

УДК 621.895

СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИЕ ЖИДКОСТИ (СОЖ): СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

© 2025 С.А. Соков¹, Р.У. Каменов^{1,2}, А.В. Толстых¹, И.А. Конарев¹, В.А. Туркин¹

¹Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия

²Самарский федеральный исследовательский центр РАН, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 20.09.2025

Настоящий обзорный материал посвящен комплексному анализу смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), занимающих ключевую позицию в обеспечении эффективности, точности и экономической целесообразности современных промышленных технологий. В работе проведена систематизация существующих классификаций СОЖ, основанных на их типе (масляные, водосмешиваемые, синтетические), функциональном назначении и химической природе. Детально рассмотрен состав современных жидкостей, с углубленным анализом механизмов действия ключевых функциональных присадок: противоизносных, противозадирных, противопиттинговых, антифрикционных, антиокислительных и диспергирующих. Особый акцент сделан на установлении корреляционных связей между молекулярной структурой компонентов СОЖ и их триботехническими характеристиками, такими как несущая способность, коэффициент трения и стабильность свойств в экстремальных условиях обработки. Значительная часть исследования сфокусирована на специфике применения смазочно-охлаждающих сред в технологических процессах поверхностного пластического деформирования (ППД), включая накатывание, дорнование, дробеструйную обработку и обкатку. В свете общемировых трендов устойчивого развития, в обзоре всесторонне освещены экологические аспекты применения СОЖ. Рассмотрены проблемы токсичности традиционных компонентов, биоразлагаемости и нагрузки на окружающую среду. Проанализированы перспективные направления разработки «зеленых» или экологически безопасных СОЖ, включая использование возобновляемого сырья, растительных масел и биоразлагаемых синтетических эфиров. На основе проведенного анализа патентной литературы и научно-технических публикаций за последние годы выявлены магистральные тенденции и приоритеты в области создания новых составов СОЖ. К ним отнесены: разработка универсально-специализированных жидкостей с адаптивными свойствами, углубленная кастомизация решений для аддитивных технологий и обработки новых труднообрабатываемых материалов, а также активный поиск решений в рамках стратегии импортозамещения, направленный на создание конкурентоспособных отечественных аналогов, отвечающих требованиям как производственной эффективности, так и экологической безопасности.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), классификация СОЖ, трибология, присадки, противозадирные свойства, экология, утилизация, патентный анализ, поверхностное пластическое деформирование (ППД).

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-372-381

EDN: UHWOKJ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (Госзадания) FEMR-2025-0001.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время перед многими отраслями промышленности, особенно связанными с обработкой металлов, стоят серьезные задачи. Предприятиям необходимо постоянно повышать производительность, улучшать качество выпускаемых изделий и одновременно снижать затраты на изготовление. В решении этих вопросов важную роль играют специальные составы – смазочно-ох-

Соков Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры химическая технология и ресурсосбережение. E-mail: s.a.sokov.tltsu@gmail.com

Каменов Ренат Уахитович, кандидат технических наук, начальник НИЛ «Механическая обработка и технологии управления поверхностным слоем». E-mail: renatkamenov@mail.ru

Толстых Александр Владимирович, техник НИЛ «Механическая обработка и технологии управления поверхностным слоем». E-mail: dominys12@mail.ru

Конарев Илья Александрович, техник НИЛ «Механическая обработка и технологии управления поверхностным слоем». E-mail: iluha2004989@gmail.com

Туркин Владимир Аркадьевич, техник НИЛ «Механическая обработка и технологии управления поверхностным слоем». E-mail: dOnatell069@mail.ru

лаждающие жидкости (СОЖ). Эти средства подаются непосредственно в место контакта инструмента и заготовки, где они одновременно уменьшают трение, отводят тепло и облегчают процесс обработки. Без применения таких составов многие технологические операции были бы значительно менее эффективными.

Ранее многие предприятия активно закупали подобные составы за рубежом, однако в современных условиях всё чаще возникает необходимость перехода на отечественную продукцию. Это направление, известное как импортозамещение, становится одним из ключевых для укрепления технологической независимости страны. Разработка и внедрение российских аналогов, соответствующих мировым стандартам – важная задача для поддержания стабильной работы промышленности.

Наряду с экономическими аспектами, большое внимание сегодня уделяется и вопросам экологии. Традиционно применяемые смазочно-охлаждающие жидкости часто содержат компоненты, потенциально опасные для окружающей среды. Неправильная утилизация отработанных составов может привести к загрязнению почвы и водных источников. В связи с этим активно ведутся разработки новых, более безопасных видов жидкостей, которые обладают способностью к быстрому биологическому разложению и наносят меньший вред природе [3], [7]. Эта тенденция соответствует общемировым экологическим стандартам, которые становятся всё более строгими.

Таким образом, актуальной задачей является не просто замещение импортных СОЖ, а создание конкурентоспособных отечественных аналогов нового поколения, сочетающих высокие триботехнические характеристики с минимальным экологическим следом. **Цель данного обзора:** на основе анализа литературных и патентных данных выявить ключевые направления и «узкие места» в разработке таких многокомпонентных систем.

КЛАССИФИКАЦИЯ СОЖ

Наиболее фундаментальной является классификация СОЖ по типу основы, которая определяет физическую форму и основные эксплуатационные характеристики жидкости (рис. 1).

