

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПУТЕМ РАЦИОНАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ РАЗМЕРА МАСЛЯНЫХ КАПЕЛЬ И ОБЪЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

К.Л. Сергеев,

ст. преподаватель каф. механики материалов и деталей машин БГАТУ

М.М. Дечко,

инженер ОАО «ЛМЗ Универсал», канд. техн. наук, доцент

В статье определены рациональные сочетания размеров масляных капель и объемной концентрации дисперсной фазы водомасляной эмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости для достижения высоких показателей производительности обработки и качества обработанной поверхности. Даны рекомендации по выбору оптимальных значений для вышеуказанных факторов при осуществлении процесса магнитно-абразивной обработки.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, смазочно-охлаждающая жидкость, производительность обработки, качество обработанной поверхности, дисперсность, кавитация.

A rational combination of oil droplets sizes and the volume concentration of the dispersed phase of the water-oil emulsion cutting fluid was determined to achieve high processing performance and the quality of the treated surface. Recommendations are given on selection of optimal values for the above factors during magnetic abrasive treatment.

Key words: magnetic-abrasive machining, lubricating-cooling liquid, processing efficiency, quality of treated surface, dispersion, cavitation.

Введение

Одним из перспективных методов финишной обработки поверхностей деталей является магнитно-абразивная обработка (МАО), которая обеспечивает качественную обработку поверхностей и обладает высокой производительностью [1]. Сущность МАО состоит в том, что ферроабразивный порошок (ФАП), уплотненный энергией магнитного поля, оказывает абразивное воздействие на обрабатываемую поверхность. Действие ФАП в процессе резания на поверхность обрабатываемой детали в значительной степени усиливается при введении в рабочий зазор смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), которая обладает высокими диспергирующими, охлаждающими, моющими и смазывающими действиями.

В настоящее время для процесса МАО наиболее распространены водомасляные эмульсионные СОЖ, которые представляют собой грубодисперсные смеси нерастворимых фаз (эмульсии), получаемые при смешивании концентрата с водой [1-3]. В качестве примеров таких СОЖ можно привести эмульсии на основе эмульсолов ЭТ, ЭГТ, Э-2 [4]. Однако в последние годы наблюдается рост использования для МАО полусинтетических и синтетических СОЖ (Аквал-1, СинМА-1, СинМА-2), которые в своей осно-

ве содержат поверхностно-активные вещества и синтетические жирные кислоты, при этом ограничивая содержание нефтяных компонентов [5]. Недостатком данных СОЖ является высокая стоимость компонентов, что негативно сказывается на конкурентоспособности изделий, обработанных методом МАО. К альтернативе вышеуказанных технологических жидкостей можно отнести концентрат СОЖ [6], который содержит вместо нефтяного сырья отходы масложирового производства (соапстоки растительных масел, масленичный фуз, первичные жировые гудроны, смеси различных отходов, глицериды жирных кислот). Очевидное преимущество данной СОЖ заключается в 100 %-й биоразлагаемости, а важным аспектом при производстве такого рода СОЖ является использование отечественного сырья, так как Республика Беларусь обладает развитым аграрным сектором. Высокий промышленный потенциал является предпосылкой для востребованности новых составов СОЖ при производстве деталей для агропромышленного комплекса страны.

Дисперсность – основная коллоидно-химическая характеристика эмульсий СОЖ. В источнике [6] экспериментально исследовано и рассмотрено влияние дисперсности водомасляной эмульсионной СОЖ на эффективность МАО. Установлено, что степень диспергирования СОЖ влияет на диспергирующие и

моющие действия, что способствует повышению эффективности МАО. Усиление диспергирующего действия СОЖ с повышением ее дисперсности обусловлено более активным проникновением масляной фазы эмульсии в микротрещины металла в зоне резания, а моющего действия – более активным обволакиванием частиц шлама масляной фазой, что облегчает их последующее удаление из зоны обработки. Отмечено, что использование СОЖ с повышенной дисперсностью способствует увеличению интенсивности и улучшению качества обработки.

Изучению влияния дисперсности СОЖ на эффективность различных методов металлообработки посвящены работы Н.Е. Есиповой, В.В. Маркова, А.В. Годлевского, Е.В. Киселевой и других.

Целью настоящей работы является установление рациональных сочетаний размера R_{cp} масляных капель и объемной концентрации $C_{COЖ}$ масляной фазы СОЖ, при которых обеспечивается повышение производительности обработки и качества обработанной поверхности.

Для реализации поставленной цели исследования принят процесс МАО, при котором наиболее проявляется взаимодействие технологических режимов данного процесса и технических характеристик СОЖ.

Основная часть

Для проведения исследований была выбрана СОЖ, которая ранее использовалась при проведении экспериментов, описанных в источнике [6]. Эксперименты проводились на установке, оснащенной специальной наладкой и полюсными наконечниками, созданной на базе токарного станка ТВ-4. Обрабатывались детали типа «втулка» размером $D \times d \times l = 25 \times 16 \times 66$ мм. В качестве материала деталей использовалась сталь 45 (ГОСТ 1050–88, HB = 170...210), исходная шероховатость поверхности – $Ra_0 \approx 1,3$ мкм.

Режимы процесса МАО: величина магнитной индукции – $B = 0,8$ Тл; скорость вращения детали – $V_p = 40$ м/мин; величина рабочего зазора – $\delta = 2$ мм. В качестве ФАП применялся Ж15КТ ТУ 6-09-03-483-81, зернистость которого составляла $\Delta = 0,2...0,315$ мм; расход СОЖ – $V_{COЖ} = 0,15...0,25$ л/мин.

Диспергирование исследуемых образцов эмульсии СОЖ осуществляли с помощью ультразвукового (УЗ) диспергатора погружного типа УДНЧ (БГУИР, Беларусь). С целью получения изображений капель дисперсной фазы СОЖ применялся компьютерный микроскоп (ЧНПУП «Спектравтоматкомплекс», Беларусь). Для изучения структурных особенностей исследуемой СОЖ использовался программный комплекс обработки и анализа изображений *AutoScan Studio 3.0* (ЗАО «Спектроскопические системы», Беларусь). Измерения объемной концентрации свежеприготовленной эмульсии СОЖ осуществляли при помощи рефрактометра Мегеон 72024.

