

УДК 539.4+621.793.1

Е.К.Соловых, к.т.н.

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВАКУУМ-ПЛАЗМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО НАНЕСЕНИЮ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Кировоградский национальный технический университет, Eks_09@mail.ru

Показана целесообразность многофакторного эксперимента и многокритериальной оптимизации вакуум-плазменной технологии с учетом комплекса термомеханических свойств, а также энергоемкости и производительности.

Ключевые слова: покрытия, вакуум-плазма, энергоемкость, производительность, прочность, оптимизация.

Введение

Многочисленные разработки способов поверхностного упрочнения и многооперационных технологий, особенно по улучшению свойств покрытий, как правило, не сопровождаются оценкой их экономической эффективности и целесообразности. Поэтому в проблеме поверхностного упрочнения наименее изучен вопрос об экономических и стоимостных критериях при альтернативном подходе ко всем способам поверхностного упрочнения.

Основной причиной отсутствия методов оценки экономической эффективности альтернативных способов поверхностного упрочнения является недостаток информации о комплексе механических свойств упрочненной детали, в том числе ее износостойкости в экстремальных условиях эксплуатации, особенно при больших контактных нагрузках. Нет также методов достоверной оценки экономической эффективности применения упрочненной детали в узлах машин.

Такой оценке доступны в настоящее время только простейшие случаи – упрочненный режущий и штамповый инструмент, а также быстроизнашивающиеся сменные органы различных машин. Сдерживающим фактором является также отсутствие общих теоретических положений износа, поверхностного разупрочнения и упрочнения. Нет расчетных методов прогноза долговечности упрочненных деталей в сложных условиях эксплуатации, многие экспериментальные оценки в лабораторных условиях часто не подтверждаются натурными испытаниями.

Прямым следствием такого положения с экономическими критериями является то обстоятельство, что общие затраты на ремонт в машиностроении начали превышать затраты на новую технику. Увеличение затрат на производство машин с поверхностным упрочнением деталей многократно окупилось бы отсутствием необходимости в ремонте машин и ликвидацией простоев оборудования.

Необходимость развития ресурсосберегающих технологий должна дать толчок к развитию работ по оценке экономической эффективности поверхностного упрочнения. Основой для разработки экономических критериев является всестороннее исследование комплекса механических свойств, несущей способности и предельного состояния, достигаемых различными способами поверхностного упрочнения.

Одной из основных задач поверхностного упрочнения в условиях ограничения энергетических ресурсов является экономия затрат электроэнергии. Из тенденций увеличения числа устройств для поверхностного упрочнения, использующих электроэнергию, следует вывод о необходимости развития методов, обладающих наименьшей энергоемкостью.

Цель статьи

Поэтому цель настоящей статьи – определить и оптимизировать энергоемкость вакуум-плазменной технологии, введя этот критерий в ряд критериев оптимизации наряду с комплексом механических свойств. На примере технологии упрочнения титановых лопаток компрессора авиационного газотурбинного двигателя, оптимизирована также производительность технологического оборудования.

Результаты исследований

Оптимизацию технологического процесса осуществляли математическим моделированием

и по результатам экспериментальных исследований. Конструирование плана эксперимента проводили с помощью ППП ПРИАМ (пакет прикладных программ “Планирование, регрессия и анализ моделей”) [1, 2]. Исходя из условий эксплуатации и отказов титановых лопаток компрессора ГТД, в качестве критериев оптимизации технологического процесса нанесения вакуум-плазменных покрытий выбраны следующие критерии прочности и износостойкости:

– параметры кратковременной статической прочности и пластичности: σ_b – предел прочности, $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; σ_{-1} – предел высокочастотной выносливости при симметричном цикле; изотермическая ε_i и термоциклическая ε_m ползучесть материала с покрытием; эрозионная стойкость материала с покрытием, которая характеризуется интенсивностью изнашивания – I .