Неразбавляемые (масляные) СОЖ применяются в чистом виде без добавления воды. Их основу составляют минеральные, синтетические (полиальфаолефины, сложные эфиры) или растительные масла. Главное преимущество таких жидкостей – исключительные смазывающие свойства, обусловленные высокой прочностью масляной плёнки и эффективностью присадок, растворённых в масле. Они идеально подходят для операций с высокими удельными давлениями и низкими скоростями, таких как зубонарезание, протягивание или глубинное сверление. Однако их существенный недостаток – слабая охлаждающая способность из-за низкой теплопроводности и теплоёмкости по сравнению с водой, что ограничивает их применение в высокоскоростных процессах.

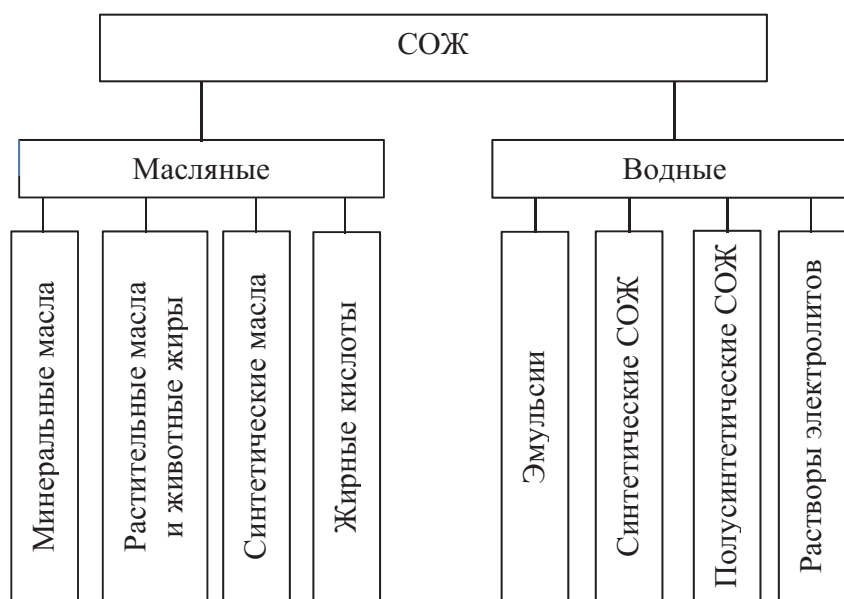


Рис. 1. – Классификация СОЖ

Водосмешиваемые СОЖ требуют приготовления рабочего раствора путём смешивания концентрата с водой. Эта группа делится на три подкатегории. Эмульсионные (эмульсируемые) СОЖ при смешивании с водой образуют непрозрачную молочно-белую жидкость типа «масло в воде». Концентрация масляной фазы обычно составляет от 3 % до 10 %. Стабильность эмульсии обеспечива-

ется пакетом эмульгаторов. Эти жидкости предлагают оптимальный баланс между смазывающими и охлаждающими свойствами и являются наиболее распространёнными в машиностроении. Полусинтетические СОЖ содержат меньшее количество масла (обычно менее 30% в концентрате) и большее количество эмульгаторов и синтетических компонентов. Их рабочие растворы обычно полупрозрачные. Они сочетают хорошие смазывающие свойства эмульсий с повышенной охлаждающей способностью и стойкостью к сколам, характерной для синтетических продуктов. Синтетические СОЖ не содержат нефтяных масел. Их основа – водорастворимые органические полимеры (полигликоли, полиакрилаты) и многофункциональные присадки. Рабочие растворы абсолютно прозрачны, что обеспечивает отличную видимость зоны обработки. Их ключевые преимущества – превосходное охлаждение, длительный срок службы и устойчивость к бактериологическому разложению, однако смазывающая способность может уступать эмульсионным составам.

Дополнительная классификация основана на преобладающем механизме действия или основном назначении жидкости, которое определяется её формулой [1], [2]. Смазывающие СОЖ имеют в составе противоизносные (AW) и противозадирные (EP) присадки. Они разработаны для операций, где трение и износ являются основными проблемами (например, обработка легированных сталей, титановых сплавов). Охлаждающие СОЖ, к которым относятся в первую очередь синтетические и некоторые полусинтетические составы, оптимизированы для максимального отвода тепла. Они применяются при высокоскоростной обработке алюминиевых и магниевых сплавов, где риск возникновения нароста и термических деформаций велик. Стабилизирующие (многофункциональные) СОЖ являются наиболее сбалансированными и распространёнными. Они содержат полный комплекс присадок для решения всех основных задач: смазки, охлаждения, защиты от коррозии и биопоражения. Специализированные СОЖ разрабатываются для конкретных материалов (например, меди или нержавеющей стали) или операций (шлифование, хонингование), где требуются особые свойства, такие как быстрый отвод шлама или контроль пенообразования.

КЛЮЧЕВЫЕ КОМПОНЕНТЫ СОЖ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Поверхностно-активные вещества являются краеугольным камнем водосмешиваемых СОЖ. Их молекулярная структура дифильна (рис. 2): она содержит лиофильную (гидрофобную) часть, например, длинную углеводородную цепь, и лиофобную (гидрофильную) часть – полярную функциональную группу ($-\text{COOH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$, $-\text{OH}$, этоксилированную цепь). По типу гидрофильной группы ПАВы делятся на анионные (мыла на основе карбоновых кислот, алкилсульфонаты, сульфосукцинаты), катионные (соли четвертичных аммониевых оснований, редко используются в СОЖ из-за коррозионной агрессивности) и неионогенные (этоксилаты спиртов или алкилфенолов, наиболее распространены благодаря своей стабильности и эффективности).

