

**ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ АГРО- И ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ**

ЖОРНИК В. И., ИВАХНИК А. В.

**(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси;
г. Минск, Республика Беларусь)**

Изложены материаловедческие и технологические подходы к получению экологически безопасных биоразлагаемых смазочных материалов (ЭБСМ), характеризующихся повышенной окислительной стойкостью и улучшенными реологическими и трибологическими свойствами, изготавливаемых на основе комбинации растительных и минеральных масел. Приведены примеры создания биоразлагаемых пластичных смазок на различных мыльных загустителях, имеющих, в том числе, температуру каплепадения свыше 220 °С и нагрузку сваривания более 6000 Н при биоразлагаемости не менее 80 %. Описан метод получения экологически безопасного масла для пильных цепей с кинематической вязкостью при 40 °С 35–55 мм²/с и температурой потери текучести ниже минус 25 °С при биоразлагаемости не менее 90 %. Разработанные ЭБСМ изготавливаются в промышленных объемах и реализуются для белорусских предприятий лесотехнического и сельского хозяйства, транспорта и других сфер.

Ключевые слова: *экологически безопасные смазочные материалы, пластичные смазки, масло для пильных цепей, комбинация растительного и минерального масел, реологические и трибологические характеристики, биоразлагаемость.*

Созданию и применению экологических безопасных или так называемых «зелёных» смазочных материалов в настоящее время уделяется все большее внимание, учитывая экологические (необходимость защиты окружающей среды) и экономические (поиск источников возобновляемого сырья как альтернативы продуктам нефтепереработки) аспекты. Области применения экологически безопасных смазочных материалов (ЭБСМ) в последние годы расширяются. Особенно актуально их применение в тех случаях, когда существует неизбежность или велика вероятность их попадания в почву, водоемы, атмосферу, например, в лесозаготовительной отрасли (харвестеры, форвардеры, бензопилы и др.), в сельском хозяйстве (почвообрабатывающая и уборочная техника), на транспорте (двухтактные двигатели внутреннего сгорания) и др. [1, 2].

Одним из направлений научных исследований и технологических разработок при создании ЭБСМ является использование сырья растительного происхождения. Однако, наряду с высокими трибологическими и экологическими качествами, растительные масла имеют такие существенные недостатки, как низкая окислительная и гидролитическая стойкость, склонность к полимеризации при длительной эксплуатации и хранении. Минеральные масла, при их низкой биоразлагаемости, более стойки к воздействию температуры и влаги и характеризуются высокой стабильностью свойств с течением времени. В связи с этим представляется рациональным создавать ЭБСМ на базе смеси растительных и минеральных масел, т. е. с использованием комбинированной дисперсионной среды (ДС). При этом выбор соотношения между содержанием растительного и минерального компонентов ЭБСМ следует осуществлять с учетом требуемого уровня его эксплуатационных характеристик и желаемой продолжительности периода биодеструкции ЭБСМ при его утилизации или попадании в окружающую среду [3].

Целью данной работы являлось установление закономерностей формирования структуры и свойств ЭБСМ на основе комбинации растительного и минерального масел, оптимизация их компонентного состава, а также организация промышленного производства ЭБСМ для нужд лесного и сельского хозяйства, транспорта и других сфер применения.

Для получения комбинированной ДС в качестве растительного компонента использовалось рапсовое масло, а в качестве минеральной ее составляющей – минеральные масла различной вязкости и степени очистки (масла марок И-30А, И-40А, И-50А, КС-19, НС-4). Дисперсной фазой для пластичных смазок являлись простые, комплексные и смешанные мыла (литиевые, кальциевые, сульфонат кальциевые, литий-кальциевые). Для повышения отдельных показателей разработанных смазочных материалов использовались различные присадки (адгезионные, противоизносные, многофункциональные).

Для изучения химического состава и структуры ЭБСМ использовались методы газожидкостной хроматографии, ядерного магнитного резонанса, ИК-спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Реологические свойства и трибологические характеристики смазочных материалов изучались стандартизованными методами. Биоразлагаемость ЭБСМ оценивалась на основе определения степени деструкции входящих в них жирных кислот в течение 28 суток в специальной иловой среде.

По химическому составу растительные масла представляют собой триглицериды – сложные эфиры глицерина и насыщенных и ненасыщенных карбоновых кислот. В составе триглицеридов исследованных образцов рапсового масла наиболее представлены моно- и полиненасыщенные жирные кислоты, общее содержание которых превышало 92 %. Значительные изменения химического состава растительных масел с протеканием термического разложения, окислительных

и гидролитических реакций могут происходить под воздействием высоких температур, а также под влиянием влаги, поэтому в технологических процессах получения смазочных материалов с использованием растительных масел действие этих факторов следует минимизировать.

