

электронная микроскопия / Я. С. Уманский [и др.] – М.: Металлургия, 1982. – 632 с. 4. Добровольский, И.П. О природе и механизме контактного плавления / И. П. Добровольский, Б. А. Картошкин, А. П. Поляков // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – №2. – С. 37-37. 5. Ляхович, Л.С. Повышение износостойкости борированных диффузионных слоев при совместном насыщении сталей бором и углеродом / Л. С. Ляхович, И. О. Дита // Теория и практика создания, испытания и эксплуатации триботехнических систем: тез. докл. – М. – 1986. – С. 100–101.

УДК 621.723

Иващенко С.А., Койда С.Г.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ИЗ НИТРИДА ТИТАНА НА ИЗДЕЛИЯХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Наличие большого числа факторов, влияющих на технологию нанесения вакуумно-плазменных покрытий, вносит дополнительные трудности в отработку режимов, формирования покрытий с заданными эксплуатационными свойствами [1]. В данной работе нами ставилась задача оптимизации технологии нанесения износостойкого TiN покрытия на детали из сплава Д16.

На первом этапе методом линейной шаговой регрессии проводился отбор наиболее значимых факторов (независимых переменных). На втором этапе – поиск экстремума построенной функции отклика.

В качестве независимых переменных выделены следующие параметры технологического процесса (см. табл. 1). При выборе факторов к ним предъявлялись следующие требования. Факторы (независимые переменные) должны непосредственно воздействовать на объект (зависимую переменную, параметр оптимизации, целевую функцию), быть независимыми, совместимыми, управляемыми, однозначными и определены операционально [4].

Таблица 1 – Независимые переменные

Код независимой переменной	Физический смысл независимой переменной (условное обозначение)
X_1	Суммарная продолжительность времени очистки, ионами материала катода ($T_{оч.}$)
X_2	Потенциал подложки при очистке ионами материала катода ($V_{под.оч.}$);
X_3	Ток дуги при очистке ионами материала катода ($I_{д.оч.}$);
X_4	Длительность паузы между очисткой и началом нанесения покрытия ($T_{пауз.}$)
X_5	Время нанесения адгезионного подслоя ($T_{ад.подсл.}$)
X_6	Время нанесения промежуточного подслоя ($T_{пр.подсл.}$)
X_7	Время нанесения наружного рабочего слоя ($T_{роб.сл.}$)
X_8	Давление реакционного газа в вакуумной камере при нанесении наружного рабочего слоя ($P_{в.к.}$)
X_9	Потенциал подложки при нанесении наружного рабочего слоя ($V_{подл.}$)
X_{10}	Суммарное время очистки в тлеющем разряде ($T_{тл.раз.}$)
X_{11}	Ток дуги при нанесении наружного рабочего слоя ($I_{д.роб.сл.}$)
X_{12}	Продолжительность остывания образцов в вакуумной камере ($T_{ост.}$)
X_{13}	Ток фиксирующей катушки при нанесении наружного рабочего слоя (I)
X_{14}	Наличие защитного экрана

Для каждого фактора были определены предельные значения и интервал варьирования (см. табл.2).

Таблица 2 – Предельные значения и интервал варьирования независимых Переменных

Номер независимой переменной	Единица измерения	Основной уровень (средний)	Интервал варьирования	Верхний уровень	Нижний уровень
X ₁	сек.	16	2	32	2
X ₂	В	-*	700	1500	2200
X ₃	А	-*	-*	180	90
X ₄	сек	300	40	600	0
X ₅	сек.	80**	12**	170	3
X ₆	сек.	90	12**	180	0
X ₇	мин.	17**	2**	36	3
X ₈	10 ⁻² Па	-*	-*	13.6	1.3
X ₉	В	100	10	140	50
X ₁₀	сек.	-**	2**	50	0
X ₁₁	А	-*	-*	1600	90
X ₁₂	мин.	15	2	30	1
X ₁₃	А	1	0.1	2	0.1
X ₁₄	-	-**	-**	1	0

* - данные не записаны или являются приближенными из-за конструктивных особенностей установки нанесения покрытия.