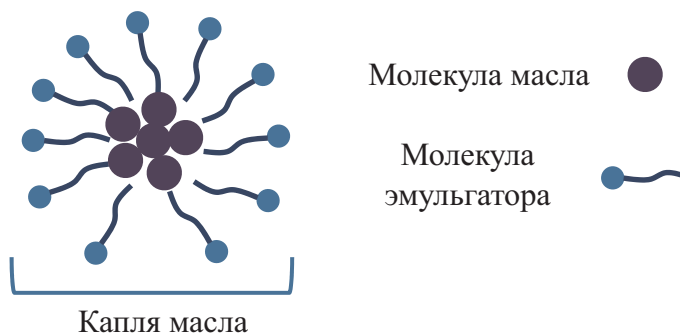


Рис. 2 – Строение молекулы ПАВ в составе СОЖ

Механизм их действия заключается в адсорбции на границе раздела фаз масло-вода. Гидрофобные «хвосты» погружаются в масляную каплю, а гидрофильные «головы» остаются в водной фазе. Это значительно снижает поверхностное натяжение и создаёт электростатический или стерический барьер вокруг каждой капли, предотвращая их коалесценцию (слияние) и расслоение эмульсии. Концентрация и тип эмульгаторов влияют на устойчивость эмульсии к жёсткой воде, склонность к пенообразованию и способность удерживать в растворе другие присадки [8].

Противоизносные и противозадирные присадки предназначены для предотвращения контакта и схватывания металлических поверхностей в условиях граничного и экстремального трения. Противоизносные присадки работают при умеренных температурах и нагрузках. Наиболее яркий представитель – дитиофосфат цинка (ZDDP). Его молекулы адсорбируются на металлических поверхностях, образуя прочный ориентированный слой. При локальных скачках температуры в зонах

контакта микровыступов ZDDP термически разлагается. В результате на поверхности образуется стеклообразная полимерная плёнка, состоящая из смеси сульфидов, фосфидов и оксидов цинка и железа. Эта плёнка имеет низкий коэффициент трения и высокую стойкость к сдвигу, эффективно предотвращая износ [5]. Противозадирные присадки активируются при очень высоких давлениях и температурах, характерных для операций формообразования или обработки твёрдых сплавов. Хлорсодержащие присадки (хлорированные парафины) и серосодержащие (дисульфиды, сульфожир) при трибохимическом контакте вступают в реакцию с поверхностью металла, образуя соответственно хлориды (FeCl_2 , FeCl_3) и сульфиды (FeS) железа. Эти соединения имеют слоистую кристаллическую решётку с легкосдвиговыми плоскостями. Они работают как твёрдые смазки, предотвращая заедание и задиры, но могут вызывать коррозию цветных металлов. Эффективность химически активных присадок, в частности на основе органических кислот, в значительной степени определяется их концентрацией в составе смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), при этом содержание органических кислот, таких как стеариновая и олеиновая, оказывает нелинейное влияние на трибологические свойства стальной пары трения. Оптимальный диапазон концентрации (1 – 3 % по массе), при котором на поверхности металла формируются устойчивые мыльные плёнки (железостеараты), обеспечивающие минимальный износ. Однако превышение этого порога (свыше 3 %) приводит к резкому ухудшению эксплуатационных характеристик: усиливается коррозионно-механический износ и возрастает коэффициент трения, это объясняется коррозионным воздействием избытка кислоты на материал [9]. Таким образом, точное дозирование химически активных компонентов является критически важным при разработке эффективных и безопасных рецептур СОЖ.

Отдельный тип присадок – антикоррозионные, чья задача защитить станок и обрабатываемые детали от химической и электрохимической коррозии, вызываемой водой и продуктами разложения СОЖ. Механизм их действия многообразен. Адсорбционные ингибиторы (например, амины, их соли, спирты) образуют на поверхности металла тонкий мономолекулярный гидрофобный слой. Этот барьер физически блокирует доступ воды и кислорода к поверхности, замедляя катодные и анодные реакции коррозии. Пассивационные ингибиторы (нитриты, хроматы, бензотриазол) работают иначе: нитриты (NO_2^-), они окисляют поверхность железа, способствуя образованию плотной оксидной плёнки ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), пассивирующей металл. Бензотриазол (БТА) – специфический ингибитор для меди и её сплавов. Он образует с атомами меди прочные хелатные комплексы по типу $\text{Cu}(\text{BTA})_2$, создавая на поверхности полимерную плёнку, непроницаемую для коррозионных агентов. Выбор ингибитора зависит от pH среды и типа обрабатываемых металлов [6].

Антиоксиданты (ингибиторы окисления) замедляют процесс автоокисления базового масла кислородом воздуха. Стерически затруднённые фенолы и ароматические амины действуют как ловушки для свободных радикалов ($\text{R}^\bullet$), обрывая цепные реакции окисления и предотвращая образование шламов, лаков и кислот. Бициды (изотиазолиноны, производные формальдегида) необходимы для контроля микробного роста в водосмешиваемых СОЖ. Они проникают через клеточные мембраны бактерий и грибов, ингибируя ключевые ферменты и нарушая клеточное дыхание, что приводит к гибели микроорганизмов. Пенообразователи и противопенные присадки используются для контроля пены. В шлифовальных операциях небольшое пенообразование полезно для удержания жидкости на заготовке, но избыточная пена снижает эффективность охлаждения и приводит к переливам. Силиконы и спирты, являясь пеногасителями, разрушают пену, увеличивая поверхностное натяжение плёнок пузырьков.

