

УДК 621.869.98

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Е.С. Венцель, профессор, д.т.н., Д.Б. Глушкова, доцент, к.т.н.,  
А.В. Щукин, аспирант, ХНАДУ

*Аннотация.* Используя теорию планирования эксперимента, установлены оптимальные параметры покрытия, наносимого на поверхность режущих элементов землеройно-транспортных машин, которое обеспечивает минимизацию износа.

*Ключевые слова:* параметр, покрытие, твердость, толщина, шероховатость, износ.

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО ПОКРИТТЯ НА ПОВЕРХНЮ РІЖУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗЕМЛЕРІЙНО-ТРАНСПОРТНИХ МАШИН

Є.С. Венцель, професор, д.т.н., Д.Б. Глушкова, доцент, к.т.н.,  
О.В. Щукін, аспірант, ХНАДУ

*Анотація.* Використовуючи теорію планування експерименту, встановлено оптимальні значення параметрів покриття, що наноситься на поверхню ріжучих елементів землерійно-транспортних машин, яке забезпечує мінімізацію зносу.

*Ключові слова:* параметр, покриття, твердість, товщина, шорсткість, знос.

## DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS FOR ION-PLASMA COATING ON THE SURFACE OF CUTTING ELEMENTS OF EARTH MOVING MACHINES

Ye. Ventsel, Professor, Doctor of Engineering Science, D. Glushkova, Associate Professor, Candidate of Engineering Science, A. Schukin, postgraduate, KhNAHU

*Abstract:* Using the theory of experimental design, the optimum parameters of coating applied to the surface of cutting elements of earth moving machines, which minimize the wear are determined.

*Key words:* parameter, cover, hardness, thickness, roughness, wear.

### Введение

Для определения оптимальных параметров ионно-плазменного покрытия, наносимого на поверхность рабочего органа землеройно-транспортной машины и обеспечивающего минимальный их износ, нами была использована теория планирования эксперимента [1].

Как известно, для хорошей адгезии покрытия к основному металлу важен не только состав

наносимого покрытия, также шероховатость, и твердость материала поверхности, на которую наносится покрытие, а также его толщина. Именно величины этих параметров выбираются оптимальными.

Нами для исследований в качестве примера оптимизации был выбран автогрейдер, рабочий орган которого (нож) изготавливается из стали 65Г.

### Анализ публикаций

Выбор в качестве одного из параметров твердости связан с тем, что она относительно легко поддается определению в любой точке ножа автогрейдера без нанесения ущерба как до, так и после эксплуатации.

Как показали результаты проведенных исследований [2], значение шероховатости поверхности, на которую наносится покрытие, должно быть не менее 0,16 Ra. В противном случае наносимое покрытие, вследствие плохой адгезии с подложкой, постепенно отслаивается. В этой связи одной из главных задач являлось определение оптимальной шероховатости обрабатываемой поверхности, которая обеспечивала бы наилучшую адгезию покрытия с основным металлом.

#### Цель и постановка задачи

Целью данной работы является определение оптимальных параметров ионно-плазменного покрытия, при которых износ режущего элемента (ножа) автогрейдера был бы минимален.

#### Исследование зависимости износостойкости от параметров ионно-плазменного покрытия

В качестве материала исследования использовалась сталь 65Г. Изначально последняя подвергалась закалке токами высокой частоты, которая, в свою очередь, обеспечивает на недостаточном уровне необходимые физико-механические свойства рассматриваемого изделия. В результате данной процедуры твердость ножа автогрейдера колеблется в пределах 45–50 HRC.

Варьировали толщину наносимого покрытия в пределах от 3 до 7 микрон, поскольку толщина от 3 до 6 микрон обеспечивает наилучшие адгезионные связи с основным металлом, менее 3 микрон – не оказывает существенного влияния на физико-механические свойства изделия [2]. Покрытие толщиной более 6 микрон обладает недостаточной адгезией, что, в конечном итоге, приводит к отслаиванию с подложкой.

Имея в виду, что значение твердости может быть только целым числом, было принято решение провести четыре серии экспериментов, соответственно брались значения твердости 40, 45, 50, 55.

Исходя из сути теории математического планирования эксперимента [3–5], в качестве варьируемого фактора принимали толщину покрытия и шероховатость, которую обозначили, соответственно,  $X_1$  и  $X_2$ . При этом функцией отклика являлся износ, который был нами обозначен как  $Y$ .