Такой подход был, в частности, реализован в технологическом процессе получения экологически безопасной литий-кальциевой пластичной смазки, в котором для снижения влияния высоких температур формирование дисперсной фазы (ДФ) смазки проводится в минеральном масле с подъемом температуры до 160–175 °С, а растительное масло добавляется уже на стадии охлаждения реакционной массы. С целью устранения влияния на растительное масло технологической воды для синтеза мыльной дисперсной фазы используются не водные растворы щелочей, как это обычно принято, а предварительно подготовленные дегидратированные их масляные суспензии [4]. В структуре сформировавшейся дисперсной фазы литий-кальциевой смазки присутствуют как относительно тонкие скрученные волокна стеарата лития длиной 10–25 мкм и диаметром 2–5 мкм, присущие простой литиевой смазке, так и более толстые и крупные пластинчатые элементы длиной 15–40 мкм и толщиной 5–10 мкм, образованные из стеарата кальция, характерные для простой кальциевой смазки (рисунок 1).

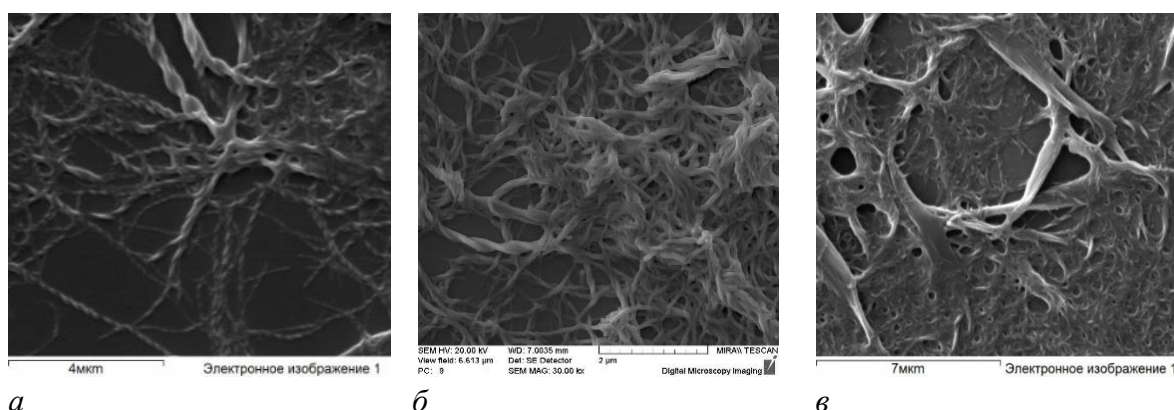


Рисунок 1. – Микроструктура ДФ простой литиевой (а), простой кальциевой (б) и литий-кальциевой (в) смазок

Для оптимизации компонентного состава и режимов получения этой смазки разработана регрессионная модель. Использование гетерогенного литий-кальциевого загустителя позволяет сочетать преимущества каждого из типов мыл, повышая более, чем вдвое температуру каплепадения относительно простых кальциевых смазок (до уровня выше 200 °С) и улучшая защиту от износа по сравнению с простыми литиевыми смазками.

Результаты испытаний на трибометре типа АТВП пары трения «сталь ШХ15 – сталь У8» в режиме граничного трения в присутствии различных смазок в диапазоне удельных нагрузок 2–10 МПа, а также данные, полученные при испытаниях

на машине трения ЧМТ, выявили повышение износостойкости в 1,3–1,4 раза и увеличение нагрузочной способности смазочного слоя в 1,4–1,7 раза в присутствии литий-кальциевой смазки по сравнению, например, с вариантом использования смазки Литол-24. Наряду с улучшением технических характеристик) и обеспечением требуемого уровня биоразлагаемости (более 80 %), повышается также экономическая эффективность процесса получения смазки. В частности, продолжительность технологического процесса сокращается на 2,0–2,2 часа, а экономия электроэнергии составляет около 100 кВт·ч/т.

Сравнение между собой разработанных пластичных смазок на различных загустителях показало преимущество комплексной сульфонат кальциевой смазки, включая ее более высокую нагрузочную способность (нагрузка сваривания более 6000 Н), повышенную термическую стойкость (температура каплепадения более 220 °С), улучшенную коллоидную стабильность (4 %). Это обусловлено специфичным строением ее гетерогенной ДФ, имеющей не волокнистое строение, как у других мыльных смазок, а представляющей собой совокупность отдельных подвижных друг относительно друга элементов (макромицелл), которые после снятия нагрузки быстро восстанавливают межмолекулярные физические связи между собой, что определяет повышенные свойства этой смазки, в частности, ее уникальную механическую стабильность. Так, если для комплексной литиевой и комплексной кальциевой смазок изменение пенетрации после 100 тыс. циклов нагружения составило 145–155 единиц, то для комплексной сульфонат кальциевой – только 28 единиц.

Другим направлением работы являлась разработка экологически безопасного биоразлагаемого масла для пильных цепей. Рецепт смазочной композиции для пильных цепей обычно включает базовое масло и набор функциональных присадок, с помощью которых корректируют при необходимости липкость масла (адгезионными присадками), триботехнические характеристики (противоизносными и противозадирными присадками) и температуру потери текучести (депрессорными присадками). Срок хранения биоразлагаемых смазочных материалов, как правило, составляет три года в герметичной таре. После вскрытия такие материалы должны сохранять работоспособность в течение одного года (сезона).