Далее, следует рассмотреть влияние состава СОЖ на его свойства. Так, вязкость является основной характеристикой, определяющей способность СОЖ формировать смазывающую плёнку и прокачиваться по системе. Для неразбавляемых масел она напрямую зависит от молекулярной массы и структуры базового масла. В водосмешиваемых СОЖ вязкость концентрата влияет на стабильность эмульсии и смазывающую способность готового раствора. Поверхностное натяжение – критически важный параметр, контролируемый ПАВами. Низкое поверхностное натяжение (45–55 мН/м) обеспечивает хорошее смачивание, то есть способность жидкости растекаться по поверхности и проникать в узкие зазоры между инструментом и стружкой. Это улучшает и охлаждение, и доставку присадок в зону резания. Высокое поверхностное натяжение ухудшает смачиваемость, приводит к скатыванию жидкости с поверхности и образованию парового барьера (эффект Лейденфроста). pH рабочего раствора (обычно 8,5 – 9,5) является индикатором его коррозионной стабильности. Щелочная среда, создаваемая аминами, ингибирует коррозию чёрных металлов. Падение pH сигнализирует об окислении жидкости или развитии микроорганизмов.

Теплопроводность и теплоёмкость определяют охлаждающую эффективность СОЖ. Вода обладает аномально высокой теплоёмкостью (4,18 кДж/кгК) и теплопроводностью (0,6 Вт/мК) по сравнению с минеральными маслами (теплоёмкость 2 кДж/кгК, теплопроводность 0,15 Вт/мК). Поэтому водосмешиваемые СОЖ, особенно синтетические, являются более эффективными хладагентами.

Стабильность эмульсии – это её способность сопротивляться расслоению. На неё влияют: тип и концентрация эмульгаторов, жёсткость воды (ионы и могут разрушать эмульсии), pH, температура и механическое воздействие (сдвиговые нагрузки). Нестабильность проявляется в виде образования сливок или полного расслоения, что приводит к неравномерному распределению присадок и ухудшению свойств.

РАЗРУШЕНИЕ СОЖ: ХИМИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ

Окисление базового масла – это главная причина старения неразбавляемых и эмульсионных СОЖ. Это автокаталитическая цепная реакция с участием кислорода воздуха, ускоренная высокими температурами в зоне резания и каталитическим действием ионов металлов (медь, железо). На лимитирующей стадии радикалы углеводородов ($\cdot$) образуются под действием тепла. Далее следует стадия распространения: радикалы реагируют с кислородом, образуя пероксидные радикалы ($\cdot$), которые отрывают водород от новых молекул, образуя гидропероксиды ($\cdot$) и новые радикалы. Гидропероксиды неустойчивы и разлагаются с образованием алкоксильных радикалов ($\cdot$), которые затем окисляются до кетонов, спиртов и, в конце до карбоновых кислот. Эти кислоты (нафтеновые, сульфоновые) вызывают коррозию, а также полимеризуются с образованием смол, лаков и шламов, забивающих фильтры и ухудшающих теплоотвод [7]. Гидролиз – это разложение сложноэфирных компонентов (базовых масел или присадок) под действием воды. Реакция приводит к образованию спиртов и карбоновых кислот, что также способствует падению pH, коррозии и потере смазывающих свойств.

Также водные СОЖ представляют собой идеальную питательную среду для аэробных бактерий и анаэробных грибов. Микроорганизмы поглощают эмульгаторы, масла и другие органические компоненты. Аэробные бактерии развиваются в верхних слоях жидкости, потребляя кислород и выделяя органические кислоты (уксусную, молочную) как продукты метаболизма. Это приводит к резкому падению pH (иногда ниже 5.0). Анаэробные бактерии развиваются в осадке на дне баков, в шламах. Они продуцируют сероводород (H_2S), который имеет характерный запах тухлых яиц и вызывает коррозию. Грибы образуют мицелий, который забивает фильтры и трубопроводы. Продукты жизнедеятельности микробов разрушают эмульсию, приводя к расслоению, и могут вызывать дерматиты у операторов.

В процессе работы СОЖ загрязняются механическими примесями: мелкодисперсной стружкой, абразивными частицами из шлифовальных кругов, пылью. Эти частицы действуют как абразив, ускоряя износ инструмента и направляющих станка, а также ухудшают качество поверхности обрабатываемой детали. Попадание посторонних жидкостей (например, гидравлического масла, конденсата, СОЖ из другого контура) может изменить химический состав, нарушить баланс присадок и спровоцировать нестабильность эмульсии.

Представленная сравнительная информация по разным типам СОЖ, в зависимости от состава представлена в таблице 1.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СОЖ В ПРОЦЕССАХ ППД

Процессы поверхностного пластического деформирования (выглаживание, обкатывание роликом, дорнование) характеризуются сверхвысокими контактными давлениями, превышающими предел текучести материала, и значительным пластическим течением металла. В этих условиях трение и адгезия становятся доминирующими факторами, определяющими стойкость инструмента и качество поверхности. Основная задача СОЖ – предотвратить схватывание (холодную сварку) материала детали с материалом инструмента (ролика, индентора). Для этого обязательны эффективные EP-присадки. Они должны формировать на границе раздела прочные трибохимические плёнки с низким сопротивлением сдвигу, которые будут разделять контактирующие поверхности даже в условиях пластической деформации. Кроме того, жидкость должна эффективно отводить тепло, сопротивляться интенсивному пластическому деформированию, чтобы предотвратить термический отпуск и разупрочнение обработанного наклёпом поверхностного слоя [2], [5].

