

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ РЕЗИНЫ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

В работе были проведены лабораторные испытания на резине I группы ГОСТ 8752-70 с введением металлических компонентов. Введение наполнителя в резиновую смесь производилось на лабораторных вальцах. В качестве наполнителей использовались мелкодисперсные порошки меди (Cu), олова (Sn) и свинца (Pb). Получены зависимости температуры в зоне контакта образца и тела вращения от концентрации наполнителя и зависимость износа от концентрации наполнителя для одинаковых нагрузок и скоростей скольжения, выявлены наполнители, придающие резине наибольшую износостойкость и определено рациональное количество наполнителя. Положительные результаты лабораторных испытаний дают основание рекомендовать к использованию в уплотнительных устройствах гидравлических систем различного оборудования, в том числе и аэрокосмического, резинотехнические изделия с металлическими наполнителями в указанных концентрациях, что позволит продлить срок их службы и повысить надежность.

**Ключевые слова:** резиновая смесь, металлические наполнители, эксплуатационные свойства резины, мелкодисперсные порошки, гидравлические системы, износостойкость.

**Введение.** Увеличение скорости механических систем и давлений в гидравлических системах, обусловленное стремлением к увеличению производительности, приводит к более высоким рабочим температурам и использованию жидкостей с пониженной вязкостью. Это связано с более высоким давлением, которое играет серьезную роль при утечке жидкостей. Такие утечки, в том числе и в топливных системах, работающих с легковоспламеняющимися растворителями, нельзя игнорировать, поскольку высока вероятность возникновения пожара. Непредвиденные утечки приводят к простоям, влияют на качество продукции и загрязняют окружающую среду в дополнение к трате материальных средств.

Появление в уплотнителе трещин и пузырей может быть связано с тем, что между жидкостью и уплотнителем происходит механическое и химическое взаимодействие. Эта проблема особенно серьезна, если жидкость имеет молекулярную структуру, подобную структуре компонентов уплотнительной резины. Пузыри и внутренние трещины указывают на то, что уплотнение взаимодействует с жидкостью. Такие провалы, которые видны только при ближайшем рассмотрении уплотнения, вызваны тем, что жидкость проникает в микроскопические пустоты в резине и расширяет их [1–4].

Резиновые уплотнительные материалы обычно выбираются на основе химической совместимости с переносимой жидкостью, но даже если уплотнение и жидкость химически совместимы, они все равно могут взаимодействовать физически, что приводит к утечке. Отказ происходит из-за того, что жид-

кость буквально вливается в уплотнение и нарушает его структуру [5]. Реакция приводит к образованию пузырей или трещин в уплотнении, которые в итоге обеспечивают путь для утечки жидкости. Эта проблема особенно остро стоит при высоких температурах и давлениях, но может проявиться и в менее тяжелых условиях эксплуатации. Жидкости взаимодействуют с уплотнениями, потому что ни один материал уплотнения не является на 100 % твердым. Как правило, молекулярные пустоты или воздушные пространства составляют около 3% объема уплотнения при его температуре стеклования [6–7]. Под давлением жидкость диффундирует в эти пустоты и достигает равновесного состояния. Любое изменение равновесия создает положительное внутреннее давление в пустотах. Если давление превышает критический уровень, пустоты расширяются, образуя пузыри или разрыв. Пузыри характерны для высокоэластичных материалов, используемых для уплотнения пересыщенных газов.

Успешная герметизация включает в себя сдерживание жидкости внутри системы при одновременном исключении загрязняющих веществ. Например, в типичной возвратно-поступательной уплотнительной системе резиновые материалы имеют размерные вариации из-за производственных допусков, нагрузок и деформаций в цилиндре под давлением. Давление системы на поверхность уплотнения пытается сжать уплотнение в осевом направлении. Это сжатие заставляет уплотнение более плотно прижиматься к контактирующей с ним металлической поверхности. Упругость резины создает плотный герметизирующий эффект,

содержащий жидкость и исключаяющий любые загрязнения. Утечки встречаются в целом ряде направлений, таких как поток жидкости, смазка, гидравлические системы и трубопроводы. Эластичная резина обеспечивает плотное и прочное уплотнение. Как правило, применение высокого давления облегчает улучшение герметизации. Резиновые уплотнения, используемые под высоким давлением, должны иметь высокую прочность на разрыв, твердость и эластичность, чтобы предотвратить разрушение резиновой прокладки [8].