В работе [7] рассматривался вопрос динамики изменения геометрических параметров масляной фа-

зы СОЖ после УЗ. Выходным показателем агрегативной устойчивости эмульсий СОЖ являлся достигаемый средний размер масляных капель после УЗ диспергирования (R_{cp1} , мкм). Эффективность стойкости эмульсии СОЖ после выдержки оценивали по отношению:

$$R_{cp0}/R_{cp1},$$

где R_{cp0} – средний размер масляных капель СОЖ до УЗ диспергирования, мкм.

Процесс МАО осуществляли после приготовления СОЖ. Эффективность стойкости эмульсии СОЖ составила 0,991. Следовательно, размер масляных капель СОЖ существенно не изменился и не оказал влияния на итоговый результат по определению качества обработанной поверхности и производительности процесса МАО.

Производительность процесса МАО можно оценивать по массе или величине толщины снятого в единицу времени с обрабатываемой поверхности материала. Для определения массового съема при МАО использовались лабораторные весы ВК-1500 (ГОСТ 24104-2001). Величину съема металла при МАО определяли как разность массы до и после обработки втулок

$$\Delta G = G_1 - G_2, \text{ мг.}$$

В дальнейшем производительность процесса МАО оценивали величиной съема металла с единицы площади в единицу времени

$$\Delta G_{уд} = \frac{\Delta G}{St},$$

где $\Delta G_{уд}$ – удельный съем, мг/(см² · мин);

S – площадь поверхности образца, см²;

t – время обработки, мин.

Качество поверхности оценивалось измерением параметров шероховатости в соответствии с ГОСТ 2789–73. Шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra определяли с помощью цифрового измерителя шероховатости поверхности TR-200.

Исследования процесса МАО выполнялись с использованием известных методик математического планирования эксперимента и статистической обработки данных на основе ортогонального центрального композиционного плана [8–10]. Для оценки воспроизводимости эксперименты с вариацией каждого образца исследуемой СОЖ повторяли три раза.

Перед проведением МАО для исследуемого состава СОЖ осуществляли процесс диспергирования. Образец СОЖ объемом 150 мл заливали в стеклянный стакан (внутренний диаметр – 58 мм; высота – 80 мм). УЗ обработку осуществляли при частоте 22 кГц и выходной мощности генератора 40 Вт в несколько этапов (с перерывами в 1–2 мин.) общей длительностью 15–20 минут, в зависимости от объемной концентрации $C_{COЖ}$ масляной фазы СОЖ. До УЗ обработки средний размер масляных капель R_{cp} составлял 5 мкм, после УЗ обработки – 3 и 1 мкм (рис. 1).

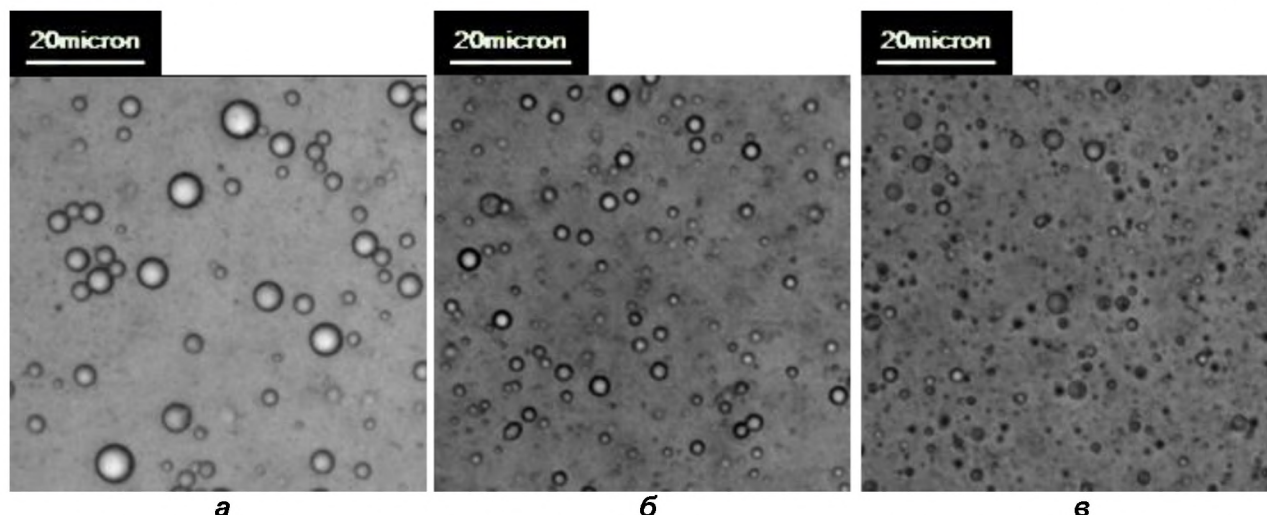


Рисунок 1. Пример типичного вида масляных капель дисперсной фазы исследуемой СОЖ: а – $R_{cp} = 5$ мкм (до УЗ обработки); б – $R_{cp} = 3$ мкм; в – $R_{cp} = 1$ мкм (после УЗ обработки)
Объемная концентрация $C_{COЖ}$ масляной фазы = 30 г/л

Диапазон максимальных и минимальных размеров масляных капель эмульсии СОЖ: для $R_{cp} = 5$ мкм – от 1,8 до 9,7 мкм; для $R_{cp} = 3$ мкм – от 0,9 до 5,2 мкм; для $R_{cp} = 1$ мкм – от 0,6 до 2,1 мкм.

В качестве управляющих факторов для процесса MAO были взяты: X_1 – объемная концентрация $C_{COЖ}$ масляной фазы СОЖ, г/л; X_2 – средний размер R_{cp} масляных капель СОЖ, мкм; X_3 – время t MAO, с. На основе априорных данных выбраны уровни и интервалы варьирования факторов для MAO (табл. 1).

Результаты опытов, выполненных по ортогональному центральному композиционному плану при 3-кратном дублировании, и их статистический анализ представлены в таблице 2.

Зависимость шероховатости от исследуемых управляющих факторов процесса MAO адекватно описывается уравнением регрессии вида:

$$Ra = 0,620 - 0,108X_1 + 0,085X_2 - 0,038X_3 + 0,058X_1X_2 + 0,115X_1^2 + 0,068X_2^2 - 0,085X_3^2. \quad (1)$$

Значения коэффициентов регрессии показывают, что наибольшее влияние на изменение шероховато-

сти оказывает объемная концентрация $C_{COЖ}$ масляной фазы (коэффициент регрессии 0,108), далее – средний размер R_{cp} масляных капель (коэффициент регрессии 0,085) и наименьшее влияние оказывает время t MAO (коэффициент регрессии 0,038). Совместное влияние объемной концентрации и размеров масляных капель ее дисперсной фазы указывает на существование рационального сочетания факторов СОЖ, а знаки при квадратичных эффектах – на наличие минимума параметра Ra по двум факторам (объемная концентрация масляной фазы СОЖ и размер масляных капель ее дисперсной фазы).