** - данный показатель не устанавливался или назначался по технологическим соображениям.

Уравнение регрессии, которое определяется с использованием пошагового множественного регрессивного анализа [2], может быть представлено в виде полинома первой степени.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^m a_i X_i, \quad (1)$$

где y - зависимая переменная;

a_0 - свободный член;

a_i - коэффициент при независимых переменных;

X_i - независимые переменные;

m - число факторов, учитываемых при оптимизации.

Для построения данной линейной модели должно выполняться условие:

$$M \geq m + 1;$$

где M - число экспериментов.

В нашем случае:

$$m=14, \text{ следовательно } M \geq 15;$$

В качестве критериев, характеризующих эксплуатационные свойства изделий с покрытием, были выбраны две зависимые переменные. Первая - визуальная оценка качества нанесенного покрытия по десятибалльной шкале (см. табл.3), вторая - определялась как соотношение микротвердости поверхностного слоя с покрытием к микротвердости поверхности исходного образца.

Таким образом, нам необходимо было решить следующую двухкритериальную задачу оптимизации в условиях помех:

$$\max f_i; i = 1, 2;$$

$$\bar{X} \in D;$$

$$\bar{X}(X_1; X_2; \dots; X_{14});$$

где D - допустимая область изменения факторов, определяемая технологическими возможностями (является пересечением допустимых областей по обоим критериям f_1 и f_2);

f_1 - критерий качества, определяемый визуально на основании экспертного оценивания (по десятибалльной шкале);

$$f_2 = \frac{H_{\muокр}}{H_{\muобр}} - \text{количественно вычисляемый критерий};$$

где:

$H_{\muокр}$ - микротвердость поверхности, образца с покрытием;

$H_{\muобр}$ - микротвердость поверхности образца до нанесения покрытия.

Таблица 3 – Критерии оценки качества покрытия

Визуальная оценка качества покрытия	Признаки, определяющие внешний вид покрытия
0	Покрытие полностью отслоилось или поверхность потеряла заданную геометрическую форму
1	На покрытии много дефектов, наблюдается частичное отслаивание покрытия, есть изменения в заданной геометрической форме образца
2	Покрытие имеет низкую адгезию с подложкой, нет блеска
3	Покрытие имеет темный цвет, неоднородность по цвету, есть микротрещины
4	Цвет покрытия желтый, есть отклонения по цвету, есть незначительный блеск
5	Цвет покрытия равномерный, есть следы эрозии подложки, возникающие при очистке, микротрещины
6	Цвет покрытия равномерный. Возможно наличие следов эрозии подложки, микротрещины. (Площадь с дефектами не более 30% от общей)
7	Цвет покрытия равномерный, следы эрозии отсутствуют или их число составляет не более 5% площади покрытия
8	Покрытие с блеском, имеет равномерный желтый цвет. По краям образца допускается наличие следов эрозии (около 1%)
9	Покрытие имеет равномерный цвет с блеском. Допускается неполный блеск из-за наличия капельной фазы
10	Покрытие блестящее, цвет равномерный. Видимых дефектов не имеет

Для поиска Парето оптимальных точек, то есть точек $\bar{X} \in D$ и являющихся неулучшаемыми, предлагалась модификация алгоритма уступок [5], причем за доминантный критерий выбирается $f_1(X)$, а $f_2(X)$, учитывается в виде ограничения. Использовался алгоритм непрямой стохастической оптимизации

На первом этапе, на котором осуществлялся выбор наиболее значимых независимых переменных, применялся метод шаговой линейной регрессии. Выбор значимых регрессоров (независимых переменных) производился по обоим критериям f_1 и f_2 .