Таким образом, опираясь на вышеизложенные соображения, принимали, что границами существования (изменения) факторов будет  $X_{1\min}=3$ ;  $X_{2\max}=7$ ;  $X_{2\min}=0,16$ ;  $X_{2\max}=0,48$ . Тогда интервалы варьирования факторов соответственно будут

$$\Delta X_1 = X_{2\max} - X_{1\min} = 4;$$

$$\Delta X_2 = X_{2\max} - X_{2\min} = 0,32.$$

В первую очередь был проведен факторный эксперимент первого порядка. Целью данного эксперимента было изыскание математической модели зависимости  $Y$  от  $X_1$ ,  $X_2$ , которая была бы представлена в виде линейного полинома. Для достижения поставленной цели для каждого значения твердости был реализован полный факторный эксперимент типа  $2^n$ .

Результаты этого эксперимента приведены в табл. 1–4.

Таблица 1 Значения толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 40 HRC

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,16	0,3540
2	3	0,48	0,6723
3	7	0,16	0,7012
4	7	0,48	0,6822

Таблица 2 Значения толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 45 HRC

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,16	0,2421
2	3	0,48	0,6253
3	7	0,16	0,6643
4	7	0,48	0,6211

Таблица 3 Значения толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 50 HRC

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,16	0,2632
2	3	0,48	0,6133
3	7	0,16	0,6311
4	7	0,48	0,5722

Таблица 4 Значения толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 55 HRC

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,16	0,2332
2	3	0,48	0,6318
3	7	0,16	0,6511
4	7	0,48	0,5987

*Примечание.* По каждой строке планов табл. 1–4 проводилось два износных испытания ножей автогрейдера на специальном лабораторном стенде [6]. При этом в таблицы в качестве значения  $Y$  записывались средние значения.

Далее для всех табл. 1–4 рассчитывалось уравнение регрессии

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2. \quad (1)$$

Результаты расчета его коэффициентов представлены в табл. 5.

Таблица 5 Значение коэффициентов регрессии

Значение твердости	$b_0$	$b_1$	$b_2$
40	0,230	0,045	0,468
45	0,107	0,052	0,531
50	0,170	0,041	0,455
55	0,114	0,048	0,543

По критерию Фишера была проведена проверка адекватности полученных уравнений путем сравнения расчетного критерия Фишера  $F_p$  с табличным  $F_T$  при уровне значимости  $q = 0,05$ . В связи с тем, что во всех рассмотренных случаях  $F_p > F_T$ , можно сделать вывод о том, что уравнения не являются адекватными. В конечном итоге было принято решение продолжить эксперименты. При этом полученные планы  $2^n$  были дополнены до центральных композиционных планов второго порядка. Реализации этих планов показаны в табл. 6–9.

Таблица 6 Значения толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 40 HRC в результате экспериментов по плану второго порядка

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,16	0,3540
2	3	0,48	0,6723
3	7	0,16	0,7012
4	7	0,48	0,6822
5	5	0,16	0,4976
6	5	0,32	0,3146
7	5	0,48	0,5214
8	3	0,32	0,2987
9	7	0,32	0,7237

Таблица 7 Значения толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 45 HRC в результате экспериментов по плану второго порядка

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,16	0,2421
2	3	0,48	0,6253
3	7	0,16	0,6643
4	7	0,48	0,6211
5	5	0,16	0,2521
6	5	0,32	0,4878
7	5	0,48	0,4411
8	3	0,32	0,3129
9	7	0,32	0,6821

Таблица 8 Значения толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 50 HRC в результате экспериментов по плану второго порядка

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,16	0,2632
2	3	0,48	0,6133
3	7	0,16	0,6311
4	7	0,48	0,5722
5	5	0,16	0,4322
6	5	0,32	0,1778
7	5	0,48	0,3927
8	3	0,32	0,1944
9	7	0,32	0,6088

Таблица 9 Значения толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 55 HRC в результате экспериментов по плану второго порядка

№ опыта	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,16	0,2332
2	3	0,48	0,6318
3	7	0,16	0,6511
4	7	0,48	0,5987
5	5	0,16	0,2312
6	5	0,32	0,4511
7	5	0,48	0,4146
8	3	0,32	0,2455
9	7	0,32	0,6748

Далее по каждой из приведенных таблиц было рассчитано уравнение регрессии

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{22}X_2^2. \quad (2)$$

Результаты расчета коэффициентов регрессии приведены в табл. 10.

