

КОМПЛЕКСНАЯ АЛЮМИНИЕВАЯ СМАЗКА ДЛЯ ТРИБОУЗЛОВ СОВРЕМЕННЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

М.Ю. Юнусов, М.С. Холикзода, Ш. Шарифов, О.С. Ниёзов

Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими

В статье приведены общие сведения о пластичных смазках, приготовленных на комплексных мылах, отличающихся тугоплавкостью в широком интервале температур и эффективностью в тяжелых режимах эксплуатации трибологических узлов машин и механизмов. Акцентировано внимание на комплексные алюминиевые смазки (kAl), которые очень эффективны для смазывания пар трения, эксплуатирующихся в обводненной и химически агрессивной среде. Будучи разработанными еще в середине двадцатого века, они до сих пор занимают не более 5% всего рынка пластичных смазок, несмотря на отличные эксплуатационные характеристики. В исследовании в роли компонента загустителя данных смазок выбрана дистиллированная жирная кислота производства хлопкового масла и изучена степень ее влияния на структурообразование пластичной смазки.

Ключевые слова: машины и механизмы, трибологические узлы, смазочные материалы, пластичные смазки, алюминиевые комплексные мыла, дистиллированные жирные кислоты.

ҲАМИРАРАВҒАНҲОИ КОМПЛЕКСИ АЛЮМИНИЙДОР БАРОИ УЗВҲОИ ТРИБОЛОГИИ МОШИН ВА МЕХАНИЗМҲОИ МУОСИР

М.Ю. Юнусов, М.С. Холикзода, Ш. Шарифов, О.С. Ниёзов

Дар мақола маълумоти умумӣ оид ба равғанҳои молидани дар асоси собунҳои комплексӣ оварда шудааст, ки онҳо дар фосилаи васеи ҳароратӣ қобилияти корӣ дошта, дар шароити вазнини истифодабарии машину механизмҳо самаранокии баланд нишон медиҳанд. Таваҷҷуҳ асосан ба равғанҳои алюминий комплексӣ равона шудааст, ки онҳо хосияти обногузарӣ, устувории кимиёвии хосиятҳои хуби муҳофизатӣ, ки барои равғанҳои оддии алюминий ҳос аст ва иловатан бо устувории баланди гармӣ, меҳаникӣ ва коллоидӣ беҳтар мегардад, нишондиҳандаҳои баланди истифодабарии чунин равғанҳоро таъмин менамоянд. Сарфи назар аз он ки чунин равғанҳо ҳанӯз дар нимаи дуюми асри XX ҳосил карда шуда, дорони хосиятҳои баланди истифодабарӣ мебашанд, онҳо то ҳол ҳатто 5%-и бозори умумии равғанҳои пластикиро ташкил намекунанд. Дар тадқикот ҳамчун унсури гализкунандай чунин равғанҳо кислотаи равғани поккардашуда, ки аз равғани пахта ҳосил мегардад, интиҳоб шуда, дараҷаи таъсири он ба ташаккули соҳтори равғани пластики омӯҳта шудааст.

Вожаҳои қалидӣ: машинаҳо ва механизмҳо, узвҳои трибологӣ, маводи молидани, равғанҳои пластикӣ, собунҳои алюминий комплексӣ, кислотаҳои равғани пок кардашуда.

A COMPLEX ALUMINUM LUBRICANT FOR THE DRIVE UNITS OF MODERN MACHINES AND MECHANISMS

M.Yu. Yunusov, M.S. Kholikzoda, Sh. Sharifov, O.S. Niyoзов

This article provides general information about complex soap-based lubricants, which operate over a wider temperature range and are more effective in the harsh operating conditions of machines and mechanisms. Attention is focused on complex aluminum greases, which are of particular interest because the water resistance, chemical stability, and good protective properties inherent in conventional aluminum greases are complemented by high thermal, mechanical, and colloidal stability, ensuring excellent performance characteristics. Developed in the mid-twentieth century, they still account for no more than 5% of the total grease market, despite their excellent performance characteristics. In this study, distilled fatty acid from cottonseed oil was selected as a thickening component for these lubricants, and its influence on the structure formation of the grease was examined.

