



Research Article

Received: December 10, 2021

Accepted: December 20, 2021

Published: December 23, 2021

ISSN 2304-6295

# Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study

Mishnev, M. V.<sup>1\*</sup> Korolev A. S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation; [mmv2004@list.ru](mailto:mmv2004@list.ru) (M.M.V.); [korolev@sc74.ru](mailto:korolev@sc74.ru) (K.A.S.)

Correspondence: \* [mmv2004@list.ru](mailto:mmv2004@list.ru)

## Keywords:

Solid particle erosion; Composite materials; Thermoset resins; Fiberglass; Wear resistance; Gas ducts; Abrasive flow

## Abstract:

The work is devoted to experimental research of resistance to gas abrasion of polymeric thermosetting binders and composites on their basis, intended for use in constructions of gas exhaust ducts of the industrial enterprises (mainly metallurgical). The new experimental equipment for gas-abrasive wear tests has been developed and made. This equipment allows to carry out accelerated tests at temperatures up to 250 °C at angles of attack of 90° and 45°. The tests carried out on this equipment allowed to receive dependence of wear intensity of the considered binders in a gas-abrasive flow on temperature change and mechanical characteristics changing due to it. The influence of long-term exposure at the temperature exceeding the glass transition temperature on their resistance to gas-abrasive wear is evaluated. The wear resistance in gas abrasion flow of glass-reinforced plastics based on epoxy and epoxy-phenolic binders and different types of glass fabrics is evaluated.

## 1 Introduction

Согласно утвержденной Правительством РФ дорожной карте «Технологии новых материалов и веществ» Российская Федерация к 2024 году должна сократить технологическое отставание, а к 2030 году – войти в число мировых технологических лидеров по таким направлениям как: полимерные композиционные материалы (ПКМ), новые конструкционные и функциональные материалы и вещества. Для выполнения данной задачи необходимо резко увеличить интенсивность внедрения полимерных композиционных материалов и конструкций во многих областях промышленности и, в частности, в строительстве. Решение этой задачи требует интенсификации проведения научно-исследовательских работ в данной области.

Благодаря своим уникальным свойствам (прежде всего высокой коррозионной стойкости, малому весу, низкому аэродинамическому сопротивлению), оболочечные конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ) хорошо зарекомендовали себя при эксплуатации в сооружениях газоотводящих трактов многих промышленных предприятий, в связи с чем существует потребность промышленных предприятий на разработку и внедрение оболочечных конструкций из ПКМ в новые области применения:

- в системы отведения газов с более высокими температурами (до 200 °C и выше);
- в системы отведения газов с высоким содержанием твердых частиц (пульпы).

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4



В частности, к таким системам относятся газоходы металлургических предприятий.

Такие конструкции эксплуатируются при температурах отводимых газов 50...120 °С, в отсутствие высокого содержания твердых частиц, вызывающих абразивный износ внутренней поверхности конструкций. Благодаря имеющемуся положительному опыту существует потребность промышленных предприятий на внедрение оболочечных конструкций из ПКМ в область более высоких температур (до 200 °С, а в последующем и до 250...300 °С) в системы отведения газов, содержащих твердые частицы (пульпу). В частности, к таким системам относятся газоотводящие тракты металлургических предприятий (в большей степени газоходы).

Для эксплуатации в газоотводящих трактах в условиях повышенных температур в качестве матрицы композитов (в основном стеклопластиков) наиболее подходят полимерные связующие горячего отверждения, в частности эпоксидные на ангидридных отвердителях, фенольные или эпоксидно-фенольные. Для регулирования в достаточно широком диапазоне механических и других функциональных свойств связующие могут быть модифицированы различными активными или инертными наполнителями, кремнийорганическими смолами и др.

Чтобы оценить возможность применения композитных оболочек газоотводящих трактов в условиях совместного воздействия высоких температур, абразивного потока частиц и механических нагрузок необходимо получить экспериментальные данные о износостойкости в таких условиях вышеописанных материалов.

Анализ литературных источников показал, что большое количество исследований посвящены изучению износа материалов (как полимерных, так и металлических) в гидро- и газоабразивных потоках, например, они представлены в работах [1–14].

Экспериментальному исследованию износостойкости (в том числе в газоабразивном потоке) композитов (угле- и стеклопластиков) на основе термореактивных смол посвящены работы [11,15–39].

Экспериментальным исследованиям износостойкости эпоксидных смол, модифицированных различными добавками и наполнителями, посвящены работы [30,33,34,40–44]. В частности, в работах [34,39] отмечается, что модификация эпоксидной смолы определенным видом органических и неорганических наполнителей снижает износ по сравнению с ненаполненной смолой. В другой работе [18] напротив отмечается, что меньшая скорость износа наблюдалась при ненаполненном эпоксидном связующем, по сравнению с наполненным микрочастицами монтмориллонита. Это говорит о неоднозначности влияния на износостойкость полимерных связующих модифицирующих добавок и необходимости дальнейшего исследования данного вопроса. В настоящей работе исследовались ненаполненные связующие.

Прогнозированию и численному моделированию процессов гидро- и газоабразивного износа полимеров и композитов посвящены работы [7,9,14,45–48].

Анализ состояния исследований в рассматриваемой области показал, что стойкость к износу под действием потока абразивных частиц в совокупности с влиянием повышенных температур для полимерных композиционных материалов на основе термореактивных связующих горячего отверждения практически не изучена. При этом существует большое количество исследований по смежным направлениям.

В целом имеющиеся исследования в смежных областях можно разделить на следующие укрупненные группы:

1. исследование износа в потоке абразива (в том числе при повышенных температурах) материалов и элементов конструкций и оборудования (например, турбомашин и др.) не относящихся к полимерным композиционным (в основном это исследования различных металлов, сплавов и керамики);

2. исследование износа полимерных композиционных материалов и покрытий (в том числе на основе термореактивных связующих горячего отверждения) при фрикционных воздействиях в деталях машин;

3. исследование износа в потоке абразива полимерных материалов и покрытий (в том числе наполненных), не относящихся к композиционным материалам на основе термореактивных связующих горячего отверждения.

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4



В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований износостойкости эпоксидных и эпоксидно-фенольных связующих и стеклопластиков на их основе при воздействии газоабразивного потока в условиях температур от 23 °С до 200 °С.

Целью работы являлось исследование износостойкости в газоабразивном потоке различных типов термореактивных связующих, а также стеклопластиков на их основе в диапазоне температур от 23 °С до 200 °С, в том числе после длительного выдерживания при температуре, превышающей температуру стеклования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику ускоренных экспериментальных исследований износостойкости полимерных материалов в газоабразивном потоке при повышенных температурах и изготовить соответствующее испытательное оборудование;
- провести испытания образцов термореактивных смол и стеклопластиков на их основе на износостойкость в газоабразивном потоке в диапазоне температур от 23 °С до 200 °С;
- изготовить образцы полимерных связующих для испытаний на износостойкость и на трехточечный изгиб;
- провести испытания образцов на трехточечный изгиб, определить значения модулей упругости и прочности при изгибе;
- оценить влияние на износостойкость рассматриваемых связующих их выдерживания при температуре, превышающей их температуру стеклования;
- оценить корреляцию между износостойкостью некоторых термореактивных смол и их механическими характеристиками.

Анализ литературы показал, что оборудование для проведения экспериментальных исследований износа полимерных композиционных материалов под действием потока абразивных частиц в типовом исполнении на рынке не представлено, поэтому в рамках настоящей работы был разработан и изготовлен специальный экспериментальный стенд для ускоренных испытаний на газоабразивный износ. Примеры подобных стендов индивидуального изготовления, применяемых в основном для исследований износа металлических элементов конструкций, описаны в научной литературе [43,44].

Поскольку предполагаемая практическая значимость настоящей работы будет заключаться в расширении области применения оболочек из полимерных композитов в конструкциях газоотводящих трактов, необходимо было также оценить изменение механических свойств полимерных связующих и их износостойкость после длительного воздействия повышенных температур (превышающих температуру стеклования). Влияние длительной выдержки при повышенных температурах на механические характеристики и температуру стеклования эпоксидных и эпоксидно-фенольных связующих было выполнено нами в рамках настоящей работы, результаты представлены в [49].

В работах [49,50] было показано, что при длительном воздействии на термореактивные полимеры температуры, превышающей температуру стеклования, в результате терморелаксации происходит изменение их механических и структурных свойств. При этом изменения происходят с разной скоростью в процессе длительного воздействия температуры (например, потеря массы интенсивно развивается в течение примерно 24-х часов после повышения температуры, а затем затухает). Для предварительной оценки влияния времени выдержки при температуре, превышающей температуру стеклования, на стойкость рассмотренных связующих к газоабразивному износу были проведены испытания после 24-х часов выдержки при температуре 190 °С и после 120 часов выдержки при такой же температуре. Результаты оценки износостойкости выдержанных при повышенной температуре образцов сопоставлялись с результатами образцов, не подвергавшихся подобному выдерживанию.



## 2 Materials and Methods

### 2.1 Materials

Для получения образцов композитов и компаундов в настоящей работе были использованы следующие материалы:

- эпоксидная смола KER 828 (аналог ЭД20), со следующими основными характеристиками: содержание эпоксидных групп (EGC) 5308 ммоль/кг, эквивалентный вес эпоксиды (EEW) 188,5 г/экв, вязкость при 25 °С 12,7 Па.с, HCl 116 мг/кг, общий хлор 1011 мг/кг. Производитель: KUMHO P&B Chemicals;

- изометилтетрагидрофталевоый ангидрид (ИЗОМТГФА) (отвердитель для эпоксидной смолы) со следующими основными характеристиками: вязкость при 25 °С 63 Па.с, содержание ангидрида 42,4%, содержание летучих фракций 0,55%, свободной кислоты 0,1%. Производитель: ASAMBLY Chemicals company Ltd., Nanjing, China.

- алкофен (ускоритель отверждения эпоксидных смол) со следующими основными характеристиками: вязкость при 25 °С 150 Па.с, молекулярная формула C<sub>15</sub>H<sub>27</sub>N<sub>3</sub>O, молекулярная масса 265, аминное число 600 мг КОН/г. Производитель: АО "Эпитал", Москва, Российская Федерация.