Производители уплотнений разрабатывают собственные резиновые смеси, подходящие для уплотнений, которые обладают химическими и физическими свойствами в соответствии с функциональными требованиями и условиями работы. Соединения, используемые при изготовлении уплотнений, получают из базовых каучуков, натурального каучука, нитрилов, неопренов, бутилов, бутадиен-стиролов, карбоксилированных нитрилов, силиконов и политетрафторэтилена. Из всех свойств, проявляемых различными типами резиновых смесей, наиболее важные относятся к тому, как они изменяются при установке в качестве уплотнений и во время эксплуатации. Все физические свойства изменяются с возрастом и воздействием колебаний температуры, типа жидкости, давления и других факторов, которые могут включать агрессивные химические вещества, пары различных химических соединений и газы, а также под воздействием вакуума [9–10].

С соединениями с наименьшей склонностью к изменению своих свойств, будь то химические или физические, легче работать. С помощью этих соединений можно производить более адаптируемые и универсальные уплотнения [11].

В процессе эксплуатации гидравлического оборудования чаще всего наблюдаются отказы, связанные с выходом из строя резинотехнических изделий (РТИ), которые выполняют функции герметизирующих устройств. Основной причиной отказов является повышенный износ контактирующих поверхностей. Повышения их износостойкости можно добиться путем введения в резину мелкодисперсных порошков металлов.

**Подготовка образцов и проведение эксперимента.** Для оценки влияния наполнителей проводились лабораторные испытания нескольких образцов резины. Введение наполнителя в резину производилось на установке, состоящей из двух гладких вращающихся с различными скоростями валков. Резина прокатывалась валками в тонкий лист. Наполнитель тонким слоем распределялся по поверхности резины, затем резина закатывалась трубкой и пропускалась через валки. Операция прокатки многократно повторялась. Происходило вдавливание порошка наполнителя в поверхность резины. Перемешивание осуществлялось за счет различных скоростей вращения валков. Образцы РТИ изготавливались с различным процентным содержанием наполнителя. Для сравнения результатов износных испытаний были также изготовлены образцы РТИ из чистой резины той же марки.

**Целью работы является** выявление наполнителя, который придает резине наибольшую износостойкость, а также определение его рациональной концентрации.

Так как износные испытания проводились с использованием масла ИГП-14, то при подготовке к эксперименту была произведена проверка

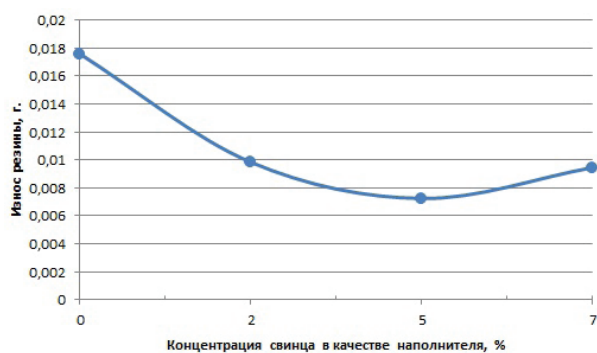


Рис. 1. Зависимость износа от концентрации свинца в роли наполнителя

образцов РТИ с металлическими наполнителями на маслостойкость, то есть резинотехническое изделие, стойкое к воздействию технических масел. Для этого образцы РТИ помещались на 24 часа в масло ИГП-14. Проверкой установлено, что маслостойкость резины при введении в нее металлических наполнителей существенно не меняется.

Образцы РТИ изготавливались на установке ДБ-2426А — гидравлическом прессе-полуавтомате ускоренного прессования. Пресс предназначен для формования изделий из реактопластов методом прямого и трансфертного прессования. Наличие на нем гидроблока аккумулятора позволяет проводить ускоренное прямое прессование с высокотемпературным (до 120–130 °С) предварительным подогревом прессуемого материала или получать тонкие армированные изделия трансфертным способом. Кроме того, прессы могут быть эффективно использованы для производства тонкостенных изделий методом прямого прессования в пресс-формах, нагретых до 200–230 °С.

Аппаратура прессов предусматривает работу в полуавтоматическом и наладочном режимах при прямом и трансфертном прессовании обеспечивает автоматическое поддержание заданной температуры пресс-формы.

Температура варки образцов РТИ — 170 °С, время варки — 25/30 минут.

Износные испытания проводились на машине трения СМЦ-2. Пара трения — «резина (колодка) — сталь (ролик)».

Трение осуществлялось под нагрузкой в 5,5 Мпа со скоростью скольжения 2,346 м/с; путь трения — 7038 м.

**Результаты и обсуждение эксперимента.** Наименьший износ резины характерен при добавлении свинца (рис. 1) в качестве наполнителя с концентрацией в 5 %, также при этом количестве не возникает значительных изменений физико-механических свойств резины при реакции между серой и свинцом, выявлено наличие темноокрашенных сульфидов.

