

С. А. ЯКОВЛЕВА, А. Г. ЩЕРБАК, С. Н. БЕЛЯЕВ

## МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ГАЗОВОГО ПОДШИПНИКА

Представлены результаты исследования особенностей формообразования аэродинамического профиля газового подшипника с использованием лазерной обработки и ионного травления. Рассматривается разработанная технология создания аэродинамического профиля переменной глубины на полусферической детали.

**Ключевые слова:** газовый подшипник, аэродинамический профиль, лазерная обработка, ионное травление.

В современных изделиях точного приборостроения в качестве опорных элементов широко применяются различные конструкции подшипникового узла на газовой смазке. Так, например, в поплавковом гироскопе для взвешивания главной оси ротора гироскопа используется газодинамический полусферический обращенный подшипник катушечного типа с нагнетанием смазки к полюсу. На рис. 1, а показаны элементы конструкции поплавкового гироскопа, где 1 — корпус, 2 — поплавковая камера, 3 — игольчатые подшипники, 4 — жидкость, 5 — неподвижные опоры газового подшипника, 6 — ротор, 7 — вращающиеся фланцы подшипника [1]. Несущая способность подшипника создается за счет аэродинамического профиля, выполняемого в виде спиральных канавок на неподвижной опоре (рис. 1, б). Оси канавок — сферические винтовые линии, глубина канавок составляет 3...6 мкм, а шероховатость поверхности Ra 0,16 мкм (рис. 1, в). Материал опоры и фланца — прецизионный сплав 40ХНЮ-ВИ (Cr~40%, Al~3,5%, Ni — ост.).

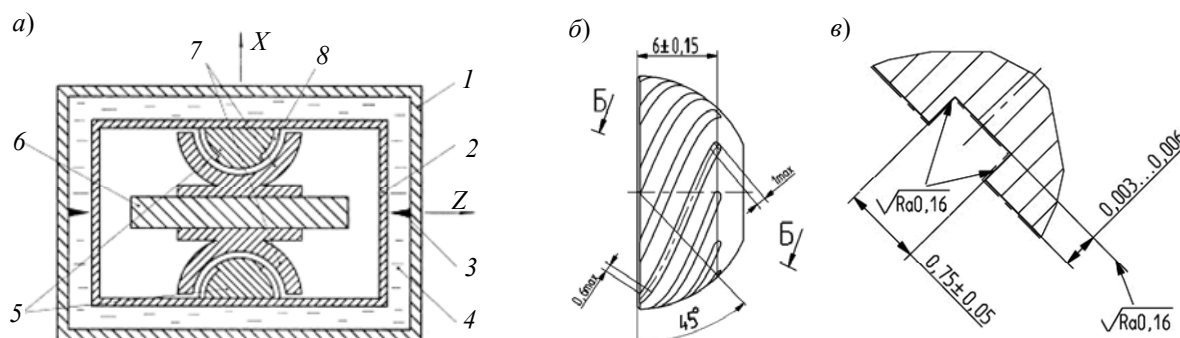


Рис. 1

К деталям газового подшипника поплавкового гироскопа предъявляются высокие требования по геометрической точности и ее сохранению в течение длительного периода эксплуатации. Допустимое отклонение от круглости рабочей сферической поверхности детали составляет 0,4 мкм. При этом точность гироскопа и стабильность его технических характеристик

во многом зависят от параметров газовых подшипников: стабильности геометрии и качества рабочих поверхностей деталей подвеса, включая параметры аэродинамического профиля [2].

Важной операцией в технологии изготовления прецизионного газового подшипника является формообразование аэродинамического профиля на деталях подвеса. Основные параметры профиля, такие как форма, угол наклона, глубина и ширина микроканалов, непосредственно влияющие на несущую способность узла, зависят только от технологии формообразования.

В настоящее время формообразование аэродинамического профиля на деталях газового подшипника поплавок-гироскопа осуществляется методом механической обработки — притиркой с алмазной пастой (шлифовально-доводочный метод). Этот метод имеет недостатки, связанные с неравномерностью получаемой геометрии, низкой воспроизводимостью результатов, невысокой точностью и чистотой ( $Ra\ 0,16—0,75\ \mu\text{м}$ ) выполнения канавок. Кроме того, шлифовально-доводочный метод формообразования вносит значительные напряжения при обработке, что обуславливает формирование явно выраженного неосесимметричного поля распределения остаточных напряжений, которые на последующей операции нанесения покрытия, сопровождаемой отжигом при  $350\ ^\circ\text{C}$ , вследствие процессов релаксации могут приводить к искажению формы детали. Из-за этого отклонение от круглости сферической поверхности деталей может выходить за допустимые пределы. Для сохранения точности прецизионных деталей газового подшипника на уровне  $0,3—0,4\ \mu\text{м}$  в технологии их изготовления необходимо применять операции формообразования, обеспечивающие минимальные механические воздействия и осесимметричную эпюру внутренних напряжений детали.