- смола фенолоформальдегидная СФЖ-309 со следующими основными характеристиками: вязкость при 25 °С 700 МПа.с, не более 20% (м/м) воды, и не более 20% (м/м) свободного фенола, производитель: ФКП "Завод имени Свердлова", г. Дзержинск, Россия;

- стеклоткань ЭЗ-200 по Российскому государственному стандарту ГОСТ 19907–83 «Ткани электроизоляционные из стеклянных крученых комплексных нитей» [51];

- стеклоткань Т-23 по Российскому государственному стандарту ГОСТ 19907–83 «Ткани электроизоляционные из стеклянных крученых комплексных нитей» [51];

- кремнийорганический лак КО-08 по Российскому государственному стандарту ГОСТ 15081–78 «Лак ко-08 кремнийорганический термостойкий» [52].

На основе вышеперечисленных материалов были изготовлены исследованные в настоящей работе компаунды (Таблица 1, Table 1). и композиты (Таблица 2, Table 2). Виды испытаний, указанные под номерами в таблицах, см. в разделе «2.2».

Виды испытаний, обозначенные знаком «\*» проводились до и после выдержки компаунда или композита при температуре 190 °С в течение 120 часов.

**Таблица 1. Типы исследованных компаундов**  
**Table 1. Types of compounds investigated**

№	Тип компаунда	Состав в % по массе	Условное обозначение	Виды испытаний
1	Эпоксидное связующее горячего отверждения	KER 828 54,5 % + ИЗОМТГФА 42,5 % + Алкофен 3%	ЭС	1*, 2, 3*, 4*
2	Эпоксидно-фенольное связующее горячего отверждения	KER 828 50 % + СФЖ-309 50%	ЭФС	1*, 2, 3*, 4*
3	Эпоксидное связующее горячего отверждения с добавлением КО-08	ЭС 85% + КО-08 20%	ЭС-КО08	3*, 4*



**Таблица 2. Типы исследованных композитов**  
**Table 2. Types of composites investigated**

№	Тип композита	Состав	Условное обозначение	Виды испытаний
1	Эпоксидный стеклопластик на основе стеклоткани Т-23	10 слоев стеклоткани Т23 + ЭС	ЭС-Т23	3*, 4*
2	Эпоксидный стеклопластик на основе стеклоткани ЭЗ-200	10 слоев стеклоткани ЭЗ-200 + ЭС	ЭС-ЭЗ200	3*, 4*
3	Эпоксидно-фенольный стеклопластик на основе стеклоткани Т-23	10 слоев стеклоткани Т23 + ЭФС	ЭФС-Т23	3*, 4*

Для изготовления экспериментальных образцов связующие заливались в силиконовые формы. Размеры пластинчатых образцов для испытаний на износ – 65 x 40 мм и 80 x 40 мм (из-за разных по размеру силиконовых форм), начальная толщина образцов 4...7 мм. Размеры образцов для испытаний на изгиб: длина 80 мм, ширина 10 мм ( $\pm 1,0$  мм), толщина от 4 до 5 мм. Толщина образцов была различной, так как они подвергались механической обработке (шлифовке) для удаления поверхностных дефектов. Фактические размеры испытываемых образцов измерялись штангенциркулем с точностью до 0,01 мм. Образцы на основе эпоксидной смолы отверждались в лабораторной печи при температуре 110 °С в течение 30 мин. Образцы на основе эпоксидно-фенольного связующего отверждались при температуре 90 °С в течение 6–10 ч. После первичного отверждения все образцы выдерживались при температуре 150 °С в течение 12 часов.

Стеклопластики изготавливались из десяти слоев стеклоткани, пропитываемых эпоксидным и эпоксидно-фенольным связующим. Стеклоткань Т23 имеет силановый замасливающий агент, и пропитка связующим производилась без его отжига, стеклоткань ЭЗ200 имеет парафиновый замасливающий агент и непосредственно перед пропиткой связующим она прокаливается при температуре 300 °С для удаления парафина.

Пропитанные слои стеклоткани размерами 15 x 15 см укладывались в силиконовую форму и пригружались сверху грузом, создающим давление около 0.22 кПа. После отверждения из пластин вырезались образцы для испытаний на абразивный износ.

## 2.2. Methods

На образцах композитов и композитов были выполнены следующие виды испытаний:

1. испытание на трехточечный изгиб для определения модуля упругости и прочности при изгибе;
2. экспресс-испытание на газоабразивный износ;
3. испытание на газоабразивный износ на изготовленном экспериментальном стенде при комнатной температуре;
4. испытание на газоабразивный износ на изготовленном экспериментальном стенде при повышенных температурах.

Виды испытаний, обозначенные знаком «\*» проводились до и после выдержки композита или композита при температуре 190 °С в течение 120 часов.

Схема разработанного экспериментального стенда для испытаний на газоабразивный износ показана на рисунке (Рис. 1, Fig. 1), фото изготовленного стенда на рисунке (Рис. 2, Fig. 2).

Экспериментальный стенд включает следующие основные элементы:

1. теплоизолированная крышка с держателем для испытываемого образца;
2. пескоструйный пистолет Metabo SSP 1000 производительностью 300 л / мин;



3. строительные трубчатые нагревательные элементы (ТЭН) мощностью 1 кВт установленные в количестве 2 шт. внутри корпуса;
4. корпус из стального квадратного гнутосварного профиля;
5. патрубков для установки дополнительных термопар;
6. смотровой лючок с жаропрочным стеклом;
7. зажимной держатель для фиксации сопла пескоструйного пистолета.

Стенд предназначен для ускоренных испытаний пластинчатых образцов полимерных и композитных материалов на газоабразивный износ при комнатной и повышенных температурах. Ширина образцов 40...50 мм, высота 50...80 мм, толщина 1...10 мм.

Абразивный износ создается стандартным пескоструйным пистолетом Metabo SSP 1000 с диаметром выходного отверстия сопла 6 мм, производительностью 300 л/мин (5 м<sup>3</sup>/с), скорость воздуха на выходе из сопла составляет около 140 м/с. Пескоструйный пистолет может быть установлен в два положения для проведения испытаний при углах атаки 90° и 45°. Отработанный абразив сыпается в нижнюю часть корпуса откуда затем извлекается при открытии нижней крышки корпуса.

Пластинчатый образец устанавливается в зажимы напротив сопла пескоструйного пистолета и подвергается абразивной обработке. Расстояние от конца сопла до образца при угле атаки 90° составляет 112 мм минус толщина образца. Диаметр обрабатываемого пятна составляет 27...30 мм.

Нагрев воздуха внутри корпуса осуществляется 2 ТЭНами мощностью по 1 кВт каждый, управление нагревом производится терморегулятором ОВЕН ТРМ500-Щ2.30А с термопарой ДТПЛ054 00 100, установленной на верхней крышке корпуса. Поскольку в данном исполнении сжатый воздух не подогревается, то для снижения охлаждения образца при высокотемпературных испытаниях абразивный материал следует предварительно подогревать.

Сжатый воздух подается в пескоструйный пистолет компрессором NEXTOOL КМК-2300/100V с производительностью 420 л/мин, максимальным давлением 8 бар, объемом ресивера 100 л.

В качестве абразива используется купершлак, выпускаемый согласно ТУ 3989-003-82101794-2008 порошок абразивный [53], с зернами острой угловатой формы, крупностью 0,125...0,63 мм, твердостью по шкале Мооса не менее 6, плотностью зерна 3,2...3,9 г/см<sup>3</sup>.

Испытания на абразивостойкость проводились по следующей методике:

- предварительно путем гидростатического взвешивания определялась плотность образцов;
- пластинчатый образец взвешивался с точностью до 0.001 г и устанавливался в зажимы испытательного стенда;
- в емкость для абразива пескоструйного пистолета засыпалось 600 г абразивного порошка (купершлака);
- производилась обработка образца в течение 1-й минуты;
- после обработки производилось измерение объема и взвешивание отработанного абразива, в среднем объем составлял 500 см<sup>3</sup> при весе 1025 г (средняя насыпная плотность 2.05 г/см<sup>3</sup>);
- образец извлекался из зажимов стенда и повторно взвешивался, определялась потеря массы;
- через потерю массы и плотность высчитывалась потеря объема материала, в результате газоабразивной эрозии.

Если отнести потерю объема в результате эрозии к площади пятна, подвергшегося обработке, можно определить осредненный износ материала в пределах данной площади в единицах длины.