Кроме комплекса термомеханических свойств материала с покрытиями в качестве критериев оптимизации приняты энергоёмкость и производительность оборудования.

Для моделирования процесса нанесения вакуум-плазменных покрытий была определена группа факторов, которые в наибольшей степени влияют на величину критериев оптимизации, и установлены уровни их варьирования. При выборе управляемых факторов к изучению процесса подходили комплексно, учитывали влияние конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов. Поэтому в матрицу планирования, как управляемые факторы, были внесены: тип покрытия и его толщина, время ионной обработки, давление реакционного газа в технологической камере и эксплуатационная температура (табл. 1). В таблице 1 приведены также уровни варьирования переменных.

Таблица 1

Факторы и уровни их варьирования

№	Факторы	Обозначение	Уровни варьирования
1	Покрытие	X_1	TiN TiAlN TiCN
2	Толщина покрытия (м)	X_2	$2 \cdot 10^{-6} \dots 10 \cdot 10^{-6}$
3	Время ионной обработки (с)	X_3	360...1080
4	Давление реакционного газа (Па)	X_4	0,267...0,48
5	Эксплуатационная температура (К)	X_5	663...913

Эксперименты по нанесению покрытий выполнены на серийной установке типа ННВ-6,6-И1 [3]. План эксперимента в натуральных значениях (табл. 2). Всего выбрано 16 вариантов.

Энергетические затраты состоят из затрат на режим ионного травления, режим осаждения покрытия, а также энергетические затраты вакуумных насосов. В табл. 3 представлены энергетические затраты на один технологический цикл. Как видно из этой таблицы, диапазон энергетических затрат составляет от минимального уровня 9,50 кВт·час (поз. 15, табл. 3) до максимального уровня 14,87 кВт·час (поз. 8, табл. 3), т.е. различие в ~1,6 раза.

Таблица 2

План эксперимента

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	(TiAl)N	6	720	0,3735	788
2	TiN	8	540	0,4267	725,5
3	(TiC)N	4	900	0,3202	850,5
4	TiN	7	990	0,4534	819,2
5	(TiAl)N	3	630	0,3469	694,3
6	(TiAl)N	5	810	0,2936	881,8
7	(TiC)N	9	450	0,4001	756,8
8	TiN	9,5	855	0,3336	709,9
9	(TiAl)N	5,5	495	0,4401	834,9
10	TiN	3,5	1035	0,3868	772,4
11	(TiC)N	7,5	675	0,2803	897,3
12	TiN	4,5	585	0,4134	803,6
13	(TiC)N	8,5	945	0,3069	678,6
14	(TiAl)N	6,5	405	0,3602	866
15	(TiC)N	2,5	765	0,4667	741
16	TiN	6,25	653	0,3136	780

Таблица 3

Энергетические затраты вакуум-плазменной технологии

№	Тип покрытия	Ионное травление кВт·час	Осаждение покрытия кВт·час	Вакуумные насосы кВт·час	Общие затраты кВт·час
1	(TiAl)N	0,710	2,82	9,2	12,73
2	TiN	0,533	2,72	9,8	13,05
3	(TiC)N	0,888	1,36	8,6	10,84
4	TiN	0,976	2,38	9,9	13,25
5	(TiAl)N	0,621	1,41	7,9	9,93
6	(TiAl)N	0,799	2,35	8,9	12,04
7	(TiC)N	0,444	3,06	10,1	13,60
8	TiN	0,843	3,23	10,8	14,87
9	(TiAl)N	0,488	2,59	8,8	11,87
10	TiN	1,021	1,19	8,6	10,81
11	(TiC)N	0,666	2,55	9,8	13,01
12	TiN	0,577	1,53	8,5	10,60
13	(TiC)N	0,932	2,89	10,5	14,32
14	(TiAl)N	0,399	3,06	9,1	12,55
15	(TiC)N	0,754	0,85	7,9	9,50
16	TiN	0,644	2,13	9,2	11,97

