

О. С. ЮЛЬМЕТОВА, В. А. ВАЛЕТОВ, А. Г. ЩЕРБАК

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ШЕРОХОВАТОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Обосновывается необходимость оптимизации шероховатости поверхностей деталей приборов, влияющей на оптические характеристики роторов шаровых гироскопов с оптоэлектронной системой съема информации. Приводится алгоритм оптимизации, базирующийся на применении аппарата теории планирования эксперимента и непараметрических критериев оценки шероховатости функциональных поверхностей.

*Ключевые слова:* оптимизация, оптическая контрастность, лазерное маркирование, шероховатость, планирование эксперимента.

**Введение.** В технологии изготовления узлов гироскопических приборов важное место занимает процесс формирования функциональных поверхностей, при этом в ряде случаев рабочие характеристики полученной поверхности находятся в прямой зависимости от характера ее шероховатости. Один из возможных путей повышения качества изделий — обеспечение требуемого уровня функционального свойства поверхностей за счет оптимизации их шероховатости [1, 2].

Примером изделия, оптические (контрастность) и механические (дисбаланс) характеристики которого зависят от шероховатости его поверхности, является тонкостенный бериллиевый ротор электростатического гироскопа (ЭСГ). Ротор представляют собой сферу с доведенной до зеркального блеска наружной поверхностью, на которую методом локального электрохимического травления наносятся оптические элементы заданной контрастности, имеющие вид двух полюсных меток — двух полудисков диаметром 2,8 мм. Возможные направления работ по повышению точности электростатических гироскопов связаны, с одной стороны, с поиском более прогрессивного метода нанесения меток заданной контрастности на поверхности ротора, а с другой — с необходимостью применения эффективных технологических методов для обеспечения стабильности рабочих характеристик узлов гироскопов.

Необходимость поиска альтернативного способа нанесения оптических меток обусловлена недостаточной управляемостью применяемой в настоящее время технологии электрохимического травления, что выражается в относительно низкой воспроизводимости контраста, колеблющегося в пределах от 0,5 до 0,8 для роторов, изготовленных по единой технологии. Кроме того, возрастающая необходимость повышения точности гироскопов требует конструктивной модификации технологии нанесения меток, и для ротора ЭСГ их формирование следует осуществлять с относительной разностью контраста не менее 10 %. Однако электрохимический метод в принципе не может обеспечить стабильную разность контраста, что не позволяет повысить точностные характеристики прибора.

В настоящей статье рассматривается возможность повышения стабильности оптических характеристик ротора электростатического гироскопа путем оптимизации шероховатости функциональных поверхностей. При этом формирование оптических меток заданной контрастности 0,5 на поверхности ротора предлагается осуществлять методом лазерного маркирования, который является одним из перспективных способов нанесения меток [3]. Потребность в оптимизации шероховатости поверхностей объясняется тем, что ее измерение осуществляется до процедуры нанесения меток, после производится контроль лишь оптических и механических характеристик.

**Алгоритм оптимизации шероховатости функциональных поверхностей.** Для обеспечения процесса оптимизации был разработан алгоритм, схема которого представлена на рис. 1.