Координаты минимума определим из условия равенства нулю градиента функции (1) по X_1 и X_2 , продифференцировав ее по этим переменным:

$$\nabla Ra(X_1, X_2) = \begin{pmatrix} 0,230X_1 + 0,058X_2 - 0,108 \\ 0,058X_1 + 0,136X_2 + 0,085 \end{pmatrix} = 0, \quad (2)$$

откуда $X_1 = 0,703$; $X_2 = -0,925$ или в натуральных координатах: $C_{COЖ} = 44$ г/л; $R_{cp} = 1,15$ мкм.

Время обработки оказывает независимое от факторов СОЖ влияние на шероховатость. Как видно из

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни варьирования факторов	Варьируемые факторы		
	Объемная концентрация $C_{COЖ}$ масляной фазы СОЖ, г/л	Средний размер R_{cp} масляных капель СОЖ, мкм	Время t MAO, с
Кодовое обозначение факторов	X_1	X_2	X_3
Основные уровни ($X_i = 0$)	30	3	90
Интервалы варьирования	20	2	30
Нижние уровни ($X_i = -1$)	10	1	60
Верхние уровни ($X_i = +1$)	50	5	120
Звездные точки ($X_i = -1,2154$)	5,7	0,6	53,5
Звездные точки ($X_i = +1,2154$)	54	5,4	126,5

Таблица 2. План эксперимента, результаты и статистический анализ зависимости шероховатости поверхности (Ra , мкм) от свойств СОЖ

№	Нормированные значения факторов			Экспериментальные и расчетные значения параметра шероховатости Ra , мкм и их дисперсии						
	X_1	X_2	X_3	Ra_1	Ra_2	Ra_3	Ra_{cp}	S^2	Ra_p	S_R^2
1	1	1	1	0,77	0,73	0,65	0,72	0,004	0,72	0,00000
2	1	1	-1	0,67	0,69	0,78	0,71	0,003	0,79	0,00595
3	1	-1	1	0,42	0,38	0,44	0,41	0,001	0,43	0,00027
4	1	-1	-1	0,55	0,43	0,39	0,46	0,007	0,51	0,00238
5	-1	1	1	0,88	0,69	0,80	0,79	0,009	0,82	0,00060
6	-1	1	-1	0,97	0,89	0,95	0,94	0,002	0,89	0,00218
7	-1	-1	1	0,57	0,90	0,83	0,77	0,030	0,76	0,00005
8	-1	-1	-1	0,92	0,76	0,90	0,86	0,008	0,84	0,00063
9	0	0	0	0,54	0,67	0,38	0,53	0,021	0,62	0,00792
10	-1,215	0	0	0,87	0,86	0,87	0,87	0,000	0,92	0,00262
11	1,215	0	0	0,74	0,78	0,78	0,77	0,001	0,66	0,01200
12	0	-1,215	0	0,59	0,65	0,67	0,64	0,002	0,62	0,00044
13	0	1,215	0	0,78	0,97	0,83	0,86	0,010	0,82	0,00141
14	0	0	-1,215	0,67	0,48	0,59	0,58	0,009	0,54	0,00147
15	0	0	1,215	0,44	0,54	0,43	0,47	0,004	0,45	0,00040
Критерий Кохрена	экспериментальный			0,276		Дисперсия воспроизводимости				0,0073
	критический			0,335		Дисперсия адекватности				0,0170
Статистически значимые коэффициенты регрессии	b_0		b_1	b_2	b_3	Критерий Фишера				
	0,620		-0,108	0,085	-0,038	экспериментальный		расчетный		
	b_{12}		b_{11}	b_{22}	b_{33}	2,324		2,334		
	0,058		0,115	0,068	-0,085					
Ra_1, Ra_2, Ra_3 – полученные экспериментальные значения параметра шероховатости для каждого опыта; Ra_{cp} – выборочное среднее значение параметра шероховатости для каждого опыта; S^2 – выборочная дисперсия для каждого опыта; Ra_p – расчетное значение параметра шероховатости для каждого опыта; S_R^2 – квадрат разности экспериментальных и расчетных значений параметра шероховатости для каждого опыта.										

графика на рисунке 2, увеличение времени обработки, согласно полученному регрессионному уравнению, вначале ведет к возрастанию шероховатости, а затем к ее снижению. Однако расчет доверительных интервалов для расчетных значений шероховатости показывает, что это возрастание находится в пределах статистической ошибки, поэтому реальная зависимость может быть такой, как показано штриховой линией на рисунке 2.

Согласно рисунку 2, установлено, что в пределах исследуемого диапазона при увеличении длительности обработки, шероховатость поверхности уменьшается. Это объясняется тем, что за определенное время MAO по своей полирующей способности достигает максимальной интенсивности относительно шероховатости для применяемого типа ФАП и условий обработки.

Экстраполяция зависимости шероховатости Ra от времени t MAO за область варьирования фактора в данном эксперименте (рис. 3) позволяет предположить дальнейшее ее снижение при увеличении времени обработки, что требует дополнительной экспериментальной проверки.

Особое внимание следует уделить анализу полученного уравнения регрессии с учетом совместного влияния объемной концентрации СОЖ и размеров масляных капель ее дисперсной фазы, которое указывает на существование рационального сочетания фак-

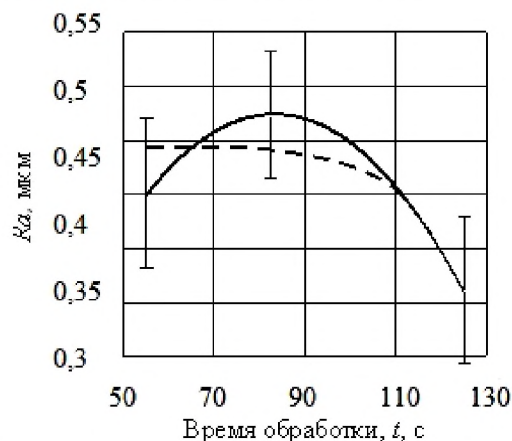


Рисунок 2. Зависимость шероховатости Ra от времени t MAO при объемной концентрации $C_{COЖ} = 44$ г/л и среднем размере масляных капель дисперсной фазы СОЖ $R_{cp} = 1,15$ мкм

торов СОЖ. Возможная причина этого заключается в синергетическом эффекте, т.е. совместном влиянии варьируемых факторов, которое в дальнейшем положительно скажется на итоговом значении параметра шероховатости (по результатам анализа уравнения регрессии выявлено снижение шероховатости R_a при увеличении объемной концентрации масляной фазы СОЖ при уменьшении размеров масляных капель).