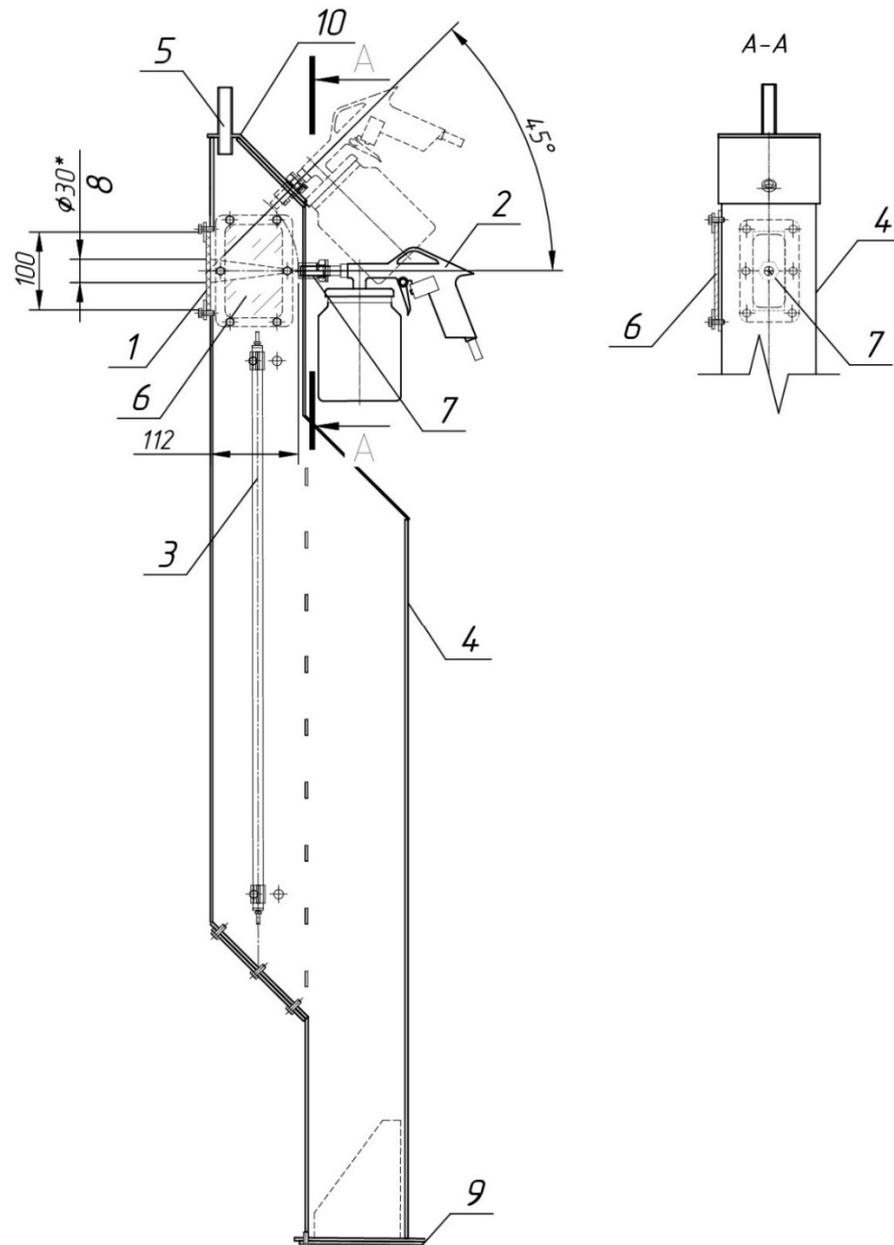
Температура образца контролировалась внешней термопарой, установленной с его тыльной стороны, не подвергающейся абразивному воздействию. Поскольку при испытании происходило охлаждение образца потоком неподогретого воздуха то в качестве значения температуры, при которой определялся износ, принималось среднее арифметическое между значениями температуры перед началом испытаний и после их окончания.

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4

Из-за высокой интенсивности абразивного воздействия износ образцов, испытываемых по предлагаемой методике, будет отличаться в большую сторону от износа реальных конструкций. Однако результаты испытаний могут не только позволить сопоставить между собой износостойкость применяемых материалов, но и с некоторыми допущениями предварительно спрогнозировать ресурс с точки зрения газоабразивного износа композитных оболочечных конструкций газоотводящих трактов.



**Рис. 1 - Схема экспериментального стенда для испытаний на газоабразивный износ: теплоизолированная крышка и держатель для испытываемого образца; 2 – пескоструйный пистолет Metabo SSP 1000; 3 – ТЭН 1 кВт (2 шт.); 4 – стальной корпус стенда; 5 – патрубок для дополнительной термопары; 6 – смотровой лючок с жаропрочным стеклом; 7 – зажимной фиксатор для сопла пескоструйного пистолета; 8 – пятно обработки; 9 – нижняя крышка; 10 – верхняя крышка.**

**Fig. 1 - Schematic of gas abrasion test tool: 1 - insulated cover and holder for the test sample; 2 - sandblasting gun Metabo SSP 1000; 3 - electric heater 0,7 kW (2 pcs.); 4 - steel case of the stand; 5 - branch pipe for an additional thermocouple; 6 - inspection hatch with heat-resistant glass; 7 - clamping retainer for sandblaster gun nozzle; 8 - machining spot; 9 - bottom cover; 10 - top cover.**

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4



**Рис. 2 - Изготовленный стенд для испытаний на газоабразивный износ**  
**Fig. 2 - Manufactured gas abrasion test tool**

Помимо испытаний на газоабразивный износ, проводившихся на разработанном стенде, для быстрого сопоставления износостойкости различных типов ненаполненных и наполненных связующих были выполнены экспресс-испытания с использованием пескоструйного пистолета с системой рециркуляции абразива «Русский Мастер PS-10 PM-99191» (Рис. 3, Fig. 3). Такой пескоструйный пистолет позволяет обрабатывать точечные участки образцов, имеющиеся насадки позволяют проводить обработку под углом  $90^\circ$  и  $45^\circ$ . Диаметр сопла пистолета составляет 6,35 мм, диаметр выходного отверстия насадки для обработки под углом атаки  $90^\circ$  – 12 мм. Обработка

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4

проводилась с использованием вышеописанного абразива – купершлака, расход воздуха составлял 320 л/мин ( $5,3 \text{ м}^3 / \text{с}$ ).

Экспресс-испытания на абразивостойкость проводились по следующей методике:

- предварительно путем гидростатического взвешивания определялась плотность образцов;
- пластинчатый образец взвешивался с точностью до 0.001 г;
- в мешок для абразива пескоструйного пистолета засыпалось 150 г абразивного порошка (купершлака);
- производилась обработка участка образца в течение 10-ти секунд;
- образец повторно взвешивался, определялась потеря массы;
- через потерю массы и плотность высчитывалась потеря объема материала, в результате газоабразивной эрозии.



**Рис. 3 - Применяемый пескоструйный пистолет с системой рециркуляции абразива**  
**Fig. 3 - Used sandblasting gun with abrasive recirculation system**

Испытания образцов стеклопластика и отвержденного эпоксидного связующего на трехточечный изгиб проводились согласно Российскому государственному стандарту ГОСТ Р 56810–2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на изгиб плоских образцов» [54] на машине Tinius Olsen h100ku. По паспортным данным точность измерения нагрузки машины Tinius Olsen h100ku составляет  $\pm 0,5\%$  в диапазоне от 0,2 до 100% от допустимой нагрузки установленного датчика силы (100 кН). Разрешающая способность измерения перемещения траверсы - 0,001 мм с погрешностью до 0,01 мм. Чтобы исключить влияние податливости машины, смещение центральной точки образца под нагрузкой также контролировались с помощью механического индикатора часового типа, установленного под образцом. Образцы испытывались на пролете 70 мм. При испытаниях определялся модуль упругости и прочность при изгибе образцов отвержденных полимерных связующих.

Для оценки потери массы образцов полимерных связующих при кратковременном нагреве во время испытаний на абразивостойкость при температуре выше температуры стеклования были выполнены термогравиметрические исследования эпоксидных и эпоксидно-фенольных связующих на дериватографе. Термогравиметрические (ТГ) исследования проводились с использованием синхронного термического анализатора Netzsch STA 449C "Jupiter" (Selb, Германия) в атмосфере аргона в корундовых тиглях с массой образца 10-15 мг и размером в поперечном сечении около 1-2 мм. Во время ТГ-теста определяли массу образца, поглощение и выделение тепла, температуру при нагревании с получением кривых ТГ, а также кривых дифференциальной ТГ (ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4



## 3 Results and Discussion

### 3.1 Results of rapid testing of binders for gas abrasion

Важными этапами при проведении экспресс-испытаний на газоабразивный износ являлись:

- предварительная оценка износостойкости полимерных связующих;
- предварительная оценка влияния на абразивостойкость связующих выдержки их в течение 24 часов при температуре, превышающей температуру стеклования;
- сопоставление интенсивности газоабразивного износа исследуемых материалов при углах атаки 90° и 45°.

Испытания проводились на образцах эпоксидного связующего (ЭС), эпоксидно-фенольного связующего (ЭФС). Испытывались образцы ЭС и ЭФС, не подвергавшиеся длительному воздействию повышенной температуры, а также образцы ЭС и ЭФС, выдержанные при температуре 190 °С в течение 24 часов. Выдержка в течение 24-х часов имитирует кратковременные повышения температуры в процессе эксплуатации газоотводящего тракта.

Результаты экспресс-испытаний показаны в таблице (Таблица 3, Table 3). При этом следует отметить, что хотя абразивная обработка при экспресс-испытаниях проводилась 10 секунд, для последующего сопоставления результатов с испытаниями на экспериментальном стенде (см. ниже) результаты были приведены к 60 секундам.

Статистическая обработка результатов проводилась в соответствии с разделом 4 Российского государственного стандарта ГОСТ 14359–69\* «Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования» [55]. Согласно результатам статистической обработки результатов испытаний среди полученных значений (за исключением 3-х значений прочности при изгибе для эпоксидно-фенольного связующего после выдержки) грубые ошибки (отскоки) отсутствуют, и средние значения определены достоверно. Для ЭФС после выдержки три значения показателя износа при угле атаки 90° были аномально низкими и были отброшены, среднее определено по трем оставшимся значениям.

Основываясь на полученных результатах испытаний по экспресс-методике, можно сделать следующие предварительные **выводы**:

1. из образцов, не подвергавшихся выдерживанию при температуре 190 °С, наилучшую стойкость к газоабразивному износу показали образцы эпоксидного связующего, у которых износ при угле атаки 90° в 1.8 раз ниже, чем у образцов эпоксидно-фенольного связующего;

2. после выдержки образцов в течение 24-х часов при температуре 190 °С эпоксидные и эпоксидно-фенольные образцы показали практически такую же износостойкость, что и до выдержки;

3. во всех случаях износ при угле атаки 45° оказался выше (в 1.65...1.97 раз), чем при угле атаки 90°.

Результаты определения прочности и модуля упругости при испытаниях на трехточечный изгиб приведены в таблице (Таблица 4, Table 4). Прочность и модуль упругости не были определены для эпоксидно-фенольных образцов, поскольку после выдержки их при температуре 190 °С произошло их расслоение, что говорит о их неоднородной структуре.

С использованием пакета Microsoft Excel была выполнена оценка корреляции для показателя износа при угле атаки 90° ( $\Delta V_{e90}$ ) со средними значениями прочности и модуля упругости образцов типа ЭС, ЭС (после выдержки) и ЭФС. Коэффициент корреляции между показателем износа и средним модулем упругости составил +0.996. Коэффициент корреляции между показателем износа и средней прочностью составил -0.946.