С целью оптимизации компонентного состава масла для пильных цепей на основе смеси минерального и растительного масел была разработана его регрессионная модель. При этом в качестве критериев оптимизации были выбраны кинематическая вязкость готового масла и температура потери текучести, а параметрами оптимизации выступали вязкость минерального масла, содержание растительного масла в композиции и содержание адгезионной присадки. На основе разработанной модели, например, рассчитано, что для получения биоразлагаемого масла для пильных цепей со значением кинематической вязкости при 40 °С в диапазоне 35–55 мм²/с и с температурой потери текучести ниже минус 25 °С

при биоразлагаемости не менее 90 % компонентный состав базовой основы смазочного материала должен соответствовать следующим условиям: содержание растительного масла – 78 ± 2 масс.%; кинематическая вязкость минерального масла при $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 50 ± 5 мм²/с; содержание адгезионной присадки – $1,25 \pm 0,25$ масс.%.

Изучение состояния и свойств экологически безопасного масла для пильных цепей осуществлялось на двух группах образцов, отличающихся типом адгезионной присадки (1-я группа – универсальная адгезионная присадка КП-20; 2-я группа – специальная адгезионная присадка для растительных масел Petrolad 484BD). Испытания проводились в три цикла: сразу после изготовления образцов смазочных материалов, а также через 6 и 12 месяцев их хранения в открытой таре. После 6-ти месяцев хранения отклонения показателей качества всех образцов были в пределах допусков, а после 12-ти месяцев хранения в образцах с присадкой КП-20 было выявлено значительные изменения их вязкостных характеристик (в частности, индекс вязкости увеличился на 5–6 единиц), и в ёмкостях образовался осадок. Исследование вещества осадка методами ИК-спектроскопии показало, что оно состоит, в основном, из полиизобутилена, входящего в состав присадки КП-20. В то же время образцы масла с адгезионной присадкой Petrolad 484BD характеризовались более высокой седиментационной устойчивостью и стабильностью свойств.

Результаты проведенных исследований влияния компонентного состава и технологических режимов получения масла для пильных цепей показали, что смазочная композиция должна содержать, наряду с рапсовым маслом, 20–25 масс.% высокоочищенного минерального масла III группы по стандарту API, 1,0–1,5 масс.% адгезионной присадки, а в качестве многофункциональной присадки следует использовать комплекс сульфоната и карбоната кальция в количестве 1,5–2,0 масс.%. При этом смешивание компонентов следует осуществлять при температуре $105\text{--}115\text{ }^{\circ}\text{C}$ и энергонапряженности процесса смешивания 1,0–1,5 Вт/кг, а доза введенной механической энергии должна составлять 3,0–4,5 кДж/кг. Биоразлагаемость масла 93 % [5]. Разработанное всесезонное биоразлагаемое масло для пильных цепей ECO CS BIO (ТУ ВУ 190410065.018-2019) по уровню свойств соответствует одному из лучших мировых аналогов – маслу Husqvarna Bio Advanced.

Разработанные ЭБСМ изготавливаются в промышленных объемах на двух предприятиях белорусской смазочной индустрии ООО «Евразия Лубрикантс» (г. Заславль) и ОДО «Спецсмазки» (г. Минск) и предназначены для смазывания узлов трения различной степени механической и термической нагруженности лесозаготовительной и сельскохозяйственной техники, транспорта и др.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Евдокимов, А. Ю. Смазочные материалы в техносфере и биосфере: экологический аспект / А. Ю. Евдокимов, И. Г. Фукс, И. А. Любинин. – Киев : Атика-Н, 2012. – 292 с.

2. Запольский, А. В. Биоразлагаемые смазочные материалы – важнейший продукт смазочной индустрии будущего / А. В. Запольский // Новая экономика. – 2018. – № 1. – С. 226–229.
3. Новый подход к получению биоразлагаемых пластичных смазок / В. И. Жорник, А. В. Запольский, А. В. Ивахник, В. П. Ивахник, Л. Ю. Тычинская // Полимерные композиты и трибология : (Поликомтриб – 2019) : междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 25–28 июня 2019 г. : тез. докл. / Ин-т механики металлополимер. систем НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: В. Н. Адерица [и др.]. – Гомель, 2019. – С. 189.
4. Биоразлагаемая пластичная смазка и способ ее получения : пат. ВУ 23651 / В. И. Жорник, А. В. Запольский, А. В. Ивахник, В. П. Ивахник. – Опубл. 28.02.2022.
5. Биоразлагаемый смазочный материал и способ его получения : пат. ВУ 24034 / В. И. Жорник, А. В. Запольский, А. В. Ивахник. – Опубл. 30.06.2023.