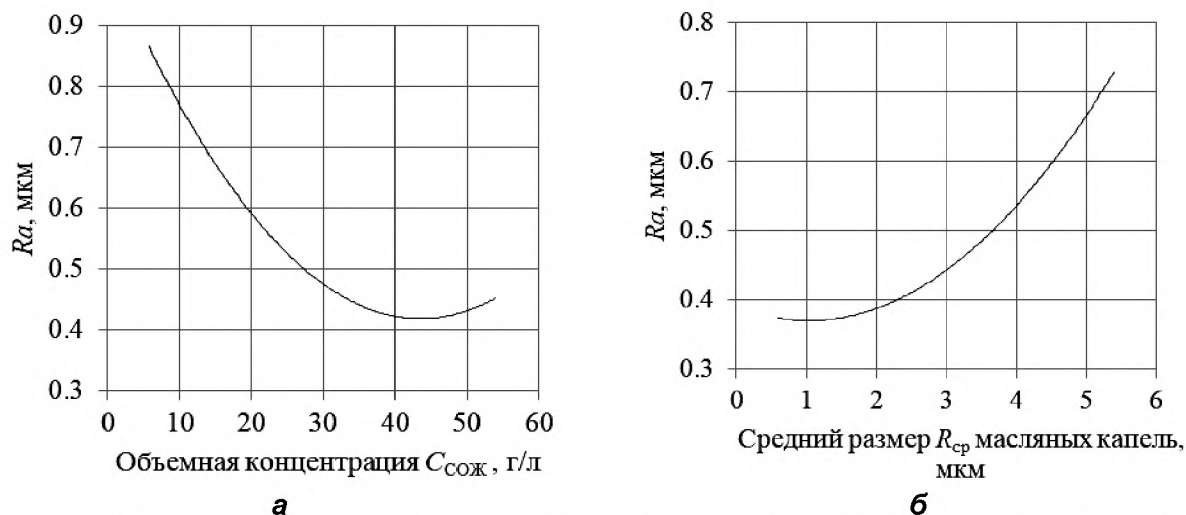


Рисунок 3. Зависимость шероховатости Ra от объемной концентрации $C_{\text{СОЖ}}$ масляной фазы при среднем размере масляных капель дисперсной фазы СОЖ $R_{\text{ср}} = 1$ мкм и времени МАО $t = 126$ с (а) и среднего размера $R_{\text{ср}}$ масляных капель дисперсной фазы СОЖ при объемной концентрации $C_{\text{СОЖ}}$ масляной фазы = 50 г/л и времени МАО $t = 126$ с (б)

На наличие глобального минимума параметра Ra (единственная точка, при которой значение шероховатости минимально на всей области определения) указывают знаки при квадратичных эффектах (знак «минус» – наличие глобального максимума, «плюс» – глобального минимума), где наибольшее влияние оказывает средний размер масляных капель, уменьшение которого продуктивно повлияет на параметр Ra .

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что увеличение объемной концентрации масляной фазы СОЖ и уменьшение размеров масляных капель дисперсной фазы СОЖ приводит к снижению шероховатости (рис. 3). В источнике [6] подробно рассмотрены происходящие изменения, возникающие при увеличении объ-

емной концентрации масляной фазы СОЖ и уменьшении размеров масляных капель в характере влияния СОЖ на процесс МАО, которые были вызваны соответствующими изменениями физико-химических свойств СОЖ.

После обработки полученных результатов определено, что минимальное значение шероховатости достигается при времени МАО, которое составило: $t = 126$ с. При этом влияние свойств СОЖ на шероховатость показывает (рис. 4), что ее минимум достигается при объемной концентрации масляной фазы $C_{\text{СОЖ}} = 40 \dots 45$ г/л и среднем размере масляных капель $R_{\text{ср}} = 1 \dots 2$ мкм.

На рисунке 5 представлены профилограммы поверхностей до и после МАО при использовании исследованной СОЖ с различными размерами масля-

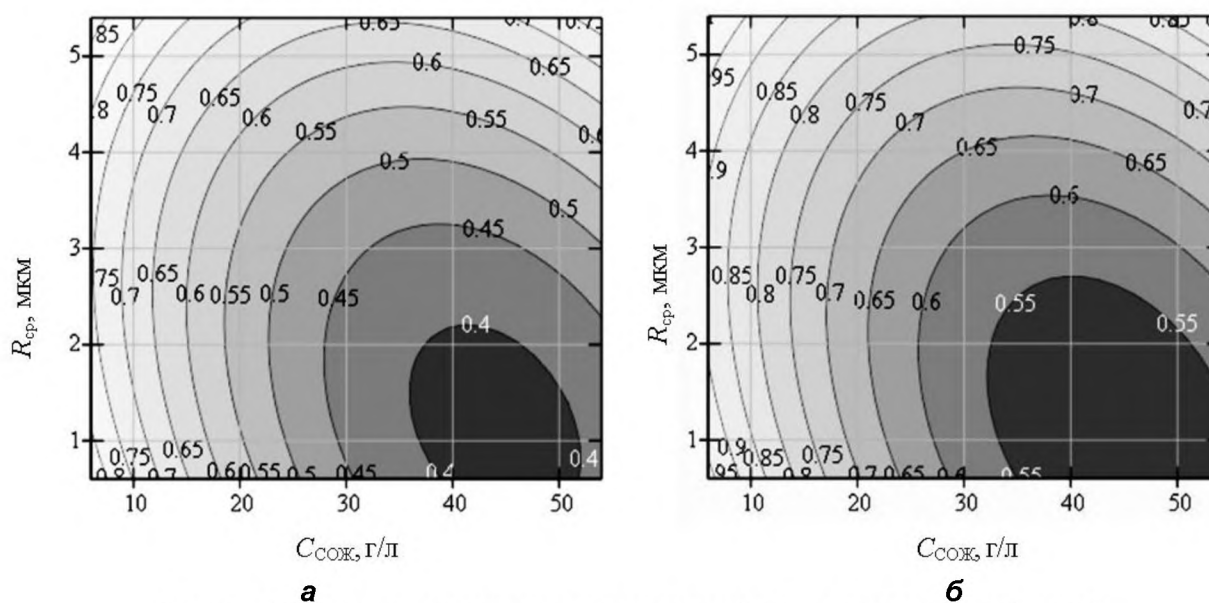


Рисунок 4. Уровни шероховатости по параметру Ra в зависимости от объемной концентрации $C_{\text{СОЖ}}$ масляной фазы и среднего размера $R_{\text{ср}}$ капель при времени МАО $t = 126$ с (а) и $t = 55$ с (б)