Таким образом, на основании данного анализа корреляции можно предположить, что износостойкость (обратно пропорциональная значению показателя износа) рассмотренных образцов возрастает с уменьшением модуля упругости и повышением прочности. При этом влияние модуля упругости на износостойкость выше, чем прочности. Данный вывод пока носит предварительный характер из-за крайне ограниченного объема испытаний.

Таблица 3. Результаты экспресс-испытаний на газоабразивный износ полимерных связующих  
Table 3. Results of rapid gas abrasion tests of polymer binders

№ образца	Тип связующего	Начальная масса m1 (г)	Конечная масса m2 (г)	Изменение массы Δm (г)	Средняя плотность (г/см <sup>3</sup> )	Изменение объема за 10 с (см <sup>3</sup> )	Изменение объема за 60 с ΔVe (см <sup>3</sup> )	Угол атаки	Среднее изменение объема за 60 с при угле атаки 90 ΔVe90 (см <sup>3</sup> )	Среднее изменение объема за 60 с при угле атаки 45 ΔVe45 (см <sup>3</sup> )	ΔVe90 / ΔVe45
1	ЭС	11.406	11.39	0.016	1.18	0.014	0.081	90	<b>0.084</b>	<b>0.158</b>	<b>1.88</b>
		11.39	11.364	0.026	1.18	0.022	0.132	45			
		11.364	11.346	0.018	1.18	0.015	0.092	90			
		11.346	11.312	0.034	1.18	0.029	0.173	45			
2		11.454	11.442	0.012	1.18	0.010	0.061	90			
		11.442	11.422	0.02	1.18	0.017	0.102	90			
		11.422	11.404	0.018	1.18	0.015	0.092	45			
		11.404	11.358	0.046	1.18	0.039	0.234	45			
3	ЭС после выдержки при 190 °С	8.69	8.66	0.02	1.18	0.017	0.102	90	<b>0.086</b>	<b>0.147</b>	<b>1.71</b>
		8.66	8.646	0.014	1.18	0.012	0.071	90			
		8.646	8.616	0.03	1.18	0.025	0.153	45			
		8.616	8.586	0.03	1.18	0.025	0.153	45			
4		12.484	12.468	0.016	1.18	0.014	0.081	90			
		12.468	12.45	0.018	1.18	0.015	0.092	90			
		12.45	12.422	0.028	1.18	0.024	0.142	45			
		12.422	12.394	0.028	1.18	0.024	0.142	45			
5	ЭФС	10.396	10.368	0.028	1.24	0.023	0.135	90	<b>0.152</b>	<b>0.252</b>	<b>1.65</b>
		10.368	10.332	0.036	1.24	0.029	0.174	90			
		10.332	10.27	0.062	1.24	0.050	0.300	45			
		10.27	10.224	0.046	1.24	0.037	0.223	45			
6		11.856	11.822	0.034	1.24	0.027	0.165	90			
		11.822	11.794	0.028	1.24	0.023	0.135	90			
		11.794	11.736	0.058	1.24	0.047	0.281	45			
		11.736	11.694	0.042	1.24	0.034	0.203	45			
7	ЭФС после выдержки при 190 °С	15.82	15.792	0.028	1.24	0.023	0.135	90	<b>0.142</b>	<b>0.190</b>	<b>1.97</b>
		15.792	15.778	0.014	1.24	0.011	0.068	90			
		15.778	15.744	0.034	1.24	0.027	0.165	45			
		15.744	15.702	0.042	1.24	0.034	0.203	45			
8		12.792	12.764	0.028	1.24	0.023	0.135	90			
		12.764	12.732	0.032	1.24	0.026	0.155	90			
		12.732	12.69	0.042	1.24	0.034	0.203	45			
		12.69	12.63	0.06	1.24	0.048	0.290	45			
9	18.442	18.432	0.01	1.24	0.008	0.048	90				
	18.432	18.424	0.008	1.24	0.006	0.039	90				
	18.424	18.402	0.022	1.24	0.018	0.106	45				

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4



		18.402	18.366	0.036	1.24	0.029	0.174	45		
--	--	--------	--------	-------	------	-------	-------	----	--	--

**Таблица 4. Результаты определения прочности и модуля упругости при изгибе полимерных связующих**

**Table 4. Results of determining the bending strength and modulus of elasticity of polymer binders**

Образец	Модуль упругости (МПа)	Разрушающая нагрузка (кН)	Прочность (МПа)	Среднее значение модуля упругости (МПа)	Среднее значение прочности (МПа)	Коэффициент вариации %	
						Модуль упругости	Прочность
Эс 1.1	2590	0.804	71.5	<b>2617</b>	<b>69</b>	6	17.4
Эс 1.2	2470	0.77	64.2				
Эс 1.3	2850	0.252	50.3				
Эс 1.4	2750	0.144	67.5				
Эс 1.5	2450	0.179	87				
Эс 1.6	2590	0.146	70.9				
ЭФ 1.1	2850	0.1078	55	<b>2882</b>	<b>52</b>	6.3	29.6
ЭФ 1.2	2860	0.0608	36.6				
ЭФ 1.3	3120	0.0953	47.9				
ЭФ 1.4	3070	0.1482	80.6				
ЭФ 1.5	2660	0.1004	49.5				
ЭФ 1.6	2730	0.0514	42.3				
Эс(t) 1.1	2880	0.1327	59.1	<b>2598</b>	<b>63</b>	8.0	32.1
Эс(t) 1.3	2390	0.0935	73				
Эс(t) 1.4	2720	0.0134	42.1				
Эс(t) 1.5	2590	0.1176	48.1				
Эс(t) 1.6	2410	0.234	92.2				

### 3.2 Results of experimental studies of binder and fiberglass plastics wear in gas-abrasive flow at room temperature

Результаты экспериментальных исследований износостойкости в газоабразивном потоке на изготовленном стенде при комнатной температуре отвержденных термореактивных связующих приведены в таблице (Таблица 5, Table 5). Испытания проводились на образцах эпоксидного связующего (ЭС), эпоксидно-фенольного связующего (ЭФС) и связующего (ЭС+К008), состоящего из 80 м. ч. связующего ЭС и 20 м. ч. кремнийорганического лака К008, который одновременно служил растворителем и модификатором. Испытывались образцы ЭС, ЭФС и ЭС+К008, не подвергавшиеся длительному воздействию повышенной температуры, а также образцы ЭС и ЭФС, выдержанные при температуре 190 °С в течение 120 часов. Все испытания проводились при угле атаки 90°. По результатам испытаний определялся объем материала образца, потерянный в результате газоабразивной эрозии.

Статистическая обработка результатов проводилась в соответствии с разделом 4 Российского государственного стандарта ГОСТ 14359–69\* «Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования» [55]. Согласно результатам статистической обработки (Таблица 6, Table 6) результатов испытаний среди полученных значений (за исключением 1-го значения

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4

показателя износа для эпоксидно-фенольного связующего после выдержки) грубые ошибки (отскоки) отсутствуют, и средние значения определены достоверно (при доверительной вероятности 0.95).

**Таблица 5. Результаты испытаний на газоабразивный износ эпоксидных и эпоксидно-фенольных связующих**

**Table 5. Gas flow abrasion test results for epoxy and epoxy-phenolic binders**

Тип связующего	Начальный вес $m_1$ (г)	Конечный вес $m_2$ (г)	Изменение веса $\Delta m$ (г)	Средняя плотность (г/см <sup>3</sup> )	Изменение объема VE (см <sup>3</sup> )	Среднее изменение объема $V_{ep}$ (см <sup>3</sup> )	VE190 / VE
ЭС	12.000	11.924	0.076	1.18	0.064	<b>0.080</b>	1.4
	11.924	11.846	0.078	1.18	0.066		
	11.846	11.748	0.098	1.18	0.083		
	11.748	11.658	0.090	1.18	0.076		
	11.658	11.562	0.096	1.18	0.081		
	11.562	11.460	0.102	1.18	0.086		
	24.440	24.352	0.088	1.18	0.075		
	24.352	24.232	0.120	1.18	0.102		
24.232	24.128	0.104	1.18	0.088			
ЭС после 120 часов выдержки при 190 °С	8.608	8.440	0.168	1.2	0.140	<b>0.112</b>	
	8.440	8.308	0.132	1.2	0.110		
	8.298	8.202	0.096	1.2	0.080		
	8.202	8.094	0.108	1.2	0.090		
	8.094	7.960	0.134	1.2	0.112		
	7.960	7.856	0.104	1.2	0.087		
	23.440	23.278	0.162	1.200	0.135		
	23.278	23.110	0.168	1.200	0.140		
23.110	22.974	0.136	1.200	0.113			
ЭФС	14.600	14.404	0.196	1.24	0.158	<b>0.168</b>	
	14.404	14.184	0.220	1.24	0.177		
	14.184	13.970	0.214	1.24	0.173		
	13.970	13.762	0.208	1.24	0.168		
	13.762	13.556	0.206	1.24	0.166		
	13.556	13.342	0.214	1.24	0.173		
	13.196	13.006	0.190	1.24	0.153		
13.006	12.786	0.220	1.24	0.177			
ЭФС после 120 часов выдержки при 190 °С	17.166	16.942	0.224	1.24	0.181	<b>0.177</b>	1.05
	16.942	16.688	0.254	1.24	0.205		
	16.688	16.480	0.208	1.24	0.168		
	16.480	16.250	0.230	1.24	0.185		
	16.250	16.040	0.210	1.24	0.169		
	16.040	15.836	0.204	1.24	0.165		
	10.698	10.494	0.204	1.24	0.165		
	<del>10.494</del>	<del>10.144</del>	<del>0.350</del>	<del>1.24</del>	<del>0.282</del>		
ЭС-К008	20.550	20.458	0.092	1.15	0.080	<b>0.081</b>	1.49
	20.458	20.364	0.094	1.15	0.082		
	20.364	20.272	0.092	1.15	0.080		