В настоящей статье представлены результаты исследования и разработки прогрессивных технологических методов немеханического формообразования аэродинамического профиля газового подшипника, а именно электрофизических методов, использующих потоки высокоэнергетических частиц (так называемые „пучковые технологии“), — светолучевой (лазерной) обработки и ионно-вакуумной обработки. При этом были решены следующие задачи:

- выявление особенностей технологий ионного распыления поверхности (травления) и лазерной обработки при формообразовании на плоскости заданного профиля;
- сравнительный анализ результатов формообразования и выбор более эффективного метода для обеспечения аэродинамического профиля;
- разработка технологии формообразования профиля на полусферической детали.

Рассмотрим особенности этих методов немеханического формообразования.

*Лазерная обработка.* Принцип лазерной обработки заключается в воздействии сфокусированного луча лазера на поверхность обрабатываемого изделия. Результатом этого воздействия является изменение структуры материала, его расплавление, испарение поверхностных слоев материала. Преобладание того или иного эффекта воздействия зависит от вида материала, типа лазера и режимов обработки [3].

В ходе исследований для лазерной обработки применялся „Минимаркер 20 Вт“ с диаметром лазерного пятна  $50\ \mu\text{м}$  и длительностью импульса  $\tau=100\ \text{нс}$ . Для формирования на плоскости заданного прямоугольного профиля с шероховатостью  $Ra\ 0,16\ \mu\text{м}$  (см. рис. 1, в) необходимы следующие этапы лазерной обработки:

- получение профиля заданной глубины;
- полировка поверхности для обеспечения заданной чистоты.

При этом целесообразно формировать глубину профиля при более щадящих режимах обработки в целях сокращения количества полировочных проходов, так как уменьшение толщины слоя материала, испаряемого под воздействием одного импульса, позволяет достичь меньшей шероховатости [3].

Экспериментально определен многопроходный режим наиболее щадящей обработки для формирования глубины ( $h$ ) канавки: 5 проходов при мощности лазерного излучения  $P=6$  Вт, частоте следования импульсов  $f=90$  кГц, длительности импульса  $\tau=100$  нс, скорости сканирования  $v=900$  мм/с, линейатуре  $l=200$  линий/мм (рис. 2, а). Для уменьшения шероховатости выполнялась дополнительная полировка: 5 проходов при  $P=2$  Вт и указанных выше параметрах и затем 5 проходов при  $P=2$  Вт и  $\tau=4$  нс (остальные параметры те же), что обеспечивает шероховатость  $Ra$  0,33 мкм (рис. 2, б). Однако даже щадящие режимы лазерного воздействия, изменяющие только шероховатость поверхности, приводят к образованию наплывов на краях контуров канавки, которые связаны с процессами истечения и перераспределения жидкой фазы (рис. 2, в: 10 проходов при  $P=4$  Вт,  $f=90$  кГц,  $\tau=100$  нс,  $v=900$  мм/с,  $l=200$  линий/мм). После формирования профиля требуется дополнительная доводка поверхности для снятия наплывов по краям, поэтому в данном случае метод профилирования с использованием лазерной обработки не может быть финишной операцией.