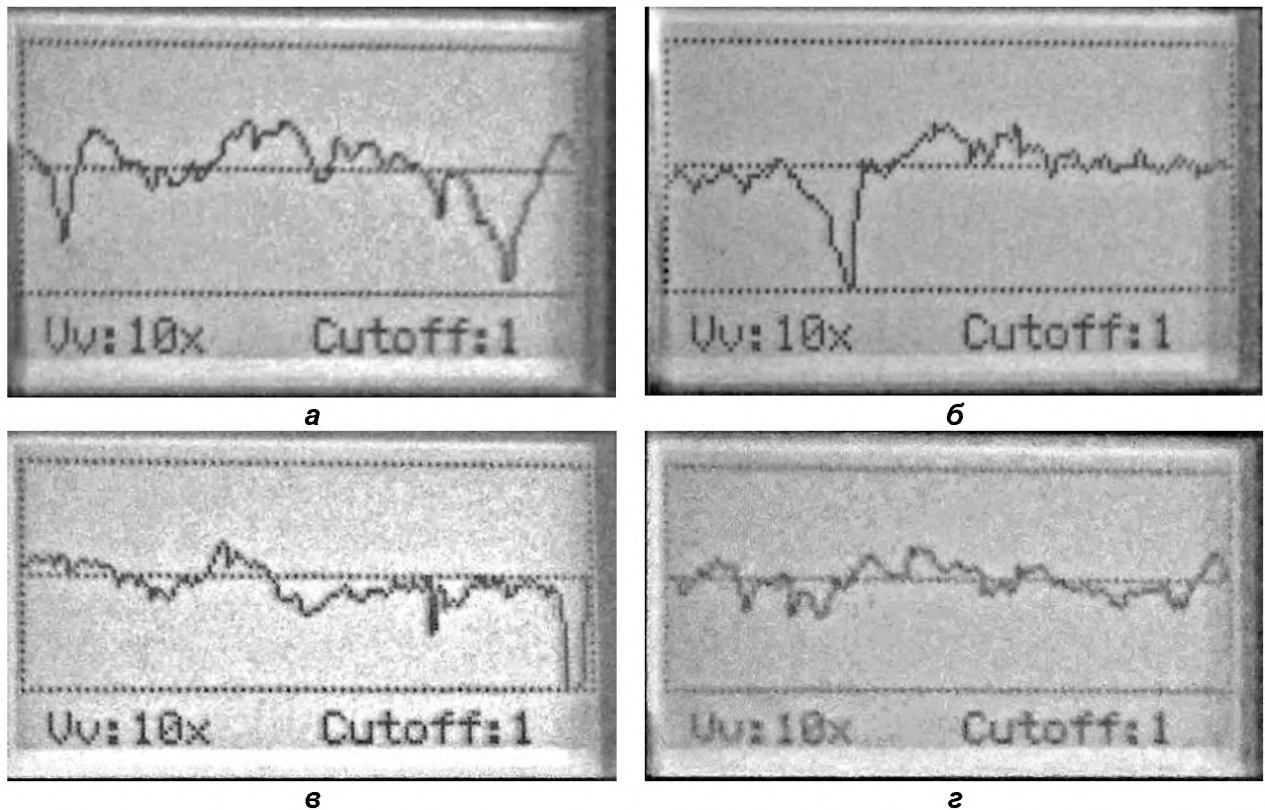


Рисунок 5. Профилограммы обработанной поверхности при MAO с использованием СОЖ с объемной концентрацией масляной фазы $C_{\text{СОЖ}} = 50$ г/л: до MAO (а); после MAO – $R_{\text{cp}} = 5$ мкм (б); $R_{\text{cp}} = 3$ мкм (в); $R_{\text{cp}} = 1$ мкм (г)

ных каплей ее дисперсной фазы для значений объемной концентрации масляной фазы $C_{\text{СОЖ}} = 50$ г/л и среднего размера масляных каплей $R_{\text{cp}} = 1$ мкм.

Результаты экспериментов по изучению влияния исследуемых управляющих факторов процесса MAO на производительность обработки (табл. 3) показали, что зависимость удельного съема металла может быть описана регрессионным уравнением вида

$$\begin{aligned} \Delta G_{\text{уд}} = & 2,24 + 0,94X_1 - 0,18X_2 - 0,38X_3 - \\ & - 0,21X_1X_2 - 0,32X_1X_3 - 0,65X_1^2 + \\ & + 0,52X_2^2 - 0,28X_3^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Значения коэффициентов регрессии показывают, что наибольшее влияние на удельный сьем $\Delta G_{\text{уд}}$, как и на шероховатость поверхности Ra , оказывает объемная концентрация $C_{\text{СОЖ}}$ масляной фазы (коэффициент регрессии 0,94), далее – время t MAO (коэффициент регрессии 0,38) и наименьшее влияние оказывает средний размер R_{cp} масляных каплей (коэффициент регрессии 0,18). Для удельного съема существенно не только совместное влияние объемной концентрации СОЖ и размеров масляных каплей ее дисперсной фазы, но и совместное влияние объемной концентрации СОЖ и времени MAO. Статистически значимы также квадратичные эффекты факторов. Отрицательные

значения коэффициентов регрессии при квадратичных эффектах объемной концентрации масляной фазы и времени обработки указывают на наличие максимума производительности в координатах этих факторов.

