УДК 621.923
https://doi.org/10.56619/2078-7138-2026-176-4-24-30

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ УГЛЕРОДНЫМИ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

К.Л. Сергеев,
ст. преподаватель каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ

М.М. Дечко,
инженер иностранного унитарного предприятия «САМСОЛЮШНС», канд. техн. наук, доцент

А.В. Гуд,
ст. преподаватель каф. моделирования и проектирования БГАТУ

Проведено экспериментальное исследование по модифицированию водомасляных эмульсионных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) высокодисперсными углеродными материалами и повышению дисперсности масляной фазы, обеспечивающим снижение износа лезвийных инструментов при обработке металлов резанием. Установлены оптимальные параметры, включающие размеры масляных капель, объемную концентрацию масляной фазы и концентрацию углеродных высокодисперсных материалов водомасляной эмульсионной СОЖ, обеспечивающие максимальную эффективность по снижению износа лезвийного инструмента.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость, углеродные частицы, масляные капли, дисперсность, износ инструмента, лезвийная обработка металла.

An experimental study has been conducted to modify water-oil emulsion cutting fluids with highly dis-persed carbon materials and to increase the dispersion of the oil phase, which leads to reduced wear of cutting tools during metal cutting. Optimal parameters have been established, including the size of oil drops, the volumetric concentration of the oil phase, and the concentration of highly dispersed carbon materials in the water-oil emulsion cutting fluid which ensure maximum effectiveness in reducing the wear of cutting tools.

Keywords: cutting fluid, carbon particles, oil drops, dispersity, tool wear, metal cutting.

Введение

В процессах металлообработки практически на всех операциях применяют смазочно-охлаждающие жидкости [1]. Применение данных технологических сред при обработке металлов резанием существенно снижает интенсивность изнашивания режущего инструмента, одновременно повышая точность обработки и качество поверхностного слоя деталей [2]. Снижение износа режущего инструмента приобретает особую актуальность на ремонтных предприятиях агропромышленного комплекса Республики Беларусь для повышения эффективности эксплуатации станочного парка. Анализ ассортимента СОЖ [3], применяемых в металлообрабатывающей отрасли страны, показал, что при обработке резанием используются преимущественно водомасляные эмульсии, получаемые разбавлением эмульсолов водой. Это обусловлено их низкой стоимостью, простотой приготовления и высокими охлаждающими свойствами.

В последние годы активно проводятся исследования по повышению эффективности процесса резания путем модифицирования СОЖ высокодисперсными углеродными материалами (модификаторами). Такие модифицированные СОЖ, представляющие собой смеси суспензий и эмульсий, называют суспоэмульсиями. Изучением введения углеродных модификаторов в СОЖ и их последующего влияния на процессы резания в разное время занимались ученые Chen H., Manikanta Ja.E., Фомин А.А., Мышкин В.А., Фесенко А.В., Белоус В.И., Никитин В.А., Сойту Н.Ю. и др. [4-10].

Несмотря на многочисленность исследований в смежных областях металлообработки, вопросы комплексной оптимизации параметров рабочей среды практически не рассматривались. В частности, существующие работы в основном ограничиваются общими аспектами обработки металлов резанием и не учитывают совместного влияния модификации водомасляных эмульсионных СОЖ углеродными высокодисперсными материалами и изменения дисперсности их масляной фазы.

Для решения указанной научно-технической задачи ранее было экспериментально показано [11], что

модифицирование водомасляной эмульсионной СОЖ углеродными высокодисперсными материалами, а также повышение дисперсности масляной фазы приводит к снижению шероховатости обрабатываемой поверхности. При этом наблюдается выраженный синергетический эффект, обусловленный капиллярным механизмом проникновения суспоэмульсионной СОЖ в зону резания. Это предопределяет необходимость установления оптимальных параметров состава и структуры технологической среды для достижения максимальной эффективности процесса резания.

Целью данной работы является установление оптимальных значений размеров масляных капель, объемной концентрации масляной фазы и концентрации углеродных высокодисперсных материалов водомасляной эмульсионной СОЖ, а также исследование влияния указанных параметров на интенсивность износа режущего инструмента.