Метод шаговой регрессии позволил наряду с получением функции регрессии итерационно выводить наиболее значимые независимые переменные. На основании последовательности их выводов, а также статистических результатов обработки экспериментов были получены уравнения регрессии (2 и 3) и построена диаграмма свойств изучаемого объекта (см. табл. 4).

$$y_1 = -19.5375 + 0.5842 X_1 + 0.118 X_2 + 9.494 X_{14} - 0.085 X_{10} - 0.4784 X_{13} + 1.81413 X_{11} + 0.70225 X_9 - 0.2741 X_7 + 0.29337 X_{13} - 0.085186 X_8 + 0.12924 X_{12} + 0.3 X_4 + 0.1115 X_5 + 0.02143 X_3; \quad (2)$$

$$y_2 = -15.0931 - 4.8945X_{14} + 0.2366X_7 + 0.12489X_8 - 0.121X_{11} - 0.254878X_{12} - 0.5438X_3 + 0.52335X_4 - 0.3465X_{13} + 0.00935X_1 + 0.09X_{10} + 0.187X_6 - 0.11264X_5 - 0.15328X_9 - 0.0244X_2, \quad (3)$$

Таблица 4 - Диаграмма свойств независимых переменных при решении двухкритериальной задачи оптимизации

Критерий увеличения микротвердости				Связь между факторами по критериям f_1 и f_2	Критерий качества по 10-ти бальной шкале f_1			
Множественный коэффициент корреляции на момент ввода	Последовательность ввода	знак	Ранг независимой переменной		Ранг независимой переменной	знак	Последовательность ввода	Множественный коэффициент корреляции на момент ввода
0,566	1	-	X_{14}	↔	X_{14}	+	3	0,856
0,907	6	-	X_3	↔	X_{11}	+	6	0,903
0,935	7	-	X_4	↔	X_9	+	7	0,912
0,953	8	-	X_{13}	↔	X_6	-	5	0,896
0,824	5	-	X_{12}	↔	X_4	+	12	0,944
0,645	2	+	X_7	↔	X_{13}	+	9	0,931
0,986	11	+	X_6	↔	X_7	-	8	0,929
0,996	13	-	X_9	↔	X_{12}	+	11	0,937
0,707	3	+	X_8	↔	X_2	+	2	0,822
0,775	4	-	X_{11}	↔	X_5	+	13	0,960
0,995	12	-	X_5	↔	X_8	-	10	0,935
0,980	10	+	X_{10}	↔	X_{10}	-	4	0,883
0,996	14	-	X_2	↔	X_1	+	1	0,748
0,976	9	+	X_1	↔	X_3	+	14	0,950

Факторы записывались сверху вниз согласно их значимости (ранга).

Зависимые переменные y_1 и y_2 имеют различный физический смысл и, следовательно, влияние на них независимых переменных будет различно. В таблице 4 представлено расположение факторов согласно их значимости, знака, последовательности их ввода и значения множественного коэффициента корреляции на момент ввода. Знак перед каждым фактором говорит о необходимости (+) увеличивать, или (-) уменьшать его для достижения оптимального значения зависимой переменной. Последовательность ввода факторов говорит о влиянии введенного на данной итерации фактора на независимую переменную с учетом ранее введенных факторов. При этом на каждом шаге проводится статистическая обработка результатов [2, 3]. В частности, в таблице 4 для примера приведен множественный коэффициент корреляции.

Выбранные независимые переменные могут оказывать схожее воздействие на параметр оптимизации, и тем самым дополнять или компенсировать друг друга. Так, например, воздействие факторов X_1 и X_{10} на f_2 очень близко. Факторы X_1 ; X_2 ; X_3 ; X_4 ; X_{10} влияют на разогрев подложки при ее очистке, а это сказывается на свойствах наносимого затем покрытия. Факторы X_7 ; X_9 ; X_{11} ; X_{13} ; X_{14} влияют на производительность процесса формирования защитного покрытия, разогрев поверхности в момент нанесения покрытия, то есть зоны их влияния на зависимую переменную, например f_1 могут перекрываться. Возможно равнозначное влияние и других факторов на определенные свойства покрытия.