Характерной особенностью ППД, отличающей его от режущих методов обработки, является формирование микрорельефа в результате пластического течения материала, а не его резания. Отдельные компоненты СОЖ способны активно взаимодействовать с этой вновь образованной поверхностью, модифицируя её свойства. Твёрдые смазки (графит, MoS_2 , PTFE) в виде тонкодисперсных частиц механически внедряются в микропоры и впадины под действием высокого контактного давления. Это приводит к физическому «запечатыванию» дефектов и созданию сухой смазки в по-

Таблица 1. Сравнительная характеристика СОЖ

Критерий	Масляные	Эмульсионные	Полусинтетические	Синтетические
Область применения	Тяжелонагруженные операции с низкой скоростью: зубонарезание, протягивание, глубинное сверление	Универсальные операции: точение, фрезерование, шлифование чёрных металлов	Высокоскоростная обработка, операции, требующие баланса смазки и охлаждения	Высокоскоростная обработка алюминия, шлифование, операции, требующие чистоты и контроля
Основные преимущества	Высокая противозадирная стойкость, хорошая адгезия к металлу	Универсальность, низкая цена	Лучшее охлаждение, чем у эмульсий, стойкость к сколам	Долгий срок службы, отличное охлаждение, чистота на деталях
Основные недостатки	Пожароопасность, слабое охлаждение, риск образования тумана	Чувствительность к жёсткой воде, склонность к размножению бактерий при долгом хранении	Высокая стоимость	Высокая стоимость, возможна агрессивная реакция на определённые виды металлов, например цветные металлы

рах. Неоднородности могут иметь различную природу и масштаб. Микроскопические впадины и поры, возникающие при пластической деформации, способны эффективно заполняться твёрдыми смазками и адсорбционными слоями присадок, образуя своеобразную «сухую» смазку и защитные покрытия. В то же время более крупные дефекты материала (например, газовые поры в алюминиевых сплавах или литейные раковины) не могут быть полностью перекрыты механизмами адсорбции или механического внедрения частиц. В этом случае их заполнение происходит иначе: в них могут упруго втягиваться полимерные плёнки или накапливаться продукты износа и вторичные структуры, что также снижает их вредное влияние, но по другим физико-химическим механизмам.

Таким образом, процесс «запечатывания» дефектов при ППД носит многомасштабный характер: микроуглубления выравниваются и стабилизируются за счёт синергии механического внедрения и химической адсорбции, тогда как макропоры частично экранируются за счёт образования эластичных или вторичных слоёв. Это обеспечивает как снижение шероховатости, так и повышение общей эксплуатационной стойкости поверхности. Высокополяризованные присадки (например, некоторые сложные эфиры, фосфорсодержащие соединения) обладают высокой адсорбционной способностью. Они хемосорбируются на химически активной, чистой поверхности металла, обнажённой после пластической деформации, образуя прочные ориентированные слои. Эти слои заполняют микронные неровности, эффективно снижая шероховатость и создавая защитный барьер. Полимерные присадки могут образовывать эластичные плёнки, которые упруго деформируются, сглаживая пики микрорельефа.

Этот синергетический эффект механического заполнения и адсорбционного выравнивания приводит к значительному улучшению микрогеометрии поверхности. Повышается опорная площадь контакта, что увеличивает износостойкость детали в эксплуатации. Кроме того, «запечатанная» поверхность становится более устойчивой к проникновению влаги и агрессивных сред, то есть повышается её коррозионная стойкость. Таким образом, правильный подбор СОЖ для ППД позволяет не только защитить инструмент, но и активно влиять на формирование конечных эксплуатационных свойств обработанной детали.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И УТИЛИЗАЦИЯ

Широкое применение СОЖ в промышленности, к сожалению, сопряжено с образованием значительного количества опасных отходов, что создаёт серьёзные экологические риски. К ним относятся загрязнение водоёмов нефтепродуктами и ионами тяжёлых металлов, а также образование аэрозолей, оказывающих вредное воздействие на дыхательную систему персонала [3], [4], [7].

В соответствии с решением данных проблем сформировались следующие направления для минимизации ущерба:

- **Разработка и внедрение «зелёных» СОЖ.** Основная идея – заменить традиционные минеральные масла на биоразлагаемые основы, такие как растительные масла (рапсовое, кокосовое). Параллельно идёт работа по отказу от высокотоксичных присадок (хлор, нитриты, бор) в пользу более безопасных аналогов [7]. Например, вместо хлорпарафинов все чаще используются современные безгалогеновые ЕР-присадки на основе фосфора и серы. Нитриты, являющиеся канцерогенами, заменяются на менее вредные ингибиторы коррозии на основе карбоновых кислот или «защищенных» аминов.

- **Внедрение ресурсосберегающих технологий.** К ним, в первую очередь, относится метод минимального количества смазки (Minimum Quantity Lubrication – MQL), который за счёт малого расхода кардинально сокращает объём образующихся отходов. Другим важным аспектом является оснащение производств системами рециркуляции и многоступенчатой фильтрации, которые позволяют многократно продлевать срок службы рабочих составов, снижая их потребление [10].

АНАЛИЗ ПАТЕНТНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Систематизация и анализ последних патентных разработок в области СОЖ для выявления ключевых тенденций является неотъемлемой частью процесса рассмотрения СОЖ. Патентный поиск позволяет не только оценить текущий уровень развития данного направления, но и идентифицировать перспективные направления для дальнейших исследований. Все рассмотренные патенты для удобства анализа лучше рассматривать по определенным категориям:

Патенты по составу СОЖ. Данная группа патентов объединена принципиальным улучшением эксплуатационных характеристик СОЖ за счет модификации их химического состава. Ключевыми тенденциями являются использование смазок в форме эмульсии (US6245723B1) [18], биоразлагаемой основы (RU2716499C1) [11], введение нанодисперсных добавок (нитрид бора, оксид графена) для усиления противозадирных и теплопереносящих свойств (US2017106420A1) [23], а также разработка комплексных биоцидов для подавления микрофлоры и продления срока службы (RU 2144560C1) [12]. Эти решения направлены на создание более эффективных, специализированных и долговечных жидкостей.