Основная часть

В экспериментах использовали СОЖ ТУ 100185315.001-2012, которая в исходном состоянии представляет собой 5 %-ю водную эмульсию, приготовленную на основе концентрата, содержащего отходы масложирового производства вместо обычно применяемых нефтяных масел [12]. Для измерения объемной концентрации СОЖ использовался рефрактометр «Мегеон 72024». В качестве модификаторов СОЖ использовали порошок углеродного наноматериала в виде конгломератов углеродных нанотрубок (УНТ) (синтезирован в НПП «Перспективные исследования и технологии», Республика Беларусь) и порошок технического графита (ТГ) марки ГК-2 ГОСТ 17022-81 [12].

Приготовление суспоэмульсии СОЖ выполняли в два этапа. На первом этапе на основе модификаторов формировали водные суспензии (рис. 1а), которые подвергали предварительному механическому перемешиванию с последующим ультразвуковым (УЗ) диспергированием. Второй этап заключался во введении в водную суспензию концентрата эмульсола с последующей УЗ-обработкой (рис. 1б). Для обеспечения чистоты эксперимента аналогичной УЗ-обработке подвергали базовую эмульсию СОЖ (рис. 1в), не содержащую модификаторов. Диспергирование проводили ультразвуковым диспергатором низкочастотным погружного типа по методике, аналогичной описанной ранее [12].

Размеры частиц модификаторов $d_ч$ и масляных капель $d_к$ определяли с помощью компьютерного микроскопа, который дает возможность различать структуры с расстоянием между элементами до 0,5 мкм и программного комплекса обработки и анализа изображений «AutoScanStudio» [13].

Для проведения экспериментов было приготовлено три пары образцов СОЖ, характеристика которых представлена в таблице 1.

Необходимо отметить, что фактический размер частиц модификатора в суспензии при приготовлении варьируется в диапазоне от 0,5 до 5,9 мкм.

С использованием приготовленных образцов СОЖ была выполнена серия экспериментов по точению на токарно-винторезном станке 16К20. В качестве режущего инструмента применяли проходные резцы сечением 25х16 (ГОСТ 18877-73) с пластинами, изготовленными из твердого сплава Т15К10. Обработке подвергали цилиндрические поверхности заготовок типа «вал» из стали 45 (ГОСТ 1050-2013, НВ = 170…210) диаметром d = = 40 мм и длиной l = 500 мм. Режимы обработки: глубина резания t = 1,0 мм; подача S = 0,2 мм/об; скорость резания V = 90-100 м/мин. Подача СОЖ в зону резания осуществлялась свободным поливом объемом Q = 0,1 л/мин.

Износ режущего инструмента после точения определяли по его задней поверхности. При проведении исследований через равные промежутки времени ($\Delta\tau$ = 120 с) фиксировали линейную величину фаски износа. Общая длительность лезвийной обработки составляла τ = 900 с.

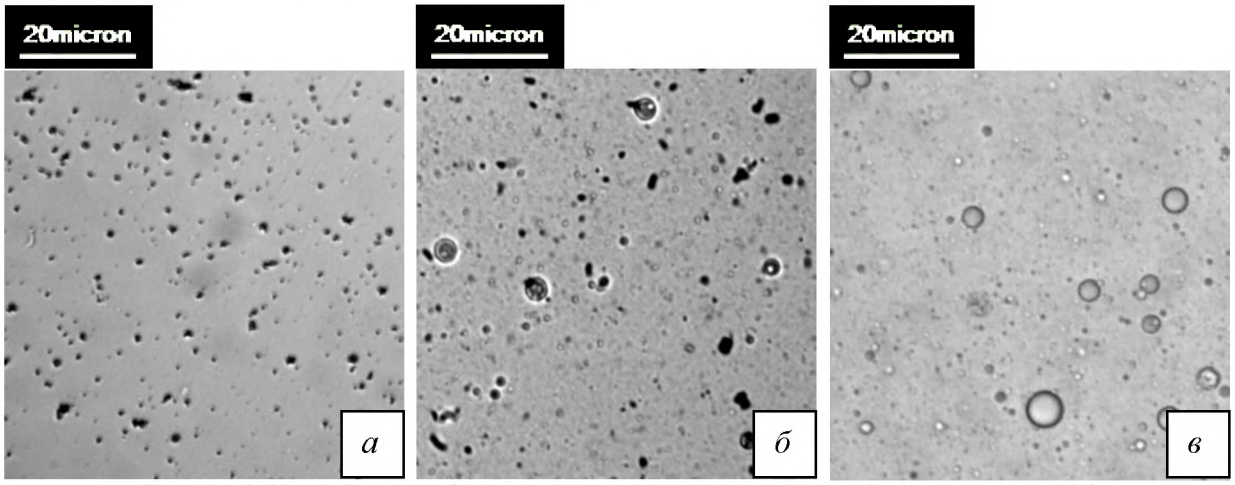


Рисунок 1. Микрофотографии суспензии после первого этапа диспергирования (а) суспоэмульсии СОЖ, полученной на втором этапе (б), и базовой эмульсии СОЖ (в), применяемых в экспериментальном исследовании