Координаты максимума определим из условия равенства нулю градиента функции (3) по X_1 и X_3 :

$$\begin{aligned} \nabla \Delta G(X_1, X_3) = \\ = \begin{pmatrix} 0,939 - 1,298X_1 - 0,211X_2 - 0,316X_3; \\ -0,381 - 0,316X_1 - 0,566X_3 \end{pmatrix} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Решая полученную систему уравнений относительно X_1 и X_3 , получим:

$$\Delta G_{\text{max}} = 2,964 - 0,393X_2 + 0,539X_2^2. \quad (5)$$

Из уравнения следует, что наибольшая производительность MAO достигается при наименьших размерах каплей $X_2 = -1,2154$. Подставив это значение в выражение (4) и решив полученную систему уравнений, найдем оптимальные значения факторов $X_1 = 1,256$ и $X_3 = -1,246$. Так как полученные значения факторов в нормированных координатах лежат за исследованной экспериментально областью, то для достижения максимальной производительности следует рекомендовать максимальное значение объемной концентрации масляной фазы $C_{\text{СОЖ}} = 54$ г/л и минимальное время обработки $t = 53$ с.

Таблица 3. План эксперимента, результаты и статистический анализ зависимости удельного съема $\Delta G_{уд}$, мг/(см²·мин) процесса МАО от свойств СОЖ

№	Нормированные значения факторов			Экспериментальные и расчетные значения параметра $\Delta G_{уд}$, мг/(см ² ·мин) и их дисперсии							
	X_1	X_2	X_3	$\Delta G_{уд1}$	$\Delta G_{уд2}$	$\Delta G_{уд3}$	$\Delta G_{удср}$	S^2	$\Delta G_{удр}$	S^2_R	
1	1	1	1	1,54	1,64	2,03	1,74	0,067	1,69	0,003	
2	1	1	-1	3,09	3,47	3,30	3,29	0,036	3,08	0,045	
3	1	-1	1	1,93	2,80	2,61	2,45	0,209	2,46	0,000	
4	1	-1	-1	3,54	4,82	4,05	4,14	0,415	3,85	0,082	
5	-1	1	1	0,67	0,48	0,87	0,67	0,038	0,86	0,037	
6	-1	1	-1	1,54	0,58	0,58	0,90	0,307	0,99	0,008	
7	-1	-1	1	0,39	0,48	0,58	0,48	0,009	0,79	0,097	
8	-1	-1	-1	0,58	0,77	1,54	0,96	0,258	0,92	0,002	
9	0	0	0	1,93	2,19	2,57	2,23	0,104	2,24	0,000	
10	-1,215	0	0	0,39	0,77	0,65	0,60	0,038	0,14	0,208	
11	1,215	0	0	2,06	2,19	1,69	1,98	0,067	2,43	0,200	
12	0	-1,215	0	2,32	3,86	3,47	3,22	0,646	3,22	0,000	
13	0	1,215	0	3,47	2,90	2,06	2,81	0,503	2,80	0,000	
14	0	0	-1,215	1,93	2,33	1,49	1,92	0,177	2,29	0,135	
15	0	0	1,215	1,76	2,04	1,40	1,74	0,102	1,36	0,142	
Критерий Кохрена		экспериментальный			0,217		Дисперсия воспроизводимости			0,199	
		критический			0,335		Дисперсия адекватности			0,480	
Статистически значимые коэффициенты регрессии		b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	Критерий Фишера				
		2,24	0,94	-0,18	-0,38	-0,21	экспериментальный		расчетный		
		b_{13}	b_{11}	b_{22}	b_{33}		2,410		2,421		
		-0,32	-0,65	0,52	-0,28						
$\Delta G_{уд1}$, $\Delta G_{уд2}$, $\Delta G_{уд3}$ – полученные экспериментальные значения удельного съема для каждого опыта; $\Delta G_{удср}$ – выборочное среднее значение удельного съема для каждого опыта; S^2 – выборочная дисперсия для каждого опыта; $\Delta G_{удр}$ – расчетное значение удельного съема для каждого опыта; S^2_R – квадрат разности экспериментальных и расчетных значений удельного съема для каждого опыта.											

На рисунке 6 показаны максимальные значения производительности в зависимости от времени обработки при оптимальном размере масляных капель СОЖ и времени обработки.

Влияние свойств СОЖ (рис. 7б) на удельный съем показывает, что с ростом объемной концентрации масляной фазы до 35 г/л производительность процесса возрастает в 3...5 раз, а дальнейшее увеличение объемной концентрации масляной фазы на этот параметр существенно не влияет. Размер капель влияет на удельный съем менее интенсивно, но имеет оптимум, который по мере возрастания объемной концентрации смещается с 3 мкм до 1 мкм. Объяснить это можно тем, что увеличение объемной концентрации масляной фазы приводит к повышению вязкости, что, в свою очередь, приводит к большей вероятности заклинивания отверстий пор на режущем контуре ферроабразивной «щетки» каплями масла, через которые не смогут проникать последующие капли такого же размера или меньше. Постепенно на поверхности ФАП будет создаваться плотный слой (корка), который не даст режущим кромок ФАП продолжать дальнейшее удаление металла в том количестве, которое осуществлялось ранее, до образования данного слоя на поверхности ФАП [11]. В дальнейшем увеличение объемной концентрации до 35 г/л приводит к снижению подвижности и умень-

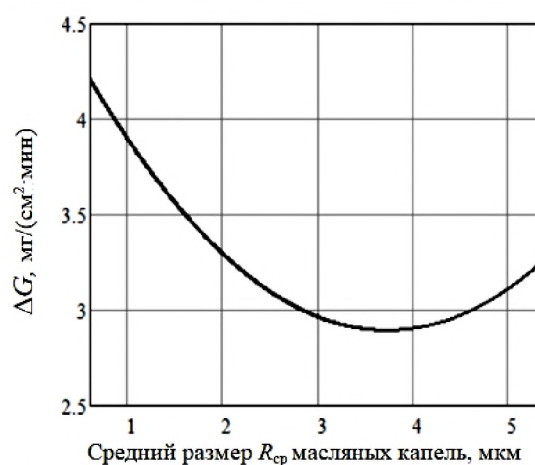


Рисунок 6. Зависимость максимальной производительности $\Delta G_{уд}$ от размеров капель при объемной концентрации масляной фазы $C_{сож} = 54$ г/л и времени обработки $t = 53$ с

шению самозатачивания ферроабразивного зерна, что сказывается на его работе в процессе обработки (изменяется диапазон угла наклона зерен). Все это приводит к уменьшению удельного съема металла. Различность же масляных капель дисперсной фазы связана с проникновением в горло поры ФАП, то есть чем меньше размер капли дисперсной фазы, тем больше вероятность попадания в данную область [5].