Патенты по сфере применения. Эту группу объединяет узкая специализация составов под конкретные материалы и технологические процессы. Патенты предлагают целевые решения для обработки труднообрабатываемых титановых сплавов, холодной прокатки алюминия с требованием к чистоте поверхности (US12215295B2) [18], операций штамповки (CN103666708A) [16] и даже механической обработки природного камня (RU 2047656C1, CN104974832A) [13], [20]. Это указывает на важность отказа от универсальных СОЖ в пользу высокоэффективных специализированных продуктов, обеспечивающих максимальное качество для конкретной задачи.

Патенты по «экологичности». Все патенты в этой группе направлены на снижение экологического следа от применения СОЖ, что достигается за счет использования быстроразлагаемого сырья (растительные масла RU 2716499C1) [11], кардинальным сокращением расхода за счет технологии минимального количества смазки и продлением срока службы жидкости за счет повышения ее биостойкости и организации регенерации (DE102011008183A1) [15].

Патенты по оборудованию очистки СОЖ. В данной группе рассматриваются патенты, направленные на продление срока службы СОЖ, оптимизации процесса очистки компонентов, а также возможности повторного использования в процессе. Решения направлены на автоматизацию контроля ключевых параметров жидкости (вязкость, загрязненность) в реальном времени для перехода к обслуживанию по фактическому состоянию (DE102004050372A1) [19], а также на создание оборудования для точного дозирования и автоматического пополнения систем подачи (US6745591B1) [22] и приготовления однородных смесей (US2017106420A1) [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные СОЖ представляют собой результат точного инжиниринга, где свойства определяются синергией основы и присадок. Их выбор зависит от триады «материал – операция – оборудование». Ключевые тенденции – развитие специализированных составов и экологизация через биораз-

лагаемые основы, что сокращает отходы. Развитие отечественных СОЖ, соответствующих мировым стандартам, является важным фактором конкурентоспособности отечественной промышленности. Таким образом, будущее отрасли – за созданием интеллектуальных и экологических решений, обеспечивающих высокое качество обработки при минимальном воздействии на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Haydarov A.* A review of modern research on the composition, types and innovations of cutting fluids / A.A. Haydarov, K.R. Khujakulov, J.Z. Muradov // *Universum: технические науки: электрон. научн. журн.* – 2023. – № 11(116).
2. *Ларина, А.И.* Механизмы действия смазочно-охлаждающих жидкостей / А.И. Ларина, И.В. Постникова // *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение.* – 2022, – № 3.
3. *Лысенков, М.П.* Экологически чистые смазочно-охлаждающие технологические среды / М.П. Лысенков // *Инструмент и технологии.* – 2012. – № 5-6.
4. *Яблокова, М.А.* Современные технологии и оборудование для обезвреживания отработанных смазочно-охлаждающих жидкостей / М.А. Яблокова, В.В. Бугров, Р.А. Хасаев // *Известия СПбГТИ(ТУ).* – 2014. – № 25. – С. 62–66.
5. *Кисель, А.Г.* Влияние смазочно-охлаждающей жидкости на стойкость металлорежущего инструмента при токарной обработке / А.Г. Кисель, Д.С. Реченко, А.Ю. Попов, А.А. Ражковский // *Системы. Методы. Технологии.* – 2013. – № 4(20). – С. 138–142.
6. *Елизарова, Ю.А.* Вопросы адгезии при нанесении высокотемпературных покрытий / Ю.А. Елизарова, А.И. Захаров // *Успехи в химии и химической технологии.* – 2021. – Т. XXXV. – № 4.
7. *Котенко, А.А.* Очистка металлических деталей от масел, СОЖ и алмазных паст различных видов / А.А. Котенко, Е.В. Лыткин, А.Г. Старостин // *Химия. Экология. Урбанистика. Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников (с международным участием).* – 2018. – С. 694–698.
8. *Попова, А.А.* Физическая химия: учебное пособие / А. А. Попова, Т. Б. Попова. – СПб.: Лань, 2015. – 496 с.
9. *Бурлакова, В.Э.* Влияние концентрации органической кислоты в составе смазки на трибологические характеристики пары трения / В.Э. Бурлакова, Е.Г. Дроган // *Вестник Донского государственного технического университета.* – 2019. – Т. 19. – № 1. – С. 24–30.
10. *Кирейнов, А.В.* Современные тенденции применения смазочно-охлаждающих технологических средств при лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов / А.В. Кирейнов, В.Б. Есов // *Инженерный журнал: наука и инновации.* – 2017. – № 2.
11. Патент RU2716499C1. Российская федерация. Способ получения биоразлагаемой низкотемпературной консистентной смазки на основе целлюлозы / С.О. Ильин, С.Н. Горбачева, Ю.М. Ярмуш, 2019.
12. Патент RU 2144560C1. Российская федерация. Бактерицидная присадка к смазочно-охлаждающим жидкостям / Ю.К. Малков, Н.Л. Ланцберг, В.Н. Хлебников, С.И. Смоленцева, С.А. Данилов, 1998.
13. Патент RU 2047656 C1. Российская федерация. Состав смазочно-охлаждающей жидкости для механической обработки природных камней / Петров М.В., Никитин А.И., Шалунов Г.П.
14. Патент RU 2118965 C1. Российская федерация. Смазочно-охлаждающая жидкость для механической обработки металлов / Шабалин В.С., Булыжев Е.И., Афанасьев Н.И., Ромашкин В.Г.
15. Патент DE102011008183A1. Германия. Непрерывная подготовка охлаждающей жидкости / Франк Шарренбах, Энгхардт Раймар, Ен Чжун Чо, 2011.
16. Патент CN103666708A. Китай. Смазка для тиснения и растяжения на водной основе, способ приготовления и способ применения / Лю Тяньшань, Се Цзуншэн, Ван Сяолун, 2013.
17. Patent US12215295B2. United States of America. Cooling lubricant for cold rolling aluminum / Stephan Draese, Thomas Graf, Oliver Seiferth, Volker Schmitz, 2020.
18. Патент US6245723B1. Соединенные Штаты Америки. Смазочно-охлаждающая эмульсия / Карл Сигг, Хартмут Ригер, Юрген Геке, Вильтруд Клозе, 1997.
19. Патент DE102004050372A1. Германия. Способ и устройство для определения свойств смазочно-охлаждающих материалов / Бернхард Нойманн, 2003.
20. Патент CN104974832A. Китай. Смазочно-охлаждающая жидкость для каменного материала / Чжо Цинмин, 2015.
21. Патент US2008171679A1. Соединенные Штаты Америки. Глицериловые эфиры как консерванты для смазочно-охлаждающих жидкостей / Вольфганг Байльфус, Ральф Градтке, Вольфганг Зигерт, Карл-Хайнц Диль, Клаус Вебер, 2002.
22. Патент US6745591B1. Соединенные Штаты Америки. Устройство для пополнения охлаждающей жидкости и смазки компрессора / Шан-Чи Линь, 2003.
23. Патент US2017106420A1. Соединенные Штаты Америки. Способ и устройство для получения смазочно-охлаждающей смеси, формовочная установка для формования полуфабрикатов и применение смазочно-охлаждающей смеси / Клаус Ройкер, 2014.