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4



ЭС-КО08 после 120 часов выдержки при 190 °С	17.762	17.594	0.168	1.2	0.14	<b>0.121</b>
	17.594	17.452	0.142	1.2	0.118	
	17.452	17.328	0.124	1.2	0.103	

Таблица 6. Результаты статистической обработки испытаний на газоабразивный износ эпоксидных и эпоксидно-фенольных связующих

Table 6. Results of statistical processing of gas flow abrasion tests of epoxy and epoxy-phenolic binders

Тип связующего	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации	Xp-Xi	Статистический критерий (0.95)	Количество определений	Промежуточные вычисления			Отклонение	Отбросить если > 0
ЭС	0.011558	<b>14.41%</b>	0.016	2.306	<b>9</b>	0.00025	0.00107	0.0116	<b>0.027</b>	-0.011
			0.014			0.00020				-0.013
			0.003			0.00001				-0.024
			0.004			0.00002				-0.023
			0.001			0.00000				-0.026
			0.006			0.00004				-0.020
			0.006			0.00003				-0.021
			0.021			0.00046				-0.005
ЭС после 120 часов выдержки при 190 °С	0.022547	<b>21.51%</b>	0.038	2.571	<b>6</b>	0.00141	0.00254	0.0225	<b>0.058</b>	-0.020
			0.007			0.00005				-0.051
			0.023			0.00055				-0.035
			0.013			0.00018				-0.045
			0.009			0.00008				-0.049
ЭФС	0.008781	<b>5.22%</b>	0.010	2.365	<b>8</b>	0.00010	0.00054	0.0088	<b>0.021</b>	-0.011
			0.009			0.00009				-0.011
			0.004			0.00002				-0.016
			0.000			0.00000				-0.020
			0.002			0.00000				-0.019
			0.004			0.00002				-0.016
			0.015			0.00022				-0.006
			0.009			0.00009				-0.011
ЭФС после 120 часов выдержки при 190 °С	0.039749	<b>22.49%</b>	0.004	2.365	<del>8</del> <b>7</b>	0.00002	0.00132	0.0137	<b>0.032</b>	-0.029
			0.028			0.00079				-0.004
			0.009			0.00008				-0.023
			0.009			0.00008				-0.024
			0.007			0.00005				-0.025
			0.012			0.00015				-0.020
			0.012			0.00015				-0.020
		-	-	<b>0.106</b>	-		<b>0.01114</b>	-	-	-

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4

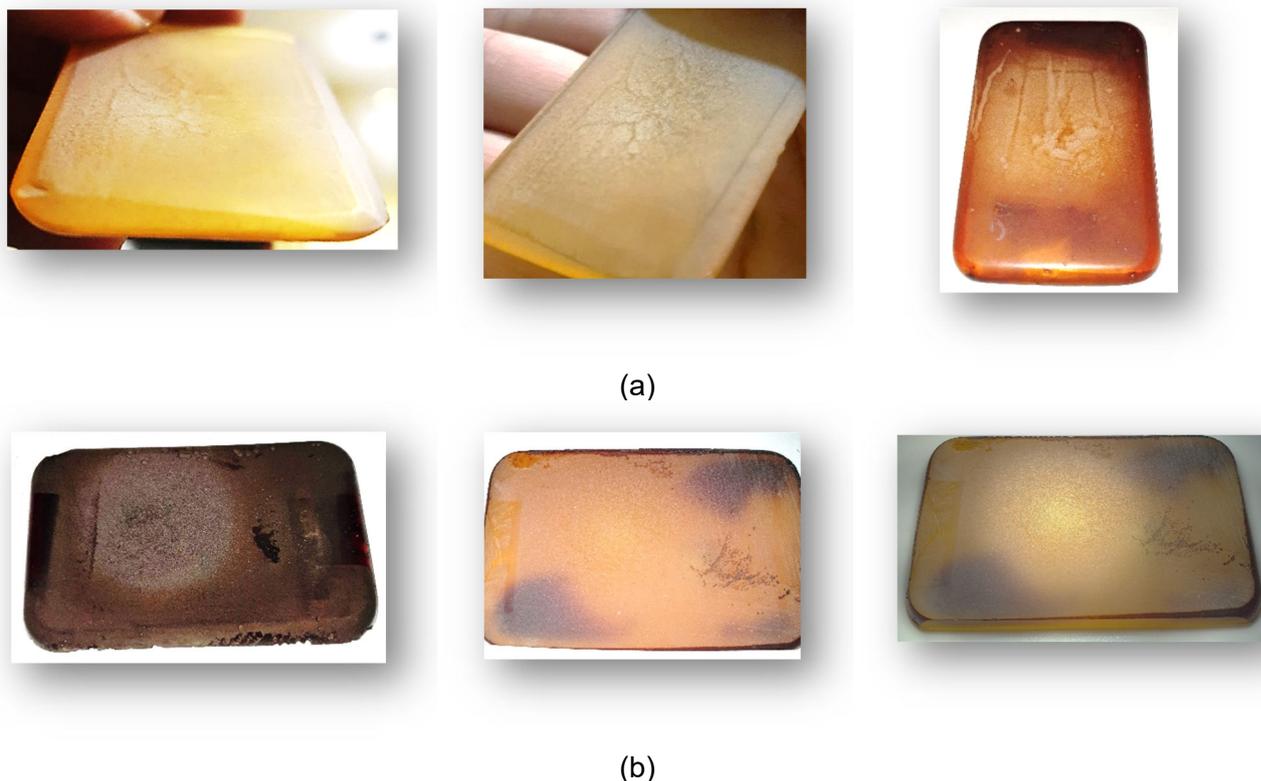
Основываясь на полученных результатах испытаний полимерных связующих на газоабразивный износ, можно сделать следующие **выводы**:

1. наименьшие потери объема в результате газоабразивной эрозии после испытаний при комнатной температуре показали образцы эпоксидного связующего (ЭС), не подвергавшегося выдержке при температуре 190 °С, модификация эпоксидного связующего кремнийорганическим лаком КО0.8 не привела к изменениям в большую или меньшую сторону, износ эпоксидно-фенольного связующего при аналогичных условиях оказался в 2.1 раза выше, что в целом согласуется с результатами экспресс-испытаний;

2. после выдержки в течение 120 часов при температуре 190 °С образцы связующих ЭС и ЭС-КО08 показали увеличение абразивного износа в 1.4 и 1.49 раза соответственно, при этом износ эпоксидно-фенольного связующего (ЭФС) практически не изменился (вырос в 1.05 раз, что может быть вызвано погрешностями испытаний и неоднородностью материала), но несмотря на это, интенсивность износа ЭФС в одинаковых условиях осталась в 1,6 раз выше, чем у ЭС;

3. в целом результаты испытаний на разработанном экспериментальном стенде согласуются качественно и количественно с результатами, полученными по экспресс-методике, что говорит о возможности ее использования для быстрой и предварительной оценки износостойкости полимерных материалов в газоабразивном потоке;

4. образцы ЭС и ЭФС имеют разную структуру поверхности после износа, у ЭФС структура поверхности равномерная слегка шершавая, у ЭС после обработки поверхности явно прослеживается рельефная дендритная структура на всех образцах (как до, так и после выдерживания при температуре 190 °С), что, вероятно, говорит о неоднородности механических свойств и подтверждает наличие макроструктуры даже в ненаполненном и неармированном связующем ЭС, фото образцов связующих ЭС и ЭФС после испытаний показаны на рисунке (Рис. 4, Fig. 4).



**Рис. 4 - Фото образцов после испытаний на газоабразивный износ на экспериментальном стенде: а) связующее ЭС; б) связующее ЭФС**

**Fig. 4 - Used sandblasting gun with abrasive recirculation system: (a) Epoxy binder; (b) Epoxy-Phenolic binder**

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4

Результаты экспериментальных исследований износостойкости в газообразивном потоке на изготовленном стенде при комнатной температуре стеклопластиков на основе связующего ЭС и различных типов стеклотканей приведены в таблице (Таблица 7, Table 7). Были испытаны образцы стеклопластика на стеклоткани Т23 с силиновым замасливателем и на стеклоткани ЭЗ200 с парафиновым замасливателем, который удалялся прокаливанием при температуре 300 °С непосредственно перед пропиткой связующим. Стеклопластик на отожженной стеклоткани ЭЗ200 также испытывался после выдержки при температуре 190 °С в течение 120 часов. Все испытания проводились при угле атаки 90°. По результатам испытаний определялся объем материала образца, потерянный в результате газообразивной эрозии, объем определялся через потерю массы и плотность, которая в среднем составила 1.61 г/см<sup>3</sup>. Фото образцов после испытаний показано на рисунке (Рис. 5, Fig. 5).