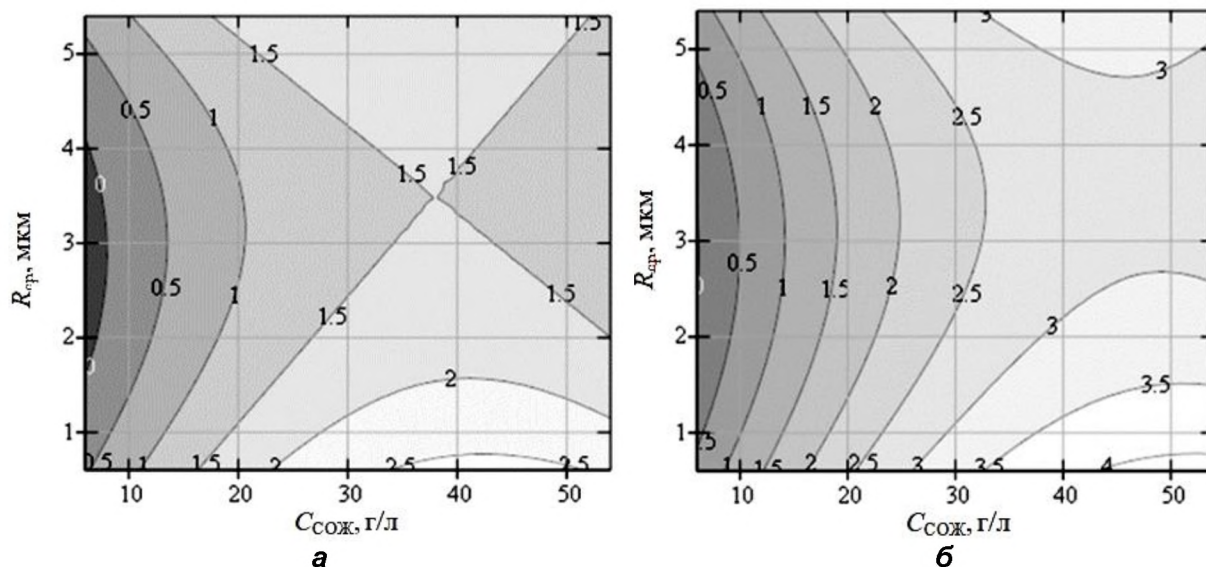


Рисунок 7. Уровни производительности МАО в зависимости от объемной концентрации $C_{сож}$ масляной фазы и среднего размера $R_{ср}$ масляных капель при времени МАО $t = 126$ с (а) и $t = 55$ с (б)

Полученные значения удельного съема и шероховатости разнятся с экспериментальными значениями, которые были представлены в работе [6]. Если сравнивать значения шероховатости Ra , то полученные значения будут больше в 1,9-3,0 раза, а по удельному съему $\Delta G_{уд}$ меньше в 5,2-5,6 раза по сравнению со значениями в вышеуказанной работе. Объясняется это главным образом тем, что увеличение рабочего зазора δ с 1 до 2 мм при проведении экспериментов приводит к снижению производительности и качества обрабатываемой поверхности за счет уменьшения давления ферроабразивной «щетки» на обрабатываемую поверхность и, соответственно, приводит к сведению к минимуму сил резания магнитного происхождения [12, 13].

Степень влияния дисперсности СОЖ на изменение шероховатости обработанной поверхности оценивали по отношению Ra_5/Ra_b , показывающему, во сколько раз уменьшается шероховатость после МАО для различных образцов СОЖ за счет повышения дисперсности масляной фазы, т.е. при уменьшении среднего диаметра масляных капель от 5 мкм до 1 мкм. При этом для достижения минимальной шероховатости принимаем рекомендуемые оптимальные значения объемной концентрации масляной фазы $C_{сож} = 44$ г/л и времени МАО $t = 126$ с.

Результаты влияния дисперсности СОЖ на изменение шероховатости обработанной поверхности при подстановке рекомендуемых значений в уравнение регрессии представлены в таблице 4.

Как видно из таблицы 4, с уменьшением размеров масляных капель с 5 до 1 мм полученное значение шероховатости на основании подстановки в уравнение регрессии уменьшается в 1,22-1,68 раза,

что доказывает рассмотренные изменения, возникающие при уменьшении размеров масляных капель в характере влияния СОЖ на процесс МАО [6].

Для комплексной оценки влияния факторов МАО на шероховатость обработанной поверхности и производительность процесса, сравним контурные графики шероховатости (рис. 4) и производительности (рис. 8) в одной системе координат.

Сравнение показывает, что области оптимальных

Таблица 4. Результаты влияния дисперсности СОЖ на изменение шероховатости обработанной поверхности при $C_{сож} = 44$ г/л и $t = 126$ с

$R_{ср}$, мм	Ra , мкм	h_{30}/h_{3M}
5	0,627	—
4	0,513	1,22
3	0,432	1,45
2	0,385	1,63
1	0,373	1,68

решений не совпадают по фактору t – время обработки. Следовательно, на практике надо выбирать некоторое компромиссное решение. Например, фиксировать допустимое значение шероховатости и находить, при каких значениях факторов достигается наибольшая производительность.

На рисунке 8 приведен вариант компромиссного решения, при котором можно получить: $Ra < 0,5$ мкм и $\Delta G > 3$ мг/(см²·мин) при $R_{ср} < 1$ мкм, $C_{сож} = 45$ г/л, $t = 110$ с.