LUBRICATING AND COOLING FLUIDS (COOLANTS): PROPERTIES, APPLICATION AND ENVIRONMENTAL ASPECTS

© 2025 S.A. Sokov¹, R.U. Kamenov^{1,2}, A.V. Tolstykh¹, I.A. Konarev¹, V.A. Turkin¹

¹ Togliatti State University, Togliatti, Russia

² Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

This review is devoted to a comprehensive analysis of lubricating and cooling fluids (coolants), which occupy a key position in ensuring the efficiency, accuracy and economic feasibility of modern industrial technologies. The paper systematizes the existing classifications of coolants based on their type (oil, miscible, synthetic), functional purpose and chemical nature. The composition of modern liquids is considered in detail, with an in-depth analysis of the mechanisms of action of key functional additives: anti-wear, extreme pressure, anti-pitting, antifriction, antioxidant and dispersing. Special emphasis is placed on establishing correlations between the molecular structure of COOLANT components and their tribotechnical characteristics, such as bearing capacity, coefficient of friction, and stability of properties under extreme processing conditions. A significant part of the research is focused on the specifics of the use of lubricating and cooling media in the technological processes of surface plastic deformation (PPD), including rolling, mandrel, shot blasting and running-in. In the light of global trends in sustainable development, the review comprehensively highlights the environmental aspects of COOLANT application. The problems of toxicity of traditional components, biodegradability and environmental impact are considered. Promising directions for the development of “green” or environmentally friendly coolants, including the use of renewable raw materials, vegetable oils and biodegradable synthetic esters, are analyzed. Based on the analysis of patent literature and scientific and technical publications in recent years, major trends and priorities in the field of creating new coolant compositions have been identified. These include: the development of universally specialized liquids with adaptive properties, in-depth customization of solutions for additive technologies and processing of new hard-to-process materials, as well as an active search for solutions within the framework of an import substitution strategy aimed at creating competitive domestic analogues that meet the requirements of both production efficiency and environmental safety.

Keywords: lubricants and coolants, classification of coolants, tribology, additives, extreme pressure properties, ecology, recycling, patent analysis, surface plastic deformation (PPD).