**Рис. 5 - Фото образцов стеклопластиков на связующем ЭС после испытаний на газообразивный износ при комнатной температуре на экспериментальном стенде: а) на стеклоткани Т23; б) на стеклоткани ЭЗ200**

**Fig. 5 - Photo of samples of fiberglass plastics on epoxy binder after gas abrasion tests at room temperature: a) on fiberglass fabric T23; b) on fiberglass fabric EZ200**

**Таблица 7. Результаты испытаний на газообразивный износ эпоксидных и эпоксидно-фенольных стеклопластиков**

**Table 7. Gas abrasion test results for epoxy and epoxy-phenolic fiberglass plastics**

Тип стеклопластика	Начальный вес m1 (г)	Конечный вес m2 (г)	Изменение веса Δm (г)	Средняя плотность (г/см <sup>3</sup> )	Изменение объема VE (см <sup>3</sup> )	Среднее изменение объема VEn (см <sup>3</sup> )
ЭС + Т23 (неотожженная)	15.216	14.872	0.344	1.61	0.214	<b>0.177</b>
	14.872	14.488	0.384	1.61	0.239	
	14.488	14.26	0.228	1.61	0.142	
	14.26	14.004	0.256	1.61	0.159	
	16.356	16.116	0.24	1.61	0.149	
	16.116	15.856	0.26	1.61	0.161	
ЭС + ЭЗ200 (отожженная)	8.494	8.370	0.124	1.61	0.077	<b>0.103</b>
	8.37	8.194	0.176	1.61	0.109	
	8.194	7.996	0.198	1.61	0.123	
ЭС + ЭЗ200 (отожженная)	9.35	9.028	0.322	1.61	0.200	<b>0.183</b>
	9.028	8.76	0.268	1.61	0.166	

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4



выдержанная 120 ч при 190°C	8.76	8.466	0.294	1.61	0.183	
ЭФС + Т23 (неотожженная)	13.116	12.394	0.722	1.61	0.448	<b>0.355</b>
	11.63	11.146	0.484	1.61	0.300	
	7.35	6.84	0.51	1.61	0.316	

Основываясь на полученных результатах испытаний стеклопластиков на газоабразивный износ, можно сделать следующие **выводы**:

1. интенсивность износа у стеклопластика на связующем ЭС и стеклоткани Т23 в 1.7 раз выше, чем у стеклопластика на таком же связующем и стеклоткани Э3200, из этого следует, что тип стеклонаполнителя и его обработка оказывают существенное влияние на стойкость к газоабразивному износу, при этом в качестве вероятной причины более высокой износостойкости стеклопластика на Э3200 видится то, что качество пропитки волокна связующим было выше из-за отжига парафинового замасливателя перед пропиткой;
2. интенсивность износа стеклопластика на ЭС и Э3200 после выдержки в течение 120 часов при температуре 190 °С при тех же условиях испытаний повысилась в 1.78 раз, что выше возрастания интенсивности износа после температурной выдержки у неармированного связующего ЭС;
3. у рассмотренных стеклопластиков на связующем ЭС и стеклоткани Э3200 потери объема в результате износа оказались выше в 1.3...1.5 раз, чем у ненаполненного связующего ЭС, невыдержанного и выдержанного при температуре соответственно;
4. наихудшую износостойкость показал стеклопластик на эпоксидно-фенольном связующем ЭФС, она оказалась в 2 раза ниже, чем у стеклопластика на эпоксидном связующем ЭС и аналогичной стеклоткани.

### 3.3 Results of studies on gas abrasion of binders at elevated temperature

Результаты экспериментальных исследований износостойкости в газоабразивном потоке при повышенных температурах ненаполненных связующих и стеклопластиков приведены в таблице 8, Table 8.

На основании полученных результатов можно сделать следующие **выводы**:

1. интенсивность газоабразивного износа при повышении температуры относительно комнатной существенно снизилась во всех образцах полимерных связующих и стеклопластиков (за исключением одного значения, отмеченного в таблице знаком «\*»);
2. интенсивность износа при повышенных температурах (как и при комнатной) у эпоксидных связующих и стеклопластиков на основе эпоксидного связующего выросла (например, при температуре 75 °С в 1.3 раза);
3. наименьшую интенсивность износа при температурах 75...100 °С показало эпоксидное связующее, модифицированное кремнийорганическим лаком (ЭС+КО0.8), не подвергавшееся выдерживанию при 190 °С, однако после выдерживания интенсивность износа при повышенных температурах приблизилась к значениям у немодифицированного эпоксидного связующего ЭС.

**Таблица 8. Результаты экспериментальных исследований износостойкости в газоабразивном потоке при повышенных температурах ненаполненных связующих и стеклопластиков**  
**Table 8. Results of experimental studies of wear resistance in gas-abrasive flow at elevated temperatures of unfilled binders and fiberglass plastics**

Тип образца	Начальный вес m1 (г)	Конечный вес m2 (г)	Изменение веса Δm (г)	Начальная и конечная температура образца (°С)		Средняя температура образца (°С)	Средняя плотность (г/см <sup>3</sup> )	Изменение объема VE (см <sup>3</sup> )	Среднее изменение объема VEn (см <sup>3</sup> )
				75	67				
ЭС	24.126	24.074	0.052	75	67	71	1.18	0.044	<b>0.059</b>
	24.074	23.998	0.076	75	67	71			
	23.998	23.918	0.080	75	72	73.5			
	23.918	23.844	0.074	100	78	89	<b>92.8</b>	0.063	<b>0.055</b>

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4



	23.844	23.780	0.064	100	93	96.5		1.18	0.054	
	23.780	23.724	0.056	100	86	93		1.18	0.047	
	11.574	11.536	0.038	120	114	117	<b>116.6</b>	1.18	0.032	
	11.536	11.482	0.054	120	110	115		1.18	0.046	
	11.482	11.442	0.040	120	113	116.5		1.18	0.034	
	11.442	11.402	0.040	120	116	118		1.18	0.034	
	11.364	11.258	0.106	200	168	184	<b>155.5</b>	1.18	0.090	
9.192	9.102	0.09	200	155	177.5	1.18		0.076		
<b>ЭФС</b>	11.118	10.964	0.154	120	90	105	<b>109.1</b>	1.24	0.124	<b>0.145</b>
	10.964	10.768	0.196	120	102	111		1.24	0.158	
	10.768	10.596	0.172	120	97	108.5		1.24	0.139	
	10.596	10.400	0.196	120	104	112		1.24	0.158	
	10.224	9.97	0.254	205	150	177.5	<b>177.5</b>	1.24	0.205	
	9.97	9.758	0.212	205	150	177.5		1.24	0.171	
9.642	9.436	0.206	205	150	177.5	1.24		0.166		
<b>ЭС+К008</b>	20.250	20.182	0.068	75	72	73.5	<b>72.0</b>	1.15	0.059	<b>0.040</b>
	20.182	20.146	0.036	75	63	69		1.15	0.031	
	20.146	20.112	0.034	75	72	73.5		1.15	0.030	
	20.112	20.070	0.042	100	93	96.5	<b>96.5</b>	1.15	0.037	
	20.070	20.030	0.040	100	93	96.5		1.15	0.035	
	20.030	19.994	0.036	100	93	96.5		1.15	0.031	
<b>ЭС после выдержки 120 ч при 190 °С</b>	22.984	22.894	0.09	75	64	69.5	<b>69.0</b>	1.2	0.075	<b>0.078</b>
	22.894	22.798	0.096	75	62	68.5	<b>105.5</b>	1.2	0.080	<b>0.080</b>
	22.798	22.696	0.102	120	91	105.5		1.2	0.085	<b>0.080</b>
	22.696	22.606	0.09	120	91	105.5		1.2	0.075	<b>0.032</b>
	22.606	22.582	0.024	200	162	181	<b>182.3</b>	1.2	0.020	<b>0.032</b>
<b>ЭС+К008 после выдержки 120 ч при 190 °С</b>	22.582	22.53	0.052	200	167	183.5		1.2	0.043	
	17.328	17.214	0.114	75	70	72.5	<b>70.8</b>	1.19	0.096	<b>0.100</b>
	17.214	17.09	0.124	75	63	69		1.19	0.104	
	17.09	16.988	0.102	120	100	110	<b>110.8</b>	1.19	0.086	<b>0.082</b>
	16.988	16.894	0.094	120	103	111.5		1.19	0.079	
	16.894	16.838	0.056	200	159	179.5	<b>183.8</b>	1.19	0.047	<b>0.046</b>
<b>Стеклопластик ЭС+Э3200 (отожён)</b>	16.838	16.784	0.054	200	176	188		1.19	0.045	
	9.468	9.300	0.168	100	80	90	<b>91.3</b>	1.61	0.104	<b>0.135</b>
	9.300	9.032	0.268	100	85	92.5		1.61	0.166	
	9.032	8.790	0.242	120	95	107.5	<b>109.2</b>	1.61	0.150	
	8.790	8.472	0.318	120	96	108		1.61	0.198	
8.472	8.200	0.272	120	104	112	1.61		0.169		
<b>Стеклопластик ЭС+Т23 (неотожён)</b>	14.488	14.26	0.228	75	66	70.5	<b>71.0</b>	1.61	0.142	<b>0.150</b>
	14.26	14.004	0.256	75	68	71.5		1.61	0.159	
<b>Стеклопластик ЭС+Э3200 (отожён) после выдержки 120 ч при 190 °С</b>	8.466	8.27	0.196	75	60	67.5	<b>68.8</b>	1.61	0.122	<b>0.136</b>
	8.27	8.028	0.242	75	65	70		1.61	0.150	
	8.028	7.806	0.222	120	95	107.5	<b>105.5</b>	1.61	0.138	
	7.806	7.64	0.166	120	87	103.5		1.61	0.103	
	7.64	7.466	0.174	200	151	175.5	<b>175.5</b>	1.61	0.108	
7.466	7.302	0.164	200	151	175.5	1.61		0.102		

Если рассмотреть подробнее изменение интенсивности газоабразивного износа связующих ЭС и ЭФС, не подвергавшихся выдерживанию при температуре 190 °С мы увидим следующую закономерность:

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4

- при росте температуры примерно до температур стеклования (которые для данных связующих были нами определены в [49]) потеря массы и, как следствие, интенсивность газообразного износа снижается;

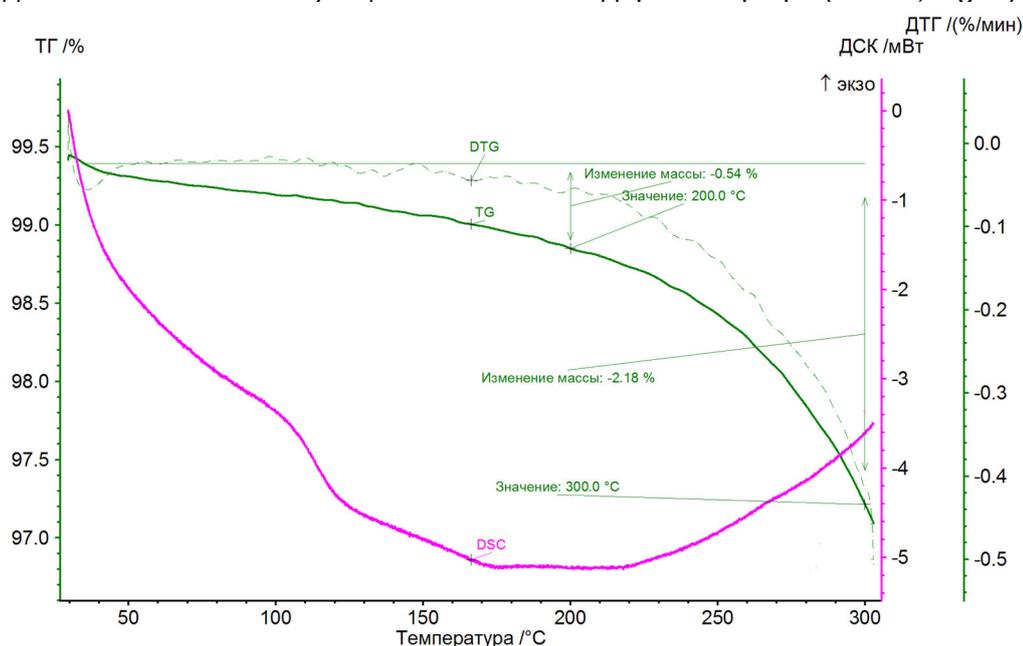
- при испытаниях при средних температурах 175...188 °С, что выше температур стеклования ЭС и ЭФС, потеря массы снова начинает возрастать, что (как будет показано ниже) не связано с ростом интенсивности абразивного износа.