Keywords: machines and mechanisms, tribological components, lubricants, greases, aluminum complex soaps, distilled fatty acids.

Введение

Для надежной работы трибологических узлов машин и механизмов, состоящих из множества пар трения, необходимо применить высококачественные смазочные материалы. Согласно результатам исследований, представленным в работе Иzzатуллоева М.А. [1], формирование регулярной микрогеометрии поверхности позволяет улучшить условия смазывания и существенно снизить износ в трибосопряжениях. В то же время эффективная работа трибоузла возможна лишь при правильном подборе качественного смазочного материала.

Пластичные смазки, в отличие от масел, преимущественно применяются в открытых трибоузлах, в связи с чем к ним по техническим, экономическим и экологическим соображениям предъявляются повышенные требования. Комплексный показатель качества данного вида нефтепродуктов в значительной степени определяется природой и свойствами дисперсной фазы — одного из основных компонентов пластичной смазки [2]. В указанном направлении научный и практический интерес представляет изучение kAl-смазок, которые очень эффективны для смазывания пар трения, эксплуатирующихся в обводненной и химически агрессивной среде.

kAl-смазки обычно получают взаимодействием алкооксида алюминия с карбоновыми кислотами в гидратной среде. Для них свойственна довольно высокая температура каплепадения (свыше 220°C), водостойкость, способность сохранять свойства при нагреве (выдерживают температуры 150 – 200°C) и прочность структурного строения. В этой связи они нашли широкое применение как смазочный материал многоцелевого назначения в трибоузлах наземного и воздушного транспорта, тяжелой промышленности и др. сферах промышленности [3].

При использовании комплексных алюминиевых смазок (kAl-смазки) сокращается расход природных жиров и особенно касторового масла [7].

Современные исследования в области кAl-смазок в основном направлены на оптимизацию состава, т.е. разработку новых рецептур с использованием альтернативных жирных кислот и добавок для улучшения эксплуатационных характеристик, исследование влияния различных добавок и модификаций структуры, изучение влияния мыл на стабильность смазки при высоких температурах и механических нагрузках [6]. Имеются работы, представляющие научно-практический интерес по изучению влияния дисперсионной среды на структуру кAl-смазок [5, 6].

Материалы и методы

кAl-смазки в основном синтезируют, используя алюминий-содержащие соли стеариновой кислоты или синтетические жирные кислоты (СЖК) иmonoосновную бензойную кислоту [4, 5, 9, 10].

Для получения комплексных алюминиевых смазок (кAl-смазок) использовались следующие исходные компоненты:

В роли высокомолекулярной кислоты – СЖК с заведомо известной молярной массой. Наряду с СЖК применялась также стеариновая кислота (HSt). В работе в основном акцентировали внимание на дистиллированные жирные кислоты (ДЖК), образующиеся в процессе производства хлопкового масла.

В качестве низкомолекулярной кислоты использовали бензойную кислоту (HBz).

Суспензию изопропилата алюминия (ИПА) - Al(O₃C₂H₅)₃ в изопропиловом спирте использовали как алкоголят алюминия.

Загуститель кAl-смазки состоит из диазамещенного основного Al – мыла. В результате взаимодействия высоко- и низкомолекулярных кислот в неводной среде в присутствии алкоголята алюминия с одной аллоксигруппой образуются стабильные диазамещенные основные кAl-мыла. Широкое применение в качестве Al – мыла нашел изопропилат алюминия (ИПА)-Al(O₃C₂H₅)₃, представляющий собой суспензию в изопропиловом спирте, а в роли высокомолекулярной органической кислоты, в этом случае, выступает стеариновая кислота (HSt) или СЖК низкомолекулярной органической кислоты – бензойная кислота (HBz) [1].

Физико-химические и трибологические свойства полученных смазок оценивались по следующим показателям:

Предел прочности при сдвиге – определялся при температурах 20 и 80°C для оценки прочности структурного каркаса смазки.