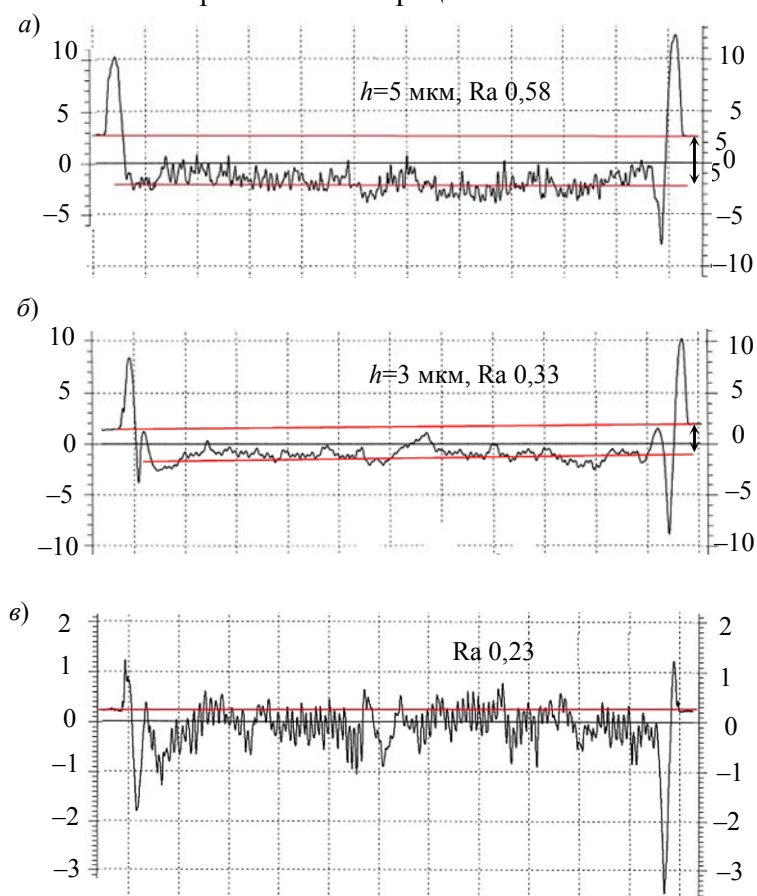


Рис. 2

*Ионно-вакуумная обработка.* Распыление атомов материала ионами инертного газа имеет следующие преимущества: получение высокой чистоты и точности формы канавок, почти полное отсутствие остаточных напряжений после обработки [4].

Для ионно-вакуумной обработки применялся источник ионов ИИ-4-0,15, имеющий следующие постоянные параметры — ионный ток  $I=0,15$  А и ускоряющее напряжение  $U=4$  кВ. Варьируемыми параметрами обработки являются: давление  $p$  рабочего газа (аргона), расстояние  $L$  между ионным источником и обрабатываемой поверхностью и угол падения  $q$  ионного потока, отсчитываемый от нормали к поверхности.

Ионное травление образца при  $p=1,4 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.,  $L=90$  мм,  $q=0$  в течение 2 ч позволило сформировать профиль глубиной 1 мкм с шероховатостью  $Ra$  0,12 мкм (рис. 3, а), в течение 3 ч — глубиной 1,5 мкм с  $Ra$  0,12 мкм (рис. 3, б). Шероховатость базовой поверхности

составляла Ra 0,14 мкм. При этом видно, что технология ионного травления обеспечивает шероховатость обработанной поверхности Ra 0,12 мкм и профиль без каких-либо краевых эффектов.

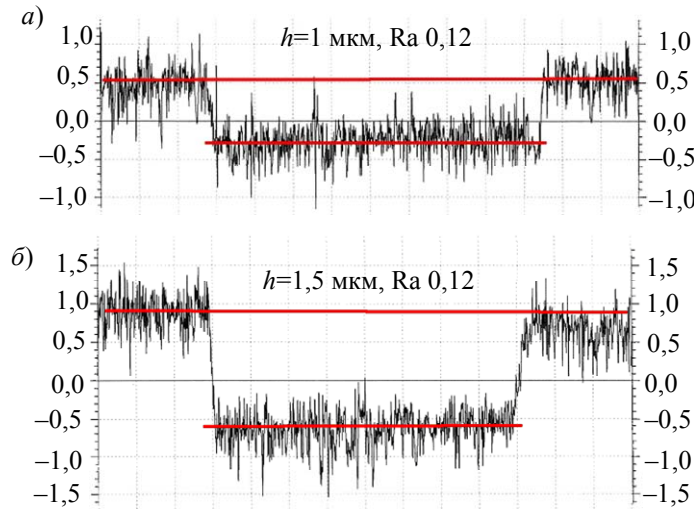


Рис. 3

Результаты формообразования прямоугольного профиля на плоскости позволяют сравнить оба метода и выбрать наиболее эффективный для создания аэродинамического профиля на полусферической поверхности. Критерии сравнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии сравнения	Ионное травление	Лазерная обработка
Необходимость маски	Да	Нет
Точность получаемого профиля	Зависит от точности маски	Зависит от диаметра луча
Краевые эффекты	Нет	Да
Структура материала профиля	Без изменений	Микрооплавления
Возможность реализации на сфере	Да	Необходимо управление фокусировкой луча
Возможность применения в качестве финишной операции	Да	Необходима финишная доводка поверхности

Сравнительный анализ показал, что технология ионного травления более эффективна. Поэтому эта технология выбрана для дальнейшей реализации на полусферической поверхности.

Для формирования канавок заданной глубины необходимо выявить зависимость скорости травления от варьруемых параметров процесса.

