



23. Амиров Ю. Д. Технологичность конструкции изделия // Библиотека конструктора. М. : Машиностроение, 1990. 768 с.
24. Говорков А.С., Чьен Х.В. Разработка автоматизированной системы проектирования технологических процессов изготовления изделия машиностроения на основе трехмерной модели / Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 4 (52). С. 48–55.
- 25.25. Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен / Richard O. Duda, Peter E. Hart. М. : Мир, 1976. 502 с.
26. Карлина Ю.И., Говорков А.С. Конструктивно-технологические характеристики номенклатуры выпускаемых изделий при автоматизации процессов подготовки производства и выбор базовой САД-системы предприятия для создания цифрового макета изделия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3 (51). С. 49–55.
27. Колганов И. М., Дубровский П.В., Архипов А.Н. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения. Ч. 1. Ульяновск : УлГТУ, 2003. 148 с.
28. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. М. : Мир, 1978. 414 с.
29. Чимитов П.Е. Разработка математической модели сборочных процессов с использованием методов распознавания образов : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2010.
30. Штайгер М.Г. Проблемы качества компонентов путевого комплекса // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 12. С. 6–9.

УДК 620.178.162; 621.839

**Буторин Денис Витальевич,**

аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов»,  
Иркутский государственный университет путей сообщения,  
тел. 89041203901, e-mail: den\_butorin@mail.ru

**Филиппенко Николай Григорьевич,**

к. т. н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов»,  
Иркутский государственный университет путей сообщения,  
тел. 89025121754, e-mail: pentagon@mail.ru

**Лившиц Александр Валерьевич,**

д. т. н., доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов»,  
Иркутский государственный университет путей сообщения,  
тел. 89501378441, e-mail: livnet@list.ru

**Попов Сергей Иванович,**

к. т. н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов»,  
Иркутский государственный университет путей сообщения,  
тел. 89086615338, e-mail: popovs@irgups.ru

## ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИДКОФАЗНОГО НАПОЛНЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ И КОМПОЗИТОВ НА ИХ ОСНОВЕ МОТОРНЫМИ МАСЛАМИ

*D. V. Butorin, N. G. Filippenko, A. V. Livshits, S. I. Popov*

### RESEARCH OF POLYMERS AND COMPOSITES ON THEIR BASIS LIQUID-PHASE FILLING WITH ENGINE OILS

**Аннотация.** В данной работе представлены результаты исследований жидкофазного наполнения полимеров и композитов на их основе моторными маслами с целью получения материалов с повышенной износостойкостью и нагрузочной способностью.

По результатам исследований был выбран способ повышения трибоустойчивости полимеров. Разработана технология их омасления, заключающаяся в погружении предварительно высушенных полимерных образцов в ванну термовакuumной камеры, частично заполненную антифрикционной жидкостью, выдержке при температуре 50 °С с низким давлением и периодическим замером веса образцов. Разработана экспериментальная установка и определены контрольно-управляющие параметры процесса омасления полимеров и композитов на их основе. Также выявлены зависимости изменения свойств антифрикционных материалов при маслонеполнении.

Разработанная технология получения маслонеполненных полимерных материалов повышает модуль упругости при их жидкофазном наполнении моторным маслом, на основании чего можно косвенно утверждать о формировании жесткоцепной структуры композита в процессе обработки.

**Ключевые слова:** полимеры, антифрикционные материалы, износ, трибоустойчивость, сушка полимеров, ПИД-регулятор.

**Abstract.** This paper presents the results of studies of liquid-phase filling of polymers and composites on their base with engine oils in order to obtain materials with high wear resistance and load carrying capacity.

According to the research, a method of increasing tribo for their oiling polymers was chosen. A technology permanency, which consists in immersing a pre-dried polymer sample in a bath of thermal vacuum chamber partially filled with a liquid anti-friction, aging at a temperature of 50 °С with low pressure metering and periodic weight samples is developed. The experimental setup is developed



and oiling polymers and composites based on them are defined. Changes depending on the properties of anti-friction materials in oil-filling are also revealed/.

The developed technology for producing oil-filled polymer material is increases the modulus of elasticity in their liquid phase filling with engine oil on the basis of what we can be indirectly assert the formation of a rigid composite structure during processing.