Коллоидная стабильность – определялась в процентах, что характеризует способность смазки сохранять дисперсную фазу при термическом воздействии.

Температура каплепадения – измерялась для оценки термостойкости смазки.

Механическая стабильность – оценивалась с помощью индексов разрушения (K_r%) и восстановления (K_v%), что отражает способность смазки сохранять и восстанавливать структуру при механическом воздействии.

Все измерения проводились в соответствии со стандартными методиками для алюминиевых комплексных смазок. Каждый показатель определялся не менее чем в трех параллельных опытах для обеспечения статистической достоверности.

Постановка эксперимента

Ряд исследователей [2, 3, 5, 6] придерживаются мнения, что научный интерес представляет установление возможности получения кAl-смазок на основе ДЖК хлопкового масла с содержанием линолевой кислоты до 40% (Таблица 1).

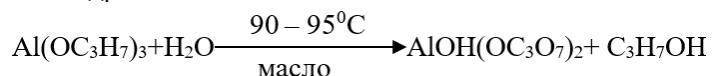
Молекулярное соотношение высоко- и низкомолекулярных кислот должно находиться от 0,8:1 до 1,2:1 [3]. Имеются сведения о предпочтительном соотношении компонентов, образующих кAl-мыло, которое должно составлять ИПА:H₂O:R₁COOH:R₂COOH=1:1:1:1 [3]. При этом считается, что оптимальной технологией получения кAl-смазок является реакция взаимодействия компонентов со ступенчатым характером [2, 12].

Таблица 1 - Характеристика дистиллированных жирных кислот хлопкового масла

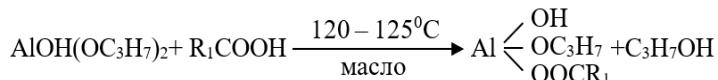
Показатели	Значение показателей
Цвет	Светло-желтый
Кислотное число, $\frac{мгКОН}{2}$	191,5
Число омыления, $\frac{мгКОН}{2}$	196,3
Йодное число, $\frac{д_2}{100\text{мл}}$	106,4
Содержание гессипола, % масс.	отс.
Содержание влаги, % масс.	0,25
Состав жирных кислот, % масс.:	
Лауринова C ₁₇	1,5
Миристиновая C ₁₃	1,6
Пальмитиновая C ₁₆	30,3
Пальмитолеиновая C _{16:1}	1,0
Стеариновая C ₁₇	3,0
Олеиновая C _{17:2}	22,0
Линолевая C _{18:2}	40,6

Приняв во внимание вышеизложенные данные, в лабораторных условиях мы получили кAl-мыла по следующей схеме:

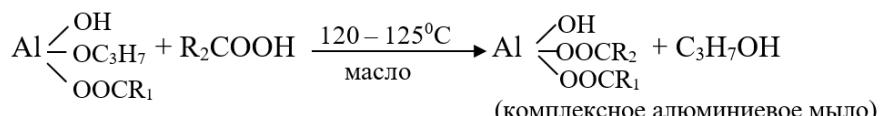
1- ступень - частичный гидролиз ИПА:



2 - ступень - получение монозамещенного мыла ДЖК (R_1COOH):