Скорость ионного травления для чистых металлов при падении ионов по нормали рассчитывается следующим образом [5]:

$$v = \frac{h}{t} = \frac{M}{eN_A \rho} S j, \quad (1)$$

где  $t$  — время травления;  $M$  — молярная масса распыляемого материала, г/моль;  $e$  — заряд электрона, Кл;  $N_A$  — число Авогадро;  $\rho$  — плотность материала, г/см<sup>3</sup>;  $S$  — коэффициент распыления материала, атом/ион;  $j$  — плотность ионного тока в сечении, перпендикулярном направлению падения ионов, А/см<sup>2</sup>.

В рассматриваемом случае  $j = 0,01$  А/см<sup>2</sup>, коэффициенты распыления  $S_{Ni}=2,00$  атом/ион,  $S_{Cr}=2,23$  атом/ион,  $S_{Al}=1,75$  атом/ион [5]. Рассчитанные теоретические скорости травления чистых металлов:  $v_{Ni}=49,5$  мкм/ч,  $v_{Cr}=41,2$  мкм/ч,  $v_{Al}=65,6$  мкм/ч. Экспериментальная скорость травления сплава 40ХНЮ-ВИ составляет 0,5 мкм/ч, что значительно ниже теоретических скоростей травления для чистых металлов, причем подобное явление наблюдается и для других сплавов, например пермаллоя 79НМ [5].

Для практического применения зависимость (1) необходимо дополнить эмпирическими коэффициентами, учитывающими сложный состав сплава ( $K_{\text{сп}}$ ), влияние давления газа ( $K(p)$ ) и расстояния между ионным источником и поверхностью ( $K(L)$ ). При травлении полусферической поверхности очевидным является изменение угла падения ионного потока на поверхность (рис. 4), а следовательно, и изменение скорости травления, поэтому необходимо учесть коэффициент  $K(q)$ , равный единице при падении ионного потока по нормали. Таким образом,

$$v = \frac{h}{t} = \frac{M}{eN_A \rho} S_{\text{Ni}} j K_{\text{сп}} K(L) K(p) K(q), \quad (2)$$

где  $K_{\text{сп}} K(L) K(p) = 0,014$  при  $L = 81,5$  мм,  $p = 1,4 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.

Для реализации на полусферической детали полного аэродинамического профиля, состоящего из 10 спиральных канавок, была разработана специальная маска, имеющая соответствующие заданному профилю сквозные пазы (рис. 5, а). Для обеспечения равномерности травления детали сообщается вращение вокруг своей оси. Полученная опора показана на рис. 5, б (при  $t = 8,5$  ч,  $L = 41,5$  мм и  $p = 1,4 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.), а переменный профиль канавки, снятый у полюса ( $q = 0$ ), под углом  $q = 10^\circ$  и у экватора ( $q = 30^\circ$ ), — на рис. 6, а—в соответственно. Изменение глубины канавок и скорости травления в зависимости от угла падения ионного потока показано в табл. 2.

