

Исследование процесса мойки металлосодержащих шламов

В. Д. ВЕРНИГОРА, А. Н. КОРОБОЧКА

Днепродзержинский государственный технический университет

На основании проведенных экспериментальных исследований процесса мойки шлама абразивной обработки металлов разработана математическая модель для определения количества загрязнений переходящих в моющий раствор в заданное время мойки.

На підставі проведених експериментальних досліджень процесу мийки шламу абразивної обробки металів розроблено математичну модель для визначення кількості забруднень, що переходять у мийний розчин в заданий час мийки.

On the basis of experimental studies of the process of cleaning the sludge abrasive machining of metals developed a mathematical model to determine the amount of contaminants passing into the cleaning solution at a specified time cleaning.

Введение. Прогрессирующее загрязнение окружающей среды, истощение не возобновляемых природных ресурсов, нарушение устойчивости биосферы, ухудшение качества жизни человека требуют создания и внедрения принципиально новых, малоотходных технологических процессов.

Любое производство, связанное с обработкой металлов, сталкивается с проблемой утилизации отходов. На предприятиях металлургии и машиностроения (особенно на подшипниковых заводах), осуществляющих обработку металлов, ежемесячно образуются тысячи тонн металлосодержащих шламов. Особенно сложен по составу шлифовальный шлак, представляющий собой пастообразную массу, в состав которой входят металлические частицы, компоненты абразивного инструмента, технические масла, смазочно – охлаждающие жидкости (СОЖ) и т.д. На подшипниковых заводах ежегодно образуется до 10 тысяч тонн отходов (металлосодержащих шламов), которые содержат около 90 % металлической фракции. Эти отходы в настоящее время практически не перерабатываются, а вывозятся в специализированные захоронения или свалки, ухудшая экологическую безопасность окружающей среды.

Для решения проблемы по использованию шламов абразивной обработки металлов, уменьшению объемов их накопления, уменьшению уровня загрязнения окружающей среды, а также использования составляющих металлосодержащих шламов в качестве вторичного сырья в народном хозяйстве авторами [1] разработан технологический процесс и комплексная система оборудования для извлечения металлических частиц из шламов абразивной обработки металлов.

Одной из первостепенных операций данного технологического процесса [1] является мойка шлама от остатков СОЖ и смазочных масел [2]. Моющее действие состоит в удалении с поверхности твердых частиц (металлических, абразивных) шлама остатков СОЖ и масел, переводе их в моющий раствор в виде растворов или дисперсий.

Постановка проблемы. Построение математической модели, которая описывает процесс мойки шлама абразивной обработки металлов в синтетическом моющем растворе «Лабомид».

Анализ публикаций по данной теме. Для решения поставленной задачи был использован теоретический материал, содержащийся в работах (1), (2), (3).

Материалы исследований. В работе была поставлена задача, определить количество загрязнения (G_i), которое переходит в моющий раствор «Лабомид» в процессе мойки шлама абразивной обработки металлов. Задача решалась нахождением условного минимума функции отклика для количества загрязнения (G_i). Для получения указанной функции проведено экспериментальное исследование.

В исследовании переменными приняты следующие факторы: C_p – концентрация моющего раствора ($\text{кг}/\text{м}^3$); T – температура моющего раствора ($^{\circ}\text{C}$); (τ) – время мойки шлама (сек.). На основе априорной информации были приняты уровни и интервалы варьирования факторов (таблица 1).

Для построения математической модели $G = f(C_p, T, \tau)$ зависимости количества загрязнения (G_i , кг), перенесенного со стороны шлама абразивной обработки металлов в моющий раствор, от таких факторов, как: C_p , ($\text{кг}/\text{м}^3$) – концентрация моющего раствора; T , ($^{\circ}\text{C}$) – температура моющего раствора; τ (сек) – время мойки, был применен метод планирования экспериментов. Получение модели процесса в виде полинома второй степени реализовано в виде не композиционного плана второго порядка, матрица которого представлена в таблице 2.

Для этого с целью определения количества загрязнения (G_i , кг) [2], перенесенного со стороны твердого тела в моющий раствор, что характеризуется уравнением А.Н. Щукарева [3], были проведены экспериментальные исследования.