**Keywords:** polymers, anti-friction materials, wear, thermal stability, polymers drying, PID controller.

### Введение

Изнашивание деталей машин и инструмента – одна из основных причин потери их работоспособности [1], проявляющаяся в постепенном разрушении поверхности при контактном взаимодействии твёрдых деформируемых тел при их относительном перемещении. Результатом изнашивания является износ, который выражается в единицах длины (изменение размеров) или массы (потеря материала).

Для создания новой перспективной техники с более жесткими условиями работы трибологических систем требуются новые материалы с повышенным комплексом эксплуатационных свойств, уровень качества которых обусловлен их составом, оптимальностью характеристик, тщательностью изготовления на всех стадиях технологической цепочки, сравнительно недорогих и технологичных в изготовлении.

### Постановка цели и задач исследования

В связи с этим целью данных исследований было разработать новые износостойкие полимерные композитные материалы, обладающие низким коэффициентом трения. Достижение поставленной цели возможно после решения ряда задач:

- выбор антифрикционного материала;
- выбор способа повышения трибостойчивости;
- определение вида смазки;
- разработка технологии омасления полимерных материалов;
- подготовка образцов;
- разработка экспериментальной установки;
- выбор контрольно-управляющих параметров и проведение эксперимента;
- выявление зависимости изменения свойств антифрикционных материалов при маслonaполнении.

### Выбор антифрикционного материала

Группа материалов, обладающих низким коэффициентом трения, или материалы, способные уменьшить коэффициент трения других материалов, называют антифрикционными (АФ). Они должны обладать следующей совокупностью свойств [2, 3]:

- совместимость – АФ–материал должен иметь малый коэффициент трения, небольшую склонность к заеданию с материалом сопряженной детали и не изнашивать ее;

- прирабатываемость – способность материала изменять геометрию поверхности, степень микронеровностей и структуру поверхностного слоя. После приработки снижается коэффициент трения и возрастают допустимые нагрузки;

- износостойкость – определяет сопротивление различным видам изнашивания;

- стойкость к заеданию – чем выше значения нагрузок и скоростей, при которых происходит схватывание с материалом сопряженной детали, тем выше стойкость к заеданию;

- способность к поглощению твердых частиц – речь идет об абразивных частицах и продуктах износа. Если они способны «вдавливаться» в основу, то абразивное воздействие на сопряженную деталь минимизируется;

- сопротивление усталости – чем большее число циклов нагружения при заданной нагрузке выдерживает материал, тем позже развивается усталостное изнашивание. Иными словами, сопротивление усталости определяется кривой усталости соответствующего материала;

- температуростойкость – чем меньше зависят от температуры физико-химические и механические свойства АФ–материала, тем менее чувствителен он к повышению температуры во время работы.

Антифрикционные материалы обладают повышенной устойчивостью к износу при продолжительном трении. Используются для покрытия трущихся поверхностей (например, в подшипниках скольжения). В перечень антифрикционных материалов для подшипников скольжения входят десятки различных бронз, других сплавов, неметаллические и композиционные материалы.

Использование композитов на основе полимеров в узлах трения повышает надежность и долговечность механизмов, обеспечивает стабильную эксплуатацию в условиях агрессивных сред, глубокого вакуума и при криогенных температурах.

### Выбор способа повышения трибостойчивости

Для повышения трибостойчивости композиционных материалов на основе полимеров используют принцип их модифицирования [4] компонентами, повышающими термостабильность, устойчивость к окислительным процессам, улучшающими смазывающие и износные показатели, способствующими в процессе фрикционного вза-



имодействия с металлом торможению развития радикальных реакций [5]. Одним из таких компонентов является масло (смазка) различной природы.

#### **Определение вида смазки**

Смазка, действующая на узел трения, уменьшает силу трения и/или интенсивность изнашивания. Чаще всего встречаются три вида смазки [2]:

1. Граничная смазка – толщина смазывающего слоя меньше микронеровностей. Трущиеся поверхности разделены тончайшими пленками (не больше 1 мкм), которые образуются в результате адсорбции.

В режиме граничной смазки коэффициент трения практически равен коэффициенту трения покоя и не зависит от скорости. Износ в этом режиме – наибольший, опасность заедания – максимальна. Одна из задач приработки трущихся поверхностей – уменьшение величины коэффициента граничного трения.

2. Жидкостная смазка – трущиеся поверхности полностью разделены смазочным слоем. Этот режим реализуется при одновременном выполнении следующих условий:

а) скорость скольжения должна быть выше критической;

б) должен иметься клиновидный зазор между поверхностями;

в) направление скорости должно быть перпендикулярно контактной линии.