Таблица 1. Характеристика пар образцов СОЖ, применяемых в экспериментальном исследовании

№ пары	№ образца	Типы СОЖ	$d_к$, мкм	$d_ч$, мкм	$C_М$, масс, %
1	1	$СОЖ_0$	5	–	–
	2		1	–	–
2	3	$СОЖ_{УНТ}$	5	2	0,1
	4		1	2	0,1
3	5	$СОЖ_{ТГ}$	5	2	0,1
	6		1	2	0,1

Условные обозначения: $СОЖ_0$ – *эмульсия* СОЖ без добавления модификаторов (базовая); $СОЖ_{УНТ}$ – *суспоэмульсия* СОЖ с модификатором *УНТ;* $СОЖ_{ТГ}$ – *суспоэмульсия* СОЖ с модификатором *ТГ;* $d_к$ – *средний размер масляных капель дисперсной фазы в образцах* СОЖ, *мкм;* $d_ч$ – *средний размер частиц модификаторов в образцах* СОЖ, *мкм;* $C_М$ – *массовая концентрация модификаторов в образцах* СОЖ, *масс, %.*

Для каждого исследуемого образца СОЖ число повторов по обработке составило 3, а за итоговый результат принималось среднее арифметическое значение. Измерение износа по задней поверхности $h_з$ осуществляли с помощью отсчетного микроскопа МПБ-2 и контролировали цифровым USB-микроскопом DM9 с последующим программным анализом изображений фаски износа, обеспечивающим дискретность (цену деления) измерений 0,01 мм.

Степень влияния модифицирования СОЖ на износ режущего инструмента по задней поверхности оценивали следующим образом:

1) по отношению $h_{з0}/h_{зМ}$, показывающему, во сколько раз уменьшается износ за счет модифицирования СОЖ с использованием в качестве модификатора УНТ (отношение $h_{з0}/h_{зУНТ}$) или ТГ (отношение $h_{з0}/h_{зТГ}$) при заданной дисперсности масляной фазы СОЖ, т.е. при среднем диаметре масляных капель $d_к$, равном 5 мкм или 1 мкм;

2) по отношению $h_{з5}/h_{з1}$, показывающему, во сколько раз уменьшается износ после обработки модифицированной СОЖ за счет повышения дисперсности масляной фазы, т.е. при уменьшении среднего диаметра масляных капель от 5 мкм до 1 мкм.

Результаты исследования влияния модифицирования СОЖ на износ режущего инструмента при лезвийной обработке представлены в таблицах 2 и 3.

Анализ кинетики износа режущего инструмента (табл. 2) и степени влияния модифицирования СОЖ (табл. 3) показывает, что дисперсность масляной фазы оказывает определяющее влияние на стойкость резцов. Как видно из представленных данных, с уменьшением среднего размера масляных капель $d_к$ с 5 до 1 мкм величина износа по задней поверхности $h_з$ при длительности обработки τ = 900 с снижается в 1,21-1,45 раза. Данная закономерность прослеживается как для базовой эмульсии СОЖ ($СОЖ_0$), так и для суспоэмульсий, модифицированных УНТ ($СОЖ_{УНТ}$) и ТГ ($СОЖ_{ТГ}$). Вместе с тем введение высокодисперсных углеродных модификаторов обеспечивает дополнительное снижение износа резцов в 1,1-1,31 раза.

Логическим продолжением экспериментального исследования является выявление степени влияния модифицирования СОЖ углеродными высокодисперсными материалами на основании полученного уравнения регрессии. С этой целью осуществлен поиск экспериментальных зависимостей, описывающих взаимосвязи размеров масляных капель, объемной концентрации масляной фазы и концентрации углеродных высокодисперсных материалов.