Экономическая эффективность технологии определяется также производительностью оборудования, т.е. объемом продукции, вырабатываемой в единицу времени. При нанесении покрытия в вакуумную камеру серийной установки типа ННВ-6,6-И1 можно загрузить в среднем 30 компрессорных титановых лопаток АГТД. Производительность процесса будет определяться длительностью этапов нанесения покрытия, ионного травления, временем вакуумирования, загрузки и выгрузки. Время этапа нанесения покрытия определяется заданной толщиной. Длительности технологических этапов приведены в табл. 4. Как следует из табл. 4, диапазон производительности оборудования составляет от максимального уровня 0,01802 шт./сек (поз.15, табл.4) до минимального уровня 0,00701 шт./сек (поз.8, табл.4), т.е. различие в 2,5 раза.

Экспериментальные результаты обработаны ППП ПРИАМ [1, 2]. Уравнение регрессии для производительности имеет вид

$$Y = 0,0110432 - 0,0520513x_1x_5^2x_4^3 - 0,029447x_1x_5^2x_2^3.$$

Модель адекватна ($F_{\text{расч}}=27,56 > F_{\text{кр}}=1,37$ при $\alpha=0,05$), информативна (коэффициент множественной корреляции 0,946, значимый $F_{\text{расч}}=55,52 > F_{\text{кр}}=3,81$ при $\alpha=0,01$ при $\alpha=0,01$ для критерия Бокса-Веца) и устойчива (число обусловленности 2,53; коэффициенты парной корреляции регрессоров между собой равны нулю). Модель объясняет 89,52% общего рассеивания.

Анализ поверхностей функции отклика Y (производительность) позволяет провести детальный анализ влияния факторов на значение функции отклика и определить то значение факторов, которое в течение всего времени влияния осуществляют наибольший или наименьший эффект.

Таблица 4

Технологическое время обработки

№ з/п	Длительность осаждения покрытия, с	Время ионного травления, с	Общее время обработки, с	Производительность, штук/с
1	2160	720	2880	0,01042
2	2880	540	3420	0,00877
3	1440	900	2340	0,01282
4	2520	990	3510	0,00850
5	1080	630	1710	0,01754
6	1800	810	2610	0,01149
7	3240	450	3690	0,00813
8	3420	855	4275	0,00701
9	1980	495	2475	0,01212
10	1260	1035	2295	0,01307
11	2700	675	3375	0,00889
12	1620	585	2205	0,01361
13	3060	945	4005	0,00749
14	2340	405	2745	0,01093
15	900	765	1665	0,01802
16	2250	653	2903	0,01033

На рис.1 приведена поверхность отклика $Y=f(X_2, X_4)$ при фиксированных значениях X_1 и X_3 . На рис.2 – поверхность функции отклика $Y=f(X_2, X_5)$, и на рис.3 – поверхность функции отклика $Y=f(X_4, X_5)$. Все поверхности отмечаются наличием зон экстремальных значений функции отклика.

В связи с наличием в работе нескольких критериев оптимизации, для определения наилучшей точки используем функцию «многопараметрическая оптимизация» [4]. Аналогично производительности рассчитываем по данным таблицы 3 уравнение регрессии для энергоёмкости технологического оборудования. Аналогично также построены поверхности функции отклика для энергоёмкости.

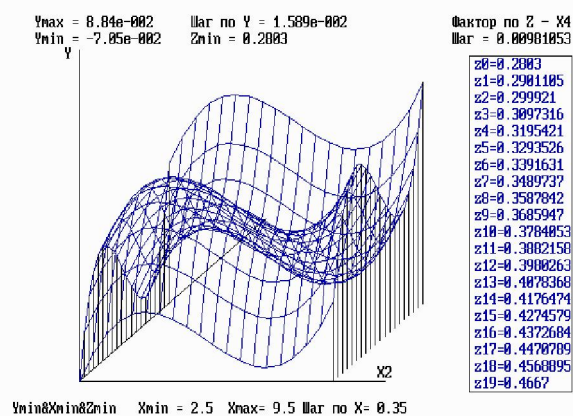


Рис.1. Поверхность функции отклика производительности в зависимости от толщины покрытия X2 и давления реакционного газа X4.