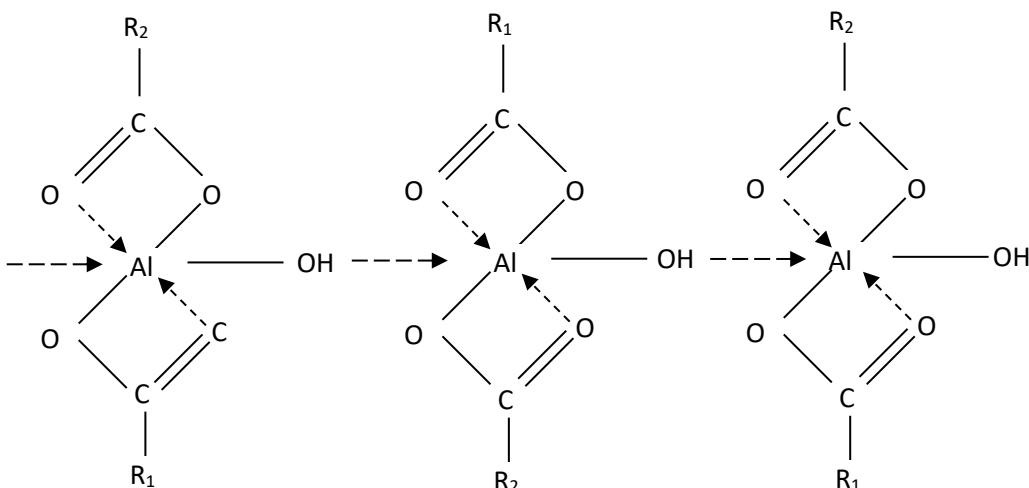


3 - ступень - получение основного дизамещенного (комплексного) мыла ДЖК - (R_1COOH) и бензойной кислоты (R_2COOH):



На заключительном этапе дизамещённое кAl-мыло формирует сложную разветвлённую структуру полимерного типа. Это происходит благодаря возникновению координационных связей между атомами алюминия одной молекулы и атомами кислорода гидроксильных групп другой молекулы мыла.

При этом комплексное алюминиевое мыло — алюминий ДЖК-бензоат, содержащее одну гидроксильную группу, может иметь следующую структурную конфигурацию [3]:



В Таблице 2 показано влияние молярной пропорции ДЖК и НВz к ИПА на свойства получаемых кAl-смазок.

Таблица 2 - Влияние молярной пропорции ДЖК и НВz к ИПА на свойства получаемых кAl-смазок (ДЖК +НВz=13%)

Характеристики	Молярное соотношение			kAl-смазка «Алюмол»
	0,8:0,8:1,0	1,0:1,0:1,0	1,1:1,1:1,0	
Предел прочности при сдвиге, Па, при:				
20°C	380	820	860	500-1000
80°C	180	410	450	-
Коллоидная стабильность, %	8,4	3,6	3,5	<12
Температура каплепадения, °C	250	250	250	230
Механическая стабильность				
Индекс разрушения K _p , %	35	36	29	-
Индекс восстановления K _b , %	28	23	16	

Обсуждение полученных результатов

Анализ данных Таблицы 2 свидетельствует о значительном влиянии молярного соотношения дикарбоновых жирных кислот (ДЖК) и бензойной кислоты (НВz) к ИПА на структурно-реологическое образование кAl-смазок.

При мольном соотношении ДЖК : НВz : ИПА = 0,8 : 0,8 : 1,0, то есть при дефиците кислотных компонентов формируется смазочный материал с пониженными объёмно-механическими характеристиками. Предел прочности при сдвиге составляет 380 Па при температуре 20 °C и снижается до 180 Па при 80 °C, что указывает на слабую структурную сетку мыльного каркаса и низкую способность удерживать дисперсную фазу при нагревании. Коллоидная стабильность при таком составе также снижается до 8,4 %, что может быть связано с образованием неустойчивой дисперсионной системы из-за нехватки кислоты для полного взаимодействия с алюминием.

При переходе к стехиометрическому молярному соотношению (ДЖК:НВz:ИПА = 1,0:1,0:1,0) отмечается существенное улучшение характеристик смазки. Предел прочности при сдвиге возрастает более чем в два раза (до 820 Па при 20°C и 410 Па при 80°C), что свидетельствует о более плотной и термостойкой пространственной структуре. Коллоидная стабильность при этом повышается до 3,6 %, что приближает смазку к уровню промышленного аналога «Алюмол». Фазовый переход из твердого в жидкое состояние остается стабильным (250°C), что характерно для систем такого рода, и показывает термическую стабильность мыльного каркаса.

