

УДК 621.91

DOI 10.47367/0021-3497\_2024\_5\_211

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОКАПСУЛИРОВАННЫХ СОТС НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕКСТИЛЬНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ\***

**POSSIBILITIES OF USING MICROCAPSULATED COOLANTS- LUBRICANTS OF DIRECTED ACTION TO ENSURING ENVIRONMENTAL AND FIRE SAFETY OF TEXTILE MACHINERY TECHNOLOGICAL PROCESSES**

*А.Г. НАУМОВ<sup>1</sup>, С.А. СЫРБУ<sup>1,2</sup>, Н.А. ТАРАТАНОВ<sup>1</sup>, А.Г. АЗОВЦЕВ<sup>1</sup>, А.С. МИТРОФАНОВ<sup>1</sup>*

*A.G. NAUMOV<sup>1</sup>, S.A. SYRBU<sup>1,2</sup>, N.A. TARATANOV<sup>1</sup>, A.G. AZOVTSEV<sup>1</sup>, A.S. MITROFANOV<sup>1</sup>*

*(<sup>1</sup>Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,  
<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет)*

*(<sup>1</sup>Ivanovo Fire and Rescue Academy of the SFC of EMERCOM of Russia,  
<sup>2</sup>MIREA – Russian Technological University)*

*E-mail: agn8@yandex.ru; syrbue@yandex.ru; taratanov\_n@mail.ru;  
asovtsev121@mail.ru; mitart1992@mail.ru*

*Представленная работа посвящена изучению возможности использования микрокапсулированных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) направленного действия для обеспечения экологической и пожарной безопасности технологических процессов текстильного машиностроения. Исследовано влияние строения микрокапсул на процессы износа инструмента из быстрорежущей стали при резании на операции точения нержавеющей и хромистой сталей, а также на значение коэффициента трения между обрабатываемым (закаленная сталь) и инструментальным (быстрорежущая сталь) материалами. Установлено, что наиболее эффективно по сравнению с масляным и водорастворимым промышленными СОТС использование 4%-ных водных эмульсий микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом и озонированной водой в ядре. Показано, что наличие в ядре микрокапсулы озонированной воды позволяет снизить коэффициент трения до 2 раз по сравнению с желатиновой оболочкой во всей области исследуемых нагрузок как за счет интенсификации процесса адгезии полимера к металлу в области малых нагрузок, так и за счет образования химических связей при более тяжелых условиях трения.*

\*Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00288 «Разработка экологически безопасной системы резания путем направленного действия смазочно-охлаждающих технологических средств».

*The presented work is devoted to the study of the possibilities of using microcapsulated coolant-s lubricants of directed action to ensuring environmental and fire safety of textile machinery technological processes. The influence of the structure of microcapsules on the wear processes of tools made of high-speed steel during cutting operations on turning stainless steel and chromium steels, as well as the value of the friction coefficient between the processed (hardened steel) and tool (high-speed steel) materials was studied. It has been established that the most effective, compared to oil-based and water-soluble industrial coolants- lubricants , is the use of 4% aqueous emulsions of microcapsules with gelatin shells with magnetite and ozonized water in the core. It has been shown that the presence of ozonized water in the core of a microcapsule makes it possible to reduce the coefficient of friction up to 2 times compared to the gelatin shell in the entire range of loads under study, both due to the intensification of the process of adhesion of the polymer to the metal in the area of small loads, and due to the formation of chemical bonds under more severe friction conditions*

**Ключевые слова:** текстильное машиностроение, смазочно-охлаждающие технологические среды, микрокапсулы, желатин, озонированная вода, сталь, износостойкость, коэффициент трения.

**Keywords:** textile machinery, microcapsulated coolants- lubricants, microcapsules, gelatin, ozonized water, steel, wear resistance, friction coefficient.

#### *Введение*

Текстильное машиностроение является важной отраслью промышленности, которая занимается разработкой и производством машин для текстильной промышленности. В технологических процессах изготовления ткацких станков, прядильных и чесальных машин используются смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС). Следует отметить, что в 90-е годы прошлого века отрасль российского текстильного машиностроения была практически полностью разрушена. Оборудование закупалось у зарубежных поставщиков. Авторы работы [1] указывают, что отсутствие в стране базы по производству станков для текстильной промышленности является одним из факторов, сдерживающих развитие данной отрасли. На импортных станках в условиях санкций отечественные предприятия не могут выпускать конкурентоспособную продукцию. Именно поэтому сейчас, когда необходимо возродить отечественное текстильное машиностроение, остро встают вопросы повышения эффективности, экологической и пожарной безопасности процессов обработки металлов

резанием с использованием СОТС. Указанные вопросы не теряют своей актуальности и в переходный период восстановления российского текстильного машиностроения, когда остро встают вопросы ремонта станков и машин зарубежного производства.