В работах [49,56,57] было показано, что при первичном увеличении температуры выше температуры стеклования в полимерных эпоксидных и эпоксидно-фенольных связующих сначала происходит интенсивная потеря массы (не связанная с термодеструкцией), которая затем замедляется и прекращается.

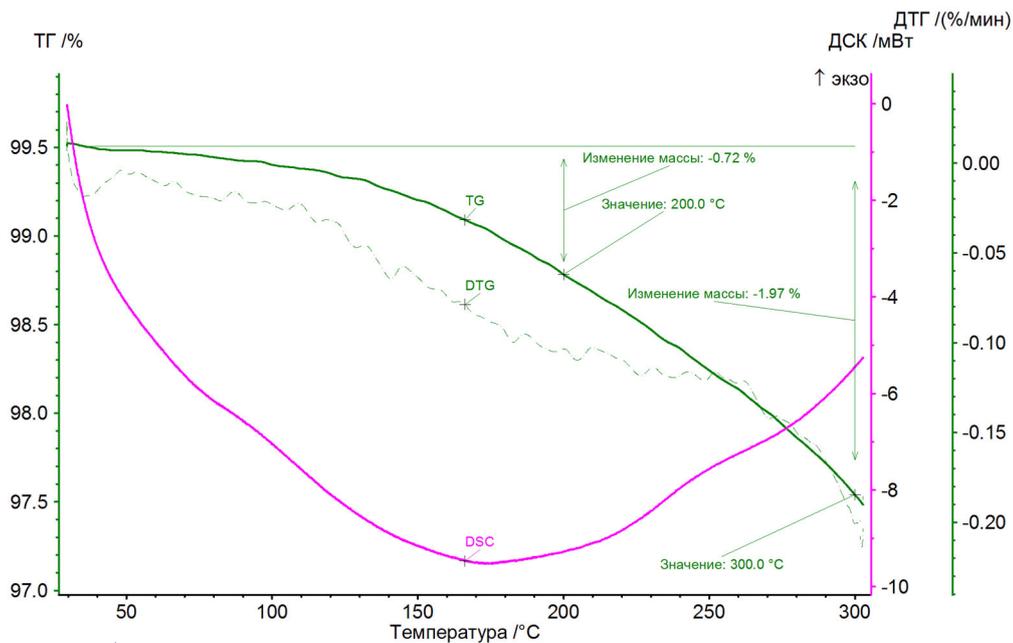
Таким образом, в рассмотренных результатах испытаний у невыдержанных при температуре связующих при первичном нагреве выше температуры стеклования также происходит интенсивная потеря массы, которая накладывается на потерю массы от газообразного износа, поэтому величина последнего получается завышенной.

Это подтверждается тем, что у выдержанных в течение 120 часов при температуре 190 °С образцов связующего ЭС при испытаниях на износ в диапазоне температур 160...200 °С роста интенсивности износа по сравнению с более низкими температурами не наблюдается.

Для того, чтобы устранить погрешность, связанную с наложением потерь массы, обусловленных процессами различной природы, были выполнены исследования потери массы при нагреве до 200 °С и выше связующих ЭС и ЭФС на дериватографе (Рис. 6, Fig. 6).



(a)



(b)

Рис. 6 Результаты дериватографии: а) ЭС б) ЭФС

Fig. 6 - Derivatography results: a) epoxy binder; b) epoxy-phenolic binder

По результатам 6 определений процентной потери массы связующего ЭС при температуре 200 °С среднее их значение составило 0.56%, по результатам 4-х определений потери массы связующего ЭФС при температуре 200°С среднее их значение составило 0.75%. Эти осредненные значения потери массы в процентах мы исключили из определения величины газоабразивного износа. Результаты зависимостей абразивного износа связующих ЭС (невыдержанных и выдержанных) и ЭФС (невыдержанных) в том числе скорректированные показаны на графике (Рис. 7, Fig. 7).

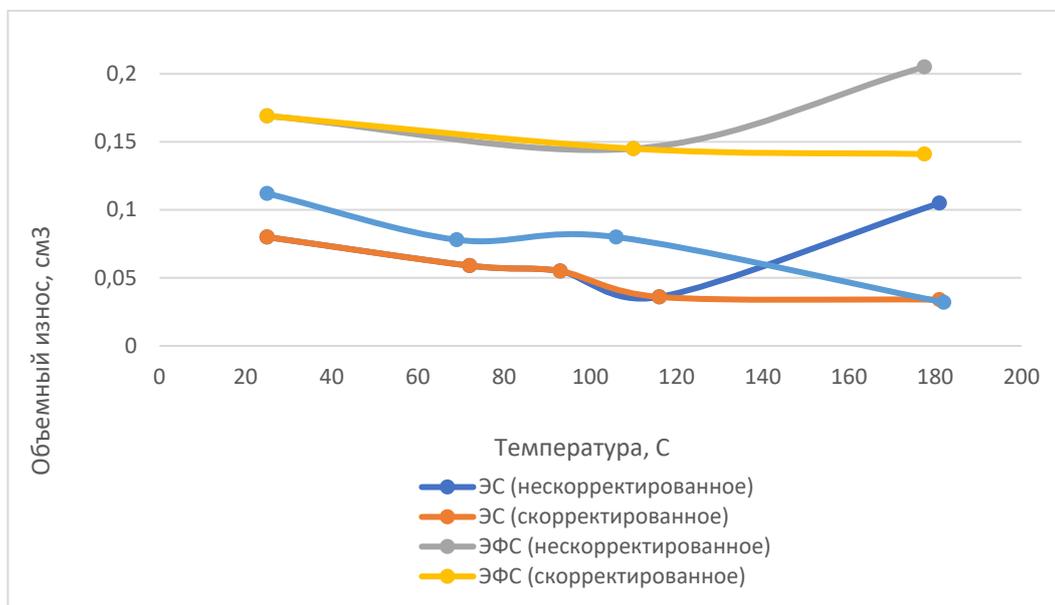


Рис. 7 - Зависимость газоабразивного износа от температуры (в том числе скорректированная для невыдержанных при температуре 190°С образцов связующих)

Fig. 7 - Dependence of gas abrasion on temperature (also corrected for binder samples not exposure at 190°С)

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4



Таким образом, после корректировки результатов и с учетом испытаний, выдержанных в течение 120 часов при температуре 190 °С образцов, мы видим, что увеличения газоабразивного износа при испытаниях при температуре выше температуры стеклования не происходит.

## 4 Conclusions

Исходя из вышеприведенных результатов можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработанное и изготовленное оборудование и методика испытаний на газоабразивный износ дают стабильные результаты и могут быть использованы для определения износостойкости полимерных связующих и композитов в газоабразивном потоке при температурах до 250 °С.

2. Из исследованных материалов при комнатной и повышенных температурах наилучшую износостойкость в газоабразивном потоке показали образцы неармированного эпоксидного связующего горячего отверждения (износ стеклопластиков на таком же связующем, оцениваемый по объему, оказался выше до 2-х раз), что говорит о целесообразности создания внутренних защитных слоев из неармированного связующего при использовании в конструкциях газоотводящих трактов.

3. Стойкость к износу в газоабразивном потоке выше у рассмотренного неармированного эпоксидного связующего, чем у рассмотренного эпоксидно-фенольного в 1.6...2.1 раз.

4. Длительное воздействие температуры, превышающей температуру стеклования эпоксидного связующего, снижает его износостойкость в газоабразивном потоке в 1.4...1.5 раз, при этом для эпоксидно-фенольного связующего подобное снижение не наблюдается.

5. Результаты предварительного анализа корреляции между интенсивностью износа полимерных связующих в газоабразивном потоке и их механическими характеристиками показали, что износостойкость (обратно пропорциональная значению показателя износа) рассмотренных образцов возрастает с уменьшением модуля упругости и повышением прочности. При этом влияние модуля упругости (коэффициент корреляции 0.996) на износостойкость выше, чем прочности (коэффициент корреляции -0.946). Данный вывод пока носит предварительный характер из-за ограниченного объема испытаний.

6. С возрастанием температуры износостойкость рассмотренных полимерных связующих и композитов на их основе существенно повышается (например, для эпоксидного связующего интенсивность износа при комнатной температуре в 2.2 раза выше, чем при температуре 120 °С).

7. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании оболочечных конструкций газоотводящих трактов из полимерных композиционных материалов, эксплуатируемых в условиях совместного воздействия температур до 200 °С и газоабразивного износа. К подобным конструкциям, например, относятся газоходы на металлургических предприятиях, с использованием полученных результатов может быть оценен ресурс таких конструкций при газоабразивном воздействии и различных температурных режимах.

## 5 Acknowledgments

Исследование выполнено при финансовой поддержке фонда РФФИ и Челябинской области, номер проекта 20-48-740021.