Таблица 10 Значения коэффициентов линейного уравнения регрессии

Значение твердости	Значение коэффициентов регрессии					
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{22}$
40	0,806	-0,169	-1,493	0,032	-0,264	4,917
45	0,108	-0,155	2,715	-0,033	-0,333	-0,779
50	0,868	-0,202	-2,068	0,037	-0,320	6,137
55	0,172	-0,170	2,239	0,035	-0,352	0,116

Для каждого значения твердости подложки на рис. 1–4 показано графическое изображение поверхности отклика.

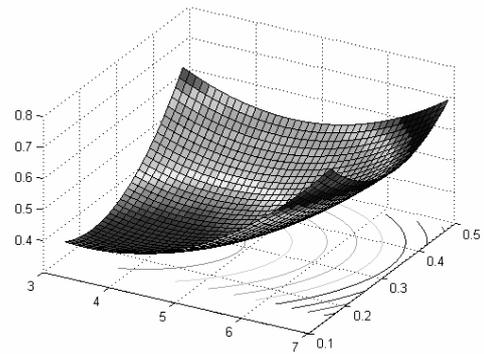


Рис. 1. Поверхность отклика для твердости 40 HRC

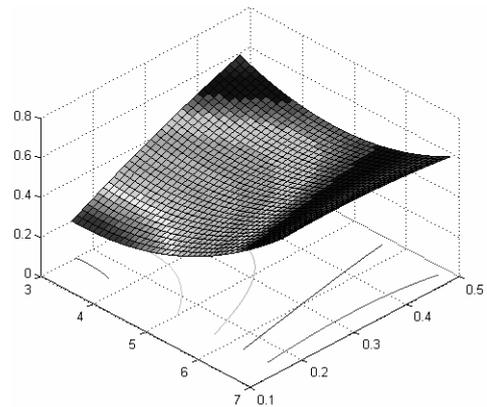


Рис. 2. Поверхность отклика для твердости 45 HRC

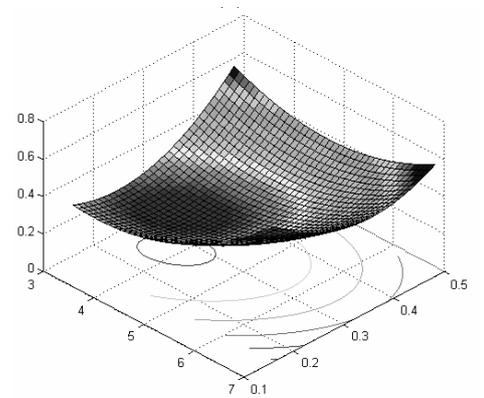


Рис. 3. Поверхность отклика для твердости 50 HRC

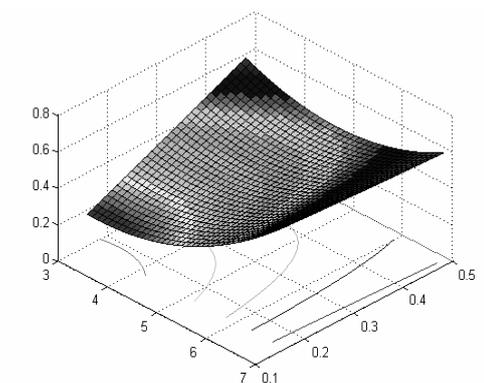


Рис. 4. Поверхность отклика для твердости 55 HRC

Далее определяли наименьшее значение функции  $Y$  в области

$$\begin{cases} 3 \leq X_1 \leq 7; \\ 0,16 \leq X_2 \leq 0,48. \end{cases} \quad (3)$$

Как известно из [5], это значение может быть принято или на границе области, или в стационарной точке. При этом координаты  $(X_1^0, X_2^0)$  стационарной точки определяли в результате решения системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial X_1} = 0 \\ \frac{\partial Y}{\partial X_2} = 0 \end{cases},$$

которая в данном случае имеет вид

$$\begin{cases} b_1 + b_{12}X_2 + 2b_{11}X_1 = 0 \\ b_2 + b_{12}X_1 + 2b_{22}X_2 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решаем приведенную выше систему уравнений (4) по формулам

$$X_1^0 = \frac{-2b_{22}b_1 + b_2b_{12}}{4b_{11}b_{22} - b_{12}^2},$$

$$X_2^0 = \frac{-2b_{11}b_2 + b_1b_{12}}{4b_{11}b_{22} - b_{12}^2}.$$

Полученные значения координат стационарной точки приведены в табл. 11.