Таблица 2. Полученные результаты износа по задней поверхности $h_з$ режущей пластины в зависимости от длительности обработки τ для различных образцов СОЖ

№ образца	Типы СОЖ	$d_к$, мкм	Износ по задней поверхности $h_з$, мм							
			Время обработки τ, с							
			60	180	300	420	540	660	780	900
1	$СОЖ_0$	5	0,03	0,06	0,11	0,15	0,21	0,26	0,35	0,46
2		1	0,03	0,05	0,09	0,14	0,19	0,24	0,31	0,38
3	$СОЖ_{УНТ}$	5	0,04	0,07	0,11	0,12	0,16	0,23	0,3	0,42
4		1	0,02	0,05	0,09	0,13	0,16	0,19	0,22	0,29
5	$СОЖ_{ТГ}$	5	0,04	0,06	0,1	0,13	0,16	0,21	0,28	0,39
6		1	0,03	0,05	0,08	0,12	0,14	0,17	0,22	0,31

Таблица 3. Степень влияния модифицирования СОЖ при лезвийной обработке (износ задней поверхности $h_з$ при длительности обработки τ = 900 с)

№ образца	Типы СОЖ	$d_к$, мкм	$h_з$, мм	$h_{з0}/h_{зМ}$	$h_{з5}/h_{з1}$
1	$СОЖ_0$	5	0,46	–	1,21
2		1	0,38	–	
3	$СОЖ_{УНТ}$	5	0,42	1,1	1,45
4		1	0,29	1,31	
5	$СОЖ_{ТГ}$	5	0,39	1,18	1,26
6		1	0,31	1,23	

Во-первых, это связано с объяснением известных предположений о механизмах влияния углеродных модификаторов на процессы обработки металлов резанием, рассмотренных в источниках [4-10], а также учета современных представлений о закономерностях износа режущего инструмента [11] и результатов, полученных на основе математической статистики [14, 15].

Во-вторых, проведение оптимизации продиктовано высокой стоимостью высокодисперсных углеродных материалов, что существенно снижает коммерческую привлекательность их промышленного применения. С целью уменьшения итоговой себестоимости приготовления суспоэмульсий СОЖ необходимо определить область оптимальных значений концентрации углеродных высокодисперсных материалов, вводимых в СОЖ.

Методика приготовления суспоэмульсии СОЖ и режимы резания оставались прежними, в то время как концентрация вводимого модификатора (на примере ТГ) варьировалась. Это позволило оценить комплексное влияние структурных свойств СОЖ на износ задней поверхности режущего инструмента.

Исследования совместного влияния размеров масляных капель, объемной концентрации масляной фазы и содержания углеродных высокодисперсных материалов на интенсивность износа режущего инструмента осуществлялись с использованием известных методик математического планирования эксперимента и статистической обработки данных на основе ортогонального центрального композиционного плана [14, 15].

В качестве управляющих факторов для определения оптимального сочетания структурных свойств СОЖ были взяты: X_1 – концентрация $C_М$ модификаторов в эмульсии СОЖ, масс. %; X_2 – средний размер $d_к$ масляных капель масляной фазы СОЖ, мкм; X_3 – объемная концентрация $C_{СОЖ}$ СОЖ, г/л. На основе априорных данных для проведения лезвийной обработки выбраны уровни и интервалы варьирования управляющих факторов (табл. 4).

Результаты опытов, выполненных по ортогональному центральному композиционному плану при 4-кратном дублировании, и их статистический анализ (табл. 5) позволяют утверждать, что зависимость износа от исследуемых управляющих факторов процесса лезвийной обработки адекватно описывается уравнением регрессии вида:

$$h_з = 0,348 + 0,016X_1 + 0,038X_2 - 0,047X_3 + $$

$$+0,018X_1X_2 + 0,032X_2X_3 + 0,036X_1^2 + 0,028X_2^2. \quad (1)$$

Для определения оптимальных значений управляющих факторов для достижения минимального износа режущего инструмента решена оптимизационная задача:

$$h_з\left(X_1, X_2, X_3\right) \to \min;$$

$$-1,215 \le X_1, X_2, X_3 \le 1,215. \quad (2)$$

Решение получено с помощью процедуры «Поиск решения» в программе MS Excel методом обобщенного понижающего градиента [16]. В результате найден локальный минимум $h_з$ = 0,24 мм, координаты которого приведены в таблице 6.

Для наглядной иллюстрации зависимости параметра оптимизации (износ режущего инструмента) от структурных свойств СОЖ в диапазоне варьирования управляющих факторов на рисунке 2 представлены поверхности отклика для параметра оптимизации.