В состав шлама механической обработки металлов входят СОТС (смазочно – охлаждающие технологические средства), которые необходимо отмыть от металлических и абразивных частиц для дальнейшего разделения их по плотности в движущемся потоке моющего раствора [1]. В качестве СОТС использовалось минеральное индустриальное масло И– 20, а в качестве моющего раствора использовались 10%, 20% - ные растворы СМС (синтетического моющего средства) Лабомид с разными температурами моющего раствора (25°C , 35°C , 45°C).

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов

№	Факторы	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
				-1	0	+1
1	C_p – концентрация моющего раствора, кг/м ³	x_1	5	10	15	20
2	T – температура моющего раствора, °C	x_2	10	25	35	45
3	(τ) – время мойки шлама, сек	x_3	1440	180	1800	3420

В соответствии с условиями опыта (таблица 2) был проведен эксперимент мойки в моющем растворе «Лабомид».

Таблица 2. Матрица планирования и результаты опытов

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y_z
1	+1	+1	+1	0	+1	0	0	+1	+1	0	7,46
2	+1	+1	-1	0	-1	0	0	+1	+1	0	4,26
3	+1	-1	+1	0	-1	0	0	+1	+1	0	4,38
4	+1	-1	-1	0	+1	0	0	+1	+1	0	5,64
5	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,89
6	+1	+1	0	+1	0	+1	0	+1	0	+1	4,26
7	+1	+1	0	-1	0	-1	0	+1	0	+1	8,57
8	+1	-1	0	+1	0	-1	0	+1	0	+1	3,43
9	+1	-1	0	-1	0	+1	0	+1	0	+1	7,05
10	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,89
11	+1	0	+1	+1	0	0	+1	0	+1	+1	3,75
12	+1	0	+1	-1	0	0	-1	0	+1	+1	7,45
13	+1	0	-1	+1	0	0	-1	0	+1	+1	4,74
14	+1	0	-1	-1	0	0	+1	0	+1	+1	8,36
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,89

По данным опытов, проведенных согласно матрице планирования (таблица 2), получена модель, характеризующая зависимость y_z от исследуемых факторов процесса. Эта модель представлена полиномом второй степени [4].

Коэффициенты моделей вычисляли по формулам, которые для трех факторов имеют вид:

$$b_0 = \frac{1}{3} \sum_{u=1}^3 y_{ou} ; \quad (1)$$

$$b_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^{15} x_{ij} y_j ; \quad (2)$$

$$b_{i_2} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij} x_{i_2 j} y_j ; \quad (3)$$

$$b_{ii} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{16} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{6} \sum_{u=1}^3 y_{ou} ; \quad (4)$$

После подстановки значений таблицы 2 в формулы (1), (2), (3) и (4) коэффициенты регрессии для y_z получили следующие значения:

$$\begin{aligned} b_0 &= 5,3674 ; \\ b_1 &= 0,506 ; \\ b_2 &= 0,00388 ; \\ b_3 &= -1,904 ; \\ b_{12} &= 1,115 ; \\ b_{13} &= -0,171 ; \\ b_{23} &= -0,0167 ; \\ b_{11} &= -0,86 ; \\ b_{22} &= 0,041 ; \\ b_{33} &= 0,548 . \end{aligned}$$

Определяем значимость найденных коэффициентов по критерию Стьюдента.

Дисперсию $s^2(y_z)$ параметра оптимизации определяли по результатам опытов в центре плана (таблица 2, опыты 5; 10; 15). Для вычисления дисперсии $s^2(y_z)$ составлена вспомогательная таблица 3.

Таблица 3. Вспомогательная таблица для расчета $s^2(y_z)$

Номер опыта	y_z	\bar{y}_z	$y_z - \bar{y}_z$	$(y_z - \bar{y}_z)^2$
5	4,385	4,1305	0,2545	0,06477
10	3,8759		-0,2546	0,06482
15	4,1305		0	0
$s^2(y_z) = \frac{s_E}{n_0 - 1} = \frac{0,115}{3 - 1} = 0,0575$				$s_E = \sum (y_z - \bar{y}_z)^2 = 0,115$

где s_E – сумма квадратов отклонений эмпирических значений y_z функции отклика от её среднего значения \bar{y}_z , вычисленных по модели в центре плана;

n_0 – число опытов в центре плана, равное 3.

Дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов уравнения регрессии для y_z , вычисляли по указанным выше формулам (1); (2); (3) и (4) при числе факторов $k = 3$. Получены следующие значения дисперсий:

$$s^2(b_0) = \frac{1}{3} s^2(y_z) = 0,0192;$$

$$s^2(b_i) = \frac{1}{8} s^2(y_z) = 0,00719;$$

$$s^2(b_{i_1}) = \frac{1}{4} s^2(y_z) = 0,0144;$$

$$s^2(b_{ii}) = \frac{13}{48} s^2(y_z) = 0,0156.$$

Доверительный интервал Δb_0 коэффициента b_0 находим по выражению

$$\Delta b_0 = \pm t_T \cdot s(b_0). \quad (5)$$

При числе степеней свободы, равном 2 и 5% - ом уровне значимости коэффициент Стьюдента $t_T = 4,3$

$$s(b_0) = \sqrt{s^2(b_0)} = \sqrt{0,0192} = 0,139.$$

$$\Delta b_0 = \pm 4,3 \cdot 0,139 = 0,5958$$

Аналогично определяем доверительные интервалы коэффициентов b_1 ; b_{i_1} ; b_{ii} ;

$$\Delta b_1 = \pm t_T \cdot s(b_1) = \pm 4,3 \cdot 0,09 = 0,3646;$$

$$\Delta b_{i_1} = \pm t_T \cdot s(b_{i_1}) = \pm 4,3 \cdot 0,118 = 0,5088;$$

$$\Delta b_{ii} = \pm t_T \cdot s(b_{ii}) = \pm 4,3 \cdot 0,1249 = 0,53707.$$

Коэффициенты b_2 ; b_{13} ; b_{23} ; b_{11} ; b_{22} меньше соответствующих доверительных интервалов коэффициентов Δb_1 ; Δb_{i_1} ; и b_{ii} , поэтому их можно признать статически не значимыми и исключить из уравнения регрессии. После исключения коэффициентов b_2 ; b_{13} ; b_{23} ; b_{11} ; b_{22} уравнение регрессии для y_z получает вид

$$y_z = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{33} \cdot x_3^2. \quad (6)$$

Так как не значимыми оказались коэффициенты b_2 ; b_{13} ; b_{23} ; b_{11} ; b_{22} , все остальные коэффициенты пересчитываем с использованием метода наименьших квадратов. Для этого по выражению (6) составляем систему нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} b_0 \cdot N &= b_1 \sum_{j=1}^N x_{1j} + b_3 \sum_{j=1}^N x_{3j} + b_{12} \sum_{j=1}^N x_{1j} \cdot x_{2j} + \\ &+ b_{33} \sum_{j=1}^N x_{3j}^2 = \sum_{j=1}^N y_{zj}; \\ b_0 \sum_{j=1}^N x_{1j} + b_1 \sum_{j=1}^N x_{1j}^2 + b_3 \sum_{j=1}^N x_{3j} \cdot x_{1j} + b_{12} \sum_{j=1}^N x_{1j}^2 \cdot x_{2j} + \\ &+ b_{33} \sum_{j=1}^N x_{3j}^2 \cdot x_{1j} = \sum_{j=1}^N y_{zj} \cdot x_{1j}; \\ b_0 \sum_{j=1}^N x_{3j} + b_1 \sum_{j=1}^N x_{1j} \cdot x_{3j} + b_3 \sum_{j=1}^N x_{3j}^2 + b_{12} \sum_{j=1}^N x_{1j} \cdot x_{2j} \cdot x_{3j} + \\ &+ b_{33} \sum_{j=1}^N x_{3j}^3 = \sum_{j=1}^N y_{zj} \cdot x_{3j}; \\ b_0 \sum_{j=1}^N x_{1j} \cdot x_{2j} + b_1 \sum_{j=1}^N x_{1j}^2 \cdot x_{2j} + b_3 \sum_{j=1}^N x_{1j} \cdot x_{2j} \cdot x_{3j} + \\ &+ b_{12} \sum_{j=1}^N x_{1j}^2 \cdot x_{2j}^2 + b_{33} \sum_{j=1}^N x_{3j}^2 \cdot x_{1j} \cdot x_{2j} = \sum_{j=1}^N y_{zj} \cdot x_{1j} \cdot x_{2j}; \\ b_0 \sum_{j=1}^N x_{3j}^2 + b_1 \sum_{j=1}^N x_{1j} \cdot x_{3j}^2 + b_3 \sum_{j=1}^N x_{3j}^3 + b_{12} \sum_{j=1}^N x_{1j} \cdot x_{2j} \cdot x_{3j}^2 + \\ &+ b_{33} \sum_{j=1}^N x_{3j}^4 = \sum_{j=1}^N y_{zj} \cdot x_{3j}^2. \end{aligned} \quad (7)$$