Однако, если всего десять – пятнадцать лет назад главными требованиями, предъявляемыми к СОТС, были их технологические свойства, то в настоящее время приоритеты поменялись. Постоянно ужесточающиеся требования защиты окружающей среды и обслуживающего персонала от техногенных воздействий выдвигают на первое место безопасность СОТС и простоту их утилизации. Далее следуют такие параметры, как совместимость СОТС с инструментальным и обрабатываемым материалами, возможности их регенерации. Только после этого оценивается эффективность СОТС и их окупаемость.

Вопросами повышения экологической безопасности при обработке металлов резанием с использованием СОТС занимается «зеленая трибология». Это понятие более 10 лет назад ввел профессор Жанг [2]. «Зеленая трибология» ищет способы снижения

негативного воздействия СОТС на окружающую среду. К ним можно отнести следующие: замена в составе СОТС потенциально опасных компонентов (минеральных масел, хлора, азота, серы и их соединений, фенолов и др.) на более экологически безопасные компоненты аналогичного действия; отказ от использования СОТС при металлообработке; замена металлов на полимеры и композитные наноматериалы. Однако, несмотря на появление новых композитных наноматериалов, металлы и сплавы продолжают широко использоваться в промышленности.

В литературе встречается несколько методов обработки режущего инструмента для повышения его износостойкости. Приведем некоторые из них. Поверхностный слой инструмента подвергают лазерной обработке [3], проводят вакуумное нанесение на его рабочие поверхности нанопокровов состава титан-алюминий-азот (TiAlN) [4], методом катодно-дугового осаждения наносят наноструктурные нитриды титана и циркония [5]. Активируют СОТС ионизированным воздухом, получая воздушно-масляные смеси [6].

Указанные способы обработки инструмента достаточно сложны и дороги, поэтому актуальность разработки более простых в техническом исполнении и менее затратных в экономическом отношении способов повышения износостойкости режущего инструмента сохраняется.

В зоне контакта при резании металлов требуются микродозы смазочного материала. Группой российских ученых под руководством профессора В.Н. Латышева, а также американскими и японскими исследователями была подтверждена высокая эффективность способа направленной подачи СОТС в виде микрокапсул и обосновано позитивное действие кислорода в контактной зоне при резании. Однако в указанных исследованиях содержимым капсул являлись промышленные масла. В данной работе предлагается вводить озонированную воду в состав микрокапсул, имеющих направленное действие. Это позволяет сохранять химическую активность аллотропной модификации кислорода до момента

попадания в контактную зону, где вещество и начинает «работать».

Следует отметить, что кислородсодержащие СОТС являются экологически безопасными, чего нельзя сказать про промышленные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ). В проведенном исследовании в качестве эталонных нами использовались масляная (МР-4) и водорастворимая (Аквол-6) СОЖ. Приведем их характеристики. МР-4 – маловязкое промышленное масло, содержащее значительное количество хлорорганических (35 % хлорпарафина) и других добавок [9]. Аквол – концентрат на основе полиэтиленгликолей, содержит присадки, придающие СОЖ необходимый комплекс свойств. При смешивании с водой образует прозрачные, бесцветные или слегка окрашенные эмульсии, используемые при обработке резанием заготовок из черных металлов и сплавов [9].

Следует отметить, что указанные СОТС, особенно масляные, а также многие из компонентов, входящих в их состав, вредны как для здоровья человека, так и для окружающей среды. В результате термодеструкции СОТС при резании, как указывают авторы работы [10], окружающая среда загрязняется такими химическими веществами, как масляные аэрозоли, альдегиды, хлористый водород, которые зачастую не являются безопасными для организма человека.

Обеспечение требуемых эксплуатационных свойств СОТС достигается путем введения в них присадок различного назначения, многие из которых могут быть токсичными для человека. Кроме того, в многокомпонентных СОТС токсичность может появиться за счет взаимодействия или синергического эффекта присадок, не имеющих явно выраженных опасных для жизни человека свойств.