Определение оптимальных диапазонов управляющих факторов для снижения износа режущего инструмента осуществлялось графическим методом путем наложения линий равного уровня параметра оптимизации. Оптимальные параметры на основании графического метода, обеспечивающие максимальное снижение износа в рамках выбранных диапазонов варьируемых факторов, представлены в таблице 7.

Особое внимание при проведении исследований представляет вопрос об увеличении концентрации модификатора в суспоэмульсии СОЖ. В таблице 8 представлены результаты подстановки кодированного фактора X_1 (концентрация модификатора $C_М$, % масс.) в полученное уравнение регрессии для определения степени влияния модификатора (на примере $СОЖ_{ТГ}$) при фиксированных значениях среднего размера масляных капель СОЖ $d_к$ = 1 мкм и концентрации масляной фазы СОЖ $C_{СОЖ}$ = 50 г/л. Выбранные значения для вышеуказанных факторов были приняты на основании ранее проведенных экспериментов первого этапа исследований, исходя из которых можно судить о максимальном снижении износа режущего инструмента.

Таблица 4. Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни варьирования факторов	Управляющие факторы		
	Концентрация модификаторов, $C_М$, % масс.	Средний размер масляных капель СОЖ $d_к$, мкм	Объемная концентрация СОЖ $C_{СОЖ}$, г/л
Кодовое обозначение факторов	X_1	X_2	X_3
Основные уровни (X_i = 0)	0,55	3	30
Интервалы варьирования	0,45	2	20
Нижние уровни (X_i = –1)	0,1	1	10
Верхние уровни (X_i = +1)	1,0	5	50
Звездные точки (X_i = –1,215)	0,03	0,6	5,7
Звездные точки (X_i = +1,215)	1,1	5,4	54

Таблица 5. План эксперимента, результаты и статистический анализ зависимости износа $h_з$, мм от структурных свойств СОЖ

№	Нормированные значения факторов			Экспериментальные и расчетные значения параметра износа $h_з$, мм и их дисперсии					
	X_1	X_2	X_3	$h_{з_1}$	$h_{з_2}$	$h_{з_3}$	$h_{з_4}$	$h_{з_{ср}}$	S^2
1	-1	-1	-1	0,47	0,44	0,47	0,56	0,49	0,0027
2	1	-1	-1	0,38	0,43	0,47	0,50	0,45	0,0027
3	-1	1	-1	0,39	0,44	0,45	0,46	0,44	0,0010
4	1	1	-1	0,43	0,49	0,45	0,51	0,47	0,0013
5	-1	-1	1	0,35	0,31	0,29	0,27	0,31	0,0012
6	1	-1	1	0,27	0,33	0,34	0,24	0,30	0,0023
7	-1	1	1	0,44	0,38	0,45	0,28	0,39	0,0061
8	1	1	1	0,51	0,41	0,52	0,34	0,45	0,0074
9	0	0	0	0,33	0,29	0,41	0,34	0,34	0,0025
10	-1,215	0	0	0,35	0,29	0,39	0,39	0,36	0,0022
11	1,215	0	0	0,42	0,46	0,47	0,52	0,47	0,0017
12	0	-1,215	0	0,34	0,31	0,27	0,33	0,31	0,0010
13	0	1,215	0	0,43	0,48	0,52	0,51	0,49	0,0016
14	0	0	-1,215	0,40	0,41	0,36	0,40	0,39	0,0005
15	0	0	1,215	0,32	0,35	0,24	0,29	0,30	0,0022

Критерий Кохрена		
	экспериментальный	0,203
	критический	0,276

Статистически значимые коэффициенты регрессии					Критерий Фишера	
	b_0	b_1	b_2	b_3	экспериментальный	расчетный
	0,348	0,016	0,038	-0,047		
	b_{12}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	2,168	2,221
	0,018	0,032	0,036	0,028		

Условные обозначения: $h_{з_1}$, $h_{з_2}$, $h_{з_3}$, $h_{з_4}$ – полученные экспериментальные значения параметра износа режущего инструмента для каждого опыта; $h_{з_{ср}}$ – выборочное среднее значение параметра износа режущего инструмента для каждого опыта; S^2 – выборочная дисперсия для каждого опыта.