После подстановки значений сумм система (7) принимает вид:

$$\begin{aligned} 15 \cdot b_0 + 0 \cdot b_1 + 0 \cdot b_3 + 0 \cdot b_{12} + 8 \cdot b_{33} &= 83,993; \\ 0 \cdot b_0 + 8 \cdot b_1 + 0 \cdot b_3 + 0 \cdot b_{12} + 0 \cdot b_{33} &= 4,047; \\ 0 \cdot b_0 + 0 \cdot b_1 + 8 \cdot b_3 + 0 \cdot b_{12} + 0 \cdot b_{33} &= -15,2316; \\ 0 \cdot b_0 + 0 \cdot b_1 + 0 \cdot b_3 + 4 \cdot b_{12} + 0 \cdot b_{33} &= 4,46; \\ 8 \cdot b_0 + 0 \cdot b_1 + 0 \cdot b_3 + 0 \cdot b_{12} + 8 \cdot b_{33} &= 47,5804. \end{aligned} \quad (8)$$

Решая систему уравнений (8), получаем следующие значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} b_0 &= 5,202; \\ b_1 &= 0,5059; \\ b_3 &= -1,904; \\ b_{12} &= 1,115; \\ b_{33} &= 0,7457. \end{aligned}$$

Уравнение регрессии для y_z получает вид:

$$y_z = 5,202 + 0,5059x_1 - 1,904x_3 + 1,115x_1 \cdot x_2 + 0,7457x_3^2. \quad (9)$$

Адекватность данной модели проверяем по критерию Фишера. Для вычисления дисперсии $s_{ад}^2$ адекватности находим сумму s_R квадратов отклонений расчетных значений y_z от экспериментальных y_z во всех точках плана (таблица 3). Расчетные значения y_z определяем по выражению (9), $s_E = 0,115$ (см. таблица 3):

$$\begin{aligned}\bar{y}_{z1} &= 6,8229; \\ \bar{y}_{z2} &= 4,5929; \\ \bar{y}_{z3} &= 3,5811; \\ \bar{y}_{z4} &= 5,8111; \\ \bar{y}_{z5} &= 5,202; \\ \bar{y}_{z6} &= 4,5496; \\ \bar{y}_{z7} &= 8,3576; \\ \bar{y}_{z8} &= 3,5378; \\ \bar{y}_{z9} &= 7,3458; \\ \bar{y}_{z10} &= 5,202; \\ \bar{y}_{z11} &= 4,0437; \\ \bar{y}_{z12} &= 7,8517; \\ \bar{y}_{z13} &= 4,0437; \\ \bar{y}_{z14} &= 7,8517; \\ \bar{y}_{z15} &= 5,202.\end{aligned}$$

Находим дисперсию адекватности по формуле

$$s_{ад}^2 = \frac{s_R - s_E}{N - k' - (n_0 - 1)}, \quad (10)$$

где $s_R = \sum (y_z - \bar{y}_z)^2 = 2,90836$ – сумма квадратов отклонений эмпирических значений y_z функции отклика от её значений \bar{y}_z , вычисленных по модели во всех точках;

$s_E = \sum (y_z - \bar{y}_z)^2 = 0,115$ – сумма квадратов отклонений эмпирических значений y_z функции отклика от её среднего значения \bar{y}_z , вычисленных по модели в центре плана;

$N = 15$ – общее число опытов в матрице планирования;

k' – число статически значимых коэффициентов модели;

n_0 – число опытов в центре плана, равное 3.

