Территория Нефтегаз. 2015. №9. С. 86–90.
3. Попов С.Н., Антоев К.П. Метод определения износостойкости материалов и покрытий при гидроабразивном воздействии. Стандарт организации СТО 52483924-001-2021. ФГУ «Якутский ЦСМ» №037/001176 от 17.06.2021.
4. Патент на полезную модель № 166009U1 Российская Федерация, МПК G01N3/56 (2006.01). Устройство для исследования износостойкости материалов и покрытий при гидроабразивном воздействии. Заявка RU2016110209/28U: заявл. 2016-03-21; опубл. 2016-11-10 / Попов С.Н., Антоев К.П., Герасимов А.И., Заровняев Б.Н.; заявитель ФГБУН Институт проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН.
5. Скребнев В.И., Сержан С.Л., Калугина Е.В. Исследование стойкости к гидроабразивному износу полимерных и стальных труб. Оценка основных параметров, влияющих на интенсивность износа гидротранспортных систем // Пластические массы. 2020. №9–10. С. 40–44. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-9-10-40-44.
6. Klaus Friedrich. Erosive wear of polymers surfaces by steel ball blasting // Journal of Materials Science. 1986. Vol. 21(9). P. 3317–3332. DOI: 10.1007/BF00553375.
7. 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. N37. P. 3807–3820. DOI: 10.1023/A:1019633515481.
8. Zhang S.W., Wang Deguo, Yin Weihua. Investigation of abrasive erosion of polymers // Journal of materials science. 1995. N30. P. 4561–4566. DOI: 10.1007/BF01153063.
9. Пенкин Н.С., Копченков В.Г. и др. Гуммированные детали машин: учебное пособие. 2 изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение. 2013. 245 с. ISBN 978-5-94275-701-4.
10. Смолдырев А.Е. Трубопроводный транспорт (основы расчета). 3 изд., перераб. и доп. М.: Недра. 1980. 293 с.
11. Никулин А.И., Татьков В.А., Юрин П.И., Борохович А.И. Некоторые вопросы износа, расчета и конструирования углесосно-насосного оборудования / под. общ. ред. П.И. Юрина. Министерство угольной промышленности СССР. Технич. управл. ВНИИГ гидроуголь. Новокузнецк: [б. и.]. 1968. 148 с.