Возникающее при этих условиях гидродинамическое давление создает подъемную силу, которая и разделяет движущиеся поверхности. Изнашивание при этом минимально. Коэффициент трения уже не зависит от материала сопряженных поверхностей, а определяется трением смазочного материала о твердые поверхности и возрастает с ростом скорости. Одним из результатов приработки является снижение величины критической скорости, т. е. обеспечение более раннего перехода в жидкостный режим

3. Полужидкостная смазка – толщина смазывающего слоя недостаточна для полного разделения поверхностей.

Это смешанный режим, когда часть поверхности испытывает граничную, а другая часть – жидкостную смазку, то есть непосредственное взаимодействие поверхностей частично сохраняется. При этом в локальных клиновых зазорах, образованных микронеровностями, возникает гидродинамический эффект. С ростом скорости вклад гидродинамического давления увеличивается, толщина смазывающего слоя растёт. В режиме

полужидкостной смазки коэффициент трения уменьшается с ростом скорости.

Все виды смазки могут реализовываться только в подшипниках скольжения. В других узлах трения может быть только граничная и (или) полужидкостная смазка.

Исходя из вышесказанного, была выбрана жидкостная смазка.

#### **Разработка технологии омасления полимерных материалов**

Для обеспечения введения жидкой смазки в полимерный образец в рамках настоящего исследования была разработана технология вакуумно-термического маслonaполнения образцов [6], заключающаяся в погружении предварительно высушенных полимерных образцов в ванну термовакуумной камеры, частично заполненную антифрикционной жидкостью, выдержке при температуре 50 °С с низким давлением (25 мм рт. ст.) и периодическом замере веса образцов.

Преимуществом разработанной технологии маслonaполнения является пропитка изделий из полимерных материалов за более короткий промежуток времени по сравнению с заполнением, осуществляемым в нормальных условиях.

Реализация разработанной технологии заполнения жидкими моторными маслами позволяет создать триботехнические полимерные материалы с повышенной износостойкостью, не требуя сложного технологического оборудования, и вполне пригодно для внедрения в промышленность.

#### **Подготовка образцов**

Объектами исследования были такие материалы, как полиамид (капролон), фторопласт и армамид ПА СВ 30-1 ЭТМ (армированный полиамид).

Перед пропиткой изделий (образцов) из полимерных материалов маслом необходимо их подготовить [7]. Основной целью подготовки полимеров является сушка полимера [8, 9] до определенного (требуемого) уровня влажности.

Повышенное содержание влаги может вызвать [10]:

– гидролитическую деструкцию полимера при переработке (может привести к изменению цвета, помутнению прозрачных полимеров, уменьшению вязкости, снижению механических свойств изделия);

– возникновение брака (разводы, волнистость, вздутие, пористость, пузыри и т. д.);

– ухудшение физико-механических свойств полимеров в изделиях (в связи с повышением влажности снижается ударная вязкость, разрушающее напряжение при растяжении);



– уменьшение вязкости расплава (может привести к нестабильности процесса переработки и нестабильности свойств изделий);

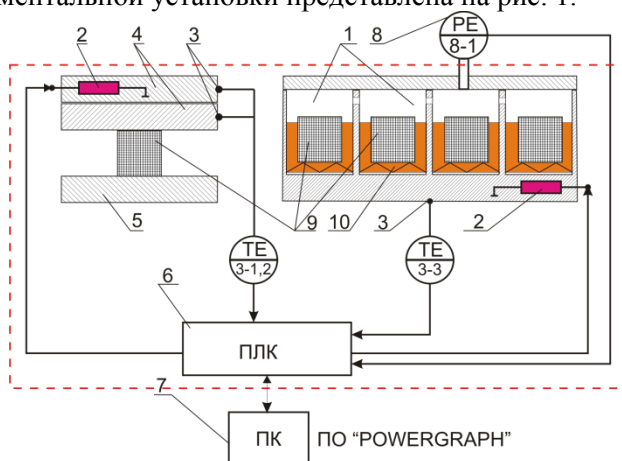
– вспенивание расплава, вытекающего из сопла (приводит к затруднению переработки и ухудшению качества изделия).

Рекомендации по влажности следует строго соблюдать, поскольку именно влага в материале оказывает существенное влияние на конечные свойства и качество изделий.