Концентрация олова в качестве наполнителя была взята в гораздо больших количествах (рис. 2) по сравнению с другими наполнителями вследствие высокой прочности, тепло- и электропроводности, а также высокого уровня термостойкости РТИ с данным металлическим наполнителем. Прочность в этом случае обусловлена химическим взаимодействием полимера с металлом (образование комплексов за счет электронов двойных связей, реакция карбоксильных групп с окислами на поверхности металла).

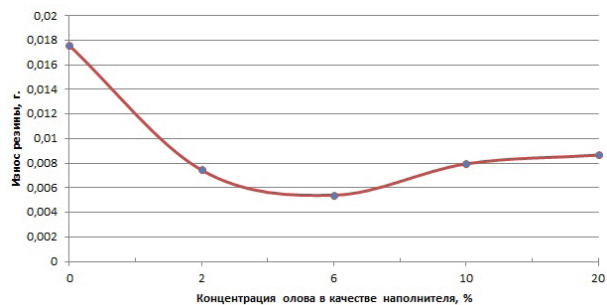


Рис. 2. Зависимость износа от концентрации олова в роли наполнителя

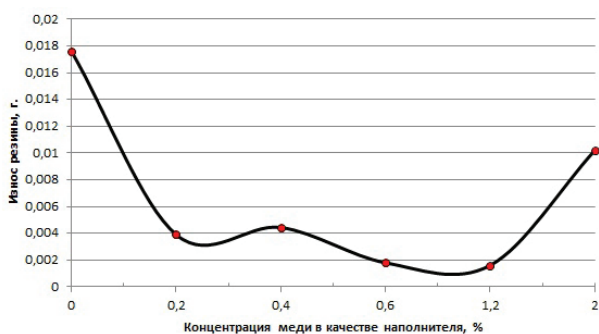


Рис. 3. Зависимость износа от концентрации меди в роли наполнителя

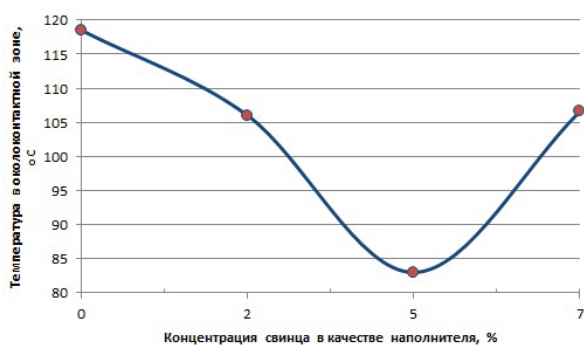


Рис. 4. Зависимость изменения температуры в околоконтактной зоне от концентрации свинца в роли наполнителя

Для меди, которая является металлом, значительно снижающим уровень теплопроводности резино-технического изделия, была выбрана концентрация на порядок ниже, чем для остальных наполнителей (рис. 3), это связано с тем, что медь хорошо компенсирует неровности на трущихся поверхностях, тем самым уменьшая износ.

Как видно из зависимостей (рис. 1–3), увеличение концентрации наполнителя, а также недостаточное его количество приводят к увеличению износа образцов резины. Также из этих зависимостей видно, что при введении рационального количества металлического наполнителя резко сокращается износ образцов резины, а это позволяет продлить срок службы резинотехнических изделий при изготовлении уплотнительных устройств.

Уменьшение температуры в околоконтактной зоне при увеличении концентрации наполнителя можно объяснить следующим образом (рис. 4–6). Снижаются потери на трение и увеличивается

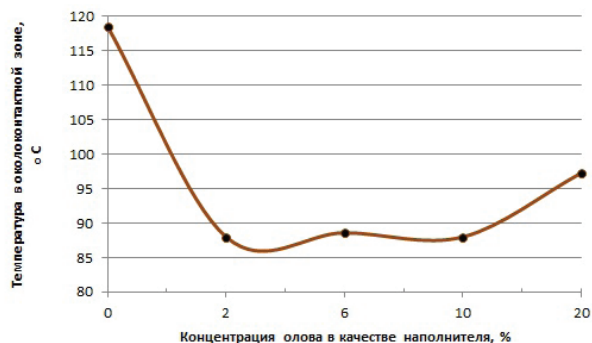


Рис. 5. Зависимость изменения температуры в околоконтактной зоне от концентрации олова в роли наполнителя

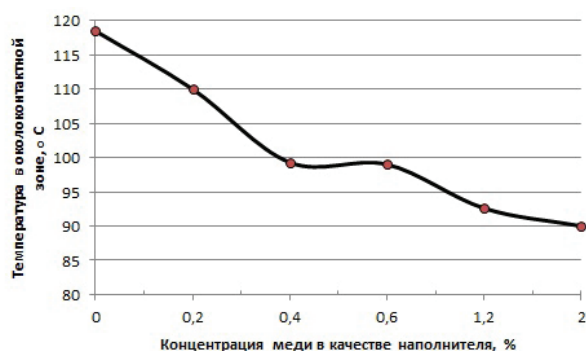


Рис. 6. Зависимость изменения температуры в околоконтактной зоне от концентрации меди в роли наполнителя

коэффициент теплопередачи, что приводит к увеличению передачи тепла во внешнюю среду. При введении наполнителя уменьшается потенциальная энергия взаимодействия полимер–наполнитель, поэтому температура плавления понижается.