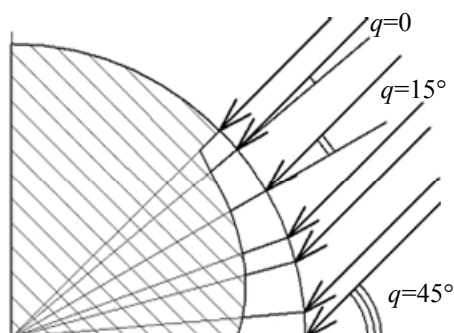


Рис. 4

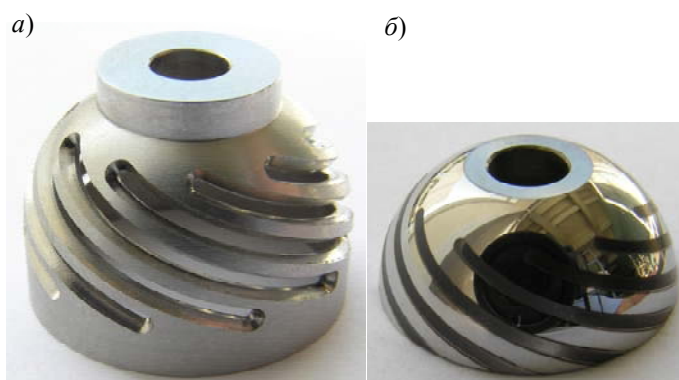


Рис. 5

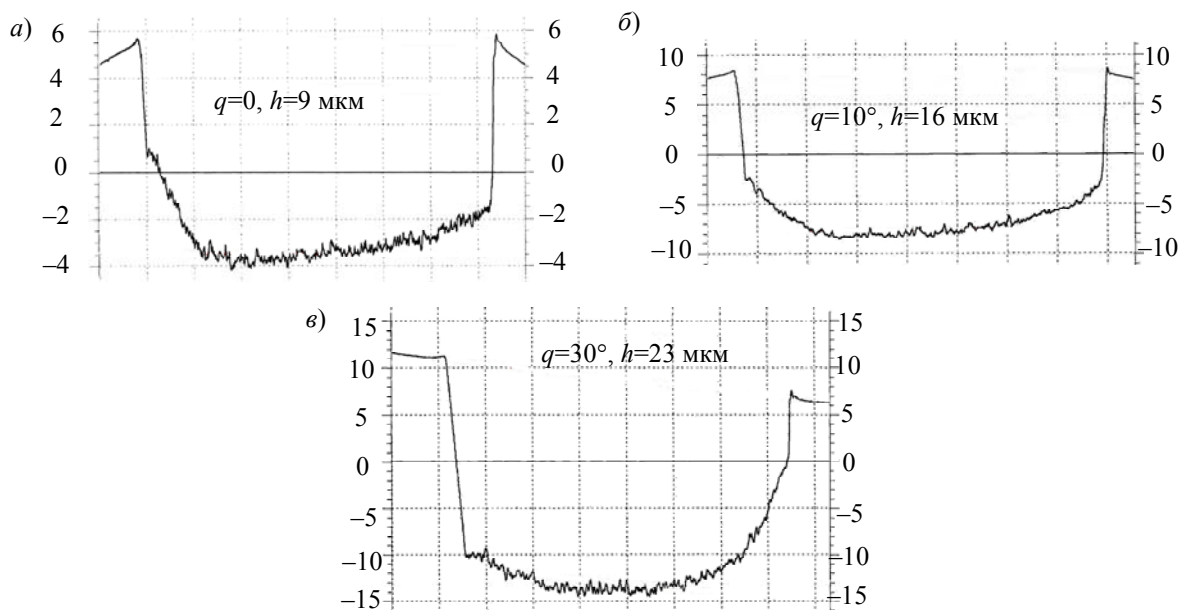


Рис. 6

Таблица 2

$q, \dots^\circ$	$h, \text{мкм}$	$v, \text{мкм/ч}$
0	9	1,05
5	12	1,41
10	16	1,88
20	19	2,26
30	23	2,71

Как видно из табл. 2, скорость травления увеличивается с увеличением угла падения ионного потока, и, ориентируя сферическую поверхность согласно рис. 4, получаем профиль с уменьшением глубины канавки в 2,5 раза от экватора к полюсу. Таким образом, технология ионного травления позволяет получать для сферической поверхности профиль переменной глубины, являющийся, по законам газовой динамики, оптимальным, в отличие от профиля, имеющего постоянную глубину [1], и который невозможно было реализовать с использованием существующих технологий. Полученный переменный профиль позволяет существенно повысить характеристики газовых подшипников.

Экспериментальная оценка влияния ионного травления на прецизионную форму детали показала, что после выполнения профиля отклонение от круглости сферической поверхности сохраняется на уровне 0,3—0,4 мкм. Кроме того, обеспечивая практически одновременное формирование всего профиля, ионное травление позволяет снизить уровень остаточных напряжений и сохранить осесимметричную эпюру их распределения в готовой детали в отличие от существующей технологии механической шлифовки-доводки, что весьма важно для сохранения полученной высокой точности с течением времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сипенков И. Е., Филиппов А. Ю., Болдырев Ю. Я., Григорьев Б. С., Заблоцкий Н. Д., Лучин Г. А., Панич Т. В. Прецизионные газовые подшипники. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2007.
2. Филиппов А. Ю. О влиянии величины смазочного зазора на качество гироскопов с неконтактным сферическим газодинамическим подшипником // Гироскопия и навигация. 1995. № 3 (10). С. 18—23.
3. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюрлов А. И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
4. Григоров А. И., Семенов А. П. Обработка газовых подшипников с применением ионного распыления. М.: Наука, 1976.
5. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Ионное травление микроструктур. М.: Сов. радио, 1979.

## Сведения об авторах

- Светлана Анатольевна Яковлева** — аспирант; ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург; E-mail: yorkunoi@gmail.com
- Александр Григорьевич Щербак** — д-р техн. наук; ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург; начальник сектора; E-mail: a\_sch@gtn.ru
- Сергей Николаевич Беляев** — канд. техн. наук; ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург; ст. науч. сотрудник; E-mail: serenible@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
технологии приборостроения  
СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
28.05.12 г.