## 6 References

1. Seleznev L. I. et al. Vliyaniye zashchitnogo pokrytiya Cr-CrC na harakteristiki iznosa gazoabrazivnym potokom ploskoj misheni na stali 20H13 pri ugle ataki 30° // Neftyanoe hozyajstvo. 2015. № 8. P. 110–113.
2. Zhang Z. et al. High temperature shape memory polymer with high wear resistance // Smart Materials and Structures. 2019. Vol. 28, № 10.

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4



3. Momber A.W., Irmer M., Marquardt T. Effects of polymer hardness on the abrasive wear resistance of thick organic offshore coatings // *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 146.
4. Olea-Mejia O., Brostow W., Buchman E. Wear resistance and wear mechanisms in polymer + metal composites // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2010. Vol. 10, № 12.
5. Wetzel B. et al. Impact and wear resistance of polymer nanocomposites at low filler content // *Polymer Engineering and Science*. 2002. Vol. 42, № 9.
6. Sedakova E.B., Kozyrev Y.P. Influence of Particle Size on the Wear Resistance and Strength of Polymer Composites // *Russian Engineering Research*. 2018. Vol. 38, № 7.
7. Kleis I., Kulu P. Solid particle erosion: Occurrence, prediction and control // *Solid Particle Erosion: Occurrence, Prediction and Control*. 2008.
8. Harsha A.P., Bhaskar D.K. Solid particle erosion behaviour of ferrous and non-ferrous materials and correlation of erosion data with erosion models // *Materials and Design*. 2008. Vol. 29, № 9.
9. Chen D., Sarumi M., Al-Hassani S.T.S. Computational mean particle erosion model // *Wear*. 1998. Vol. 214, № 1.
10. Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles // *Wear*. 1960. Vol. 3, № 2.
11. Zahavi J., Schmitt G.F. Solid particle erosion of reinforced composite materials // *Wear*. 1981. Vol. 71, № 2.
12. Li Y. et al. Solid particle erosion in the reheat stage of the steam turbine // *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering*. 2016. Vol. 52, № 16.
13. Arjula S., Harsha A.P., Ghosh M.K. Solid-particle erosion behavior of high-performance thermoplastic polymers // *Journal of Materials Science*. 2008. Vol. 43, № 6.
14. Grant G., Tabakoff W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles // *Journal of Aircraft*. 1975. Vol. 12, № 5.
15. Choudhary M. et al. Optimization of solid particle erosion behaviour of waste marble dust filled glass fiber polymer composite using Taguchi approach // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 44.
16. Hussain A., Singh G., Gill H.S. Solid particle erosion behaviour of industrial epoxy resin composite against different parameters // *Materials Today: Proceedings*. 2021.
17. Repetto C. et al. The application of a fiberglass liner in well tubing as cost effective material option in high velocity production wells // *Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2019, ADIP 2019*. 2019.
18. Ismail M. et al. Parametric appraisal of erosion behaviour of organo-modified montmorillonite-filled epoxy hybrid composites by Taguchi approach // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2013. Vol. 32, № 21.
19. Ibrahim A.T., Ballout Y., Talia J.E. An attempt to unify the models used for ductile and brittle solid particle erosion // *Journal of Materials Engineering*. 1991. Vol. 13, № 1.
20. Padhi P.K., Satapathy A. Prediction and simulation of erosion wear behavior of glass- epoxy composites filled with blast furnace slag // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 585.
21. Miyazaki N. Solid particle erosion behavior of FRPs with prior impact damage // *Journal of Composite Materials*. 2007. Vol. 41, № 6.
22. Bagci M., Imrek H. Erosion wear performance of borax filled novel hybrid composites by using the Taguchi experimental design // *Industrial Lubrication and Tribology*. 2016. Vol. 68, № 1.
23. Talia M., Lankarani H., Talia J.E. New experimental technique for the study and analysis of solid particle erosion mechanisms // *Wear*. 1999. Vol. 225–229, № PART II.
24. Bagci M. Determination of solid particle erosion with Taguchi optimization approach of hybrid composite systems // *Tribology International*. 2016. Vol. 94.
25. Barkoula N.M., Gremmels J., Karger-Kocsis J. Dependence of solid particle erosion on the cross-link density in an epoxy resin modified by hygrothermally decomposed polyurethane // *Wear*. 2001. Vol. 247, № 1.
26. Srivastava V.K. Effects of wheat starch on erosive wear of E-glass fibre reinforced epoxy resin composite materials // *Materials Science and Engineering A*. 2006. Vol. 435–436.
27. Miyazaki N., Hamao T. Effect of interfacial strength on erosion behavior of FRPs // *Journal of Composite Materials*. 1996. Vol. 30, № 1.

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4



28. Bagci M., Imrek H. Solid particle erosion behaviour of glass fibre reinforced boric acid filled epoxy resin composites // *Tribology International*. 2011. Vol. 44, № 12.
29. Bagci M. Influence of fiber orientation on solid particle erosion of uni/multidirectional carbon fiber/glass fiber reinforced epoxy composites // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2017. Vol. 231, № 5.
30. Jiang B. Study of solid particle erosion in glass fiber/epoxy composite materials // *Fuhe Cailiao Xuebao/Acta Materiae Compositae Sinica*. 1993. Vol. 10, № 4.
31. Atia A.M., El-Minia A.W.Y. Erosion of glass fibre reinforced epoxy composites // *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe*. 2018. Vol. 71, № 3.
32. Ballout Y.A., Hovis S.K., Talia J.E. Erosion in glass-fiber reinforced epoxy composite // *Scripta Metallurgica et Materiala*. 1990. Vol. 24, № 1.
33. Tewari U.S. et al. Solid particle erosion of carbon fibre- and glass fibre-epoxy composites // *Composites Science and Technology*. 2003. Vol. 63, № 3–4.
34. Srivastava V.K., Pawar A.G. Solid particle erosion of glass fibre reinforced flyash filled epoxy resin composites // *Composites Science and Technology*. 2006. Vol. 66, № 15.
35. Mishra P., Acharya S.K. Solid particle erosion of Bagasse fiber reinforced epoxy composite // *International Journal of Physical Sciences*. 2010. Vol. 5, № 2.
36. Agarwal P. et al. Numerical simulation of solid particle erosion for glass fiber reinforced epoxy composites // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 38.
37. Patnaik A. et al. Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymer composites: A review // *Wear*. 2010. Vol. 268, № 1. P. 249–263.
38. Pawar M.J. et al. Experimental and numerical investigation on erosive wear performance of hybrid polymer composites // *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 44. P. 4775–4783.
39. Shakuntala O., Raghavendra G., Samir Kumar A. Effect of filler loading on mechanical and tribological properties of wood apple shell reinforced epoxy composite // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 2014.
40. Bagci M. et al. The effect of nanoclay particles on the incubation period in solid particle erosion of glass fibre/epoxy nanocomposites // *Wear*. 2020. Vol. 444–445.
41. Wang C. et al. Anti-corrosion and wear resistance properties of polymer composite coatings: Effect of oily functional fillers // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2018. Vol. 85.
42. Liu B., Bao L., Xu A. Effect of fabric orientation and impact angle on the erosion behavior of high-performance thermoplastic composites reinforced with ductile fabric // *Wear*. 2016. Vol. 352–353.
43. Thabisimov A.B. et al. Eksperimental'nyj stend dlya izucheniya abrazivnoj stojkosti konstrukcionnyh materialov i zashchitnyh pokrytij // *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2013. Vol. 67, № 5. P. 234–238.
44. Thabisimov Aleksandr Borisovich. Povyshenie abrazivnoj stojkosti lopatochnogo apparata pervyh stupenej cilindrov vysokogo i srednego davleniya moshchnyh parovyh turbin. Moskva, 2016.
45. Das S.K. et al. Analytical model for erosion behaviour of impacted fly-ash particles on coal-fired boiler components // *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*. 2006. Vol. 31, № 5.
46. Chen Q., Li D.Y. Computer simulation of solid-particle erosion of composite materials // *Wear*. 2003. Vol. 255, № 1–6.
47. Campos-Amezcuca A. et al. Numerical study of erosion due to solid particles in steam turbine blades // *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*. 2008. Vol. 53, № 6.
48. Ashrafizadeh H., Ashrafizadeh F. A numerical 3D simulation for prediction of wear caused by solid particle impact // *Wear*. 2012. Vol. 276–277.
49. Korolev A. et al. Prolonged Thermal Relaxation of the Thermosetting Polymers // *Polymers*. 2021. Vol. 13, № 23. P. 4104.
50. Korolev A. et al. Polymers under load and heating deformability: Modelling and predicting // *Polymers*. 2021. Vol. 13, № 3.
51. National standard GOST 19907–2015 Dielectric fabrics made of glass. Twister complex threads. Specifications. // <https://docs.cntd.ru/document/1200122459>
52. National standard GOST 15081–78 Lak KO-08 Silico-organic thermostable varnish KO-08.

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4



- Specifications // <https://docs.cntd.ru/document/1200018333>
53. Tekhnicheskie usloviya TU 3989-003-82101794-2008 Poroshok abrazivnyj N/CU/G 0.5–3 Ka. // <https://asi-grit.kz/assets/docs/tu3989-2008.pdf>
  54. National standard GOST RF 56810-2015 Polymer composites. Test method for flexural flat samples. 2017 // <https://docs.cntd.ru/document/1200128337>
  55. National standard GOST 14359-69\* Plastics. Testing methods. General requirements of the methods of mechanical testing. // <https://docs.cntd.ru/document/1200020780>
  56. Korolev A. et al. Polymers under load and heating deformability: Modelling and predicting // Polymers. 2021. Vol. 13, № 3.
  57. Mishnev M.V. et al. Based on the hybrid hot-curing epoxy binder fiberglass and evaluation of its effectiveness in load-bearing chimneys // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Vol. 93.

Mishnev, M. V., Korolev A. S.

Solid particle erosion wear of thermosetting polymers and composites at room and elevated temperatures: an experimental study;

2021; Construction of Unique Buildings and Structures; 98 Article No 9804doi: 10.4123/CUBS.98.4