Исходя из вышесказанного цель нашей работы заключалась в изучении возможности замены промышленных масляных и водорастворимых СОТС озонсодержащими микрокапсулированными СОТС направленного действия в производстве нового оборудования для текстильной промышленности, а также ремонте имеющегося.

### Методы исследования

Для получения микрокапсул применялся метод простой коацервации. Для создания оболочек СОТС использовался фотожелатин марки «А». Для насыщения микрокапсул кислородом и соединениями на его основе на первой и второй стадиях процесса микрокапсулирования исходный раствор подвергался действию озонированного кислорода. Концентрация озона составляла 2%. Для сохранения продуктов распада озона в состав микрокапсул на первой стадии вводился порошок активированного угля марки БАУ-А, обладающего адсорбционными свойствами, в количестве 50 масс. % от массы желатина, а также магнетит для придания им возможности направленного движения в магнитном поле.

Исследования влияния озонированных микрокапсул в составе СОТС на работоспособность быстрорежущего инструмента проводились на операции точения.

Первая часть исследования была посвящена изучению процессов износа режущего инструмента на операции точения стали. При точении в качестве обрабатываемых материалов использовались нержавеющая 12Х18Н10Т и хромистая 40Х стали. Режимы резания выбирались согласно рекомендациям работы [7]. Для изучения динамики износа режущего инструмента испытания проводились до начала катастрофического износа резцов. За критерий начала катастрофического износа принято значение ширины фаски износа на задней поверхности резца, равное 0,6 мм согласно [7]. Износ резцов контролировался с помощью микроскопа МПБ-2. Весь применяемый быстрорежущий инструмент предварительно был подвергнут стандартной термической обработке (закалке и многократному отпуску).

В качестве режущего инструмента применялись упорнопроходные резцы из быстрорежущей стали Р6М5, для которых выбрана следующая геометрия: при точении нержавеющей стали –  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\varphi_1 = 12^\circ$ ,  $\gamma = 12^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ; при точении хромистой стали –  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ,  $\gamma = 20^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$  ( $\alpha$  – передний угол, град;  $\gamma$  – главный передний угол, град;  $\varphi$  – главный угол в плане, град;  $\varphi_1$  – вспомогательный угол в плане, град).

Для предотвращения структурных изменений в быстрорежущей стали при заточке, согласно рекомендациям работы [8], заточивание велось с поливом индустриальным маслом И-12А. Исследования при точении проводились на токарно-винторезном станке модели 16К20.

Во второй части работы изучалось влияние кислородосодержащих компонент микрокапсул на процесс трения металлов. Исследования по определению коэффициента трения проводились на машине трения СМЦ-2. В качестве испытательной использовалась схема трения «диск – колодка», изображенная на рис. 1 (1 – колодка, 2 – вращающийся диск, 3 – ванна), а в качестве контртел применялись материалы, наиболее близко соответствующие исследуемым при резании: диск из закаленной стали Ст45, колодка из быстрорежущей стали Р18.

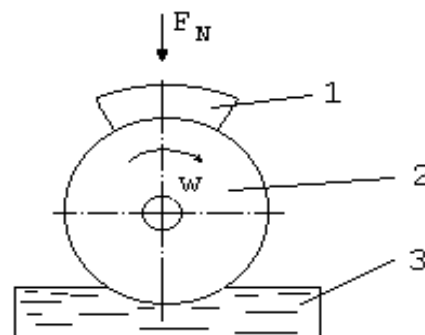


Рис. 1

Площадь контакта колодки и диска составляла  $S = 2 \text{ см}^2$ , что при нормальной нагрузке на колодку до 1300 Н позволяло достигать давления в зоне трения до 5500 кПа. В начале каждого эксперимента диск обрабатывался наждачной бумагой №1, а затем притирался в индустриальном масле И40-А около 10 минут. По этой схеме колодка 1 скользит по поверхности вращающегося диска 2 с постоянной угловой скоростью  $\omega$  при действии нормальной нагрузки  $F_N$ . Смазка фрикционного сопряжения происходит за счет окунания нижней части диска в ванну 3.

Устройство машины трения позволяет записывать трибограмму, с помощью которой определяют коэффициент трения по формуле:

$$f = \frac{2M_{mp}}{F_n D}, \quad (1)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  $M_{mp}$  – момент силы трения, Н·м;  $F_n$  – нормальная нагрузка, Н;  $D$  – диаметр подвижного образца (диска), м.