Заводы-изготовители выпускают продукт с определенной влажностью, соответствующей нормативно-технической документации (НТД). Но необходимо учитывать, что влажность может изменяться в зависимости от условий производства, хранения и транспортировки. Поэтому при поступлении полимера со склада на переработку проводят входной контроль его влажности [11]. Если перед переработкой влажность выше допустимого интервала, полимер сушат при постоянной температуре в течение определенного времени, соответствующего НТД.

**Разработка экспериментальной установки**

Для проведения экспериментальных исследований по термовакуумному маслonaполнению полимеров и композитных антифрикционных материалов авторами была модернизирована экспериментальная установка, за основу которой было взято промышленное оборудование модели AZ pre-ink N2, предназначенное для изготовления красконаполненных флеш-клише. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Экспериментальная установка:**

- 1 – вакуумная камера; 2 – нагреватель; 3 – термопара;
- 4 – плиты установочные; 5 – плита прессовая;
- 6 – микроконтроллер; 7 – компьютер;
- 8 – датчик вакуума; 9 – образец;
- 10 – антифрикционная жидкость

Одной из задач данной работы было выявление зависимости изменения свойств полимеров

и композитных антифрикционных материалов от внедрения в их пористую структуру масла. Для этого ванны вакуумной камеры после сушки образцов были частично заполнены антифрикционной жидкостью (маслом марки М8-В) с дальнейшим погружением в них полимерных образцов.

**Выбор контрольно-управляющих параметров и проведение эксперимента**

Контрольно-управляющими параметрами процесса омасления полимеров и композитных антифрикционных материалов были: температура в ванне вакуумной камеры, давление в вакуумной камере, а также вес образцов.

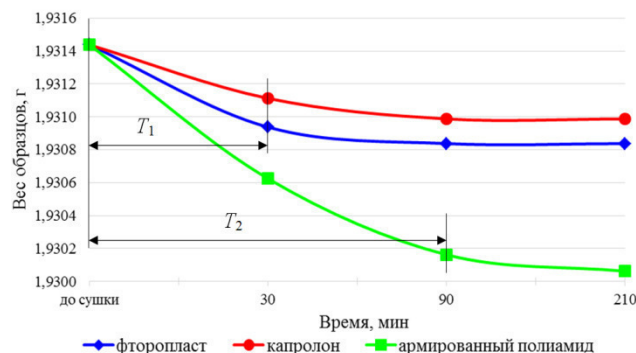
Контроль веса образцов осуществлялся на аналитических весах OHAUS модели EP114C [12], представленных на рис. 2.



**Рис. 2. Аналитические весы OHAUS модели EP114C**

Перед омаслением образцы были тщательно высушены в термовакуумной камере при температуре 50 °С в течении 210 мин.

Режим сушки образцов был подобран экспериментально (рис. 3) и составил:  $T_1 = 30$  мин – оптимальное время сушки фторопласта и капролона в вакуумной камере;  $T_2 = 90$  мин – оптимальное время сушки аррамида.



**Рис. 3. Сравнительная диаграмма сушки**



Исходя из паспортных данных масла М8-В, для него характерна высокая кинематическая вязкость в сравнении с вязкостью воды, равной 0,295 мм<sup>2</sup>/с при 100 °С. Это осложняет процесс омасления, так как у вязких жидкостей низкое проникающее действие. Как известно, вязкость меняется с изменением температуры. Кривая зависимости вязкости масел от температуры представлена на рис. 4.

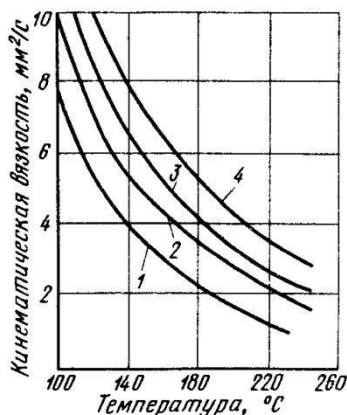


Рис. 4. Зависимость вязкости масел от температуры: 1 – М8; 2 – М10; 3 – М12; 4 – М16

Поэтому чтобы уменьшить вязкость масла и увеличить его адсорбцию, было решено ввести в масло поверхностно-активное вещество (ПАВ), в качестве которого был выбран гексан. На 100 мл раствора приходится 70 мл масла и 30 мл гексана. Достигнув необходимой вязкости раствора, мы добились высокой адсорбции, а значит, и проникающей способности.