Таблица 6. Координаты точки локального минимума зависимости износа $h_з$, мм от структурных свойств СОЖ

Фактор	Нормированные координаты	Натуральные координаты
Концентрация модификаторов, $C_М$	$X_1 = 0,073$	$C_М = 0,58$ масс. %
Средний размер масляных капель СОЖ, $d_к$	$X_2 = -1,215$	$d_к = 0,6$ мкм
Объемная концентрация СОЖ, $C_{СОЖ}$	$X_3 = 1,215$	$C_{СОЖ} = 54$ г/л

Как видно из таблицы 8, с увеличением концентрации модификатора с 0,03 до 0,55 масс. % износ режущего инструмента уменьшается приблизительно в 1,2 раза. Однако дальнейшее повышение концентрации модификатора с 0,55 до 1,1 масс. % приводит к снижению эффективности модифицирования СОЖ. Полученные результаты объясняются тем, что рост концентрации модификатора способствует увеличению численного количества частиц, образующих ЧЧ-кластеры (однофазные агрегаты, представляющие собой скопления соприкасающихся частиц) и КЧ-кластеры (двухфазные агрегаты, образованные совместно каплями и частицами), которые разделяются на несколько типов:

1) одна капля + одна частица;
2) несколько капель + одна частица;
3) несколько частиц + одна капля;
4) несколько капель + несколько частиц;
5) одна частица внутри капли;
6) несколько частиц внутри капли [11].

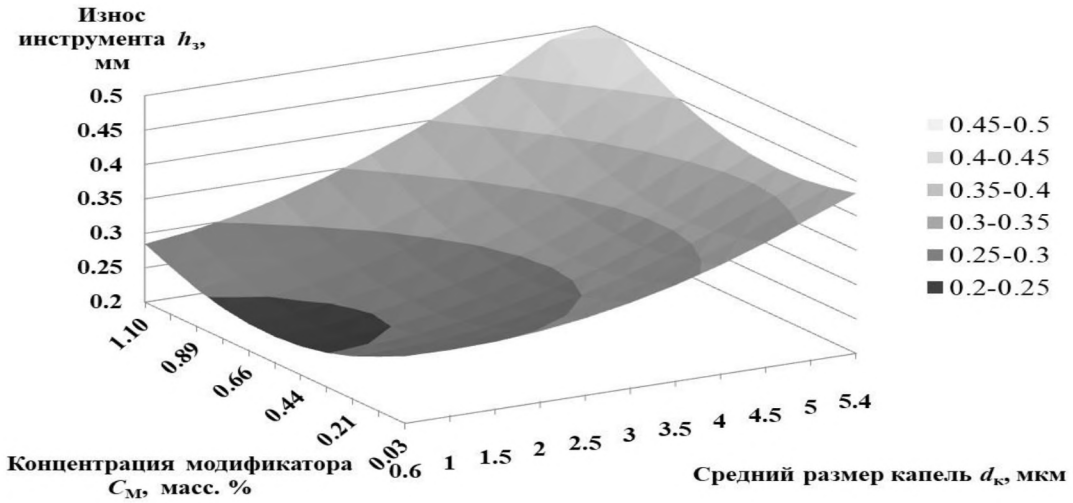
Результаты микроскопического анализа различных образцов СОЖ ($d_к$ = 1 мкм; $C_{СОЖ}$ = 50 г/л; $C_М$ = 0,03-1,1 масс. %) позволяют сделать вывод о

Таблица 7. Оптимальные диапазоны управляющих факторов

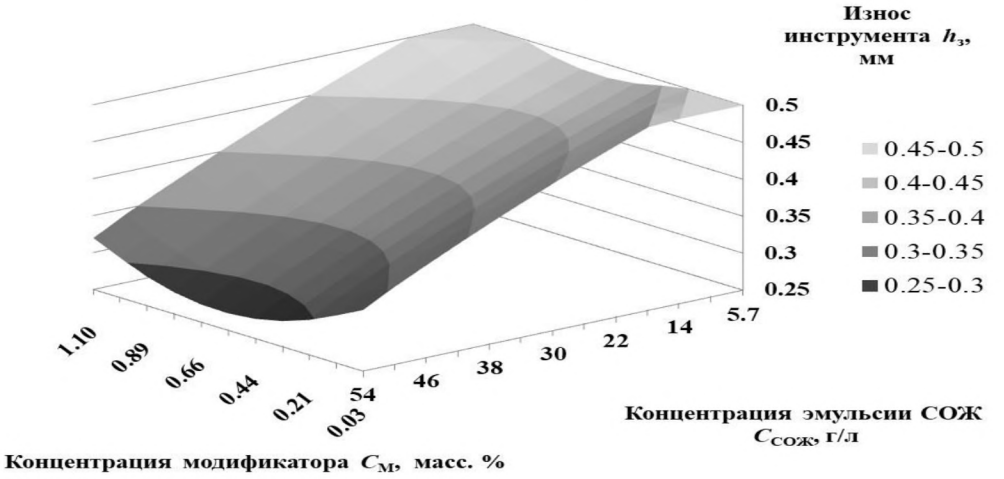
Концентрация модификатора СОЖ, масс. %	Средний размер масляных капель СОЖ, мкм	Объемная концентрация масляной фазы СОЖ, г/л
0,33-0,66	0,6-1,5	45-54