Дальнейшее повышение концентрации составляющих конгломерата (ДЖК:НВz:ИПА = 1,1:1,1:1,0) на свойства смазки заметно не влияет. Реологические свойства в виде предела прочности на сдвиг изменяются незначительно в сторону увеличения (до 860 Па и 450 Па соответственно при 20°C и 80°C), а коллоидная стабильность (3,5 %) вообще не изменяется. Наблюдается некоторое ухудшение трибологических свойств, так индекс восстановления (Кв) снижается с 23 % при стехиометрической смеси до 16 %. Это может указывать на то, что избыток кислот препятствует оптимальной кристаллизации мыльных комплексов алюминия и снижает способность смазки восстанавливать свою структуру после механических нагрузок.

Следует отметить, что выявленная закономерность может изменяться при замене дисперсионной среды. В частности, применение ароматических углеводородов в качестве дисперсионной фазы действительно способно повысить качество кAl-смазок, что подтверждается исследованиями Дмитриева А.В. [13]. Однако в условиях нашего эксперимента увеличение доли ароматических углеводородов в составе дисперсионной среды не гарантирует проявления синергетического эффекта совместно со стехиометрическим соотношением кислот. Это указывает на необходимость проведения дальнейших исследований, направленных на уточнение влияния состава дисперсионной среды на структурообразование и реологические характеристики кAl-смазок.

Таким образом, аналогично ранее описанным закономерностям для комплексных кальциевых смазок [9 - 11] избыточное количество кислот не приводит к формированию более прочной или устойчивой структуры. Напротив, оно снижает механическую стабильность и нецелесообразно с практической точки зрения.

Анализ данных Таблицы 2 показывает, что при недостатке кислотных компонентов (мольное соотношение ДЖК : НВz : ИПА = 0,8 : 0,8 : 1,0) формирующаяся смазка отличается пониженными объёмно-механическими характеристиками: наблюдаются низкие значения предела прочности, вязкости, а также сниженная коллоидная стабильность.

При стехиометрическом соотношении кислот (ДЖК : НВz : ИПА = 1,0 : 1,0 : 1,0) отмечается некоторое повышение предела прочности и вязкости, а также улучшение коллоидной стабильности полученной смазки.

Увеличение количества кислот сверх стехиометрии, аналогично ранее выявленным закономерностям для комплексных кальциевых смазок [10], например, до соотношения ДЖК : НВz : ИПА = 1,1 : 1,1 : 1,0, не вызывает ощутимого улучшения реологических свойств комплексной алюминиевой смазки. Параметры таких смазок остаются сопоставимыми с характеристиками продуктов, полученных при стехиометрическом составе. Это указывает на отсутствие необходимости введения кислот в избытке при разработке рецептур кAl-смазок.

Выводы

В ходе исследования показана принципиальная возможность вовлечения вторичного сырья производства растительных масел в технологический процесс изготовления комплексных алюминиевых смазок в качестве омыляемого компонента дисперсной фазы. Установлено, что при стехиометрически выверенном, равнопропорциональном соотношении кислот формируются кAl-смазки с оптимальными объёмно-механическими характеристиками — повышенной прочностью на сдвиг, устойчивой коллоидной структурой и улучшенной термостойкостью. Применение же кислот в количествах ниже стехиометрии приводит к выраженному снижению эксплуатационных свойств смазок, что делает такие рецептуры неприемлемыми для практического использования.

Полученные результаты демонстрируют возможность более широкого применения комплексных алюминиевых смазок, благодаря их экономической эффективности и экологичности. Применение вторичных

жировых кислот не только снижает затраты на производство, но и способствует рациональному использованию сырьевых ресурсов, что особенно актуально в условиях современных экологических вызовов.

Рецензент: Д.П. Холов — к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация гидромелиоративных систем» ТГАУ им. Ш. Шохтемура