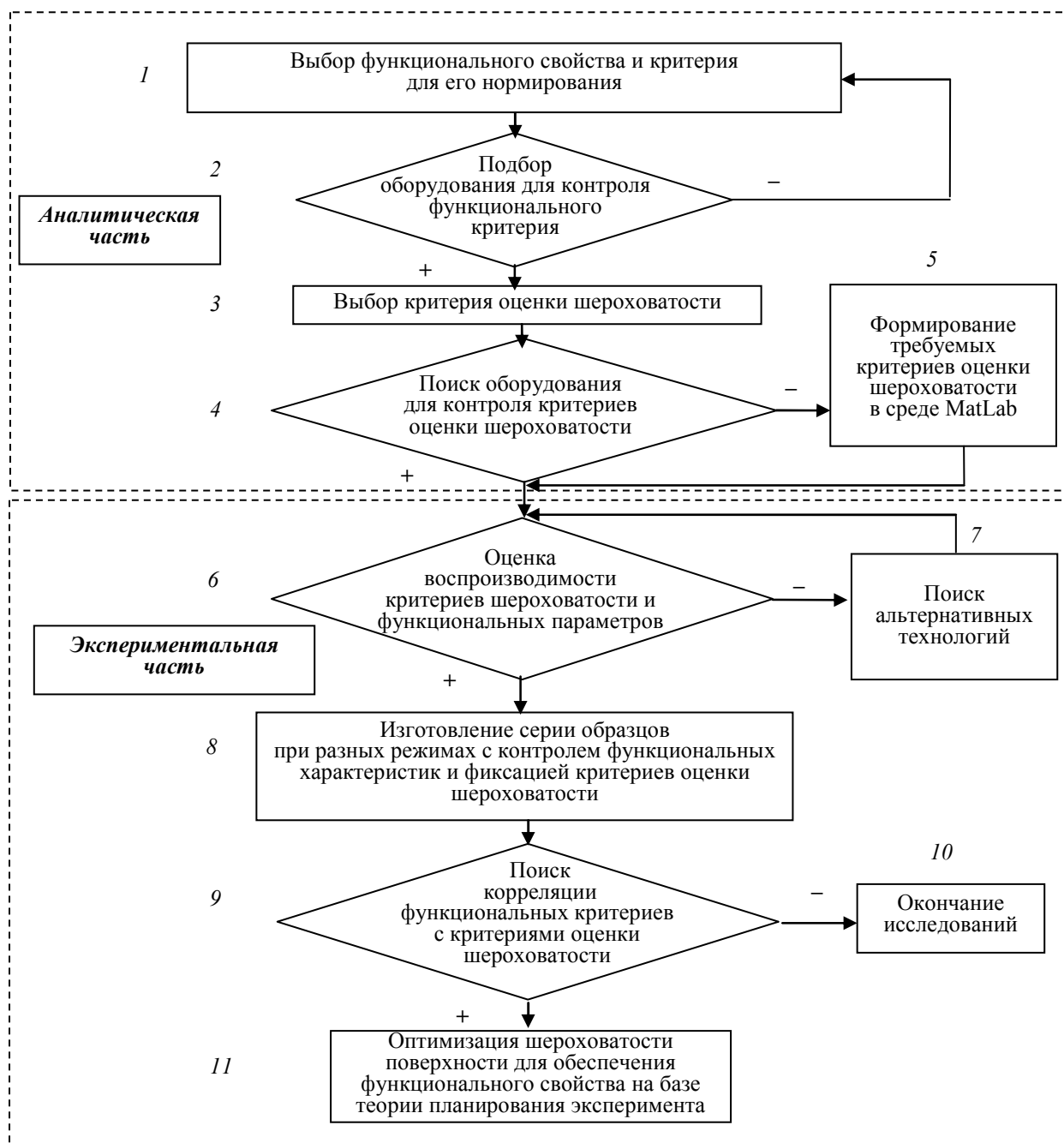


Рис. 1

Согласно алгоритму процесс оптимизации начинается с выбора функционального свойства и критерия для его нормирования. В задаче оптимизации шероховатости поверхности ротора ЭСГ оптическое свойство предложено нормировать контрастностью меток, опреде-

ляемой разностью коэффициента отражения базовой наружной поверхности бериллиевого ротора с износостойким покрытием из нитрида титана и коэффициента отражения маркированной метки. При этом коэффициенты отражения предлагается измерять с помощью микроскопа-спектрофотометра МСФУ-К, позволяющего строить зависимости коэффициентов от длины световой волны в диапазоне от 350 до 900 нм.

Следующий шаг алгоритма связан с выбором критерия оценки шероховатости. Шероховатость поверхности метки существенно влияет не только на контрастность, но и на дисбаланс ротора, поэтому необходимо создать метку с уровнем контрастности 0,5 на длине волны 860 нм при минимальном изменении шероховатости поверхности ротора в зоне нанесения метки. Иными словами, контрастность — это параметр оптимизации, а шероховатость является ограничительным фактором.

Шероховатость поверхности ротора перед операцией по нанесению метки составляет сотые доли микрометра по параметру  $R_q$  (среднеквадратическое отклонение профиля поверхности). При формировании метки методом лазерного маркирования ее шероховатость колеблется в пределах от сотых долей до одной десятой микрометра. Параметрический способ описания слабо чувствителен к изменениям шероховатости прецизионных поверхностей, происходящим после их обработки. Следовательно, параметр  $R_q$  не отражает реального изменения микрогеометрии метки, полученной лазерным маркированием. Более точным способом описания профиля обработанных прецизионных поверхностей является плотность распределения тангенсов углов наклона профиля. Современные приборы, предназначенные для оценки шероховатости, например измерительная станция Hommel Tester T8000, позволяют фиксировать координаты профиля поверхности и сохранять их в виде набора дискретных точек. Дальнейшая обработка координат и определение эмпирических плотностей распределения тангенсов углов наклона профилей производится в среде программирования MatLab. Последовательность этих действий отражена в блоках 3, 4 и 5 схемы алгоритма (см. рис. 1). Блоки 6—9 отражают действия по оценке воспроизводимости предлагаемой технологии и ее соответствия техническим условиям. Заключительным шагом алгоритма (блок 11) является проведение оптимизации шероховатости поверхности с применением теории планирования эксперимента.