Далее были проведены эксперименты по термовакуумному маслonaполнению полимеров и композитных антифрикционных материалов в масле без ПАВ и, соответственно, в масле с ПАВ.

По завершении экспериментов были получены следующие результаты (рис. 5–7).

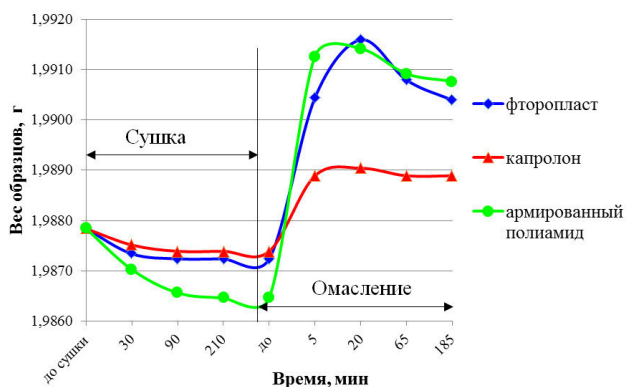


Рис. 5. График омасления полимеров после сушки

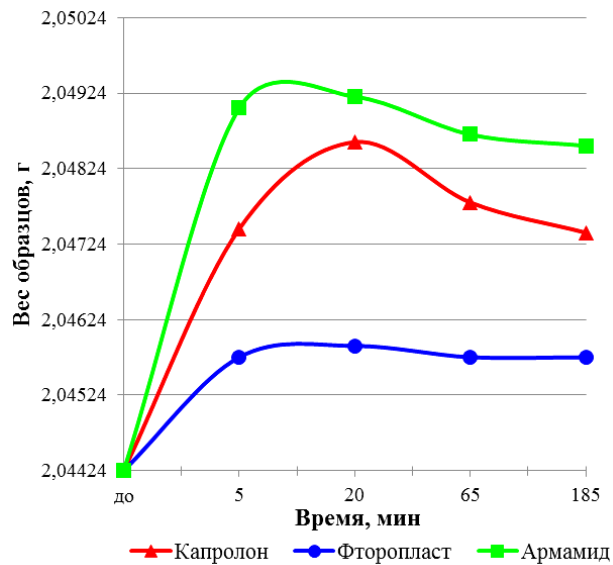


Рис. 6. График омасления без ПАВ

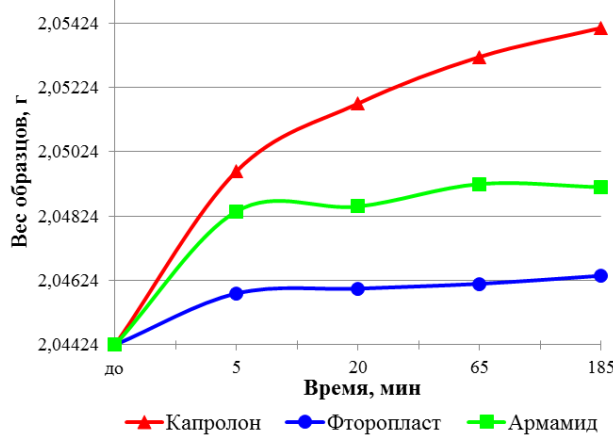


Рис. 7. График омасления с ПАВ

Из графика омасления полимеров после сушки (рис. 5) видно, что прирост веса в течение времени составляет: до 2 % в армамиде, до 1 % в фторопласте, до 1,5 % в капролоне.

Анализ полученных результатов показывает, что омасление с ПАВ идет более эффективно, чем без него.

### Выявление зависимости изменения свойств антифрикционных материалов при маслonaполнении

Для выявления зависимости изменения свойств полимеров и композитных антифрикционных материалов от внедрения в их пористую структуру масла были проведены триботехнические испытания [13] высушенных и маслonaполненных образцов, результаты которых представлены на рис. 8–10.