**Закключение.** Износные испытания образцов РТИ с медным порошком показали, что минимальный износ резины достигается при содержании меди в резине 1,2 %. При содержании меди более 2 % резина изменяет свои физико-механические свойства (становится мягкой, свободно подвергается пластической деформации) и износные испытания произвести не удастся. Это происходит из-за взаимодействия меди с серой с образованием сульфатов и сульфидов. При рациональной концентрации меди в резине наблюдается и минимально низкая температура в околоконтактной зоне трения, что характерно для минимума износа образцов.

Износные испытания образцов РТИ с оловянным порошком показали, что его рациональная концентрация, обеспечивающая минимальный износ и благоприятный тепловой режим, — 6 %.

Износные испытания образцов РТИ со свинцовым наполнителем выявили рациональную концентрацию наполнителя — 5 %. Минимальный износ достигается также при минимальной температуре в околоконтактной зоне трения образцов.

Применение медного порошка в качестве наполнителя позволяет снизить износ резины на порядок. Наполнитель из порошка олова снижает износ в три раза, из порошка свинца — более чем в два раза.

Положительные результаты лабораторных испытаний дают основание рекомендовать к использова-

нию в уплотнительных устройствах гидравлических систем различного оборудования резинотехнические изделия с металлическими наполнителями. Использование металлических наполнителей в указанных концентрациях позволит продлить срок службы уплотнительных устройств гидравлических систем.

#### Библиографический список

1. Игуменова Т. И., Шульга А. М. Влияние углеродных наноматериалов на свойства резин специального назначения // Охрана, безопасность, связь. 2018. Т. 3, № 3. С. 73–76.
2. Сосновский Л. А., Темников Е. А. Ускоренные испытания резин: методы и некоторые результаты // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2016. № 1 (32). С. 183–190.
3. Елисеев О. А., Наумов И. С., Смирнов Д. Н., Брык Я. А. Резины, герметики и огне-теплозащитные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 437–451. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-437-451.
4. Моргунов А. П., Матвеев Н. А. Моделирование процесса обеспечения прочности соединения резины с металлической поверхностью // Омский научный вестник. 2017. № 3 (153). С. 15–19.
5. Plagge J., Ricker A., Krcger N. H. [et al.]. Efficient modeling of filled rubber assuming stress-induced microscopic restructurization // International Journal of Engineering Science. 2020. Vol. 151 (9). 103291. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2020.103291.
6. Allouch M., Kamoun M., Mars J. [et al.]. Experimental investigation on the mechanical behavior of recycled rubber reinforced polymer composites filled with aluminum powder // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 259. 119845. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119845.
7. Song J., Li X., Tian K. [et al.]. Thermal conductivity of naturalrubber nanocomposites with hybrid fillers // Chinese

Journal of Chemical Engineering. 2019. Vol. 27 (4). P. 928–934. DOI: 10.1016/j.cjche.2018.09.019.

8. Dong B., Zhang L., Wu Y. Influences of different dimensional carbon-basednanofillers on fracture and fatigue resistance of natural rubber composites // Polymer Testing. 2017. Vol. 63. P. 281–288. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.08.035.

9. Чайкун А. М., Наумов И. С., Алифанов Е. В. Резиновые уплотнительные материалы (обзор) // Труды ВИАМ. 2017. № 1. 12 с. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-12-12.

10. Вишницкий А. С. Перспективы проведения новых разработок в промышленности РТИ // Каучук и резина. 2017. Т. 76, № 2. С. 100–101.

11. Шилов М. А., Фомин С. В., Бритова А. А. [и др.]. Исследование физико-механических свойств резин, армированных углеродными наноструктурами // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2020. Т. 20, № 4. С. 93–98. DOI: 10.18083/LCAppl.2020.4.93.

**ПАШУКЕВИЧ София Вячеславовна**, аспирант гр. Ма-202 кафедры «Химия и химическая технология».

SPIN-код: 5626-7085

ORCID: 0000-0002-8111-4725

Адрес для переписки: sofia96@bk.ru

#### Для цитирования

Пашукевич С. В. Исследование эксплуатационных свойств резины с металлическими наполнителями // Омский научный вестник. 2021. № 2 (176). С. 20–23. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-176-20-23.

Статья поступила в редакцию 12.02.2021 г.

© С. В. Пашукевич