**Теория планирования эксперимента.** Эксперимент является основным этапом процесса оптимизации шероховатости функциональных поверхностей. Оптимизировать влияние шероховатости на функциональное свойство предлагается путем поиска оптимума функционального критерия при варьировании технологических режимов обработки. В связи с этим важной задачей является процедура организации экспериментов для исключения хаотичных опытов и повышения эффективности исследований.

В качестве инструмента оптимизации шероховатости поверхностей был использован метод Бокса — Уилсона [4]. Оптимизация по этому методу включает следующие основные этапы:

- выбор параметра оптимизации;
- определение факторов технологического процесса и границ их варьирования;
- построение плана эксперимента или матрицы планирования;
- осуществление экспериментов согласно плану;
- проведение статистического анализа;
- построение уравнения регрессии;
- оценка адекватности полученной математической модели результатам реальных экспериментов.

Параметром оптимизации, как отмечено ранее, является контрастность меток. Факторами процесса маркирования меток с требуемым уровнем контрастности выступают режимы лазерного маркирования — мощность излучения, скорость перемещения сканирующего устройства и плотность линий (число линий, пройденных лазером на 1 мм поверхности).

В табл. 1 приведены основные факторы и диапазоны их варьирования, выбранные исходя из технических возможностей лазерного оборудования (минимаркер М10), а также результатов предварительных экспериментов [3].

Таблица 1

Фактор	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровень факторов		
			нижний (-1)	базовый (0)	верхний (+1)
Мощность $P$ , Вт	$X_1$	$\pm 0,2$	1,8	2	2,2
Плотность линий $N$ , лин/мм	$X_2$	$\pm 200$	300	500	700
Скорость $V$ , мм/с	$X_3$	$\pm 20$	30	50	70

Матрица планирования полнофакторного эксперимента  $2^k$ , где  $k$  — число варьируемых факторов, представляющая собой все возможные комбинации уровней факторов, приведена в табл. 2. Число экспериментов составляет  $2^3$ , при этом каждый эксперимент был проведен 2 раза. Фактор  $X_0$  введен в табл. 2 в целях получения свободного члена в уравнении регрессии.

Таблица 2

Номер эксперимента	Значения факторов, в кодовых обозначениях				Комбинация произведений факторов, в кодовых обозначениях				Значение параметра оптимизации $Y$
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$	$X_1X_2X_3$	
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0,03
									0,06
2	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	0,06
									0,04
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	0,88
									0,87
4	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	0,055
									0,056
5	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	0,74
									0,68
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	0,15
									0,12
7	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	0,96
									0,96
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,75
									0,76

На основе матрицы планирования (см. табл. 2) был осуществлен расчет коэффициентов уравнения регрессии, связывающего параметр оптимизации с режимами лазерного маркирования. Пренебрегая коэффициентами, вклад которых в оценку  $Y$  незначителен, получаем уравнение регрессии следующего вида:

$$Y = 0,448 + 0,192X_1 + 0,213X_2 - 0,199X_3 - 0,056X_2X_3 + 0,149X_1X_2X_3$$

или для выражения контраста:

$$K = 0,448 + 0,192P + 0,213N - 0,199V - 0,056NV + 0,149PNV.$$

Проверка корректности модели по критерию Фишера (F-критерию), показала, что рассчитанное значение F-критерия (0,014) не превышает табличного (0,6), поэтому с соответствующей доверительной вероятностью модель можно считать корректной.

Анализ приведенных выражений показывает, что по степени влияния на контраст оптических меток, полученных на поверхности с покрытием из нитрида титана, факторы могут быть распределены следующим образом: плотность линий  $N$ , скорость  $V$  и мощность излучения  $P$ . При этом коэффициенты уравнения регрессии при мощности (0,192) и скорости (-0,199) близки по абсолютному значению, поэтому влияние этих факторов на контрастность одинаково существенно. Также важны комбинация двух факторов — плотности линий и скорости перемещения сканирующего устройства — и взаимовлияние всех трех факторов.