Исходя из этого, и желая сократить число факторов (за счет исключения малозначимых) было сделано две выборки наиболее значимых факторов (по шесть). Первая выборка получена по итогам проведенных расчетов, а вторая на основе априорной информации (см. таблицу 5).

Таблица 5 – Выборка наиболее значимых факторов

Факторы отобраны по вышеприведенным расчетам (выборка 1)							Факторы отобраны априорно (выборка 2)
Код фактора	Критерий			Критерий			Код фактора
	Ранг	№ ввода		Ранг	№ ввода		
X ₁₄	1	1	0,566	1	3	0,856	X ₁₄
X ₃	2	6	0,907	14	14	0,950	X ₁
X ₄	3	7	0,935	5	12	0,944	X ₇
X ₁₁	10	4	0,775	2	6	0,903	X ₈
X ₁₃	4	8	0,953	6	9	0,931	X ₉
X ₉	8	13	0,996	3	7	0,912	X ₁₁

Наибольший интерес для нас представляют эксплуатационные свойства наносимых покрытий, поэтому дальнейшую оптимизацию будем вести по критерию f_2 .

В результате обработки экспериментальных данных (см. табл. 2) было получено следующее уравнение регрессии:

$$y_2 = 11.526 - 0.0904 X_1 - 0.063 X_2 - 0.696 X_3 - 0.00388 X_4 + 0.0937 X_5 - 0.129 X_6 + 0.0905 X_7 + 0.0415 X_8 - 0.0778 X_9 - 0.0399 X_{10} + 0.33 X_{11} - 0.09 X_{12} + 0.0192 X_{13} - 1.44 X_{14}. \quad (4)$$

После проведенных расчетов можно констатировать, что фактор X₁₄; X₁₂; X₇; X₆; X₈; X₁₁; X₁₀; X₂ имеют очень близкий ранг по критериям f_1 и f_2 , ранг X₃ и X₄ существенно отличаются, а ранг фактора X₁₃; X₅; X₁ и X₉ занимает промежуточное положение.

На втором этапе оптимизации методом шаговой регрессии по выбранным независимым переменным получаем уравнение в виде неполного квадратичного полинома:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i \in I} c_i X_i^2.$$

Для первого шага были выбраны следующие номера экспериментов: 5; 16; 7; 8; 25; 17; 18; 21; 23 и получено уравнение регрессии:

$$y = 5932639 - 1.35610X_8 - 2.58068X_{11} - 1.92852X_9 - 0.01676X_{11}^2 + 0.01209X_1^2 - 0.3429X_1 - 0.33029X_9^2 - 0.01427X_8^2.$$

На втором шаге было получено уравнение регрессии:

$$y = 2637999 - 0.32075X_8 - 0.15205X_3^2 + 0.2036X_9^2 - 2.01986X_{11} + 0.01026X_1^2 - 2.17968X_1^2 - 0.29946X_1.$$

На третьем шаге получено уравнение регрессии:

$$y = 5.55052 + 2.48845X_1 + 0.49458X_9^2 - 0.05717X_1^2 + 0.13942X_{11}^2 - 8.69319X_9 + 3.37818X_8 - 0.15004X_2^2 - 3.4239X_{11}.$$

Оптимальные значения переменных в нормированном виде получаются при:

$$X_1 = 15.03; \quad X_8 = 9.54; \quad X_9 = 9.24; \quad X_{11} = 10.0.$$

В натуральном виде получены следующие значения параметров технологического процесса

$$T_{оч} = 15 \text{сек}; V_{под} = 92 \text{В}; I_d = 10 \text{А}; P_{в.к.} = 9.5 \cdot 10^{-2} \text{Па}.$$

ЛИТЕРАТУРА:

1. Вакуумно-плазменные покрытия Мрочек Ж.А., Иващенко С.А., Фролов И.С., Вершина А.К. Латушкина С.Д./ Мн.: УП «Технопринт», 2004. – с. 369.
2. Дрейпер Н., Сминт Г. Прикладной регрессивный анализ. Статистики. М. 1973, с. 392: ил. – Библиогр.: с. 315-322.
- 3.