Литература

1. Иззатуллоев, М. А. Экспериментальная оценка влияния регулярной микрогеометрии на трибологические характеристики радиального подшипника скольжения / М. А. Иззатуллоев // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2021. – № 1(53). – С. 87-94. – EDN BNOZAC.
2. Ищук Ю.Л. Технология пластичных смазок / Ю.Л. Ищук. – Киев: Наука думка, 1986. – 248с.
3. Юнусов М.Ю. Имитация окисления дисперсионной среды пластичных смазок в процессе эксплуатации / Политехнический вестник. Серия Инженерные исследования. №2 (62) – 2023. – С. 147 -152.
4. Ищук Ю.Л. Состав, структура и свойства пластичных смазок / Ю. Л. Ищук. – Киев: Наука думка, 1996 – 512с.
5. Кучеренков, Н. П. Влияние полярности базовых масел на характеристики комплексно-алюминиевых пластичных смазок / Н. П. Кучеренков, Д. Н. Небыков, О. А. Кротикова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2024. – № 5(288). – С. 72-75. – DOI 10.35211/1990-5297-2024-5-288-72-75. – EDN OBLMDW.
6. Наконечная М.Б. Комплексные кальциевые смазки, их состав, приготовление структура и свойства: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. – М., 1970 – 40 с.
7. Дмитриев, А. В. Изучение свойств комплексных алюминиевых пластичных смазок, приготовленных на различных нефтяных маслах / А. В. Дмитриев, П. Н. Золотова, А. А. Кокотова // Трибология - машиностроению : Труды XV Международной научно-технической конференции, Москва, 12–13 ноября 2024 года. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2024. – С. 72-73. – EDN QTRVQI.
8. Состояние и перспективы производства комплексных алюминиевых пластичных смазок (обзор) / А. В. Дмитриев, А. Ю. Киликова, П. Н. Золотова, А. А. Кокотова // Мир нефтепродуктов. – 2025. – № 3. – С. 44-47. – DOI 10.32758/2782-3040-2025-0-3-44-47. – EDN KBYOKR.
9. Юнусов М.Ю. Комплексные кальциевые смазки на базе вторичных продуктов производства растительных масел / Вестник Бахтарского государственного университета им. Носира Хусрава. №2-3 (117). – 2023. – С. 70 – 74.
10. Джамалов А.А., Юнусов М.Ю. Структурообразование и совместимость пластичных смазок на основе карбоновых кислот хлопкового масла: Монография. Душанбе: ТТУ, 2014. – 210 с.
11. Фехервари А. Исследование в области структуры и свойств консистентных смазок на комплексных мылах: Автореф. ... канд. техн. наук. – М., 1966. – 25 с.
12. Максимилиан А.Л. Состав, технология и свойства комплексных алюминиевых смазок: Дис.... канд. техн. наук. – Киев, 1987. – 169 с.
13. Дмитриев А. В. Зависимость свойств комплексных алюминиевых пластичных смазок от химического состава дисперсионной среды / А. В. Дмитриев. — Текст : электронный // Молодежь и наука : материалы XXI международной научно-практической конференции старшеклассников, студентов и аспирантов (23 мая 2025 г., г. Нижний Тагил) : в 2-х т. — Т. 1. — С. 87-88. <https://elar.urfu.ru/handle/10995/146354>.

МАҶЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ - INFORMATION ABOUT AUTHORS

RU	ТJ	EN
Юнусов Мансур Юсуфович	Юнусов Мансур Юсуфович	Yunusov Mansur Yusufovich
к.т.н.	н.и.т.	Ph.D.
ТТУ имени акад. М.С. Осими	ДТТ ба номи академик М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
E-mail: m-yunusov@mail.ru		
RU	ТJ	EN
Шарифов Шариф Нурович	Шарифов Шариф Нурович	Sharifov Sharif Nurovich
соискатель	унвончӯ	applicant
ТТУ имени акад. М.С. Осими	ДТТ ба номи академик М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
RU	ТJ	EN
Холикзода Муслихиддин Салохиддин	Холикзода Муслихиддин Салохиддин	Kholikzoda Muslihiddin Salohiddin
соискатель	соискатель	applicant
ТТУ имени акад. М.С. Осими	ДТТ ба номи академик М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi
RU	ТJ	EN
Ниёзов Одил Саторович	Ниёзов Одил Саторович	Niyozov Odil Satorovich
старший преподаватель	муаллими қалон	senior lecturer
ТТУ имени акад. М.С. Осими	ДТТ ба номи академик М.С. Осими	TTU named after academician M.S. Osimi