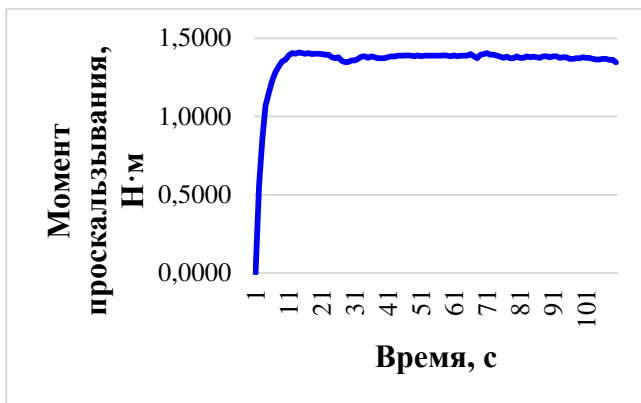


Рис. 8. График трибологических испытаний высушенного образца

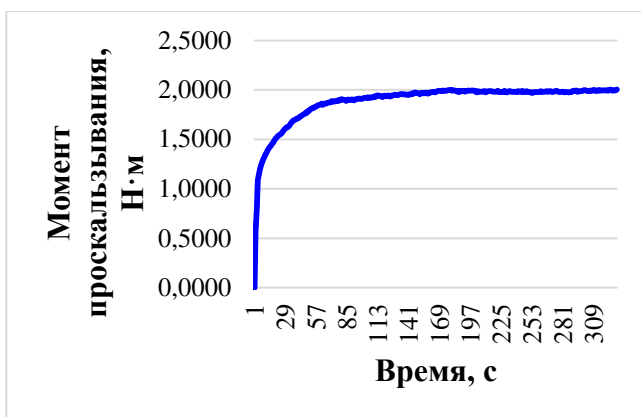


Рис. 9. График трибологических испытаний омасленного образца

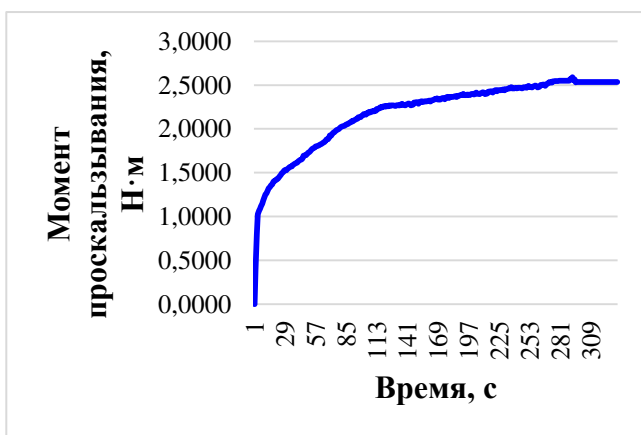


Рис. 10. График трибологических испытаний образца, пропитанного в масле с ПАВ

Из полученных данных видно, что у разных полимеров наблюдается разная реакция на ПАВ. Обнаружено адсорбционное понижение прочности, заключающееся в изменении механических свойств твёрдых тел вследствие физико-химических процессов, вызывающих уменьшение поверхностной (межфазной) энергии тела при введении в масло ПАВ. Данное явление называется эффектом Ребиндера [14]. Для стабилизации

прочностных характеристик полимера (устранение эффекта Ребиндера) следует удалять ПАВ из обработанного образца.

Одним из наиболее простых способов удаления ПАВ является процесс выпаривания. При этом необходимо учитывать температуру кипения ПАВ и выбирать для процесса омасления полимеры с температурой фазовых превращений выше температуры кипения используемых ПАВ.

Также в рамках настоящих исследований производился замер твердости образцов до и после маслonaполнения по шкале Лейба малогабаритным электронным твердомером ТЭМП-3 [15]. Результаты замеров представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1.

Значения твердости образцов по шкале Лейба

Композит	До маслonaполнения	После маслonaполнения
Капролон	643,6000	743,0000
Фторопласт	543,5333	595,3750
Армамид	780,8667	902,5000

Значения твердости по шкале Лейба у образцов, выдержанных в моторном масле, на 10–15 %, больше, чем у образцов до маслonaполнения. Это свидетельствует о повышении твердости композитов, пропитанных моторным маслом.

**Анализ результатов исследования**

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что для различных типов полимеров добавление в антифрикционную жидкость ПАВ может как улучшить процесс наполнения, так и замедлить его.

Например, для таких полимеров, как капролон, омасление происходит эффективнее с ПАВ, фторопласта, армамида поверхностно-активные вещества не требуются. Объясняется это зависимостью структуры макромолекул и наличием диполей в молекуле полимера, а также физико-химической связью ПАВ с маслом.

Зависимость коэффициента трения от наличия смазки в образце показывает снижение этого коэффициента при наличии масла, но этот эффект кратковременен, так как можно ввести лишь относительно небольшое количество жидкой смазки в полимер без усложнения технологии омасления. Однако уже на данном этапе исследований мы видим широкие возможности для эксплуатации маслonaполненных полимеров в различных областях.