Подставляем численные значения в формулу (10), получим

$$s_{ад}^2 = \frac{2,90836 - 0,115}{15 - 5 - (3 - 1)} = 0,36167.$$

Находим расчетное значение критерия Фишера (F_p) по формуле:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2}, \quad (11)$$

где $s_y^2 = \frac{s_E}{n_0 - 1} = 0,0575$ – дисперсия воспроизводимости эксперимента, определённая по результатам n_0 опытов в центре плана матрицы (см. таблица 3).

Тогда

$$F_p = \frac{0,36167}{0,0575} = 6,345.$$

Сравним F_p – расчетное значение критерия Фишера с табличным значением $F_{(0,05; f_{ад}; f_y)} = 19,4$,

где 0,05 % – ный уровень значимости;

$f_{ад}N - k' - (n_0 - 1)$ – число степеней свободы дисперсии адекватности;

$f_y = n_0 - 1$ – число степеней свободы дисперсии воспроизводимости.

Получаем, что $F_p = 6,345 < F_{(0,05; f_{ад}; f_y)} = 19,4$, следовательно, полученная модель адекватна при 5% - ном уровне значимости.

Переход от кодированных значений $(x_1; x_2; x_3)$ факторов к натуральным $(C_p; T; \tau)$ осуществляют по формулам:

$$\begin{aligned}x_1 &= \frac{C_p - 15}{5} = 0,2C_p - 3; \\ x_2 &= \frac{T - 35}{10} = 0,1T - 3,5; \\ x_3 &= \frac{\tau - 900}{720} = 0,0014\tau - 1,25.\end{aligned} \quad (12)$$

Переходя от кодированных $(x_1; x_2; x_3)$ значений факторов к натуральным $(C_p; T; \tau)$, получим зависимость количества загрязнения G_i , что перешло из шлама абразивной обработки металлов в моющий раствор «Лабомид» от составляющих (концентрации и температуры моющего раствора, а также от времени мойки шлама).

Уравнение (9) с учетом отношений (12) можно представить в виде:

$$G_i = 18,94 - 0,68C_p - 0,334T - 0,00527\tau + 0,0223C_p T + 0,00000146\tau^2. \quad (13)$$

Уравнение (13) адекватно, поэтому его можно использовать как интерполяционную формулу для вычисления величины G_i – количества загрязнения, которое переходит в моющий раствор за время мойки τ .

Выводы

Полученная математическая модель, описывающая процесс мойки металлосодержащих шламов в синтетическом моющем растворе «Лабомид» позволяет определять количество загрязнения (G_i), которое переходит в моющий раствор «Лабомид» в любое время мойки. Это позволяет определить конечное время мойки, габаритные размеры моечного желоба установки по переработке металлосодержащих шламов для получения необходимой чистоты металлических частиц и частиц абразива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернигора В. Д. Извлечение металлических частиц из шламов абразивной обработки металлов / В. Д. Вернигора,

- А. Н. Коробочка // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. — 2008. — Вип. 32(73). — С.26—32.
2. Вернигора В. Д. Исследование процесса мойки твердых частиц шлама абразивной обработки металлов / В. Д. Вернигора // Механизация производственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий. Сб. науч. труд. КГМТУ. — Керчь : 2008. Вып 9. — С.137—140.
 3. Вернигора В. Д. Очищення шламу абразивної обробки металів від мастильно-охолоджуючих рідин / В. Д. Вернигора // Збір. наук. праць ДДТУ (технічні науки). — Дніпродзержинськ. — 2010. — Випуск 2 (15). — С.46—50.
 4. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / Спиридонов Г. А. — М. : Машиностроение. 1981. — 184 с.

пост.13.05.2015