Кондел М. Дж., Стюарт А. Статистические выводы и связи. М. Наука. 1973. – 899с.: ил – Библиогр.: с. 844-877. 4. Методические указания. Методика Выбора и оптимизация контролируемых параметров в технических процессах РДМУ 190-17. М. Издательство стандартов. 1978, с. 5. 5. Меркурьев В.В., Молдавский М.А. Статистические выводы и связи. М. Наука, 1973. – 484 с.; ил. – Библиогр.: с. 48 – 475.

УДК 621.785

Ивашко В.В., Вегера И.И., Синцов С.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ ДИСКОВ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Минск, Беларусь

Введение. Развитие машиностроения связано с разработкой высокоэффективных процессов упрочнения деталей машин, претерпевающих износ, изгиб, удар и высокие контактные нагрузки. В настоящее время для этих целей применяют методы термической, лазерной, плазменной или химико-термической обработки.

Весьма перспективным для большинства деталей работающих на износ или контактную усталость следует считать поверхностную термообработку с применением высокочастотного нагрева [1-3]. Такая обработка позволяет получать на недорогих сталях поверхностно-упрочненные слои толщиной 1-10 мм, обладающие высокой твердостью и износостойкостью. Достоинствами этого метода являются высокая скорость нагрева и возможность локального упрочнения рабочих поверхностей, позволяющие резко сократить длительность цикла термообработки и снизить энергозатраты. Индукционный нагрев снижает или полностью исключает обезуглероживание и окисление, обладает достаточно высоким к.п.д, исключает загрязнение окружающей среды.

Существенным недостатком данного процесса является проблема, связанная с нагревом деталей сложной геометрической формы, так как поверхностная закалка на высокую твердость таких деталей приводит к возникновению закалочных трещин, поводок, что снижает эксплуатационные характеристики и долговечность. Непосредственной причиной образования трещин при закалке деталей из среднеуглеродистых сталей при охлаждении водой является неравномерность нагрева и охлаждения отдельных зон обрабатываемой детали. Чтобы получить равномерный закаленный слой и исключить образование трещин, необходимо разработать специальные нагревательные и спрейерные устройства оптимизировать режимы нагрева и охлаждения, обеспечивающие получение оптимальной структуры и свойств на рабочих поверхностях дисков.

Цель работы заключалась в изучении влияния режимов скоростного нагрева и охлаждения на структуру и свойства стали 45, в разработке технологических устройств для непрерывно-последовательного нагрева токами высокой частоты и спрейерного охлаждения конических рабочих поверхностей дисков (рис. 1), предназначенных для комплектования машин по переработке зерна.

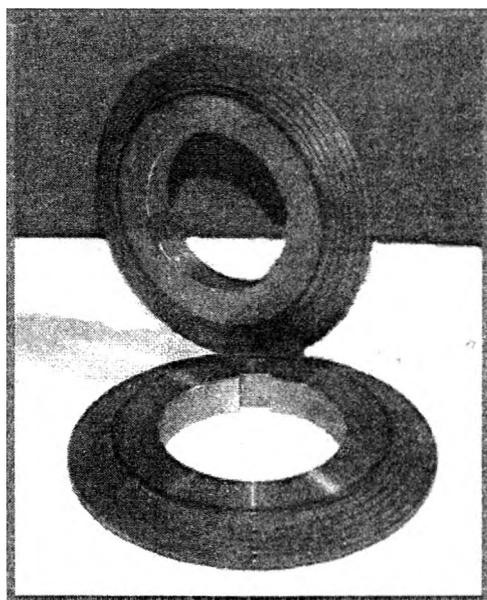


Рисунок 1 – Внешний вид диска после закалки ТВЧ.