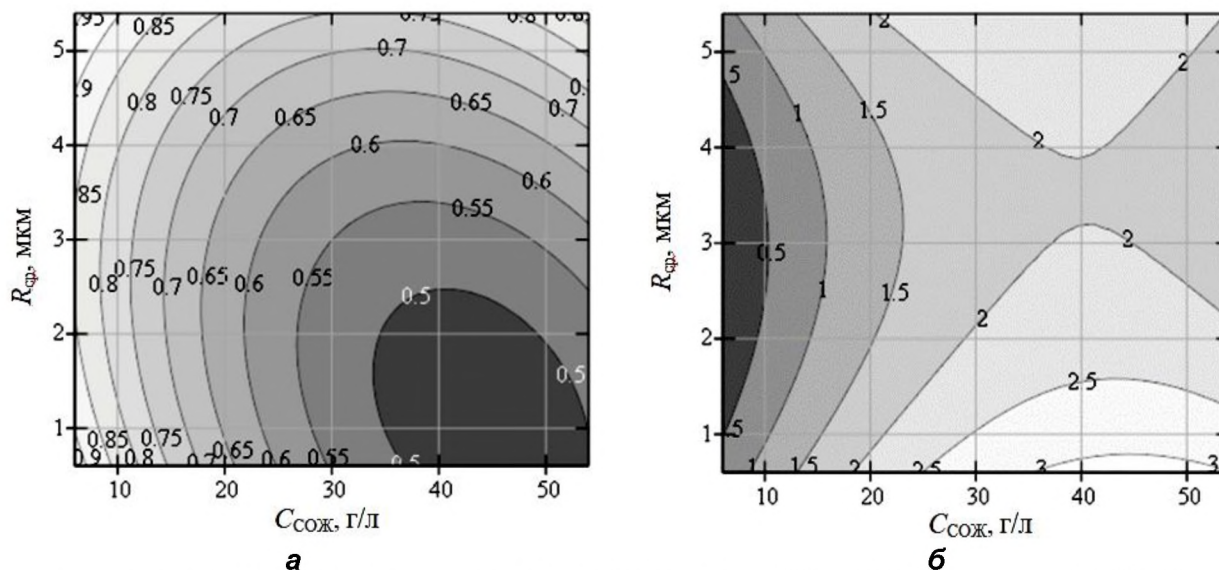


Рисунок 8. Уровни шероховатости обработанной поверхности (а) и производительности МАО (б) в зависимости от концентрации $C_{\text{СОЖ}}$ масляной фазы и среднего размера $R_{\text{ср}}$ масляных капель при времени МАО $t = 110$ с

Заключение

По результатам многофакторного эксперимента получены регрессионные уравнения зависимости шероховатости Ra обработанной поверхности и удельного съема $\Delta G_{\text{уд}}$ от объемной концентрации $C_{\text{СОЖ}}$ масляной фазы СОЖ, среднего размера $R_{\text{ср}}$ масляных капель и времени t МАО для эмульсии СОЖ, приготовленной на основе отходов масложирового производства.

Проведенные экспериментальные исследования позволили рекомендовать в качестве оптимальных значений:

- для шероховатости Ra обработанной поверхности объемную концентрацию масляной фазы $C_{\text{СОЖ}} = 45$ г/л, средний размер масляных капель $R_{\text{ср}} < 1$ мкм и время МАО $t = 110$ с;

- для удельного съема $\Delta G_{\text{уд}}$ объемную концентрацию масляной фазы $C_{\text{СОЖ}} = 40-45$ г/л, средний размер масляных капель $R_{\text{ср}} = 1..2$ мкм и время МАО $t = 126$ с.

Подтверждены ранее установленные экспериментальные данные, согласно которым использование СОЖ с более высокой дисперсностью способствует повышению производительности обработки и качества обработанной поверхности.

Результаты данной работы могут быть использованы при производстве деталей сельскохозяйственной техники, к которым предъявляются повышенные требования по качеству обработки. Применение СОЖ в процессе МАО с установленными оптимальными значениями для компромиссного решения сможет обеспечить максимальную производительность при МАО $\Delta G_{\text{уд}} > 3$ мг/(см²·мин) и шероховатость обработанной поверхности $Ra < 0,5$ мкм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акулович, Л.М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2013. – 372 с.
2. Акулович, Л.М. Магнитно-абразивная обработка сложнопрофильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ. – 2019. – 272 с.
3. Энтелис, С.Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / С.Г. Энтелис, Э.М. Берлинер. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
4. Акулович, Л.М. Синергетическая связь технологических параметров магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей вращения / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев // Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорусский национальный технический университет; редкол.: В.К. Шелег (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2024. – Вып. 35. – С. 29-39.
5. Акулович, Л.М. Примененные полусинтетических смазочно-охлаждающих технологических средств для магнитно-абразивной обработки / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, М.А. Залуцкий // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, г. Новополоцк, 21–22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т; под ред. В.К. Шелега, Н.Н. Попок. – Новополоцк, 2020. – С. 80-82.

6. 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.

7. Сергеев, К.Л. Влияние ультразвуковой обработки на агрегативную устойчивость дисперсной фазы водомасляной эмульсионной смазочно-охлаждающей жидкости / К.Л. Сергеев, П.Н. Василевский, А.А. Лиора // Современные проблемы освоения новой техники, технологий и организации технического сервиса в АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Белагро-2018», г. Минск, 7–8 июня 2018 г./ Белор. гос. аграрн. техн. ун-т; редкол.: Н.Н. Романюк [и др.]. – Минск: БГАТУ, 2018. – С. 234-240.

8. Монтгомери, Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 380 с.

9. Леонов, А. Н. Основы научных исследований в примерах и задачах: учеб.-метод. пособие для студентов вузов группы специальностей 74 06 «Агроинже-

нерия» / А.Н. Леонов, М.М. Дечко, В.Б. Ловкис; под общ. ред. А.Н. Леонова. – Минск, 2013. – 133 с.

10. 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.

11. Акулович, Л.М. Влияние свойств рабочей технологической среды на шероховатость поверхности и производительность при магнитно-абразивной обработке / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, М.М. Дечко // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2022. – № 1. – С. 39-48.

12. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.

13. Бабич, В.Е. Технология финишной магнитно-абразивной обработки сборного породоразрушающего инструмента: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Бабич Виталий Евгеньевич; ГНУ Физико-технический институт НАН Беларуси. – Минск, 2009. – 158 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 03.03.2025

Система микропроцессорного автоматизированного регулирования положения распределительной штанги относительно обрабатываемой поверхности

Предназначена для повышения равномерности внесения рабочего раствора пестицидов штанговыми опрыскивателями, снижения времени на подготовку агрегата к работе и его регулировки в процессе работы.

Система обеспечивает соблюдение постоянства расстояния между распылителями и обрабатываемой поверхностью в процессе работы опрыскивателя, как на склонах, так и на равнинной местности.



Основные технические данные

Тип механизма изменения угла наклона штанги	Гидравлический
Тип системы	Микропроцессорная
Тип датчиков	Ультразвуковые
Диапазон измерения, м	0,4 – 2,0
Погрешность измерения расстояния между штангой и обрабатываемым объектом, м	0,040
Время готовности системы к работе, мин.	до 1
Напряжение питающей сети, В	$\pm 12 \pm 2,5$
Продолжительность постоянного измерительного сигнала, после которого вырабатывается управляющее воздействие на исполнительный привод, с	2
Масса, кг, не более	40