Следует отметить, что используемая в работе масляная СОЖ (МР-4) содержит минеральные нефтяные масла, имеющие ПДК  $5 \text{ мг/м}^3$  и являющиеся умеренно опасными веществами (класс опасности 3). Для полиэтиленгликолей (Аквол-6) значение ПДК составляет  $40,2 \text{ мг/м}^3$ . Оба компонента являются горючими жидкостями. Для масел температура воспламенения составляет  $140 \dots 150^\circ\text{C}$ , температура самовоспламенения  $235^\circ\text{C}$ . Для полиэтиленгликоля указанные температуры имеют значения  $162^\circ\text{C}$  и  $340^\circ\text{C}$  соответственно [11]. При резании твердосплавными инструментами температура в зоне контактных площадок стружки может превышать  $700^\circ\text{C}$ . Таким образом, существует вероятность воспламенения указанных компонентов СОЖ. Исходя из вышесказанного, обе СОЖ являются экологически и пожароопасными жидкостями.

Как альтернатива им методом коацервации было получено несколько видов микрокапсул. В них по-разному вводился озон. В одном случае он вводился в саму желатиновую оболочку, в другом – озонированная

вода ядра микрокапсулы адсорбировалась активированным углем. Таким образом, в качестве СОТС исследовались водные эмульсии, содержащие различные массовые доли микрокапсул с желатиновыми оболочками без ядра (К), с желатиновыми оболочками с магнетитом (КМ), с желатиновыми оболочками и озонированной водой в ядре (МК) (озонированная вода ядра микрокапсулы адсорбировалась активированным углем), с желатиновыми оболочками, обработанными озоном (КО), с желатиновыми оболочками с магнетитом, обработанными озоном (КМО), и с желатиновыми оболочками с магнетитом и озонированной водой в ядре (ММК).

#### Результаты и обсуждение

В табл. 1 и 2 представлены результаты стойкостных испытаний резцов из быстрорежущей стали Р6М5 при точении нержавеющей стали 12Х18Н10Т и хромистой стали 40Х соответственно. Испытания проводили с использованием воздуха (точение всухую), дистиллированной воды, МР-4, 15%-го водного раствора Аквола-6, а также водных эмульсий шести видов микрокапсул с концентрациями от 1 до 8 масс. % при следующих параметрах:  $v = 0,48 \text{ м/с}$ ,  $s = 0,1 \text{ мм/об}$ ,  $t = 0,5 \text{ мм}$  для табл. 1 и  $v = 1,00 \text{ м/с}$ ,  $s = 0,1 \text{ мм/об}$ ,  $t = 0,5 \text{ мм}$  для табл. 2, где  $v$  – скорость резания;  $s$  – подача;  $t$  – глубина резания.

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Время стойкости резцов, мин.					Время стойкости резцов, мин.					
	Воздух	Вода	МР-4	Аквол-6		К	КО	КМ	КМО	МК	ММК
1	8,2	9,5	13,5	14,3	1%	10,0	8,7	9,8	12,1	10,8	11,4
2					2%	10,7	10,5	11,5	11,5	10,1	12,3
3					4%	10,1	15,1	13,5	17,1	12,5	21,5
4					8%	-	14,1	12,1	15,3	11,2	18,2

Т а б л и ц а 2

№ п/п	Время стойкости резцов, мин.					Время стойкости резцов, мин.					
	Воздух	Вода	МР-4	Аквол-6		К	КО	КМ	КМО	МК	ММК
1	3,0	4,4	7,5	5,2	1%	4,0	5,0	4,9	5,9	6,0	6,7
2					2%	4,5	5,5	5,2	6,3	6,7	7,1
3					4%	4,4	6,3	6,3	7,7	7,8	10,1
4					8%	-	5,7	5,6	6,8	7,1	8,8

Анализ данных табл. 1 и 2 показывает, что на эффективность промышленных СОТС влияет марка стали. Так, наиболее эффективной на операции точения нержавеющей

стали 12Х18Н10Т оказалась 15%-ная водная эмульсия Аквола-6, а на операции точения хромистой стали 40Х – масляная МР-4.