Таким образом, разработанная технология заполнения ряда полимерных материалов жидкими моторными маслами позволила создать маслonaполненные триботехнические полимерные материалы с повышенной износостойкостью





и нагрузочной способностью, способные обеспечить работу узлов трения в условиях отсутствия смазки.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что жидкофазное наполнение полимеров и композитов на их основе моторными маслами является весьма перспективным направлением.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гозбенко В.Е., Каргапольцев С.К., Карлина А.И. Главные координаты в решении задач вертикальной динамики транспортного средства // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 3. С. 58–62.
2. Сдвижков М.А. Механические свойства и структура металлов. Донецк : Восточный издательский дом, 2013. 195 с.
3. Трение, износостойкость и антифрикционные материалы [Электронный ресурс] // Антифрикционные материалы. Режим доступа: <http://normis.com.ua/2009-12-25-15-41-24> (дата обращения 20.10.2016).
4. Назров В.Г. Поверхностная модификация полимеров. М. : МГУП. 2008. 474 с.
5. Петрова, П.Н. Охлопкова А.А., Фёдоров А.Л. Особенности структурообразования полимерных композитов, модифицированных жидкой смазкой // Журнал структурной химии. 2011. № 6. С. 1116–1122.
6. Буторин Д.В. Чулкай И.В., Филиппенко Н.Г. Технология маслonaполнения полимерных и композитных антифрикционных материалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы Седьмой междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 355-летию со дня основания города Иркутска. Т.2. Иркутск, 2016. С. 490–495.
7. ГОСТ 12423–66 Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб) (Изм. № 1, № 2 ИУС5–07). М. : Изд-во Стандартиформ, 2006. 10 с.
8. Каргапольцев, С.К., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В. Повышение эффективности высокочастотной обработки полимерных материалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 4 (32) С. 50–54.
9. Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Каргапольцев С.К. Высокочастотная обработка полимерных материалов. Организация систем управления. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2013. 172 с.
10. Гигроскопичность полимера [Электронный ресурс] // Промышленные Технологии. URL: <http://www.promlitie.ru/index.php?r=35&sid=39&page=56> (дата обращения 9.10.2016).
11. ГОСТ 4650-2014 (ISO 62:2008) Пластмассы. Методы определения водопоглощения. М. : Стандартиформ, 2014
12. Весы Explorer. Аналитические, прецизионные и с увеличенным НПВ. URL: <http://www.ohaus-cis.ru/static/downloads/marketing/brochures/explorer/OHAUS-Explorer-Family-Brochure.pdf> (дата обращения 15.11.2016).
13. Чичинадзе А.В. Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учеб. для техн. вузов. М. : Машиностроение, 2001. 664 с.
14. Шукин Е.Д. Эффект Ребиндера // Наука и человечество. М. : Знание, 1970. С. 337–367.
15. ТЭМП-3 – Динамический твердомер. URL: <http://www.condtrol.ru/ndt/tverdomery/dinamicheskie-tm/tverdomer-temp-3~a31028.html> (дата обращения 15.11.2016).

УДК 658.511

*Щербатов Иван Анатольевич,*

*к. т. н., доцент,*

*Астраханский государственный технический университет,*

*тел. 8(8512)61-42-31, e-mail: sherbatov2004@mail.ru*

*Печенкин Денис Владимирович,*

*аспирант,*

*Астраханский государственный технический университет,*

*тел. 8(8512)61-42-31, e-mail: pechenkin1@gmail.com*

### ОЦЕНИВАНИЕ РИСКОВ ДЛЯ СЛАБОФОРМАЛИЗУЕМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

*I. A. Shcherbatov, D. V. Pechenkin*

### EVALUATION OF RISKS FOR POORLY FORMALIZED TECHNOLOGICAL PROCESS

**Аннотация.** Ведение технологического процесса в реальном времени сопряжено с появлением рисков, связанных не только с работой технической составляющей опасного производственного объекта, но и с неточностью или несвоевременностью оценок предаварийных или аварийных ситуаций со стороны обслуживающего персонала. В данной статье предлагаемая методика ориентирована на процесс получения элементарной серы методом Клауса, используемый на Астраханском газоконденсатном комплексе. Обосновывается целесообразность применения методов нечеткой логики как для оценки рисков