Знак коэффициентов в уравнении регрессии при варьируемых факторах (мощности  $P$ , скорости  $V$  и плотности линий  $N$ ) определяет характер влияния каждого из них на оптимизируемый параметр: „+“ означает, что увеличение данного фактора приводит к возрастанию оптимизируемого параметра, а знак „-“ — к уменьшению параметра оптимизации. При мощности  $P$  и плотности линий  $N$  коэффициенты положительные, а при скорости сканирования  $V$  коэффициент отрицательный, что полностью согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе [3].

Таким образом, в результате проведения оптимизации были получены:

1) математическая модель, описывающая процесс создания метки методом лазерного маркирования на доведенной поверхности с покрытием из нитрида титана и позволяющая прогнозировать уровень контрастности при варьировании факторов;

2) технологические режимы —  $P=2$  Вт,  $N=500$  лин/мм и  $V=50$  мм/с — для создания метки с требуемым уровнем контрастности при минимальном отклонении шероховатости для поверхности с покрытием из нитрида титана; на рис. 2 представлено изображение метки, полученное с помощью микроскопа при 10-кратном увеличении;

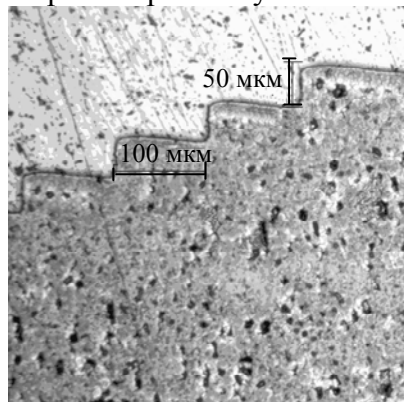


Рис. 2

3) оптимальная шероховатость поверхности, контроль которой предлагается осуществлять на основе определения плотности распределения тангенсов углов наклона профиля ( $\alpha$ ); на рис. 3 представлен график оптимальной плотности распределения тангенсов наклона ( $H$ ) для базовой доведенной поверхности с покрытием из нитрида титана (кривая 1) и поверхности маркированной метки, формирование которой осуществлялось при оптимальных режимах (кривая 2).

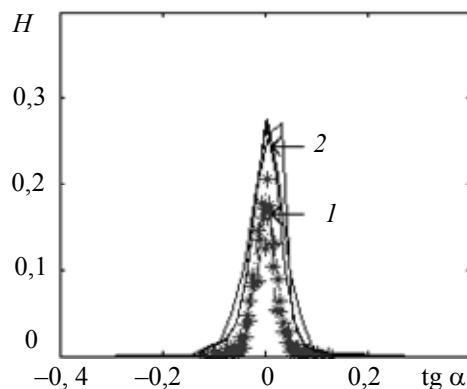


Рис. 3

**Заключение.** С использованием аппарата теории планирования эксперимента и непараметрических критериев оценки шероховатости функциональных поверхностей проведена оптимизация шероховатости, позволяющая обеспечить контрастность полюсных меток, формируемых методом лазерного маркирования на доведенной поверхности ротора электростатического гироскопа, а также стабильность оптических характеристик гиروزла.

Получена математическая модель оценивания уровня контрастности для выбранных режимов технологии лазерного маркирования.

Предложена прогрессивная технология формирования метки (метод лазерного маркирования), обеспечивающая возможность получения заданной величины относительной разности контраста полюсных меток, что позволяет повысить точность съема информации.

Статья подготовлена по результатам работ, выполненных при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 10-08-00158а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мусалимов В. М., Валетов В. А. Динамика фрикционного взаимодействия. СПб: Ин-т машиностроения, 2006. 168 с.
2. Юльметова О. С., Сисюков А. Н., Юльметова Р. Р. Создание базы данных непараметрических критериев оценки микрогеометрии функциональных поверхностей // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 8. С. 15—19.
3. Юльметова О. С., Щербак А. Г. Исследование процесса формирования светоконтрастного растра посредством лазерного маркирования // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. № 05(69). С. 28—34.
4. Валетов В. А., Васильков С. Д., Сисюков А. Н., Юльметова О. С. Методика исследования характеристик поверхностного слоя деталей приборов: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.

#### Сведения об авторах

- Ольга Сергеевна Юльметова** — ОАО Концерн «ЦНИИ “Электроприбор”», Санкт-Петербург; ст. науч. сотрудник; E-mail: www.ralli@rambler.ru; E-mail: olga@yulmetova.ru
- Вячеслав Алексеевич Валетов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения; E-mail: valetov.v@mail.ru
- Александр Григорьевич Щербак** — д-р техн. наук; ОАО Концерн «ЦНИИ “Электроприбор”», Санкт-Петербург; вед. науч. сотрудник; E-mail: a\_sch@gtm.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения  
СПб НИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
25.04.11 г.