Таблица 8. Степень влияния модифицирования СОЖ при лезвийной обработке (износ задней поверхности $h_з$)

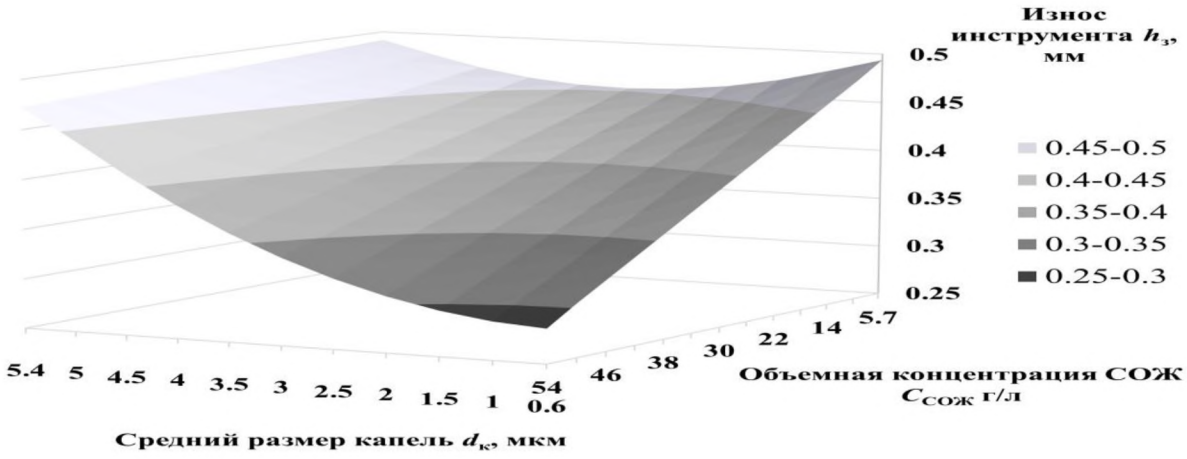
$C_М$, масс. %	$h_з$, мм	$h_{з0}/h_{зМ}$
0,03	0,360	–
0,1	0,343	1,05
0,325	0,315	1,14
0,55	0,305	1,18
0,775	0,313	1,15
1	0,340	1,06
1,1	0,357	1,01



а



б



в

Рисунок 2. Поверхности отклика для параметра оптимизации «износ режущего инструмента»: а – зависимость износа от концентрации модификатора СОЖ и среднего размера капель масла СОЖ; б – зависимость износа от концентрации модификатора СОЖ и объемной концентрации масляной фазы СОЖ; в – зависимость износа от среднего размера масляных капель СОЖ и объемной концентрации масляной фазы СОЖ

том, что с увеличением концентрации модификатора в структуре КЧ-кластеров начинают преобладать типы 3, 4 и 6, а количество ЧЧ-кластеров возрастает в несколько десятков раз. Данные изменения существенно затрудняют прохождение данных структурных формирований через сеть капилляров (микроканалов) в процессе металлообработки, а именно: затрудняют их прохождения внутрь капилляров (осуществляется блокировка канала) [11].

При анализе полученного уравнения регрессии особый интерес представляет эффект парного взаимодействия модификатора СОЖ и размера капель масла суспоэмульсии СОЖ, которое указывает на существование оптимального сочетания факторов СОЖ (X_1X_2). Это объясняется синергетическим эффектом, т.е. совместным влиянием управляющих факторов, которое в дальнейшем скажется на итоговом значении параметра износа режущего инструмента. Подстановка значений факторов в полученное уравнение позволила выявить положительный эффект при одновременном увеличении концентрации модификаторов и уменьшении размеров масляных капель СОЖ (рис. 2а).