При точении нержавеющей стали 12X18H10T (табл. 1) использование водных эмульсий, содержащих от 1 до 8 масс. % капсул с желатиновыми оболочками без ядра (К), микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом (КМ), микрокапсул с желатиновыми оболочками и озонированной водой в ядре (МК), уменьшает время стойкости режущего инструмента по сравнению с использованием 15%-ной водной эмульсии Аквола-6. На операциях точения хромистой стали 40X применение желатиновых капсул без ядра (К), микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом (КМ) и микрокапсул с желатиновыми оболочками, обработанными озоном (КО), понижает износостойкость резцов из быстрорежущей стали Р6М5 по сравнению с использованием масляной МР-4. Использование водных эмульсий микрокапсул с желатиновыми оболочками, обработанными озоном (КО), микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом, обработанными озоном (КМО), и микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом и озонированной водой в ядре (ММК) при точении нержавеющей стали 12X18H10T приводит к увеличению периода стойкости режущего инструмента по сравнению с использованием классической СОТС – водной эмульсии Аквола-6 (табл. 1). В случае обработки хромистой стали 40X при использовании микрокапсулированных СОТС стойкость резцов увеличивалась при применении микрокапсул с желатиновыми оболочками и озонированной водой в ядре (МК), микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом, обработанными озоном (КМО), а также микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом и озонированной водой в ядре (ММК) по сравнению с масляной МР-4 (табл. 2). Интересно отметить, что при точении хромистой стали 40X увеличение концентрации микрокапсул в водной эмульсии от 1 до 4 масс. % приводит к повышению износостойкости режущего инструмента, тогда как дальнейшее увеличение концентрации активного компонента в эмульсии до 8 масс. %, наоборот, несколько снижает износостойкость режущего инструмента. Аналогичное явление наблюдается и на операции точения нержа-

вующей стали 12X18H10T. Однако для нее практически незаметна разница между эффективностью применения 1%-ной и 2%-ной водных эмульсий микрокапсул.

Из данных табл. 1 и 2 видно, что использование кислородсодержащих микрокапсулированных СОТС направленного действия позволяет повысить износостойкость резцов по сравнению с вышеуказанными классическими СОТС. При применении КМО стойкость режущего инструмента повысилась в 1,3 раза по сравнению и с 15%-ной водной эмульсией Аквола-6, и с масляной МР-4 при точении 12X18H10T; в 1,5 раза по сравнению с 15%-ной водной эмульсией Аквола-6 и в 1,1 раза по сравнению с МР-4 при точении 40X, а при использовании ММК в 1,6 раза для 12X18H10T и в 1,8 раза для 40X по сравнению с 15%-ной водной эмульсией Аквола-6, в 1,4 раза при точении 12X18H10T и 1,2 раза при точении 40X по сравнению с МР-4. Наилучшая стойкость при точении обоих материалов наблюдалась в случаях применения 4%-ной эмульсии микрокапсул в воде.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что использование водных эмульсий микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом и озонированной водой в ядре в качестве СОТС наиболее эффективно снижает процесс изнашивания резцов из быстрорежущей стали Р6М5 при точении нержавеющей и хромированной сталей по сравнению с масляной (МР-4) и водорастворимой (Аквола-6), являющимися промышленными СОЖ. Следует отметить, что производимые промышленностью СОТС, в частности масляная МР-4, содержит порядка 35 % экологически опасных хлорзамещенных алканов, поэтому требует замены на более безопасные с точки зрения экологии СОЖ. Водная эмульсия микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом и озонированной водой в ядре (ММК), которая работает при концентрациях активного вещества 4 масс. % и имеет направленное движение в зону контакта обрабатываемого материала и режущего инструмента, относится к экологически безопасным СОТС, тогда как ее аналог – исследованная в ра-

боте водная эмульсия Аквола-6 – работает при концентрациях полиэтиленгликоля с присадками в 7,5...15 раз выше. Следует отметить также, что обе жидкости – и МР 4, и Аквол-6 – являются горючими, а значит, и пожароопасными.

Следующая часть работы посвящена исследованию влияния кислорода, входящего в состав микрокапсул, на процесс трения металлов.

Для определения смазочных свойств СОТС без процесса резания на практике часто используется моделирование данного процесса путем изучения трения между обрабатываемым и инструментальным материалами. Достоинствами данного метода являются экономия материалов и простота реализации.

Для определения влияния структуры микрокапсулированных СОТС на коэффициент трения проведены сравнительные исследования трех видов СОТС. В качестве СОТС использовались водные эмульсии желатиновых микрокапсул, в одних из которых отсутствовали аллотропные модификации кислорода, в других они были введены в состав желатиновой оболочки, в третьих – в ядро микрокапсулы. Эксперименты проводились до нагрузок, соответствующих области задиrow.