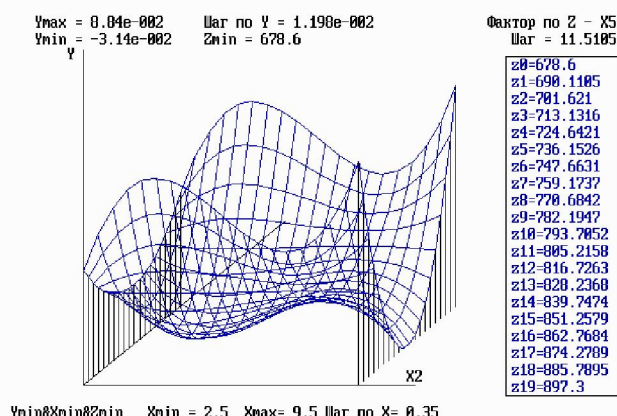


Рис.2. Поверхность функции отклика производительности в зависимости от толщины покрытия X2 и эксплуатационной температуры X5.

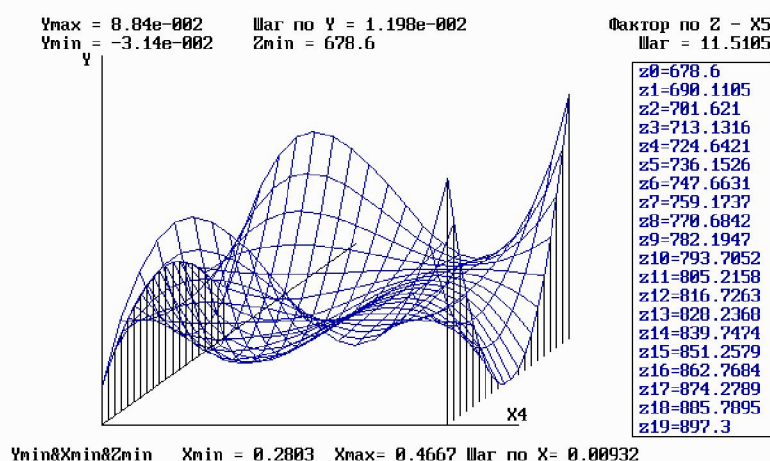


Рис.3. Поверхность функции отклика производительности в зависимости от давления реакционного газа X4 и эксплуатационной температуры X5.

Выводы

Проведение многофакторного эксперимента с учетом конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов, а также многокритериальной оптимизации с учетом комплекса механических свойств, энергоемкости и производительности оборудования позволяют управлять технологией вакуум-плазменного нанесения покрытий для достижения максимальной прочности и долговечности детали с покрытием при минимальных энергетических затратах и максимальной производительности технологического оборудования.

Список літературних джерел

1. Лапач С.Н. Пакет прикладных программ ПРИАМ / С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, Н.И. Литвинчук. – Информационный листок о научно-техническом достижении № 88–007. – К.: УкрНИИТИ, 1988. – 4 с.
2. Каталог. Программные продукты Украины. Планирование, регрессия и анализ модели ПРИАМ / НТУ КПИ; Под ред. С.Н. Лапач, С.Г. Радченко, П.Н. Бабич. – К.: СП «Текпор», 1993. – С. 24–27.
3. Пат. 26322 Україна, С23С 14/00, С23С 14/24, С23С 14/26. Установка для вакуум-плазмового напилення / Солових Є.К., Ляшенко Б.А., Антонюк В.С. та ін. Опубл. 10.09.2007, Бюл. № 14.
4. Подиновский В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.Д. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.