Заключение

На основании выполненных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Введение углеродных модификаторов и повышение дисперсности масляной фазы СОЖ снижает износ режущего инструмента в 1,1-1,45 раз;

2. Рекомендованы оптимальные параметры модифицированной водомасляной эмульсионной СОЖ: размер масляных капель составляет 0,6 мкм, объемная концентрация масляной фазы – 54 г/л, а концентрация углеродных высокодисперсных материалов – 0,58 % масс. Наблюдаемое снижение интенсивности изнашивания режущего инструмента обусловлено синергетическим эффектом. Повышение дисперсности масляной фазы способствует более активному проникновению капель масла в зону резания через сеть тонких микрокапилляров, где совместно с модификаторами формируется устойчивый защитный смазочный слой, улучшающий триботехнические характеристики всей технологической системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Худобин, Л.В. Технологии и техника применения смазочно-охлаждающих жидкостей при механической обработке: учебное пособие / Л.В. Худобин, Е.М. Булыжев – Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2013. – 232 с.

2. Ящерицын, П.И. Теория резания: учебник / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – Мн.: Новое знание, 2005. – 512 с.

3. Смазочно-охлаждающие жидкости на водной основе / А.Ю. Клюев [и др.] // Химия и технология новых веществ и материалов: сборник научных трудов. – Минск: Белорусская наука, 2009. – Вып. 3. – С. 275-321.

4. Патент RU 2417253, МПК C10M 173/02. Синтетическая смазочно-охлаждающая жидкость с углеродными нанотрубками: № 2009138618/04: заявлено 19.10.2009: опубл. 27.04.2011 / заявители: Фомин А.А., Мышкин В.А.

5. Evaluation of new nano-cutting fluids for the processing of carbon fiber-reinforced composite materials / H. Chen [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 437. – P. 140771.

6. Маниканта, Д.Э. Исследование СОЖ с использованием растительного масла, усиленного добавлением наночастиц, при токарной обработке / Д.Э. Маниканта, Н. Амбхор, Г.Р. Теллапутта // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 20-33.

7. Фесенко, А.В. Повышение эффективности шлифования за счет использования новых технологий приготовления смазочно-охлаждающих жидкостей / А.В. Фесенко, М.С. Степанов, Ю.Н. Любимый // Вестник СумГУ. Сер. «Техн. науки». – 2012. – № 2. – С. 123-127.

8. Белоус, В.И. Модифицирование смазочно-охлаждающих жидкостей при шлифовании труднообрабатываемых материалов / В.И. Белоус // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7. – С. 66-70.

9. Повышение износостойкости триботехнических узлов технологической системы при использовании наноструктурированных СОТС / В.А. Никитин [и др.] // Инструмент и технологии. – 2008. – № 25. – С. 146-150.

10. Сойту, Н.Ю. Повышение эффективности процессов сверления конструкционных материалов за счет наноструктурированных фуллеренсодержащих смазочно-охлаждающих технологических сред: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / Наталья Юрьевна Сойту; Саратовский гос. технический ун-т. – Саратов, 2010. – 231 с.

11. Толочко, Н.К. Капиллярный механизм проникновения суспоэмульсионной СОЖ в зону резания / Н.К. Толочко, К.Л. Сергеев // Технология машиностроения. – 2023. – № 5. – С. 16-22.

12. Толочко, Н.К. Влияние дисперсности эмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости на эффективность магнитно-абразивной обработки / Н.К. Толочко, К.Л. Сергеев // Технология машиностроения. – 2014. – № 10. – С. 31-35.

13. AutoScan: программный комплекс обработки и анализа изображений. – ЗАО «Спектроскопические системы», 2009. – PDF-документ (7,45 МБ).

14. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учеб. пособие / Н.А. Спирин [и др.]; под общ. ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. – 290 с.

15. Леонов, А.Н. Основы научных исследований и моделирования: учеб.-метод. комплекс для студентов вузов, обучающихся по группе специальностей 74 06 (Агроинженерия) / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.Б. Ловкис. – Минск: БГАТУ, 2010. – 276 с.

16. Любимцев, О.В. Практикум по дисциплине «Экономико-математические модели и методы»: учеб.-метод. пособие / О.В. Любимцев; Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2016. – 52 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 13.07.2026