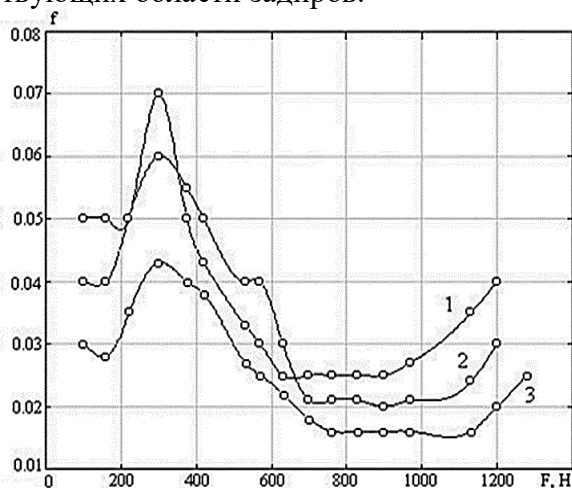


Рис. 2

На рис. 2 представлены графики зависимости коэффициента трения от приложенной нагрузки при использовании в качестве СОТС 4%-ных водных эмульсий микрокап-

сул с желатиновыми оболочками с магнетитом (КМ) (кривая 1), микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом, обработанными озоном (КМО) (кривая 2), и микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом и озонированной водой в ядре (ММК) (кривая 3).

Анализ рис. 2 показывает, что все три кривые имеют симбатный характер. Самое высокое значение коэффициент трения имеет при нормальной нагрузке 300 Н. Далее при повышении нагрузки до 700 Н его значения падают. При нагрузках от 700 Н кривые выходят на плато, значения коэффициента трения не изменяются. Протяженность плато каждой из кривых различна: кривая 1 – коэффициент трения увеличивается при нагрузке 900 Н и составляет 0,026, кривая 2 – при нагрузке 1050 Н  $f=0,02$ , кривая 3 – при нагрузке 1150 Н  $f=0,016$ . Следует отметить, что при использовании в качестве СОТС водной эмульсии микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом и озонированной водой в ядре (озонированная вода ядра микрокапсулы адсорбировалась активированным углем) значения коэффициента трения уменьшаются в 1,67 раза по сравнению с использованием микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом при приложенной нагрузке 300 Н. При нормальной нагрузке в 1200 Н значения коэффициента трения уменьшаются в 2 раза, тогда как при применении микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом, обработанными озоном, при аналогичных условиях эксперимента падение значений коэффициента трения происходит в 1,17 и 1,33 раза соответственно. Таким образом, более эффективно «работают» аллотропные модификации кислорода, введенные в ядро, а не в оболочку микрокапсулы. Аналогичный эффект наблюдался и в процессе снижения изнашивания резцов из быстрорежущей стали Р6М5 при точении нержавеющей и хромистой сталей при использовании водных эмульсий микрокапсул в качестве СОТС.

Объяснить обнаруженный экспериментальный факт можно следующим образом. Оболочки микрокапсул состоят из природ-

ного полимера – желатина, в состав которого входят крахмал, вода, белки, жиры, аминокислоты [12]. Желатин относят к биоразлагаемым («зеленым») полимерам. С одной стороны, это полимеры, макромолекулы которых содержат функциональные группы спиртов, простых и сложных эфиров, кетон, карбоновых кислот, лактонов и др. С другой стороны, биоразлагаемыми могут стать синтетические полимеры с добавками, вызывающими их разложение [13].

При действии озонированной воды, активным окислительным компонентом которой является атомарный кислород, происходит частичный распад желатина. Продуктами окисления желатина могут быть полимерные соединения с более короткими углеводородными цепями, имеющие в своем составе радикалы, кислородсодержащие органические соединения, вторичные и третичные углеводородные радикалы. Все указанные соединения могут образовывать химические связи с атомами железа ювенильной поверхности металла, которая образуется в процессе резания.

Авторы работы [14], развивая теорию, описывающую динамику процессов образования в контактной зоне разделительных смазочных пленок посредством протекания радикально-цепных реакций, подтвердили исследованиями, что образованные в контактной зоне в результате физико-химических процессов отдельные компоненты СОТС будут диффундировать в трибосопряженные металлические поверхности, изменяя их свойства.