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-372-381

EDN: UHWOKJ

REFERENCES

1. Haydarov A. A review of modern research on the composition, types and innovations of cutting fluids / A.A. Haydarov, K.R. Khujakulov, J.Z. Muradov // *Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn.* – 2023. – № 11(116).
2. Larina, A.I. Mekhanizmy dejstviya smazочно-ohlazhdayushchih zhidkostej / A.I. Larina, I.V. Postnikova // *Sovremennye naukoymkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie.* – 2022, – № 3.
3. Lysenkov, M.P. Ekologicheski chistye smazочно-ohlazhdayushchie tekhnologicheskie sredy / M.P. Lysenkov // *Instrument i tekhnologii.* – 2012. – № 5-6.
4. Yablokova, M.A. Sovremennye tekhnologii i oborudovanie dlya obezvrezhivaniya otrabotannyh smazочно-ohlazhdayushchih zhidkostej / M.A. Yablokova, V.V. Bugrov, R.A. Hasaev // *Izvestiya SPbGTI(TU).* – 2014. – № 25. – S. 62–66.
5. Kisel', A.G. Vliyanie smazочно-ohlazhdayushchej zhidkosti na stojkost' metallovezhushchego instrumenta pri tokarnoj obrabotke / A.G. Kisel', D.S. Rechenko, A.Yu. Popov, A.A. Razhkovskij // *Sistemy. Metody. Tekhnologii.* – 2013. – № 4(20). – S. 138-142.
6. Elizarova, Yu.A. Voprosy adgezii pri nanesenii vysokotemperaturnyh pokrytij / Yu.A. Elizarova, A.I. Zaharov // *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii.* – 2021. – T. XXXV. – № 4.
7. Kotenko, A.A. Ochistka metallicheskih detalej ot masel, SOZh i almaznyh past razlichnyh vidov / A.A. Kotenko, E.V. Lytkin, A.G. Starostin // *Himiya. Ekologiya. Urbanistika. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii molodyh uchenyh, aspirantov, studentov i shkol'nikov (s mezhdunarodnym uchastiem).* – 2018. – S. 694-698.
8. Popova, A. A. Fizicheskaya himiya: uchebnoe posobie / A. A. Popova, T. B. Popova. – SPb.: Lan', 2015. – 496 s.
9. Burlakova, V.E. Vliyanie koncentracii organicheskoy kisloty v sostave smazki na tribologicheskie harakteristiki pary treniya / V.E. Burlakova, E.G. Drogan // *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* – 2019. – T. 19. – № 1. – C. 24–30.
10. Kirejnov, A.V. Sovremennye tendencii primeneniya smazочно-ohlazhdayushchih tekhnologicheskikh sredstv pri lezviyjnoj obrabotke trudnoobrabatyvaemyh materialov / A.V. Kirejnov, V.B. Esov // *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii.* – 2017. – № 2.
11. Patent RU2716499C1. Rossijskaya federaciya. Sposob polucheniya biorazlagaemoj nizkotemperaturnoj konsistentnoj smazki na osnove cellyulozy / S.O. Il'in, S.N. Gorbacheva, Yu.M. Yarmush, 2019.
12. Patent RU 2144560C1. Rossijskaya federaciya. Baktericidnaya prisadka k smazочно-ohlazhdayushchim zhidkostyam / Yu.K. Malkov, N.L. Lancberg, V.N. Hlebnikov, S.I. Smolenceva, S.A. Danilov, 1998.

13. Patent RU 2047656 C1. Rossijskaya federaciya. Sostav smazочно-ohlazhdayushchej zhidkosti dlya mekhanicheskoy obrabotki prirodnyh kamnej / Petrov M.V., Nikitin A.I., Shalunov G.P.
14. Patent RU 2118965 S1. Rossijskaya federaciya. Smazочно-ohlazhdayushchaya zhidkost' dlya mekhanicheskoy obrabotki metallov / Shabalin V.S., Bulyzhev E.I., Afanas'ev N.I., Romashkin V.G.
15. Patent DE102011008183A1. Germaniya. Nepreryvnaya podgotovka ohlazhdayushchej zhidkosti / Frank Sharrenbah, Enghardt Rajmar, En Chzhun Cho, 2011.
16. Patent CN103666708A. Kitaj. Smazka dlya tisneniya i rastyazheniya na vodnoj osnove, sposob prigotovleniya i sposob primeneniya / Lyu Tyan'shan', Se Czunshen, Van Syaolun, 2013.
17. Patent US12215295B2. United States of America. Cooling lubricant for cold rolling aluminum / Stephan Draese, Thomas Graf, Oliver Seiferth, Volker Schmitz, 2020.
18. Patent US6245723B1. Soedinennye Shtaty Ameriki. Smazочно-ohlazhdayushchaya emul'siya / Karl Sigg, Hartmut Riger, Yurgen Geke, Vil'trud Kloze, 1997.
19. Patent DE102004050372A1. Germaniya. Sposob i ustrojstvo dlya opredeleniya svojstv smazочно-ohlazhdayushchih materialov / Bernhard Nojmann, 2003.
20. Patent CN104974832A. Kitaj. Smazочно-ohlazhdayushchaya zhidkost' dlya kamennogo materiala / Chzho Cinmin, 2015.
21. Patent US2008171679A1. Soedinennye Shtaty Ameriki. Glicerilovye efiry kak konservanty dlya smazочно-ohlazhdayushchih zhidkostej / Vol'fgang Bajl'fus, Ral'f Gradtkke, Vol'fgang Zigert, Karl-Hajnc Dil', Klaus Veber, 2002.
22. Patent US6745591B1. Soedinennye Shtaty Ameriki. Ustrojstvo dlya popolneniya ohlazhdayushchej zhidkosti i smazki kompressora / Shan-Chi Lin', 2003.
23. Patent US2017106420A1. Soedinennye Shtaty Ameriki. Sposob i ustrojstvo dlya polucheniya smazочно-ohlazhdayushchej smesi, formovochnaya ustanovka dlya formovaniya polufabrikatov i primenenie smazочно-ohlazhdayushchej smesi / Klaus Rojker, 2014.

*Sergey Sokov, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Chemical Engineering and Resource Conservation.
E-mail: s.a.sokov.tltsu@gmail.com*

Renat Kamenov, PhD in Engineering, Head of the Research Laboratory «Mechanical Processing and Surface Layer Control Technologies.» E-mail: renatkamenov@mail.ru

Aleksandr Tolstykh, Technician, Research Laboratory «Mechanical Processing and Surface Layer Control Technologies.» E-mail: dominys12@mail.ru

Ilya Konarev, Technician, Research Laboratory «Mechanical Processing and Surface Layer Control Technologies.» E-mail: iluha2004989@gmail.com

Vladimir Turkin, Technician, Research Laboratory «Mechanical Processing and Surface Layer Control Technologies.» E-mail: d0natell069@mail.ru