Таблица 11 Значения координат стационарной точки

Значение твердости	Координаты стационарной точки	
	$X_1^0$	$X_2^0$
T		
40	3,689	0,251
45	5,38	0,592
50	3,947	0,271
55	6,947	0,9

Как видно из представленной таблицы, только в двух случаях (при  $T=40$  и  $T=45$ ) стационарные точки ( $X_1^0 = 3,69$ ;  $X_2^0 = 0,25$  и  $X_1^0 = 3,95$ ;  $X_2^0 = 0,27$ ) принадлежат области

определения факторов. В остальных же случаях наименьшее значение функции  $Y$  наблюдается на границе (3). Подставив все необходимые значения и решив уравнение регрессии (2), определили наименьшее значение функции в каждом случае. Координаты экстремальной точки и значение  $Y$  приведены в табл. 12.

Таблица 12 Значения отклика в экстремальной точке

Значение твердости	Координаты экстремальной точки		Значение отклика
	$X_1$	$X_2$	
40	3,7	0,25	0,307
50	4,0	0,27	0,189

Как видно из данной таблицы, наименьшее значение износа прогнозируется при твердости, равной 50 HRC, толщине покрытия 4 мкм и шероховатости 0,27 мкм. Однако поскольку ближайшие значения шероховатости возможны лишь 0,16 и 0,32 мкм, проводилось два дополнительных эксперимента, результаты которых приведены в табл. 13.

Таблица 13 Толщины покрытия, шероховатости и износа при твердости подложки 50 HRC

Значение твердости	Значение параметров		Значение износа
	$X_1$	$X_2$	
50	4,0	0,16	0,175
	4,0	0,32	0,148

Как видно из табл. 13, значения параметров, полученных с помощью теории планирования, действительно являются оптимальными. При этом наименьшее значение износа было получено при твердости, равной 50 HRC, толщине покрытия 4 мкм и шероховатости 0,32 мкм.

Таким образом, результаты, проведенного эксперимента по износу ножей автогрейдера с ионно-плазменным покрытием при различных значениях твердости материала подложки, шероховатости поверхности и толщины покрытия подтверждают достоверность расчетов, полученных с помощью теории планирования эксперимента.

### Выводы

Для определения оптимальных значений параметров наносимого покрытия на поверхность режущих элементов была применена теория планирования эксперимента. При этом в качестве параметров оптимизации были приняты твердость, шероховатость подложки и толщина наносимого покрытия.

При значении твердости, равной 50 HRC, толщине покрытия 4 мкм и шероховатости подложки 0,32 мкм износ режущих элементов рабочих органов автогрейдера минимален.

Используя предлагаемую выше теорию планирования экспериментов, можно определить оптимальные параметры ионно-плазменного покрытия для любых других рабочих органов землеройно-транспортных машин.

### Литература

1. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента / Ч. Хикс. – М.: Мир, 1997. – 406 с.
2. Роик Т.А. Повышение износо- и коррозионной стойкости деталей объемного гидропривода нанесением ионно-плазменных покрытий: монография / Т.А. Роик, Д.Б. Глушкова, Ю.В. Рыжков. – Х., 2012. – 112 с.
3. Евдокимов Ю.А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.И. Тетерин. – М.: Наука, 1999. – 224 с.
4. Решение задач тепловой динамики и моделирование трения и износа. – М.: Наука, 2000. – 215 с.
5. Гегузин Я.Е. О природе схватывания твердых тел / Я.Е. Гегузин, И.В. Красильский, Л.Н. Парицкая. – М.: Наука, 1978. – С. 17–21.
6. Щукин А.В. Закономерность изнашивания рабочих органов землеройно-транспортных машин / А.В. Щукин // Строительство. Материаловедение. Машиностроение: сб. науч. тр. Серия «Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины и оборудование». – Дн-ск: ВГУЗ ПГАСА. – 2012. – Вып. 66. – С. 224–227.

Рецензент: Ю.В. Батыгин, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 25 марта 2013 г.

---