Разделительные смазочные пленки, образованные полимерными молекулами, способны иммобилизоваться на ювенильных поверхностях металлов. Иммобилизация происходит за счет образования прочных ковалентных связей радикальных фрагментов макромолекул с атомами металлов. О металлополимерной природе пленок, образующихся на стальных поверхностях в процессе резания, говорят и авторы работы [15]. Однако стоит отметить, что макромолекулам достаточно сложно «закрыть» стериически труднодоступные зоны деформации (неровности). Это доступно

свободнорадикальным фрагментам, которые образуются в результате их частичного распада при физико-химических воздействиях, в случае благоприятствования процессу термодинамических факторов (энтальпийного и энтропийного), иными словами, если образование связей свободнорадикальных фрагментов с атомом металла энергетически выгоднее, чем образование связей между ними, и отсутствуют пространственные затруднения для образования таких связей. В работе [16] нами предложен подход, с помощью которого а priori с использованием методов квантовой химии можно предсказывать потенциальную эффективность СОТС. Для этого необходимо определить, какой из процессов – образование комплексов металлов со свободно-радикальными фрагментами, на которые распадается СОТС при физико-химическом воздействии, или соединение свободно-радикальных фрагментов между собой – будет энергетически выгоднее. Если более энергетически выгоден процесс комплексообразования, то СОТС будет эффективным.

#### *Заключение*

В результате проведенных исследований показана возможность применения микрокапсулированных озонсодержащих СОТС направленного действия для обеспечения экологической и пожарной безопасности технологических процессов на машиностроительных предприятиях по производству оборудования для текстильной промышленности, например, ткацких станков, прядильных и чесальных машин, а также в ремонтных мастерских. Обоснована эффективность замены промышленных масляных и водорастворимых СОТС на микрокапсулы из природного биополимера – желатина.

Установлено, что использование 4%-ных водных эмульсий микрокапсул с желатиновыми оболочками с магнетитом и озонированной водой в ядре в качестве СОТС наиболее эффективно снижает процесс изнашивания резцов из быстрорежущей стали Р6М5 при точении нержавеющей и хромистой сталей по сравнению с масляной (МР-4)



и водорастворимой (Аквол-6), являющимися промышленными СОЖ. Наличие в ядре микрокапсулы озонированной воды позволяет снизить коэффициент трения до 2 раз по сравнению с желатиновой оболочкой во всей области исследуемых нагрузок как за счет интенсификации процесса адгезии полимера к металлу в области малых нагрузок, так и за счет образования химических связей при более тяжелых условиях трения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров П.Н., Посажеников А.А. Импортозамещение в текстильной промышленности: возможности и специфика реализации // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2015. № 4. С. 194...196.
2. Zhang Si-wei. Green tribology: Fundamentals and future development // Friction. 2013. № 1(2). P. 186...194.
3. Исакин И.А., Гнусов С.Ф. Модификация быстрорежущих сталей концентрированными потоками энергии: обзор // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14, № 5 (161). С. 209...216.
4. Мигаль Ю.Ф., Колесников И.В. Влияние состава и толщины нанопокрывтий типа TiAlN на прочность их связи с железом: квантово-химический анализ // Трение и износ. 2022. Т. 43, № 4. С. 433...442.
5. Лебедев В.А., Алиев М.М., Фоминов Е.В. и др. Термоэлектрические характеристики процесса точения стальных заготовок твердосплавными пластинами с комбинированными покрытиями // Трение и износ. 2023. Т. 44, № 2. С. 114...121.
6. Скакун В.В., Джемалидинов Р.М., Ваниев Э.Р. Повышение стойкости быстрорежущего инструмента путем активации масляных СОТС ионизированным воздухом // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: материалы. конструкции. технологии. 2022. № 3. С. 24...33.
7. Наумов А.Г., Латышев В.Н. Механизм радикально-цепных реакций при лезвийной обработке металлов // Металлообработка. 2009. № 3 (51). С. 8...16.
8. Латышев В.Н., Наумов А.Г. О смазочном и химическом действии внешней среды при резании металлов // Трение и износ. 2001. Т. 22, № 3. С. 342...348.
9. Справочник станочника / Л.И. Вереина, М.М. Краснов. М.: Академия, 2006. 560 с.
10. Матвеевский Р.М. Повышение экологической чистоты смазочных масел // Трение и износ. 1994. Т. 15, № 5. С. 843...848.
11. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник: в 2 т. М.: Пожнаука. 2004. Т. 2. 774 с.

12. Нечаев А.П., Траубенберг С.Е., Кочеткова А.А., Колпакова В.В. Пищевая химия / под ред. А.П. Нечаева. 5-е изд., испр. и доп. СПб.: ГИОРД, 2012. 672 с.
13. Луканина Ю.К., Колесникова Н.Н., Попов А.А., Хватов А.В. Металлосодержащие добавки для оксоразложения полиэтилена // Химическая физика. 2019. Т. 38. Вып. 4. С. 69...73.
14. Наумов А.Г., Латышев В.Н., Раднюк В.С., Наумова О.А. Развитие теории радикально-цепного механизма действия СОТС при резании металлов // Металлообработка. 2016. № 4 (94). С. 26...33.
15. Репин Д.С., Наумов А.Г. Об эффективности активации полимерсодержащих смазочно-охлаждающих технологических средств при механической обработке металлов резанием // Вестник УГАТУ. 2020. Т. 24, № 2(88). С. 36...42.
16. Наумов А.Г., Сырбу С.А., Таратанов Н.А., Митрофанов А.С. Изменение контактной зоны при резании сплавов в присутствии кислородсодержащих смазочно-охлаждающих сред // Трение и износ. 2023. Т. 44, № 5. С. 446...455.

#### REFERENCES

1. Zakharov P.N., Posazhennikov A.A. The import substitution in textile industry: opportunities and specifics of implementation // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2015. № 4. P. 194...196.
2. Zhang Sw. Green tribology: Fundamentals and future development. Friction 1. 2013. P.186...194. <https://doi.org/10.1007/s40544-013-0012-4>.
3. Isakin I.A., Gnyusov S.F. Modification of high-speed steels with concentrated energy flows: a review // Strengthening technologies and coatings. 2018. №5 (161). P. 209...216.
4. Migal` Yu.F., Kolesnikov I.V. The influence of the composition and thickness of TiAlNnanocoatings on the strength of their bond with iron: quantum chemical analysis // Friction and wear. 2022. № 4(43). P. 433...442.
5. Lebedev V.A., Aliev M.M., Fominov E.V. etc. Thermoelectric characteristics of the process of turning steel blanks with carbide plates with combined coatings // Friction and wear. 2023. №2(44). P. 114...121.
6. Skakun V.V., Dzhemalyadinov R.M., Vaniev E.R. Increasing the durability of high-speed tools by activating oil COTS with ionized air // Vestnik of Volga State University of technology. Series: Materials. Constructions. Technologies. 2022. № 3. P. 24...33.
7. Naumov A.G., Latyshev V.N. Mechanism of radical chain reactions in blade processing of metals // Metalworking. 2009. № 3 (51). P. 8...16.
8. Latyshev V.N., Naumov A.G. On the lubricating and chemical action of the external environment when cutting metals // Friction and wear. 2001. № 3 (22). P. 342...348.
9. Machineoperator's handbook / L.I. Vereina, M.M. Krasnov. M.: Akademiya, 2006. 560 p.

10. *Matveevsky R.M.* Increasing the environmental purity of lubricating oils // *Friction and wear*. 1994. V. 15. № 5. P. 843...848.
11. *Korolchenko A.Ya., Korolchenko D.A.* Fire and explosion hazard of substances and materials and their extinguishing agents: Handbook in 2 volumes. M.: Pozhnauka. 2004. V. 2. 774 p.
12. *Nechaev A.P., Traubenbeng S.E., Kochetkova A.A., Kolpakova V.V.* Food chemistry / ed. A.P. Nechaev. 5th ed., rev. and additional. SPb.: GIORD, 2012. 672 p.
13. *Lukanina Yu.K., Kolesnikova N.N., Popov A.A., Hvatov A.V.* Metal-containing additives for oxodecomposition of polyethylene // *Chemical physics*. 2019. №4(38). P. 69...73.
14. *Naumov A.G., Latyshev V.N., Radnyuk V.S., Naumova O.A.* Development of the theory of the radical-chain mechanism of action of lubricants and coolants

when cutting metals // *Metalworking*. 2016. № 4 (94). P. 26...33.

15. *Repin D.S., Naumov A.G.* On the effectiveness of activation of polymer-containing lubricant-cooling technological means during mechanical processing of metals by cutting // *Vestnik UGATU*. 2020. № 2(88). P. 36...42.

16. *Naumov A.G., Syrbu S.A., Taratanov N.A., Mitrofanov A.S.* Changes in the contact zone when cutting alloys in the presence of oxygen-containing lubricating and cooling media // *Friction and wear*. 2023. № 5 (44). P. 446...455.

Рекомендована кафедрой естественнонаучных дисциплин Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России. Поступила 07.05.24.